

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»

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІНЕРЦІАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Датчики MEMS, які використовуються в системах орієнтації та навігації, є невід'ємною частиною сучасного технологічного прогресу. Неочевидно, але вони присутні практично у всіх сферах техніки і технологій, починаючи від смартфонів і комп'ютерних технологій, продовжуючи автоматизованими складальними лініями на заводах, обладнанням для точної обробки металу, дерева, пластику та інших матеріалів, закінчуючи дронами і роботами-помічниками.

Ця стаття написана з метою розкриття теми підвищення точності датчиків орієнтації MEMS, в складі інерційних навігаційних блоків, за допомогою нейромереж та методів машинного навчання. В ній розглянуто ключові причини виникнення похибок в цих датчиках. Було описано як зміна температури впливає на MEMS датчики в інерційних системах навігації до яких належать гіроскопи та акселерометри.

В статті було розглянуто методи боротьби з температурною похибкою MEMS датчиків. До них можна віднести механічні, такі які борються з похибкою шляхом температурної ізоляції датчика, та створення його з матеріалів, що відрізняються малою чутливістю до зміни температури. Було визначено основні недоліки притаманні цим методам. Також розглянуто інші методи, що звуться температурною компенсацією, або ж алгоритмічною компенсацією. Їх дія заснована на математичному моделюванні сигналу похибки з ціллю його виділення із загального сигналу виходу датчика.

Основна увага була приділена методам, які в собі містять застосування нейромережеских технологій та методів машинного навчання для побудови моделі похибки. Проаналізовано сучасні дослідження які ведуться в даному напрямку, що дало змогу визначити те, що методи компенсації температурної похибки MEMS датчиків, що використовують нейронні мережі, здатні значно покращити точність цих датчиків порівняно з іншими методами.

Ключові слова: MEMS, навігаційні системи, нейронна мережа, машинне навчання, компенсація похибок.

Постановка проблеми. Системи глобальної супутникової навігації (СГСН), часто використовуються в парі з інерційними навігаційними системами (ІНС). Така комбінація дозволяє використовувати переваги обох систем. Система СГСН забезпечує регулярну корекцію навігаційних даних, що надаються ІНС. Остання в свою чергу бере на себе роль навігаційного інструменту в ситуаціях коли сигнал СГСН є недоступним або ненадійним. Це можливо в таких місцях як: гірські долини, густі міські райони та лісова місцевість. Проте, інерційні навігаційні системи, мають властивість накопичувати свою помилку з часом, що

може призвести до серйозних відхилень в процесі навігації.

На сьогоднішній день більшість інерційних навігаційних систем створюється на основі мікроелектромеханічних систем (МЕМС) гіроскопів та акселерометрів.

МЕМС гіроскоп це пристрій що складається з мікроскопічних механічних елементів (таких як: балки, мембрани, гіроскопічні маси, інше), що є інтегрованими разом з електронними компонентами. В їх основі роботи лежить ефект Коріоліса. Згідно з ним, якщо об'єкт рухається круговою траєкторією на нього починає впливати сила Коріоліса, яка змінює напрямок його руху в залеж-

ності від кута обертання. У випадку з MEMS гіроскопом цим об'єктом виступає певна маса, прикріплена до пружного підвісу. Під час роботи гіроскопа, сила Коріоліса впливає на підвішену масу і викликає її зміщення в певному напрямку. Це зміщення можна виміряти через зміни в електричних параметрах, інтегрованих в датчик електричних елементів, які виникають через рух маси. Сигнал, отриманий від зміщення маси, перетворюється в електричний сигнал, який далі аналізується мікропроцесором. За допомогою цього аналізу можна визначити кутову швидкість обертання об'єкта, на якому встановлений гіроскоп.

MEMS акселерометр, є пристроєм для вимірювання прискорення. Вимірюване прискорення може бути як лінійним так і гравітаційним. Значення прискорення датчик перетворює в електричний сигнал. Основою конструкції даного типу датчиків є маса, що закріплена на пружному підвісі. Під дією зовнішнього прискорення маса переміщується пропорційно цьому прискоренню відносно «жорсткої» частини датчика. Зміщення маси фіксуються ємнісними або резистивними вимірювачами, та в подальшому перетворюється в електричний сигнал який можна інтерпретувати як величину прискорення в напрямку вимірювання.

До переваг MEMS датчиків відносять: малий розмір, низьке енергоспоживання, інтеграцію датчиків та електроніки на одному пристрої, низька вартість в порівнянні з аналогами [1]. Найбільший недолік датчиків MEMS є їх чутливість до температури.

Вплив температури на точність MEMS сенсорів, можна описати через декілька ключових факторів, що пов'язані з фізичними властивостями датчиків та їх роботою. До таких факторів належать:

1. Зміни в матеріалі датчика. Датчики MEMS складаються з мікроскопічних елементів, та виготовлені з кремнію або інших матеріалів, що можуть змінювати свої фізичні властивості при зміні температури. До таких властивостей належать, модуль пружності та фізичні розміри, що під впливом теплового розширення може викликати деформацію датчика, що безпосередньо впливає на його точність.

2. Зміни електричних властивостей. Таких як резистивність чи ємність, що впливає на вихідний сигнал датчика та призводить до зниження точності вимірювань.

3. Шум та термічна стабільність. Термічний шум збільшується при високих або низьких тем-

пературах, що значно впливає на чутливість та як наслідок точність датчика. Результатом його дії стає те, що датчик починає давати більші помилки при критичних температурах.

Усі зазначені фактори впливають на роботу MEMS датчиків, що робить важливим проведення тестів та калібрування цих датчиків для забезпечення їх точної роботи в умовах зміни температури. Таким чином актуальним питанням є пошук оптимального методу, який дозволяє зменшити похибку MEMS сенсорів викликану зміною температури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз сучасних публікацій дозволив виділити основні методи, що використовуються для подолання похибок MEMS датчиків [2], [3], [4].

Зазвичай, зменшення похибки викликану зміною температури досягається за рахунок зниженні чутливості матеріалу датчика до температури. Для цього використовують два методи:

1. Виготовлення чутливого елемента датчика з матеріалу зі зниженою чутливістю до змін температури.

2. Теплова ізоляція датчика.

До недоліків першого методу відносять, значні часові та фінансові затрати, пов'язані з пошуком нових матеріалів. Також, зрозуміло, що зі сторони фізики є неможливим створення матеріалу який би зовсім не піддавався змінам під дією температур.

Недоліком другого методу є те, що він не захищає датчик від внутрішнього нагріву, який виникає під час його роботи. Також, такий метод накладає обмеження на сам температурний ізолятор, що значно ускладнює пошук необхідного матеріалу для його побудови. Шар ізоляції не має бути громістким, оскільки це б нівелювало переваги MEMS датчиків викликані їх малим розміром.

Інший підхід, який дозволяє зменшити температурну залежність MEMS сенсорів називається температурною компенсацією. В основі підходу лежить математичне моделювання похибки за допомогою програмних технологій, та фільтрацію вихідного сигналу датчика з подальшим виокремленням сигналу похибки. Існують різні методи моделювання сигналу похибки, які можуть бути засновані на принципах математичної апроксимації та створенню багатопараметричних моделей, а також методів машинного навчання, або штучних нейронних мереж.

Теоретично штучні нейронні мережі є ідеальними з точки зору архітектури та принципу

роботи для вирішення проблеми компенсації таких помилок [5]. Нейронна мережа складається з певного набору «нейронів», з'єднаних між собою зв'язками з певним ваговим коефіцієнтом. Кількість нейронів і зв'язків між ними може бути абсолютно довільним, головне, щоб їх було достатньо для виконання завдання. Така гнучка архітектура нейронних мереж є великим плюсом для вирішення проблем корекції порівняно з константністю математичних конструкцій. Усі дослідження в області застосування нейронних мереж для компенсації помилок MEMS-сенсорів зводяться до пошуку оптимальної структури мережі, що означає визначення необхідної кількості нейронів, їх розташування в шарах мережі та знаходження оптимальних значень коефіцієнтів зв'язків між нейронами.

Постановка завдання. Мета цієї статті – огляд можливостей використання методів машинного навчання для зменшення похибки MEMS сенсорів в системах орієнтації та навігації

Виклад основного матеріалу. Автори даної статті [6], розглядають проблеми, пов'язані з стохастичною характеристикою та невизначеністю кількісної оцінки MEMS акселерометрів. Запропонований підхід передбачає навчання сурогатних моделей з даними, отриманими в результаті початкового високоточного аналізу кінцевих елементів, що забезпечує багаті набори даних, які генеруються в автономному режимі. Застосування даної системи продемонстровано на прикладі оцінки чутливості MEMS акселерометра з урахуванням невідомих механічних зсувів, надмірного травлення та варіацій товщини. Також авторами продемонстровано використання підходу до апостеріорного розподілу невідомих виробничих параметрів пристрою на основі його реакції на перехідні сигнали напруги. Даний метод значно покращує зворотну та пряму кількісну оцінку невизначеності, даючи точні результати, водночас значно покращуючи ефективність і результативність процесу визначення характеристик. Також використання цього методу дозволяє реконструювати чутливість пристрою, використовуючи тільки сигнали напруги.

В статті [7], пропонується нова модель температурної компенсації для інерційного вимірювального блоку, що заснована на радіально-базисній нейронній мережі. Дана мережа здатна компенсувати значні детерміновані похибки як акселерометра та і гіроскопічних тріад, в широкому діапазоні температур. Автори даної статті розглядають температурну компенсацію

MEMS датчиків як задачу апроксимації функції, а похибки цих датчиків моделюється на основі функції температури та вихідних вимірювань датчика. Автори статті акцентують свою увагу на тому, що запропонований ними метод дозволяє калібрувати як тріади акселерометрів так і гіроскопів.

В [8], запропоновано метод усунення шумів у вихідних сигналах MEMS датчиків у складі інерційних навігаційних блоків, із застосуванням методів штучного інтелекту. Зокрема розглядаючи сигнали MEMS гіроскопа як часовий ряд та застосовуючи для фільтрації вихідного сигналу, рекурентну нейронну мережу із маніпуляціями в довготривалій та короткотривалій пам'яті. Автори зазначають, що даний метод дозволив зменшити стандартне відхилення гіроскопа на 60,3%, 37% і 44,6% для гіроскопів у тріаді відповідно, у порівнянні з необробленим сигналом. Також помилка орієнтації по трьох осях вдалося зменшити на 15,8%, 18,3% і 51,3% відповідно до осі. Також автори даної статті порівнюють свій метод з методом заснованим на моделі автоматичної регресії із фіксованими параметрами, та зазначають, що похибка орієнтації зменшилась на 47,6%, 42,3% та 52,0%, по відповідним осям.

Автори статті [9], використовують нейронну мережу зворотного поширення для прогнозування фазових помилок на основі резонансної частоти квадратурної корекції напруги. Як зазначається, фазова помилка демодуляції призводить до поєднання квадратурної помилки з вихідним сигналом, що призводить до погіршення продуктивності MEMS гіроскопа. Основою метода є, застосування вихідного сигналу кутової швидкості, вигляду прямокутної хвилі, до гіроскопа з автоматичним визначенням значення помилки фази демодуляції за допомогою розробленого алгоритму автоматичної ідентифікації. В рамках дослідження було проведено ряд тестів в діапазоні температур від -40 до 60 °C. Тести показали, що при нормальній температурі 25 °C, похибка зсуву гіроскопа зменшується у вісім разів, а у крайніх випадках температурного діапазону до чотирьох разів, до 0,1 °/год після компенсації під час роботи. Автори зазначають, що перевагами запропонованого методу є точна ідентифікація та компенсація фазової помилки під час роботи.

В статті [10], автори розглядають феномен високої похибки MEMS систем, що виникає через погане співвідношення сигнал/шум, та пропонують для вирішення застосувати нейронну

мережу зворотного поширення вейвлет-порогу алгоритму онлайн-компенсації. Основною ціллю алгоритму є придушення випадкової помилки масивів MEMS датчиків. Для розробки методу було створено матрицю з 10 MEMS гіроскопів. Для злиття даних масиву використовувався метод опорної матриці. Як зазначають автори компенсація випадкової похибки одного гіроскопа стала головним пріоритетом дослідження. Алгоритм запропонований ними, це гібридний алгоритм фільтрації який безпосередньо поєднує вейвлет-порогове зменшення шуму та нейронну мережу зворотного поширення. Завдяки техніці вейвлет-порогового шумозаглушення для оброблення необроблених даних вдалося успішно зменшити ступінь дискретності вихідних даних, кроку ми успішно зменшили ступінь дискретності вихідних даних, що забезпечило більш стабільну та надійну базу даних для подальшого навчання нейронної мережі. Оптимальна мережева модель була отримана шляхом багаторазового моделювання та навчання.

В статті [11], автори концентрують свою увагу на похибках MEMS резонаторів з нітриду алюмінію. Як зазначається даний тип резонаторів є одним із кандидатів на MEMS-резонатори для подолання недоліків громіздких та неінтегрованих кристалів і резонаторів на поверхневих акустичних хвилях. Також автори акцентують увагу на їх компактні розміри, низькій вартості, високій частоті, сумісності з процесами CMOS і здатності охоплювати кілька частот на одному чіпі. Використання штучної нейронної мережі для реалізації цього методу, дозволив покращити частотно-температурну стабільність в діапазоні температур від -40 до 80 °C.

Автори статті [12], зазначають, що Традиційна модель компенсації температурного дрейфу MEMS датчиків не може роз'єднати температурну залежність матеріалів на основі кремнію, оскільки температурно корельовані величини (TCQ) не були отримані всебічно, а адаптивність MEMS системи гіроскопів знижується в різноманітних, складних умовах. Авторами статті було представлено модифіковану модель компенсації MEMS гіроскопів на основі аналізу мікроструктурного теплового ефекту. Для початку, було вивчено температурну залежність матеріалів на основі кремнію, з урахуванням мікроструктури, ефекту теплового розширення та структурної деформації. Параметри модифікованої моделі було визначено на основі радикальної базової функції штучної нейронної мережі та оцінено її

продуктивність. Проведені тести показали, що стабільність зміщення MEMS-гіроскопів становила до 10% від традиційної моделі, температурна залежність матеріалів на основі кремнію була краще відокремлена модифікованим, а адаптивність MEMS-гіроскопів до навколишнього середовища була покращена для розширення їх застосування в різноманітних складних умовах.

У статті [13], було запропоновано відразу три алгоритми для боротьби з температурним дрейфом MEMS датчиків. До них входять метод з використанням рекурентної нейронної мережі з глибоким стрибком, також метод із застосуванням методу метелика монарха та його оптимізованої версії. Як зазначають автори, кожен із цих трьох алгоритмів поєднується з моделлю компенсації в реальному часі для компенсації температурного дрейфу акселерометра MEMS. Проведення експериментів підтвердило ефективність використання даних методів для компенсації температурного дрейфу акселерометрів. Також експерименти показали, що у відсотковому значенні поліпшення досягає 96,5%. Температурний дрейф акселерометра розглядають як випадковий часовий ряд, що гарно підходить для обробки рекурентною нейронною мережею, оскільки її контекстні вузли можуть запам'ятовувати попередню інформацію. Нейромережа запропонована в даній статті є різновидом звичайної рекурентної мережі, і високою швидкістю і хорошою точністю.

Авторами статті [14], Запропоновано модель температурної компенсації MEMS гіроскопа на основі нейронної мережі зворотного поширення. Як вказується в статті температурна похибка складає близько 80% від загальної помилки гіроскопа MEMS. Автори звертають увагу на нелінійності температурної похибки. Традиційні методи компенсації включають у себе застосування кусково-лінійної функції, щоб відповідати моделі помилки температури, вони можуть отримувати точні результати підгонки в точках сегментації. Але такий метод не може давати ефективних результатів компенсації в інших точках. Саме це сприяло вибору нейронної мережі зворотного поширення як основу запропонованого методу. Через її потужну здатність обробляти нелінійні моделі. Результатом цього дослідження стало створення моделі температурної похибки MEMS гіроскопа на основі нейромережі зворотного поширення, та підтвердження її ефективності в порівнянні з класичними методами.

В статті [15], проаналізовано ефект повзучості та тепловий ефект, притаманний кварцевим

MEMS акселерометрам. Авторами даної статті пропонується нова температурна модель кварцевого акселерометра на основі нелінійної авторегресії із зовнішнім виходом та вдосконаленим вейвлет-перетворенням. Також метод сприяє вирішенню проблеми затримки спричиненої тепловим ефектом. Вказується, що помилка повзання, що спричиняє несправність деформації структури акселерометра відокремлена від загальних похибок і лише теплова похибка, вплив якої є сильно залежним від температури компенсується запропонованою моделлю. Ще дві температурні моделі було встановлено як моделі порівняння для перевірки ефективності запропонованого методу компенсації. Проведені експерименти показують, що ефективність запропонованого методу є найкращою серед порівняльних моделей.

В [16], авторами запропоновано три алгоритми для компенсації дрейфу MEMS акселерометра, спричиненого дією температури. Вони включають в себе алгоритм заснований на застосуванні рекурентної нейронної мережі глибокої довготривалої та короткотривалої пам'яті. Також метод на основі алгоритму пошуку горобця, та його вдосконаленої версії. Поміж того, для порівняння ефективності запропонованих методів досліджується метод заснований на кусково-лінійній апроксимації. Дослідження запропонованих методів, починається з проведення температурного експерименту. Далі з отриманих даних формується модель похибки заснована на вище перелічених інструментах. Як висновок, автори зазначають, що всі три методи дали значно кращі результати в порівнянні з класичним методом заснованим на використанні кусково-ліній-

ної апроксимації. Найкращим із запропонованих виявився метод на основі рекурентної нейронної мережі глибокої довготривалої та короткотривалої пам'яті з додаванням алгоритму пошуку горобця. Він дозволив покращити показники MEMS акселерометра, в середньому, на 96,68%.

Висновки. В даній статті було розглянуто сучасні методи підвищення точності мікроелектромеханічних датчиків в інерційних системах навігації. Розглянуті методи були вибрані, тому що містять в собі застосування нейронних мереж та методів машинного навчання для вирішення проблеми компенсації похибок викликаних в основному зміною температури в діапазоні від -40 до 80 °C та іншими додатковими чинниками. Дані методи досліджують не тільки компенсацію похибок окремого датчика, та збільшення його точності, а й компенсацію похибок системи датчиків, такі як тріади акселерометрів та гіроскопів, що використовуються в інерційних навігаційних блоках. Після розгляду обраних методів стало зрозуміло, що тематика підвищення точності MEMS датчиків, за допомогою нейромереж та методів машинного навчання є актуальною. Також стало зрозуміло, що такі методи здатні забезпечити значне покращення точності датчиків датчиків в порівнянні з класичними методами, до яких входять методи засновані на побудові моделі температурної похибки за допомогою різних математичних функцій, включаючи кусково-лінійну апроксимацію, апроксимацію поліномом та інше. В порівнянні з класичними методами, методи розглянуті в даній статті давали покращення точності MEMS датчиків до 96,68%.

Список літератури:

1. Sohn H., Wang M. L., Lynch J. P. Sensor technologies for civil infrastructures : volume 1: sensing hardware and data collection methods for performance assessment. Woodhead Publishing, 2022. 825 p.
2. A micro oven-control system for inertial sensors / D. Yang et al. *Journal of microelectromechanical systems*. 2017. Vol. 26. No. 3. P. 507–518. URL: <https://doi.org/10.1109/jmems.2017.2692770> (date of access: 09.04.2025).
3. Shi Qiang Liu, Rong Zhu, Heng Gao Ding. A temperature compensation method for micromachined thermal gas gyroscope. *2015 IEEE Sensors*, Busan, 1–4 November 2015. 2015. URL: <https://doi.org/10.1109/icsens.2015.7370336> (date of access: 09.04.2025).
4. Feng Y., Li X., Zhang X. An adaptive compensation algorithm for temperature drift of micro-electro-mechanical systems gyroscopes using a strong tracking kalman filter. *Sensors*. 2015. Vol. 15. No. 5. P. 11222–11238. URL: <https://doi.org/10.3390/s150511222> (date of access: 09.04.2025).
5. Zhang Q., Tan Z., Guo L. Compensation of temperature drift of MEMS gyroscope using BP neural network. *2009 international conference on information engineering and computer science*, Wuhan, China, 19–20 December 2009. 2009. URL: <https://doi.org/10.1109/iciecs.2009.5365140> (date of access: 09.04.2025).
6. Neural networks based surrogate modeling for efficient uncertainty quantification and calibration of MEMS accelerometers / F. Zacchei et al. *International journal of non-linear mechanics*. 2024. P. 104902. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2024.104902> (date of access: 09.04.2025).

7. Araghi G., Landry R. J. Temperature compensation model of MEMS inertial sensors based on neural network. *2018 IEEE/ION position, location and navigation symposium (PLANS)*, Monterey, CA, 23–26 April 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/plans.2018.8373395> (date of access: 09.04.2025).
8. A MEMS IMU de-noising method using long short term memory recurrent neural networks (LSTM-RNN) / C. Jiang et al. *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 10. P. 3470. URL: <https://doi.org/10.3390/s18103470> (date of access: 09.04.2025).
9. An in-run automatic demodulation phase error compensation method for MEMS gyroscope in full temperature range / J. Wang et al. *Micromachines*. 2024. Vol. 15. No. 7. P. 825. URL: <https://doi.org/10.3390/mi15070825> (date of access: 09.04.2025).
10. Hybrid filtering compensation algorithm for suppressing random errors in MEMS arrays / S. Liang et al. *Micromachines*. 2024. Vol. 15. No. 5. P. 558. URL: <https://doi.org/10.3390/mi15050558> (date of access: 09.04.2025).
11. Xu C., Piazza G. Artificial neural network based digital temperature compensation method for aluminum nitride MEMS resonators. *2017 IEEE international ultrasonics symposium (IUS)*, Washington, DC, 6–9 September 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/ultsym.2017.8091532> (date of access: 09.04.2025).
12. Modification of mtea-based temperature drift error compensation model for mems-gyros / B. Qi et al. *Sensors*. 2020. Vol. 20. No. 10. P. 2906. URL: <https://doi.org/10.3390/s20102906> (date of access: 09.04.2025).
13. Real-Time temperature drift compensation method of a MEMS accelerometer based on deep GRU and optimized monarch butterfly algorithm / G. Gang-Qiang et al. *IEEE access*. 2023. Vol. 11. P. 10355–10365. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2023.3240766> (date of access: 09.04.2025).
14. Jiang F., Zhang M., Shao T. Temperature compensating model of MEMS gyro based on BP neural network. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2018. Vol. 382. P. 052034. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/382/5/052034> (date of access: 09.04.2025).
15. Temperature compensation for quartz flexible accelerometer based on nonlinear auto-regressive improved model / X. Wang et al. *Measurement and control*. 2023. P. 002029402210892. URL: <https://doi.org/10.1177/00202940221089264> (date of access: 09.04.2025).
16. Temperature drift compensation of a MEMS accelerometer based on DLSTM and ISSA / G. Guo et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 4. P. 1809. URL: <https://doi.org/10.3390/s23041809> (date of access: 09.04.2025).

Bohdan H.A., Feoklistov D.A. IMPROVING THE ACCURACY OF INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

MEMS sensors used in orientation and navigation systems are an integral part of modern technological progress. It is not obvious, but they are present in almost all areas of technology and engineering, starting from smartphones and computer technology, continuing with automated assembly lines in factories, equipment for precision processing of metal, wood, plastic and other materials, ending with drones and assistant robots.

This article was written to reveal the topic of increasing the accuracy of MEMS orientation sensors, as part of inertial navigation units, using neural networks and machine learning methods. It considers the key causes of errors in these sensors. It was described how temperature changes affect MEMS sensors in inertial navigation systems, which include gyroscopes and accelerometers.

The article considered methods for combating the temperature error of MEMS sensors. These include mechanical ones, which combat error by thermally insulating the sensor and making it from materials that are insensitive to temperature changes. The main disadvantages inherent in these methods were identified. Other methods, called temperature compensation or algorithmic compensation, were also considered. Their action is based on mathematical modeling of the error signal in order to isolate it from the general output signal of the sensor.

The main attention was paid to methods that include the use of neural network technologies and machine learning methods to build an error model. Modern research conducted in this direction was analyzed, which made it possible to determine that methods for compensating for the temperature error of MEMS sensors using neural networks can significantly improve the accuracy of these sensors compared to other methods.

Key words: MEMS, navigation systems, neural network, machine learning, error compensation.