

**НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ**

УДК 629.782

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПРОЕКТУВАННІ ІНЕРЦІАЛЬНИХ ДАТЧИКІВ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ І НАВІГАЦІЇ***Мироненко П. С., Мураховський С. А., Скідченко О. А.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: [mironenkops46@gmail.com](mailto:mironenkops46@gmail.com)*

**Вступ.** У роботі розглянуті методи підвищення точності та розширення функціональних можливостей приладів систем орієнтації і навігації (СОН), що використовуються при їх проектуванні з застосуванням сучасних інформаційних технологій. Забезпечення отримання достовірної інформації при її первинному перетворюванні в умовах збільшення керованих рухомих об'єктів стимулює пошук нових рішень. Відомий підхід – введення в вимірювальну систему надлишкових компонентів і зв'язків, що забезпечують її додатковою корисною інформацією (див., наприклад, [1]-[4]). Отже, відбувається розширення математичної моделі вимірювача доповненням основного рівняння перетворення вимірювальної величини одним або декількома додатковими.

**Основна частина.** У роботі представлені та описані загальна структура сучасних інерціальних вимірювачів СОН, її складові частини та програмно-апаратні засоби, що використовуються при їх проектуванні. Показано функціональну взаємодію елементів таких засобів між собою, що сприяє підвищенню ефективності проектування вимірювачів. Усе це реалізується в конкретних системних функціях, які активізуються залежно від умов експлуатації приладу. Досвід останнього десятиліття в розв'язанні багатьох практичних задач і створення сотень практично діючих систем показав, що саме інформаційні технології, які базуються на використанні додаткової вимірювальної інформації, є ефективним конструктивним і економічно виправданим методом послаблення дії певних негативних впливових факторів та покращення функціональних характеристик вимірювачів СОН.

**Висновки.** Впровадження інформаційних технологій дозволяють орієнтуватися на розробку ефективних методів програмно-апаратних засобів підтримки проектування таких датчиків СОН, які дозволяють оперативно, в реальному масштабі часу, оцінити не тільки поточний стан рухомого об'єкта, його основні характеристики, а також, за необхідності, використати додаткові вимірювальні параметри та спеціалізовані бази даних, знань та прецедентів, щоб врахувати дію дестабілізуючих факторів, які інколи обумовлюють різні за своєю природою, але тісно взаємодіючі один з одним, процеси.

**Ключові слова:** інерціальні датчики; проектування; інформаційні технології; інформаційна база знань; надлишковість.

**Вступ**

Успішне розв'язання задач керування рухомими об'єктами в багатьох випадках визначається рівнем розвитку вимірювальної техніки. Проблема достеменності вимірювальної інформації, що використовується в системах орієнтації і навігації, з року в рік загострюється у зв'язку зі збільшенням кількості керованих рухомих об'єктів. Значна кількість порушень у роботі приладів вимірювання параметрів руху пов'язана з використанням результатів вимірювань, які виходять за межі допустимої точності. В інформаційно-керуючих системах орієнтації і навігації зазвичай використовуються конструктивно та функціонально завершені датчики вимірювання фізичних параметрів руху об'єктів із різними цифровими інтерфейсами. До них, у першу чергу, відносяться датчики лінійних і кутових швидкостей та прискорень. Безперервно

збільшується їх точність і швидкодія. Більш інтенсивними стають потоки інформації, які поступають від датчиків в системи керування.

Подальший розвиток подібних систем неможливий без використання та удосконалення додаткових вимірювачів, які спроможні легко включатись в системи збору даних. Проникнення мікропроцесорних систем керування у все менш габаритні об'єкти ставить задачі підвищених вимог до них за характеристиками маси, габаритів, надійності роботи. Стрімко розвиваються датчики на основі мікроелектроніки систем (МЕМС). У той же час, існує і безперервно зростає необхідність у датчиках фізичних величин, які мають підвищену точність або стійкість до дії зовнішніх збурюючих факторів, поки що недоступних для МЕМС. Для реалізації таких датчиків і виконання сучасних вимог до систем такого типу необхідною є сучасна

елементна база. У відомих роботах такі вимірювачі представляють собою датчики з інтегрованою електронікою, мікропроцесором, цифровим сигнальним процесором тощо [5]. Розвиток сучасних систем орієнтації, навігації та керування рухом у просторі відбувається в умовах підвищення вимог до ефективності виконання ними основних цільових задач – забезпечення достовірною інформацією про параметри орієнтації і навігації рухомих об’єктів. Водночас, підвищуються вимоги до рівня надійності та терміну функціонування, при жорстких обмеженнях характеристик енергоефективності.

Сучасні розробки систем керування перспективними динамічними об’єктами вимагають вивчення нових підходів до їх проектування, створення нової елементної бази, використання нових інформаційних технологій. Незважаючи на суттєві досягнення в області проектування датчиків систем орієнтації і навігації, забезпечення виконання часто виникаючих суперечливих вимог залишається складною задачею наукових і технічних досліджень. Тому якісне розв’язання задач проектування датчиків СОН вимагає вивчення та впровадження нових підходів у проектуванні, створення спеціального інформаційно-програмного оточення, що забезпечить адаптацію приладів до змінних внутрішніх і зовнішніх умов використання, діагностики, аналіз і синтез окремих складових системи та ефективне об’єднання аналітичної та інформаційної систем.

Мета роботи – виявлення сучасних методів і перспективних рішень у проектуванні інерціаль-

них датчиків систем орієнтації та навігації нового покоління, включаючи методи, пов’язані з використанням додаткової вимірювальної інформації. Таке дослідження дозволить пришвидшити пошук раціональних конструктивних рішень, а також розширити інструментальні засоби проектування для створення новітніх інформаційних технологій розробки сучасних вимірювачів СОН.

**Структурна модель сучасних датчиків СОН**

Датчик системи орієнтації і навігації – це складний вимірювальний комплекс, який поєднує конструктивний, програмний, метрологічний, інформаційний та інші аспекти. Для розв’язування задач вимірювання параметрів руху об’єктів розроблені різні вимірювальні прилади та системи здебільшого є достатньо складними. Такі вимірювальні перетворювачі зберігають, при зміні власних параметрів і характеристик зовнішнього середовища, здатність ефективно вирішувати свої задачі.

У загальному випадку, сучасний датчик СОН можна представити у вигляді багатоваріантної блочної структури, основними елементами якої є вимірювальний перетворювач (рис. 1), блок розширення інформаційних ресурсів, базова аналітична платформа, блок обробки і розрахунку сигналів та блок відтворення одиниці вимірювального сигналу.

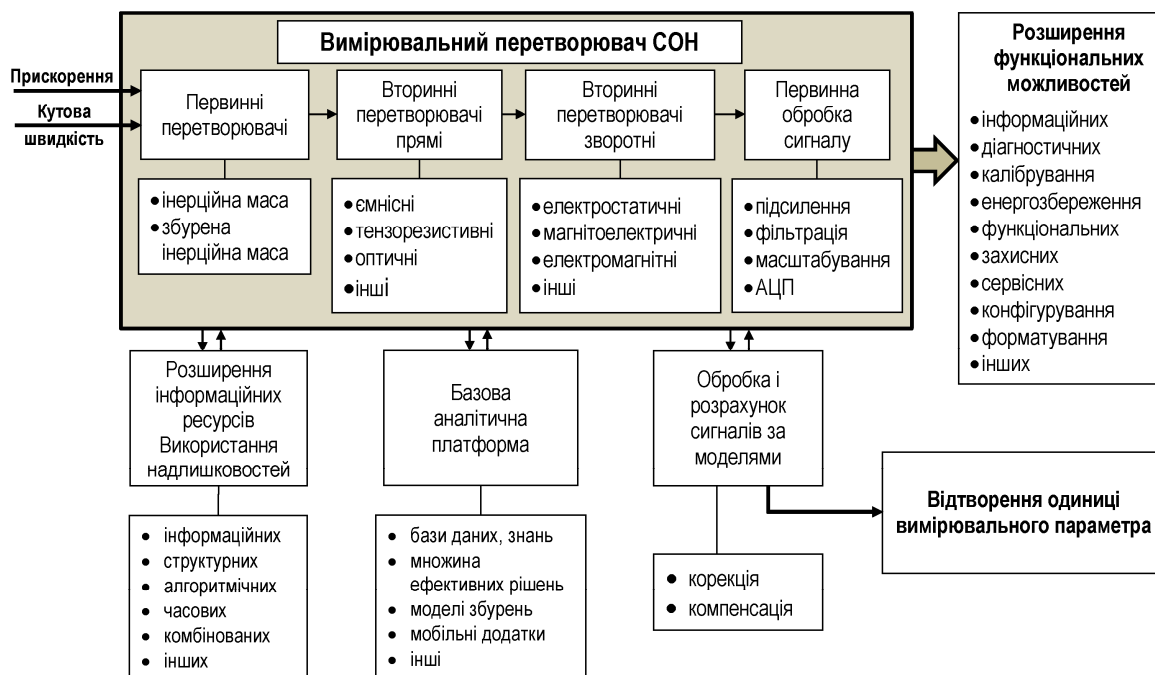


Рис. 1. Узагальнена структурна модель датчика СОН

Такий датчик СОН зазвичай реалізує наступний набір функцій:

- забезпечення точності та стабільності показів вимірювання на основі використання сучасних методів та ефективної первинної обробки сигналів;
- наявність функцій лінеаризації, масштабування, обчислення за заданими алгоритмами та статистичної обробки сигналів;
- можливість отримання та обробки додаткової вимірювальної інформації та використання її для покращення характеристик вимірювачів;
- підвищення надійності вимірювача введенням функцій автоматичного самокалібрування, самодіагностики та відновлення коефіцієнта перетворення;
- реалізація функції розширеної архівації даних метрологічних характеристик, опорних значень та допустимих границь їх змін за заданий довготривалий проміжок часу експлуатації приладу;
- наявність граничних значень похибок, за яких здійснюється автоматична корекція;
- наявність функції самовідновлення на основі зміни програми обробки даних;
- можливість автоматично в оперативному режимі вибирати діапазони вимірювання датчика;
- наявність функції виявлення заданих подій;
- можливість спряження з інформаційно-вимірювальними системами більш високого рівня;
- використання удосконалених функцій енергозбереження.

Використання інерціальних вимірювальних систем як джерел інформації для мобільних об'єктів супроводжується викривленням сигналів датчиків перешкодами, що створюють суттєві труднощі в отриманні необхідної точності оцінювання параметрів руху об'єктів. Для зниження впливу перешкод необхідно застосовувати додаткові заходи перетворення і обробки сигналів. Досягти цього можливо двома шляхами.

Перший з них заснований на пристосуванні вимірювальної системи до змін, модифікуючи при цьому відповідні алгоритми. В умовах, коли джерела зовнішньої інформації відсутні, доводиться проводити корекцію показань датчика за допомогою алгоритмів прогнозу. У таких вимірювальних системах використовуються накопичені знання про датчик, об'єкт керування і навколишнє середовище. Для підвищення точності функціонування вимірювачів необхідно побудувати математичну модель похибок, здійснити їх прогноз та використати у вихідній інформації для компенсації. До таких методів відносять різні модифікації ПІД-регуляторів з самонавчанням або системи керування з самонавчанням на основі використання нейронних мереж.

Другий шлях – забезпечити використання вимірювальної системи, представивши її розшире-

ною моделлю, що адекватно відображає процеси, які відбуваються в різних її елементах і режимах функціонування. У такому напрямку розвиваються багато сучасних вдосконалених систем вимірювання. Проблеми, які виникають в цій групі вимірювальної техніки можуть бути ефективно вирішені методами, що використовують один з перспективних напрямків підвищення досконалості їх характеристик – метод надлишковості. Створення у вимірювальному приладі розподілених у просторі або часі додаткових датчиків, а також використання інших методів отримання корисної інформації, дозволяє значно розширити функцію перетворення, включивши в неї низку параметрів, що обумовлюють дію впливових чинників, аби сформувати додаткові, до основного перетворювача вимірювальної величини, рівняння [6, 7]. Водночас, введенням надлишкових компонентів і зв'язків можна суттєво розширити вимірювальну базу. Додаткова інформація, що отримується внаслідок формування надлишкових вимірювань, може бути отримана безпосередньо з приладу, а може бути сформована штучно.

Тому, однією з важливіших задач при початку проєктування сучасних датчиків СОН є цілеспрямований аналіз схем побудови вимірювачів на предмет реалізації в конструкціях використання додаткових схемних рішень, вимірювачів та інших корисних ідей.

#### **Напрямки підвищення ефективності вимірювачів СОН**

Суттєво розширити вимірювальну базу, збільшити інформаційні ресурси, а також покращити точність і функціональні характеристики приладів СОН можна використанням так званих інформаційних, функціональних, структурних, алгоритмічних, часових і комбінованих надлишковостей.

Одним з розповсюджених методів отримання додаткової інформації є метод, що базується на основі структурної надлишковості, яка передбачає використання результатів вимірювання основного і додаткового (або додаткових) вимірювального перетворювача. Такий метод підвищення точності датчиків СОН здебільшого використовується для послаблення дії певних чинників, що впливають на процес передачі інформації або результат вимірювання.

Так, у практиці проєктування вимірювачів СОН, одним з перспективних напрямків підвищення стійкості мікромеханічних гіроскопів до механічних впливів вважається збільшення кількості інерційних мас з метою забезпечення інваріантності зазору в ємнісних перетворювачах при дії поступальних вібрацій. У роботі [8] запропоновано на додатковій інерційній масі закріпити електроди указаних перетворювачів. Зміна зазору  $z$  при дії прискорення, коли електроди системи керування

вихідними коливаннями закріплені на рухомій інерційній масі пружного підвісу, складає

$$z = 2W_z \omega_{z1}^{-2} \delta \omega (1 + \delta \omega)^{-1}, \quad (1)$$

де  $W_z$  – прискорення вздовж вимірювальної осі;  $\delta \omega = (\omega_{z2} - \omega_{z1}) / \omega_{z1}$  – відносна різниця власних частот поступальних коливань.

Навіть при відносному незбігу власних частот коливань обох підвісів на рівні 10 % зміна зазору в конструкції зменшиться приблизно в шість разів. Максимальне зменшення впливу прискорення досягається при точному збігу власних частот поступальних коливань.

У роботі [9] розв'язується схожа задача, але іншими методами. В ній запропоновано структуру диференціального ємнісного датчика переміщень, особливістю якого є наявність додаткового вихідного сигналу, пропорційного зазору між вимірювальними електродами і інерційною масою. Проведено аналіз можливого використання цього додаткового сигналу для підвищення точності мікромеханічних датчиків при дії зовнішніх чинників: дія вібрації, лінійного прискорення та зміна температури.

Для розв'язання задачі компенсації авторами пропонується змінити існуючу структурну схему перетворення сигналів і використати алгоритмічний підхід. На вимірювальні ємності  $C_1$  і  $C_2$ , які утворюють ємнісний міст, подається гармонічна змінна напруга. Струми  $I_1$  та  $I_2$ , які протікають через відповідні ємності при такій схемі, будуть складатися з двох компонент:

$$\begin{aligned} I_1 &= I(C_0) + I(\Delta C), \\ I_2 &= I(C_0) - I(\Delta C), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $I(C_0)$  – струм, пропорційний величині зазору;  $I(\Delta C)$  – струм, що визначається корисною зміною ємності.

Ці струми за допомогою трансрезистивних підсилювачів перетворюються у відповідні напруги  $U_1$  і  $U_2$ . Вихідний сигнал диференціального ємнісного датчика визначається як відношення сигналу різниці напружень, до сигналу на виході суматора. Експериментальні дослідження ємнісного датчика при дії вібрації з частотою 3 Гц і амплітудою 2,5 г показали зміну зазору 11,1 нм, що дає змогу використати її для корекції масштабного коефіцієнта гіроскопа.

Одним з методів підвищення характеристик приладів СОН є проектування функціонально надлишкових систем. Функціонально надлишкова система – це система, яка може реалізувати одну з декілька можливих поведінок (із заданого класу поведінок) без апаратного переналаштування, внаслідок спеціальним чином побудованої системи вхідних впливів і отриманих вимірювальних реак-

цій у визначені моменти часу. Функціональна надлишковість може використовуватись у вже розробленій системі з метою отримання необхідної реакції, а може цілеспрямовано створюватись на етапі проектування.

У процесі вдосконалення швидкодіючих вимірювальних приладів визначення площини географічного меридіану (маятникових гірокомпасів) з'ясувалося, що подальше підвищення точності цих приладів є пов'язаним з необхідністю врахування постійного неконтрольованого моменту, обумовленого експлуатаційними причинами, що змінюються в процесі вимірювання. Запропоновані методи автокомпенсації похибки на основі використання вимірювань з різними, але фіксованими параметрами приладу, більш ніж вдвічі подовжили процес вимірювання. У роботах [10, 11] пропонується використати операцію визначення положення площини географічного меридіану на основі використання функціонально-часової надлишкової системи, тобто провести аналіз азимутального руху чутливого елемента за інтервал часу, менший за необхідний для встановлення стаціонарного режиму роботи гіромотора в режимі контрольованого розгону ротора. Оскільки цей момент змінний у часі, це дає можливість визначити його в процесі одного вимірювання алгоритмічним методом, доповнивши модель руху чутливого елемента рівнянням зміни кінетичного моменту гіроскопу (здебільшого використовується експоненціальний розгін ротора). Даний метод вимірювання з одного боку скорочує час вимірювання площини географічного меридіану, а також дає можливість ідентифікувати шкідливий неконтрольований момент.

Метод підвищення точності вимірювального приладу СОН із використанням додаткової інформації використано також у роботах [12, 13]. На основі дослідження різних моделей динамічної похибки гіртеодоліта, в цих роботах розроблено методи визначення додаткових параметрів руху чутливого елемента вимірювача площини меридіану, що працює на обмежено рухомій основі та реалізує компенсаційний метод вимірювання. Як додаткові вимірювачі кутового відхилення використовувались високоточні фотоелектричні датчики автоколіматорного типу, які встановлювались на слідувальному корпусі, і вісь чутливості яких спрямована вздовж нормалі до дзеркала. Визначення оцінки кутової швидкості чутливого елемента навколо вертикальної осі здійснювалось внаслідок синтезу спостережувача. Проведені дослідження за отриманою розширеною інформаційною моделлю приладу показали зменшення вібраційної похибки гіртеодоліта алгоритмічною компенсацією вихідного параметра приладу.

Сучасна МЕМС-технологія компанії Xsens [14] дозволяє виготовляти мініатюрні гіроскопи і акселерометри. Але платою за малий розмір стає

низька точність, яка у більшості випадків є перешкодою для їх використання при розв'язуванні задач орієнтації і навігації в умовах вібрації, магнітних збурень, а також в умовах тривалої дії лінійних прискорень. Проективальники компанії змогли розв'язати цю проблему, доповнивши вхідні параметри блоку чутливих елементів інформацію від додаткових вимірювачів – магнітометрів і барометра, та деталізуючи математичну модель системи динамікою руху об'єкта, на якій встановлено інерційний модуль. При аналізі характеристик гіроскопів і акселерометрів було враховано, що використання цих вимірювачів у складі єдиного модуля, дає кращі характеристики, ніж у окремих датчиків. При перетворенні аналогового сигналу в цифровий в цих модулях проводиться додаткова обробка сигналу по мінімізації похибок при накладанні спектрів, наявності високочастотних шумів, нульових сигналів, масштабних коефіцієнтів, похибок неортогональності установки гіроскопів і акселерометрів та похибки від дії лінійних прискорень. Аналогічне калібрування виконується і для магнітометрів. Кожний інерціальний модуль МТі індивідуально відкалібрований і має калібрувальний паспорт. Як показано в [14], при проведенні такої додаткової обробки сигналів, вдається покращити характеристики датчиків приблизно в 100 разів.

За останні 15 років МЕМС – індустрія показала велике зростання не тільки за кількістю виготовлених виробів, а і за типом і точністю приладів. Одним з таких вимірювачів є інерційний модуль DMU 30 [15]. Цей модуль має низку унікальних особливостей. Наприклад, за кожною з трьох осей розташовано по два гіроскопи і по два акселерометри. Водночас, гіроскопи абсолютно незалежні і, у зв'язку з тим, що вони мають різну конструкцію і принцип роботи, забезпечують різні переваги за характеристиками. Перша тріада – недорогі мініатюрні гіроскопи з відкритим контуром, датчиками збурення і знімання інформації п'єзоелектричного типу. Друга тріада – високоточні гіроскопи із закритим контуром, що мають магнітоелектричне збурення та індукційні датчики реєстрації інформації. В якості вимірювачів прискорення використовуються двовісні ємнісні акселерометри з відкритим контуром, розташовані таким чином, щоб з кожною з осей інерційного модуля співпадали по дві вимірювальні осі акселерометрів.

Подібне рішення з двома різними гіроскопами за кожною з осей має низку переваг. Шляхом калібрування кожного гіроскопа і синтезу вихідних сигналів можна отримати високу чутливість на малих діапазонах вимірювання: до  $200^0/c$  і, одночасно, великий діапазон вимірювання до  $500^0/c$  і вище. Для об'єктів, що переміщуються з малою швидкістю, ключовою вимогою є малий шум, що зазвичай означає малий діапазон вимірювання. При виникненні великих прискорень такі датчики "виходять" в режим насичення. У цей час друга тріада, з більшим діапазоном вимірювання, буде продовжувати давати показання і, тим самим, буде

запобігати втраті даних. У випадку акселерометрів, надлишковість вимірювальних осей може бути використана для усунення синфазних похибок, що, таким чином, сприяє підвищенню точності і зниженню шумів.

Для особливо важливих застосувань, де необхідна висока надійність, цей датчик є відмінним готовим рішенням, постільки має надлишковість вимірювань по всім осям, і, таким чином, може за необхідності використовуватися в якості резервних вимірювачів вздовж всіх осей вимірювання.

Ще одна особливість модуля полягає у тому, що друга тріада гіроскопів має дуже мале енергоживлення – 2 % від використання високоточними гіроскопами. Це дає можливість використати нові функції режиму сну, коли високоточні гіроскопи вимкнені, але модуль продовжує функціонувати і видавати інформацію з другої тріади гіроскопів і акселерометрів. Високоточні гіроскопи знову можуть бути включені або у випадку перевищення кутової швидкості, або при перевищенні прискорення граничних величин.

Одним з актуальних напрямків розвитку сучасних інерціальних вимірювачів для компенсації похибок окремих датчиків є технологія спільної обробки результатів вимірювань, отриманих від різних датчиків [16]. Суть її полягає у тому, що отримання вимірювальної інформації від різних датчиків (акселерометрів, гіроскопів і магнітометрів) здійснюється в одні і ті ж моменти часу, а потім отримані дані обробляються спеціальними алгоритмами таким чином, що дані з кожного з них використовуються для суттєвого зменшення похибок інших. Алгоритми, що застосовуються при цьому, використовують спеціальні методи фільтрації, такі як Quaternion, оснований на використанні фільтрів Калмана. У даний час є багато компаній, які спеціалізуються на створенні алгоритмів обробки інформації саме для такої технології «сполучення датчиків» (Sensor Platforms, Hillcrest Labs, Movea). А такі компанії, як STMicroelectronics, Freescale, Inven Sense і Kionix пропонують готові рішення.

Компанія Microsoft вважає цю технологію настільки важливою, що підтримка сенсорних пристроїв є обов'язковою в Windows. Був розроблений клас драйверів, визначені стандарти для датчиків і проведена оптимізація датчиків. Типове рішення, що включає 3D-акселерометр, 3D-гіроскоп і 3D-магнітометр отримало назву системи з 9 ступенями вільності. Суттєвим недоліком технології є те, що вона вимагає значних ресурсів мікроконтролера.

Одним з перспективних способів забезпечення стабільності та достовірності характеристик вимірювального пристрою є створення датчиків з функцією самоконтролю. Це системи з адаптивним контуром, що забезпечує зниження додаткових похибок вимірювального пристрою, що пов'язані зі зміною умов їх експлуатації і дозволяють забезпечити необхідні метрологічні харак-

теристики, не використовуючи при цьому додаткові стабілізуючі системи і суттєво не ускладнюючи конструкцію датчиків.

Функція самодіагностики розв'язує дві задачі. По-перше, користувач може перевірити, що акселерометр готовий до використання, тобто інерційна маса може переміщуватись. По-друге, прикладена електростатична сила дозволяє регулювати відхилення інерційної маси.

Сучасні ММГ здебільшого обладнані вбудованою логікою самодіагностики, яка активізується через спеціальні виводи та дозволяє протестувати механічні й електричні компоненти гіроскопа [17]. Подача каліброваного потенціалу активізує електростатичне поле, яке імітує дію сили Коріоліса на коливальну масу. Водночас, на виході спостерігається зміна вихідної напруги. Якщо напруга знаходиться в межах приведених в документації границь, то це свідчить про штатний стан роботи механічних та електричних компонентів гіроскопу

Як видно з огляду, при проектуванні та виробництві нових інерціальних вимірювачів СОН всі компанії-розробники використовують нові сучасні технології для отримання високих робочих характеристик своїх датчиків.

Найбільших технічних успіхів у проектуванні та виготовленні сучасних вимірювальних систем досягають ті підприємства, які активно використовують сучасні інформаційні технології, їх додатки та моделі, орієнтовані на опис та всебічний аналіз об'єктів розглянутої предметної області. Це дозволяє інтегрувати інформаційні і обчислювальні ресурси в єдину спеціалізовану інформаційну структуру (базу), в якій визначається та формується взаємозв'язок знань і даних для підтримки різних форм і алгоритмів прийняття рішень, аналізується та ідентифікується все різноманіття відношень об'єктів, які є в цій області.

Такий досвід часто формалізують у вигляді бази прецедентів [18], яка повинна узагальнювати і враховувати, в межах розв'язання завдань проектування, досвід користувачів, що вже зустрічались з подібними задачами. З огляду на розв'язування задач проектування, розмірковування по прецедентах – це метод отримання розв'язувань пошуком подібних проблемних ситуацій в пам'яті бази прецедентів, що зберігає досвід розв'язання задач і адаптації найдених розв'язків до нових умов.

У цьому випадку, накопичений досвід розв'язання задач проектування може бути відправним пунктом у процесі пошуку розв'язків нових подібних задач.

### Висновки

Проаналізовані існуючі методи та наведені приклади проектування сучасних інерціальних датчиків систем орієнтації і навігації з метою підвищення їх точності та функціональних можливостей на основі використання додаткової вимірювальної інформації.

Таке проектування визначається рівнем розвитку і ступенем використання сучасної вимірювальної техніки та базується на основі використання існуючих і перспективних інформаційних технологій збору, інтеграції та комплексного аналізу всіх видів вимірювальної інформації, у тому числі інформації, отриманої з додаткових вимірювачів. Однією з реалізацій сучасних технологій проектування датчиків СОН може бути використання комп'ютерно-інтегрованих систем прийняття проектних рішень. Показано, що найбільші складності при їх розробці в досліджуваній предметній області викликає етап аналізу даних, знань і прецедентів, – особливо слабо формалізованих характеристик датчиків систем орієнтації і навігації. Для створення таких систем необхідна класифікована та систематизована інформація, моделі, алгоритми, які б забезпечували розробників цих приладів необхідною інформацією.

Таким чином, підсумовуючи наведене в статті, можна зробити висновки.

1. Приведений у статті аналіз схем побудови, особливостей функціонування та методів проектування датчиків систем орієнтації і навігації показав очевидну необхідність все більш широкого використання цифрових і мікропроцесорних пристроїв.
2. Розглянуті методи наділення датчиків СОН новими функціональними властивостями і підвищеними характеристиками по точності досягаються, в основному, при допомозі програмно-алгоритмічних дій, що спираються на використання результатів нових методів отримання достеменної вимірювальної інформації, включаючи методи надлишкових вимірювань.
3. Рівень достеменності вимірювальної інформації сучасних датчиків СОН з часом підвищується. Перспективні розробки включають проектування: адаптивних датчиків; датчиків, які можуть прогнозувати значення вимірювальної величини; датчиків з повною самодіагностикою, які б мали власну розширену вимірювальну базу та базу додаткової інформації, та можливість виконувати досить складну і об'ємну обробку даних вимірювання.

Розглянуті методи підвищення точності та розширення функціональних можливостей вимірювачів СОН дають можливість спеціалістам внаслідок використання різних комбінацій виявити перспективні принципи проектування та модернізації інерціальних датчиків систем орієнтації і навігації.

### Література

- [1] А. Пронин, С. Сапожникова, и Р.Тайманов, “Достоверность измерительной информации в системах управления”, *Телекоммуникация и транспорт*, т. 9, № 3, с. 32-37, 2015.



- [2] Р.Тайманов, и К. Сапожникова, “Метрологическое обеспечение средств измерений – взгляд в будущее”, *Главный метролог*, № 5, с. 4-13, 2011.
- [3] В. Ефимов, В. Калинин, В. Лихошерст, В. Матвеев, и В. Распопов, “Информационно-аналитическое обеспечение начальных этапов проектирования микромеханических гироскопов и акселерометров”, *Нано- и микросистемная техника*, № 1, с. 11-18, 2011.
- [4] П. Артамонов, “Использование структурной и временной избыточности в преобразователях емкости датчиков”, *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего*, № 5(34), с. 82-89, 2016.
- [5] Ю. Пономарев, “Инерциальные модули европейских производителей на базе МЭМС – датчиков. Обзор новинок”, *Компоненты и технологии*, № 12, с. 24- 33, 2016.
- [6] Ф. Храпов, “К вопросу использования различных видов избыточности для оценки состояния измерительных систем с труднодоступными первичными измерительными преобразователями в процессе эксплуатации”, *Вестник метролога*, № 3, с. 11-16, 2010.
- [7] М. Евстифеев, и Д. Елисеев, “Оптимизация конструкции подвижного электрода микромеханического гироскопа RR-типа”, *Гироскопия и навигация*, т. 25, № 2(97), с. 66-76, 2017.
- [8] М. Евстифеев, и Д. Елисеев, “Разработка многомассового микромеханического гироскопа RR-типа с повышенной устойчивостью к поступательным ускорениям”, на *XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н.Острякова*, СПб(б), 2016, с. 17-24.
- [9] Р. Люкшонков, и Н. Моисеев, “Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре”, *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*, № 4(74), с. 69-73, 2011.
- [10] В. Федоров, “Об определении положения географического меридиана трехстепенным маятниковым гироскопомасом во время разгона его ротора”, *Механика гироскопических систем*, № 27, с. 30-36, 2014.
- [11] V. Fedorov, B. Ivanov, and A. Olefir, “Method of determining the geographic meridian plane by ground-based pendulum gyrocompass in exponential acceleration mode of its rotor”, *Механика гироскопических систем*, № 30, с.42-48, 2015. DOI:10.20535/0203- 377130201569529.
- [12] С. Мураховский, “Метод определения дополнительных параметров движения чувствительного элемента гиротеодолита”, *Вісник Інженерної академії України*, № 2, с. 106-109, 2012.
- [13] А. Боярчук, П. Мироненко, С. Мураховский, “ПД-регулятор в контуре компенсационной обратной связи гиротеодолита”, *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування*, Вип. 47(1), с. 39-43, 2014.
- [14] Ю. Пономарев, “Инерциальные модули компании Xsens- объединение последних достижений науки в миниатюрном формате”, *Компоненты и технологии*, № 7, с. 52-58, 2017.
- [15] Э. Уитли, С. Кларк, и Ю. Пономарев, “Инерциальные модули на базе МЭМС для построения морских систем ориентации и навигации следующего поколения”, *Компоненты и технологии*, № 9, с. 12- 14, 2016.
- [16] А. Райхман, “ST Microelectronics – мировой лидер в производстве датчиков движения”, *Новости электроники*, № 2, с. 31, 2009.
- [17] А. Волович, и Г. Волович, “Интегральные акселерометры”, *Компоненты и технологии*, № 1, с. 31-43, 2002.
- [18] В. Мошкин, и Н. Ярушкина, “Модифицированный метод логического вывода знаний на основе нечеткой онтологии и базы прецедентов”, на *VI междунар. науч.- техн. конф. Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем, Open Semantic Technologies for Intelligent System (OSTIS – 2016)*, Минск, 2016, с. 265 – 270.

УДК 629.782

**П. С. Мироненко, С. А. Мураховский, А. А. Скидченко**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ

**Вступление.** При управлении современными сложными техническими объектами невозможно обойтись без современных методов и технологий, как средства контроля в условиях дестабилизирующих факторов. В работе рассмотрены методы повышения точности и расширения функциональных возможностей инерциальных приборов систем ориентации и навигации (СОН), используемых при их проектировании с помощью современных информационных технологий. Обеспечение получения достоверной информации при ее первичном преобразовании в условиях увеличения количества управляемых подвижных объектов стимулирует поиск новых решений. Известный подход – введение в измерительную систему избыточных компонентов и связей, обеспечивающих ее дополнительной полезной информацией (см., например, [1] - [4]). Таким образом, происходит расширение математической модели измерителя за счет дополнения основного уравнения преобразования измеряемой величины одним или несколькими вспомогательными.

**Основная часть.** Представлены и описаны общая структура современных инерциальных измерителей СОН, ее составные части и программно-аппаратные средства, используемые при их проектировании. Показано функциональное взаимодействие элементов таких средств между собой, что способствует повышению эффективности проектирования измерителей. Все это реализуется в конкретных системных функциях, которые активизируются в зависимости от условий эксплуатации прибора. Опыт последнего десятилетия в решении многих практических задач и создание сотен практически действующих систем показал, что именно использование информационных технологий, которые базируются на использовании дополнительной измерительной информации, является эффективным конструктивным и экономически оправданным методом ослабления действия определенных негативных влияющих факторов и улучшения функциональных характеристик измерителей СОН. В условиях, когда в состав датчика входит много компонентов различных типов, для повышения эффективности проектирования современных измерителей целесообразно создать обобщенную модель всего устройства. В работе представлена функциональная структурная схема инерциального измерительного преобразователя систем ориентации и навигации с избыточностью и сделан обзор вариантов реализации предложенного подхода к синтезу указанных датчиков.

**Выводы.** Внедрение информационных технологий позволяет ориентироваться на разработку эффективных методов программно-аппаратных средств поддержки проектирования современных датчиков СОН. Это позволяет оперативно, в реальном масштабе времени, оценить не только текущее состояние подвижного объекта, его основные характеристики, а также, при необходимости, использовать дополнительные измерительные параметры, чтобы учесть действие дестабилизирующих факторов, которые обуславливают иногда различные по своей природе, но тесно взаимодействующие друг с другом, процессы. Наибольших успехов в проектировании датчиков СОН в современных условиях достигают те разработчики, которым удается эффективно интегрировать информационные и вычислительные ресурсы в единую специализированную информационную структуру (базу), в которой определяется и формируется взаимосвязь знаний и данных для поддержки различных форм и алгоритмов принятия решений, анализируется и идентифицируется все многообразие отношений объектов, которые есть в этой области.

**Ключевые слова:** инерциальные датчики; проектирование; информационные технологии; информационная база знаний; избыточность.

**P. S. Myronenko, S. A. Murakhovsky, O. A. Skidchenko**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

## INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE DESIGN OF INERTIAL SENSORS OF ORIENTATION AND NAVIGATION SYSTEMS

**Introduction.** The methods of increase of accuracy and expansion of functionality of devices of systems of orientation and navigation (SON) at their designing with use of modern information technologies are considered in the work. Ensuring the receipt of reliable information in real conditions of operation of devices stimulates the search for new solution. One of the approaches is the introduction of redundant components and connections into the measuring system, which can provide it with additional useful information (see, for example, [1-4]). Thus, the expansion of the mathematical model of the meter by supplementing the basic equation of transformation of the measured value by one or more additional ones.

**Main part.** The general structure of modern inertial meters of SON, its components and software - hardware used in their design are presented and described. The functional interaction of elements of such means among themselves that promotes increase of efficiency of designing of meters is shown. All this is implemented in specific system functions, which are activated depending on the operating conditions of the device. The experience of the last decade in solving many practical problems and creating hundreds of practical systems has shown that the use of information technology based on the use of additional measurement information is an effective constructive and cost-effective method of mitigating certain negative influencing factors and improving the functional characteristics of meters SON.

**Conclusions.** The introduction of information technology allows us to focus on the development of effective methods of software and hardware to support the design of such SON sensors, which allow you to quickly, in real time, assess not only the current state of the moving object, its main characteristics, and, if necessary, use additional measurement parameters and specialized databases, knowledge and precedents to take into account the effects of destabilizing factors, which sometimes cause different in nature, but closely interacting with each other, processes.

**Keywords:** inertial sensors; design; information technologies; information base of knowledge; redundancy.

*Надійшла до редакції  
10 березня 2020 року*

*Рецензовано  
20 березня 2020 року*