

Богдан Г.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Феоклістов Д.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ІНЕРЦІЙНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Сучасні навігаційні системи є критичною складовою більшості транспортних, авіаційних, космічних та робототехнічних платформ. Зростання вимог до точності та автономності навігаційних рішень стимулює розвиток методів проектування, математичного моделювання та оцінки продуктивності навігаційних систем різної архітектури. Інерційні навігаційні системи (ІНС) функціонують на базі безперервного вимірювання кутових швидкостей та лінійних прискорень об'єкта за допомогою триад гіроскопів та акселерометрів. Інтегрування отриманих даних у часі забезпечує оцінку орієнтації, швидкості та просторового положення об'єкта в обраній системі координат. Основною перевагою ІНС є автономність роботи, водночас ключовим обмеженням є накопичення похибок з часом.

Математичне моделювання ІНС виступає початковим етапом у процесі їхнього проектування та оцінки ефективності навігаційних рішень. Адекватні моделі дозволяють кількісно оцінити вплив параметрів сенсорних елементів, алгоритмів обробки сигналів та зовнішніх факторів, на точність визначення положення і орієнтації об'єкта. Зокрема, побудова моделей гіроскопів та акселерометрів дає змогу дослідити вплив випадкових і систематичних похибок на динаміку помилок ІНС, а також розробляти ефективні методи їхньої компенсації.

Метою даної роботи є систематичний аналіз сучасних підходів до моделювання інерційних навігаційних систем.

У статті розглянуто підходи до моделювання інерційних навігаційних систем із акцентом на побудові та інтеграції моделей основних сенсорів – гіроскопів та акселерометрів. Показано, що створення окремих моделей сенсорів є необхідним для точного відтворення динаміки об'єкта та оцінки впливу похибок на результати навігаційних обчислень. Розглянуто принципи роботи основних сенсорів навігаційних систем.

Особливу увагу приділено інтеграції моделей сенсорів у єдину структуру інерційної навігаційної системи, що дозволяє моделювати повний цикл обчислень – від формування вимірювань до оцінки навігаційних параметрів. Показано, що ключовим елементом забезпечення стабільності та точності є застосування фільтраційних алгоритмів, що забезпечують компенсацію накопичення похибок і дрейфу сенсорів з часом.

Показано, що комплексний підхід до моделювання та інтеграції сенсорів забезпечує ефективний інструмент для аналізу, тестування та оптимізації ІНС різного рівня складності, що сприяє підвищенню надійності та точності автономної навігації у транспортних та робототехнічних платформах.

Ключові слова: автоматизація, навігація, робототехніка, вимірювання, точність, похибка.

Постановка проблеми. Інерційна навігаційна система являє собою інтегрований комплекс апаратних і програмних засобів, призначених для збору, обробки та інтерпретації інформації про рух об'єкта. Рівень її ефективності визначається точністю сенсорних компонентів, структурою системи та обчислювальними алгоритмами.

ІНС застосовуються для визначення положення, швидкості та орієнтації рухомого об'єкта щодо вибраної системи координат на основі вимі-

рювань власних прискорень та кутових швидкостей [1]. Ключовою особливістю таких систем є їхня відносна автономність, яка дозволяє функціонувати без зовнішніх джерел навігаційного сигналу. Завдяки цьому інерційні системи знаходять застосування у середовищах, де супутникова навігація або недоступна, або ненадійна, зокрема в авіації, морській справі та робототехніці.

Основним елементом ІНС є інерційний вимірювальний блок (IMU – Inertial Measurement Unit), який

зазвичай містить три взаємно ортогональні гіроскопи та три акселерометри. Гіроскопи фіксують кутові швидкості обертання об'єкта, а акселерометри реєструють лінійні прискорення по відповідних осях. Дані з сенсорів надходять до обчислювального модуля, де шляхом чисельного інтегрування визначаються орієнтація, швидкість та координати об'єкта у вибраній системі координат.

Математичний опис процесу інерційної навігації зазвичай здійснюється через систему диференціальних рівнянь, яка пов'язує вимірювані величини з кінематикою руху об'єкта. Вектор стану включає положення (r), швидкість (v) та орієнтацію (q), що часто задається кватерніонами:

$$x(t) = \begin{bmatrix} r(t) \\ v(t) \\ q(t) \end{bmatrix}, \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad (1)$$

де $u(t)$ – сигнали від гіроскопів і акселерометрів, $\dot{x}(t)$ – похідна вектору стану з часом.

ІНС можуть бути платформними та безплатформними. У платформних системах сенсори кріпляться на стабілізованій платформі, яка підтримує фіксовану орієнтацію відносно інерціальної системи координат, що спрощує перетворення сигналів. У безплатформних системах датчики встановлюються безпосередньо на корпус об'єкта, а орієнтація обчислюється програмно, що знижує конструктивну складність, але підвищує вимоги до алгоритмів обробки даних. Сучасні ІНС часто використовують МЕМС-гіроскопи та акселерометри, які відзначаються компактністю, низьким енергоспоживанням і доступною вартістю [2].

Суттєвою проблемою інерційних систем є накопичення похибок у часі. Навіть незначні систематичні зсуви призводять до поступового дрейфу координат і орієнтації, що знижує точність навігаційних обчислень. Для мінімізації цього ефекту ІНС можуть інтегруватися з зовнішніми системами корекції, такими як супутникові навігаційні системи, одометрія [3], або застосовувати внутрішні алгоритми компенсації похибок [4].

Імітаційне моделювання інерційних навігаційних систем є одним із ключових етапів у їхній розробці та вдосконаленні, оскільки дозволяє аналізувати ефективність системи без необхідності проведення дорогих експериментів на реальних пристроях. Завдяки цьому підходу можливо оцінити вплив характеристик сенсорів, алгоритмів обробки сигналів та зовнішніх умов на точність навігаційних рішень, а також виявити джерела похибок і розробити ефективні методи їхньої компенсації.

Математична модель ІНС зазвичай формується з трьох взаємопов'язаних блоків: кінематичної моделі руху об'єкта, моделі сенсорних вимірювань та алгоритму навігаційних обчислень, який визначає координати, швидкість і орієнтацію об'єкта [5]. Кінематична модель відтворює справжню динаміку об'єкта у вибраній системі координат і задає еталонні значення параметрів руху, з якими порівнюються результати імітаційних розрахунків. Модель вимірювань відтворює сигнали, що надходять від датчиків, з урахуванням систематичних і випадкових похибок. Алгоритм навігаційних обчислень виконує чисельне інтегрування цих сигналів і формує поточний стан системи.

Точність моделювання істотно залежить від правильного опису похибок сенсорів. Зазвичай для кожного пристрою враховують такі компоненти: постійне зміщення (зсув нуля), масштабну похибку, часову нестабільність параметрів, температурні впливи та випадкові флуктуації, що моделюються шумом. Для реалістичної симуляції поведінки сенсорів зсув нуля часто моделюють як випадковий процес першого порядку, що дозволяє врахувати кореляцію похибок у часі.

Крім того, моделювання ІНС передбачає створення фільтраційної моделі, яка забезпечує оцінку стану системи на основі наявних вимірювань та прогнозування їхніх майбутніх значень. Використання таких методів істотно підвищує точність навігаційних обчислень та стабільність роботи системи навіть у складних динамічних умовах [6].

Таким чином, пошук, оптимізація та дослідження методів моделювання ІНС залишається актуальним питанням, сучасної інерційної навігації.

Аналіз останніх досліджень і матеріалів.

Початком створення моделі ІНС є створення моделей її основних сенсорів, гіроскопів та акселерометрів. Гіроскоп є одним із ключових сенсорів інерційних навігаційних систем, призначеним для вимірювання кутових швидкостей обертання об'єкта відносно його локальних осей. Отримані вимірювання дозволяють визначати поточну орієнтацію об'єкта у просторі шляхом інтегрування сигналів у часі. Точність гіроскопічних даних безпосередньо впливає на достовірність навігаційних розрахунків: навіть невеликі систематичні похибки з часом накопичуються, спричиняючи дрейф оцінених параметрів орієнтації [7].

Принцип роботи гіроскопів може реалізовуватися різними способами. У традиційних механічних гіроскопах вимірювання базується на властивості збереження напрямку осі обертання ротора, обумовленої законом збереження моменту кіль-

кості руху. У сучасних лазерних та волоконно-оптичних гіроскопах використовується ефект Саньяка: різниця фаз між двома світловими променями, що проходять замкненим контуром у протилежних напрямках, пропорційна кутовій швидкості обертання. Найпоширенішими сьогодні є MEMС-гіроскопи, де вимірювання здійснюється за рахунок ефекту Коріоліса – відхилення коливної мікрмаси під дією обертання навколо перпендикулярної осі. Кожен тип сенсорів має свої переваги й обмеження: механічні гіроскопи характеризуються високою стабільністю, але складні у виробництві; оптичні – високою точністю, проте дорого коштують; MEMС-гіроскопи компактні та економічні, але поступаються точністю та стабільністю [8].

Математичний опис гіроскопа враховує формування вимірюваного сигналу із систематичними та випадковими похибками. У загальному вигляді його можна представити як:

$$\omega_m(t) = \omega(t) + b_g(t) + S_g \omega(t) + n_g(t), \quad (2)$$

де $\omega(t)$ – істинна кутова швидкість, $b_g(t)$ – вектор зсуву нуля, $S_g \omega(t)$ – матриця масштабних коефіцієнтів і взаємно-перехресних чутливостей, а $n_g(t)$ – випадкова шумова складова. У найпростішому випадку масштабна похибка не враховується, і модель набуває вигляду:

$$\omega_m(t) = \omega(t) + b_g(t) + n_g(t), \quad (3)$$

Випадкові та систематичні похибки гіроскопів мають різну природу. Постійний зсув нуля зумовлений внутрішніми асиметріями сенсора та температурними ефектами, з часом цей зсув може повільно змінюватися, тому його часто моделюють як випадковий процес першого порядку:

$$b_g(t + \Delta t) = \rho b_g(t) + w_b(t), \quad (4)$$

де $0 < \rho < 1$ – коефіцієнт кореляції, що визначає швидкість зміни зсуву, а $w_b(t)$ – білий шум із дисперсією σ_b^2 . При $\rho \rightarrow 1$ дрейф змінюється повільно, що відповідає властивостям реальних гіроскопів високої точності.

Випадковий шум вимірювання $n_g(t)$ зазвичай розглядається як гаусовий білий шум із нульовим середнім і заданою спектральною щільністю, яка визначається паспортними характеристиками сенсора.

Для підвищення точності моделювання можуть також враховуватися нелінійні ефекти, пов'язані з насиченням сигналу, температурною залежністю чутливості та механічними вібраціями корпусу. У високоточних навігаційних системах іноді додають корекцію похибок, що залежать

від прискорення або вібраційного навантаження, особливо на рухомих платформах.

Імітаційні експерименти зазвичай передбачають обчислення орієнтації об'єкта шляхом інтегрування вимірюваних кутових швидкостей та порівняння результатів із істинними значеннями. Такий підхід дозволяє оцінити вплив шумів та дрейфу на точність визначення орієнтації [9].

Моделювання гіроскопів є важливою складовою створення ІНС. Адекватне відтворення стохастичних властивостей сенсорів дозволяє прогнозувати накопичення похибок у навігаційних обчисленнях і розробляти ефективні методи їхньої компенсації. Побудова правильної моделі гіроскопа створює основу для комплексного моделювання ІНС, де взаємодія похибок різних сенсорів формує загальну динаміку навігаційних помилок.

Акселерометр є другим по важливості сенсором інерційної навігаційної системи, який призначений для вимірювання лінійних прискорень об'єкта у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Дані, отримані від акселерометрів у поєднанні з інформацією від гіроскопів, дозволяють визначати швидкість і положення об'єкта шляхом подвійного інтегрування прискорень у часі. Точність вимірювань акселерометра безпосередньо впливає на якість навігаційних розрахунків, оскільки навіть невеликі систематичні похибки накопичуються під час інтегрування, викликаючи помітний дрейф координат [10].

Принцип роботи акселерометра базується на фіксації інерційної сили, що виникає при прискореному русі маси, закріпленої на пружному елементі. Вимірювана сила пропорційна прискоренню відповідно до другого закону Ньютона, що дозволяє перетворити механічне відхилення або деформацію у електричний сигнал. Залежно від технології виготовлення розрізняють п'єзоелектричні, ємнісні, тензорезистивні та MEMС-акселерометри. Найбільш поширеними є MEMС-пристрої завдяки їх компактності, низькому енергоспоживанню та можливості інтеграції з іншими сенсорами.

Математично сигнал акселерометра може бути поданий у вигляді:

$$a_m(t) = a(t) + b_a(t) + S_a a(t) + n_a(t). \quad (5)$$

де $a(t)$ – істинне лінійне прискорення у системі тіла, $b_a(t)$ – систематична похибка, $S_a a(t)$ – матриця масштабних коефіцієнтів і перехресних чутливостей, а $n_a(t)$ – шумова складова. Спрощений варіант моделі набуває вигляду:

$$a_m(t) = a(t) + b_a(t) + n_a(t). \quad (6)$$

Під час побудови моделей акселерометрів також важливо враховувати наявність проєкції прискорення сили тяжіння, що сприймається сенсором як додаткове прискорення. Тому в моделі необхідно використовувати трансформацію вимірних прискорень із системи тіла в навігаційну систему координат із подальшим відніманням вектору гравітації:

$$a_a(t) = R_b''(a(t) + b_a(t) + n_a(t)) - g, \quad (7)$$

де R_b'' – матриця переходу від системи тіла до навігаційної системи координат, а g – вектор прискорення сили тяжіння. Ця операція є критичною для правильного визначення лінійних прискорень і, відповідно для точного обчислення положення об'єкта.

Для моделювання акселерометрів зазвичай створюють синтетичну траєкторію руху об'єкта, обчислюють істинні прискорення, а потім додають до них змодельовані похибки. Такий підхід дозволяє оцінити вплив різних характеристик сенсора, включаючи зсув нуля, шум та температурну нестабільність, на точність визначення координат [11].

Адекватна модель акселерометра необхідна не лише для перевірки навігаційних алгоритмів, а й для тестування методів калібрування та компенсації похибок. Коректне відтворення стохастичних властивостей сенсора дозволяє прогнозувати довгостроковий дрейф координат та оцінювати ефективність інтеграції ІНС з іншими джерелами навігаційної інформації, такими як GPS або візуальні системи.

Постановка завдання. Мета цієї статті – систематичний аналіз сучасних підходів до моделювання інерційних навігаційних систем.

Виклад основного матеріалу. Після створення окремих моделей гіроскопів та акселерометрів наступним кроком є їх інтеграція у єдину інерційну навігаційну систему. Така інтеграція дозволяє моделювати повний цикл навігаційних обчислень – від генерації сенсорних сигналів до отримання оцінених координат, швидкостей та орієнтації об'єкта. Взаємодія між сенсорами та обчислювальними алгоритмами є критичною, оскільки саме правильне поєднання даних із різних джерел забезпечує стабільність та точність навігаційних рішень.

Основою обчислювального процесу ІНС є алгоритм, який оцінює поточний стан об'єкта на основі інтегрування вимірних кутових швидкостей і прискорень [12]. Спочатку гіроскопи надають інформацію про кутові швидкості, що дозволяє обчислити орієнтацію тіла відносно

навігаційної системи координат. Для цього використовуються різні підходи: матричні рівняння кінематики, кватерніонна параметризація або подання через кути Ейлера. Обчислена орієнтація застосовується для перетворення векторів прискорень із системи тіла у навігаційну систему координат, після чого з них віднімається вектор прискорення сили тяжіння. Подальше інтегрування цих сигналів дозволяє визначити швидкість і положення об'єкта.

Навіть за наявності високоточних сенсорів похибки гіроскопів та акселерометрів накопичуються з часом, що призводить до зростання помилок у визначенні координат і орієнтації. Для компенсації цього ефекту в моделі ІНС застосовується процедура фільтрації, яка забезпечує оцінку стану системи з урахуванням статистичних властивостей похибок вимірювань. Найбільш поширеним інструментом є фільтр Калмана [13], що реалізує рекурсивний алгоритм мінімізації середньоквадратичної помилки. Базовий фільтр Калмана включає два етапи: прогноз стану на основі динамічної моделі системи та оновлення стану на підставі результатів вимірювань.

Прогноз у рамках ІНС базується на кінематичних рівняннях руху, які використовують змодельовані сигнали гіроскопів і акселерометрів. Оновлення здійснюється при наявності зовнішніх джерел інформації, наприклад, сигналів GPS, магнітометра або барометричного висотоміра. Результатом фільтрації є оцінка поточного стану об'єкта, що включає координати, швидкість, орієнтацію та оцінки дрейфів сенсорів. Фільтр не лише зменшує миттєві похибки вимірювань, а й забезпечує корекцію повільно змінних систематичних похибок. При моделюванні ІНС важливо забезпечити синхронізацію часових характеристик усіх компонентів системи. Затримки сигналів, різна частота оновлення даних або невідповідність часових міток можуть призвести до суттєвих помилок у результатах.

Результати моделювання інтегрованої ІНС зазвичай представлені у вигляді траєкторій руху (рис. 1), оцінених параметрів орієнтації та графіків динаміки похибок.

Аналіз цих результатів дозволяє оцінити вплив характеристик сенсорів, частоти оновлення, параметрів фільтрації та алгоритмів компенсації на загальну ефективність системи [15]. Це дає змогу визначити умови, за яких автономна ІНС забезпечує достатню точність, та ситуації, коли необхідна періодична корекція за допомогою зовнішніх джерел навігаційної інформації.

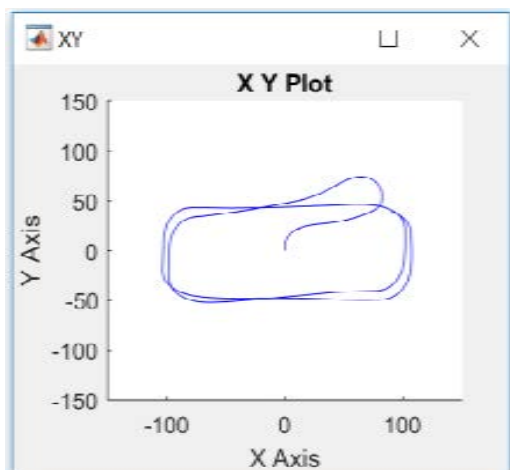


Рис. 1. Результат симуляції роботи ІМУ в складі системи автопілоту [14]

Інтеграція моделей гіроскопів і акселерометрів у єдину систему дозволяє створити комплексну модель ІНС, здатну відтворювати її роботу у реальних умовах. Коректно побудована модель є ефективним інструментом для аналізу, оптимізації та тестування навігаційних систем різного рівня складності.

Після побудови та інтеграції моделі інерційної навігаційної системи важливим етапом є аналіз отриманих результатів. Основна мета цього етапу – оцінка точності навігаційних параметрів, стабільності системи та впливу похибок сенсорів на кінцевий результат. Аналіз дозволяє перевірити адекватність математичних моделей сенсорів, коректність реалізації алгоритмів обчислення та фільтрації, а також визначити можливі шляхи підвищення точності системи.

Основними показниками якості роботи ІНС є точність визначення орієнтації, швидкості та координат об'єкта [16]. Похибки орієнтації зазвичай оцінюються в кутових секундах або градусах, похибки швидкості – у метрах за секунду, а похибки координат – у метрах або кілометрах залежно від тривалості моделювання. Для оцінки точності порівнюють оцінені значення параметрів із істинними, які формуються в моделі як еталон. На цій основі розраховуються середньоквадратичні похибки, середні відхилення та кумулятивні помилки.

Оскільки інерційна навігаційна система функціонує на основі інтегрування сигналів сенсорів, похибки з часом накопичуються. Для гіроскопів це проявляється у вигляді поступового дрейфу сигналу, тоді як похибки акселерометрів призводять до квадратичного росту помилки положення. Тому особлива увага приділяється довгостроковій

стабільності системи. В цьому контексті ефективним інструментом є аналіз дисперсій Аллана (рис. 2), який дозволяє розділити різні компоненти шуму такі як: білий шум (White Noise), випадковий дрейф (Bias Instability), шум з масштабною залежністю тощо, та виявити домінуючі джерела нестабільності сенсорів.

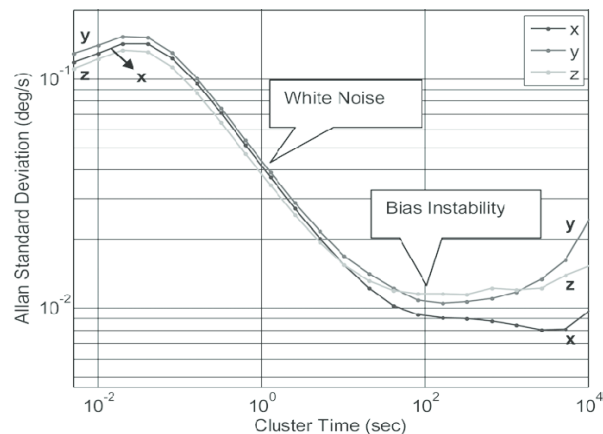


Рис. 2. Приклад кривих дисперсій Аллана для МЕМС гіроскопа [17]

Для оцінки ефективності фільтрації аналізують залишкові похибки між прогнозованими та скоригованими станами системи. При коректно налаштованому фільтрі Калмана статистичні характеристики залишків повинні відповідати параметрам шуму сенсорів. Відхилення від очікуваного розподілу сигналізує про некоректне моделювання шуму. На практиці це перевіряють шляхом порівняння фактичної дисперсії залишків із теоретичною, а також аналізом автокореляційних функцій.

Важливим аспектом аналізу є дослідження впливу різних типів похибок сенсорів на загальну точність навігації. Для цього проводяться серії експериментів із варіюванням параметрів моделей – рівня шуму, швидкості дрейфу та масштабних похибок. Результати дозволяють побудувати залежності між характеристиками сенсорів та точністю визначення координат або орієнтації. Наприклад, підвищення стабільності гіроскопа на порядок може суттєво зменшити кутовий дрейф, що особливо важливо для автономних систем навігації без зовнішньої корекції.

Для комплексної оцінки роботи ІНС застосовують як візуальні, так і статистичні методи аналізу: графіки траєкторій істинного та оціненого руху, візуалізацію кутів орієнтації, часові ряди похибок та гістограми шумових компонентів. Такі методи дозволяють наочно оцінити якість функціонування системи та визначити моменти, коли філь-

трація або моделі сенсорів показують найбільші відхилення.

У випадку інтегрованих систем (наприклад, ІНС + GPS) аналіз результатів також включає оцінку точності позиціонування під час втрати сигналу супутникової системи. Це дозволяє визначити, як довго ІНС здатна підтримувати прийнятний рівень точності в автономному режимі. Такі випробування особливо важливі при розробці навігаційних систем для авіації, морського та наземного транспорту, де безперервність роботи є критичною [18].

Висновки. У статті досліджено підходи до моделювання інерційних навігаційних систем із фокусом на моделювання їх окремих елементів (гіроскопів та акселерометрів). Показано, що створення окремих моделей сенсорів є необхідним для точного відтворення динаміки системи та оцінки впливу похибок на кінцевий результат. Інтеграція цих моделей у єдину структуру дозволяє моделювати повний цикл навігаційних обчислень – від вимірювань параметрів об'єкта

до оцінки координат, швидкостей і орієнтації об'єкта. Ключовим елементом стабільної та точної роботи системи є застосування фільтраційних алгоритмів, що компенсують накопичення похибок та дрейф сенсорів.

Аналіз результатів показав, що точність визначення навігаційних параметрів залежить від характеристик сенсорів, частоти оновлення даних і параметрів фільтрації. Дослідження впливу різних компонентів шуму та дрейфу дозволяє ідентифікувати джерела критичних похибок та забезпечити їх ефективну компенсацію. Результати моделювання також можуть слугувати основою для оптимізації конструктивних та алгоритмічних рішень у реальних ІНС, що особливо важливо для автономних платформ із обмеженим доступом до зовнішніх джерел навігаційної інформації.

Отже, комплексний підхід до моделювання сенсорів та їх інтеграції в інерційну систему створює ефективний інструмент для аналізу, тестування та оптимізації ІНС різного рівня складності, підвищуючи надійність і точність автономної навігації.

Список літератури:

1. Titterton D., Weston J. Strapdown inertial navigation technology - 2nd edition - [Book review. *IEEE aerospace and electronic systems magazine*. 2005. Vol. 20, no. 7. P. 33–34.
2. El-Sheimy N., Hou H., Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors using allan variance. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. 2008. Vol. 57, no. 1. P. 140–149.
3. Global positioning systems, inertial navigation, and integration / ed. by Weill, Lawrence R. (Lawrence Randolph), 1938-, A. A. P, W. O. Library. 2nd ed. Hoboken, N.J : Wiley-Interscience, 2007.
4. Bohdan H. A., Feoklistov D. A. Improving the accuracy of inertial navigation systems using neural network technologies. *Scientific notes of taurida national V.I. vernadsky university. series: technical sciences*. 2025. Vol. 2, no. 3. P. 101–106.
5. Mukhina M. P., Filyashkin M. K. Computer modeling of accuracy characteristics of strapdown inertial navigation system. *Radio electronics, computer science, control*. 2019. No. 4. P. 157–165.
6. Luo Y., Guo C., Liu J. Equivariant filtering framework for inertial-integrated navigation. *Satellite navigation*. 2021. Vol. 2, no. 1.
7. El-Sheimy N., Youssef A. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends. *Satellite navigation*. 2020. Vol. 1, no. 1.
8. A multi-imu based self-contained pedestrian navigation algorithm / Y. H. Jen et al. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. 2023. XLVIII-1/W1-2023. P. 603–608.
9. Woodman, O. J. (2007). *An introduction to inertial navigation* (No. UCAM-CL-TR-696). University of Cambridge, Computer Laboratory.
10. Research on algorithm of airborne dual-antenna GNSS/MINS integrated navigation system / M. Xia et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 3. P. 1691.
11. A novel high-precision trajectory generator with complex motion simulation for enhanced inertial navigation algorithm testing / C. Chen et al. *Actuators*. 2025. Vol. 14, no. 3. P. 146.
12. Simulation platform for SINS/GPS integrated navigation system of hypersonic vehicles based on flight mechanics / K. Chen et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 18. P. 5418.
13. Comparison of kalman filters for inertial integrated navigation / M. Zhang et al. *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 6. P. 1426.
14. Kapeel, E. H., Kamel, A. M., & Omar, A. Modeling and simulation of low cost MEMS gyroscope using matlab (simulink) for UAV autopilot design. *IT Must Conference*. August. 2019.
15. A simulation framework for precision landing and hazard avoidance technology assessments / A. M. Dwyer-Cianciolo et al. *AIAA scitech 2020 forum*, Orlando, FL. Reston, Virginia, 2020.

16. Observability of strapdown INS alignment: a global perspective / Yuanxin Wu et al. *IEEE transactions on aerospace and electronic systems*. 2012. Vol. 48, no. 1. P. 78–102.
17. Niu X., Nassar S., El-Sheimy N. An accurate land-vehicle MEMS IMU/GPS navigation system using 3D auxiliary velocity updates. *Navigation*. 2007. Vol. 54, no. 3. P. 177–188.
18. Chiang K.-W., Duong T., Liao J.-K. The performance analysis of a real-time integrated INS/GPS vehicle navigation system with abnormal GPS measurement elimination. *Sensors*. 2013. Vol. 13, no. 8. P. 10599–10622.

Bohdan H.A., Feoklistov D.A. A COMPREHENSIVE APPROACH TO MODELING INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

Modern navigation systems are a critical component of most transport, aviation, space and robotic platforms. The growing requirements for the accuracy and autonomy of navigation solutions stimulate the development of design methods, mathematical modeling and performance assessment of navigation systems of various architectures. Inertial navigation systems (INS) operate on the basis of continuous measurement of angular velocities and linear accelerations of an object using triads of gyroscopes and accelerometers. Integration of the obtained data over time provides an estimate of the orientation, speed and spatial position of the object in the selected coordinate system. The main advantage of INS is the autonomy of operation, while the key limitation is the accumulation of errors over time.

Mathematical modeling of INS is the initial stage in the process of their design and assessment of the effectiveness of navigation solutions. Adequate models allow us to quantitatively assess the influence of the parameters of sensor elements, signal processing algorithms and external factors on the accuracy of determining the position and orientation of the object. In particular, the construction of models of gyroscopes and accelerometers allows us to study the influence of random and systematic errors on the dynamics of INS errors, as well as to develop effective methods for their compensation.

The purpose of this work is a systematic analysis of modern approaches to modeling inertial navigation systems.

The article considers approaches to modeling inertial navigation systems with an emphasis on the construction and integration of models of the main sensors - gyroscopes and accelerometers. It is shown that the creation of separate sensor models is necessary for accurate reproduction of the dynamics of the object and assessment of the influence of errors on the results of navigation calculations. The principles of operation of the main sensors of navigation systems are considered.

Special attention is paid to the integration of sensor models into a single structure of the inertial navigation system, which allows modeling the full cycle of calculations - from the formation of measurements to the evaluation of navigation parameters. It is shown that the key element in ensuring stability and accuracy is the use of filtering algorithms that compensate for the accumulation of errors and sensor drift over time.

It is shown that a comprehensive approach to sensor modeling and integration provides an effective tool for analyzing, testing, and optimizing INS-s of various levels of complexity, which contributes to increasing the reliability and accuracy of autonomous navigation in transport and robotic platforms.

Key words: automation, navigation, robotics, measurement, accuracy, error.

Дата надходження статті: 24.11.2025

Дата прийняття статті: 11.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025