



І. Г. Цмоць¹, В. М. Теслюк¹, Ю. В. Опотяк¹, Ю. І. Бударецький¹, А. О. Дзюба², О. О. Олійник¹

¹ Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

² Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, Україна

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ МОБІЛЬНИХ ПЛАТФОРМ ЗА УМОВИ ДІЇ ЗАВАД

Сформульовано вимоги до системи інтелектуального визначення координат мобільних платформ за умови дії завад, визначено основні етапи розроблення системи. Запропоновано розроблення системи здійснювати на базі інтегрованого підходу, який охоплює: методи нейромережевого оброблення та аналізу даних від навігаційних сенсорів; методи машинного навчання нейронних мереж; методи навігації; методи збирання та оброблення даних із давачів за умови дії завад і неповноти інформації; сучасну елементну базу. Обрано проблемно-орієнтований підхід для реалізації системи, який передбачає поєднання програмних і апаратних засобів та такі основні принципи розроблення: адаптації до змін у середовищі; системності; змінного складу обладнання; модульності; відкритості програмного забезпечення; сумісності; спеціалізації та адаптації апаратно-програмних засобів до структури алгоритмів; використання комплексу базових проектних рішень. Розроблено структуру системи, основними компонентами якої є модулі: навігаційних давачів; бездротового зв'язку та захисту даних; оброблення, аналізу та відновлення втрачених даних; нейромережевого підвищення точності вимірювання параметрів руху та визначення географічних координат; нейромережевого прогнозування географічних координат і маршруту руху; збирання та збереження даних; визначення географічних координат і управління рухом. Вдосконалено метод нейромережевого сингулярного спектрального аналізу, який за рахунок відкидання головних компонентів, що вносять шуми, забезпечив підвищення точності вимірювання параметрів руху. Показано, що використання сингулярного спектрального аналізу є доцільним у задачах підвищення точності вимірювання параметрів руху та прогнозування вихідних параметрів динамічних об'єктів. Визначено, що нейромережевий спектральний аналіз порівняно з класичними методами немає обмежень на вимірність, є швидким, неітеративним і не нагромаджує похибки.

Ключові слова: мобільна платформа; координати об'єкта; нейромережеві методи; вимірювання параметрів руху; дія завад; структура інтелектуальної системи.

Вступ / Introduction

Широке застосування різноманітних мобільних платформ (МП) з урахуванням їх функціонування за умови дії засобів радіоелектронної боротьби, дії завад роботі систем супутникової навігації та неповноти інформації вимагає розроблення бортових радіоелектронних засобів вимірювання параметрів руху та визначення просторової орієнтації МП, які одночасно забезпечують вимоги конкретних застосувань щодо масо-габарит-

них параметрів, енергоспоживання та вартості.

Ефективне створення таких засобів можливе з використанням інтегрованого та проблемно-орієнтованого підходів. Інтегрований підхід охоплює радіотехнічні методи вимірювання, нейромережі на підставі парадигми послідовних геометричних перетворень, методи навігації, методи інтелектуального попереднього оброблення даних давачів, нейромережеві методи прогнозування та відновлення втрачених даних, сучасну елемен-

Інформація про авторів:

Цмоць Іван Григорович, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: ivan.h.tsmots@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-4033-8618>

Теслюк Василь Миколайович, д-р техн. наук, професор, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: vasyl.m.teslyuk@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-5974-9310>

Опотяк Юрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизованих систем управління.

Email: yurii.v.opotyak@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-9889-4177>

Бударецький Юрій Іванович, канд. техн. наук, ст. наук. співроб., кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювання.

Email: yurii.i.budaretskyi@lpnu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-8882-0374>

Дзюба Артем Олексійович, начальник факультету ракетних військ і артилерії. Email: artem.dzuba@icloud.com

Олійник Олександр Олександрович, аспірант, кафедра автоматизованих систем управління. Email: oleksandr.o.oliinyk@lpnu.ua

Цитування за ДСТУ: Цмоць І. Г., Теслюк В. М., Опотяк Ю. В., Бударецький Ю. І., Дзюба А. О., Олійник О. О. Методи та засоби визначення координат мобільних платформ за умови дії завад. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 2. С. 69–77.

Citation APA: Tsmots, I. H., Teslyuk, V. M., Opotyak, Yu. V., Budaretskyi, Yu. I., Dzuba, A. O., & Oliinyk, O. O. (2024). Methods and means for determining mobile platforms coordinates in the conditions of interference. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(2), 69–77.

<https://doi.org/10.36930/40340209>

тну базу. Проблемно-орієнтований підхід передбачає реалізацію вказаних засобів на базі універсальних процесорних ядер, доповнених спеціалізованими апаратно-програмними компонентами. Використання інтегрованого та проблемно-орієнтованого підходів для реалізації інтелектуальних бортових засобів вимірювання параметрів руху наземних МП забезпечить високі техніко-експлуатаційні характеристики та функціонування у реальному часі.

Сьогодні у військовій галузі для транспортування озброєння, проведення розвідки, виконання спеціальних військових і пошуково-рятувальних операцій, забезпечення виконання задач логістики актуальною проблемою є підвищення точності визначення просторової орієнтації МП у реальному часі під час пересування бетонними, асфальтованими, гравійними, ґрунтовими дорогами та по бездоріжжю.

Особливістю сучасного стану військових операцій є їх ведення за умови дії засобів радіоелектронної боротьби, дії завад роботі систем супутникової навігації та неповноти інформації. Вирішенню цієї проблеми може допомогти розроблення методів та засобів підвищення точності вимірювання відстаней і геопросторової орієнтації за допомогою інтелектуальних радіолокаційних, навігаційних, магнітно-індукційних і механічних давачів, що реалізують методи сингулярного спектрального аналізу та розпізнавання відбитих зондуючих сигналів. Особливістю вимірювання параметрів руху у цьому випадку є необхідність врахування поверхні покриття під час пересування дорогами та по бездоріжжю.

Основною ідеєю пропонованого підходу до побудови бортових радіоелектронних засобів вимірювання параметрів руху та визначення просторової орієнтації наземних МП у реальному часі за умови завад, неповної інформації та динамічної зміни ситуації є використання інтегрованого підходу, який охоплює методи радіолокації, навігації, методи інтелектуального попереднього оброблення даних і розпізнавання відбитих від земної поверхні зондуючих сигналів.

Для реалізації обчислювальних процедур пропонуємо використати проблемно-орієнтований підхід, який передбачає використання універсальних процесорних ядер, доповнених спеціалізованими апаратно-програмними засобами, що реалізуються на сучасній елементній базі та забезпечують роботу у реальному часі.

Розглянуті засоби інтелектуального вимірювання параметрів руху наземних робототехнічних платформ можна використати для підтримки роботи систем автономної навігації МП. Тому актуальним завданням є розроблення інтелектуальної системи та відповідних методів підвищення точності вимірювання параметрів руху наземних МП.

Об'єкт дослідження – визначення координат мобільних платформ за умови дії завад.

Предмет дослідження – моделі, методи та структури систем інтелектуального визначення координат мобільних платформ, що дасть змогу підвищити точність вимірювання параметрів їх руху.

Мета роботи – вдосконалення методів інтелектуального уточнення географічних координат мобільних платформ за умови дії завад з використанням параметрів їх руху.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- формування вимог до системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад;
- вибір підходів та принципів розроблення системи;
- розроблення структури системи;
- вдосконалення методу нейромережевого спектрального аналізу для підвищення точності параметрів руху.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як показує аналіз, сьогодні активно здійснюються дослідження в області розроблення бортових радіоелектронних засобів вимірювання параметрів руху та визначення просторової орієнтації МП у реальному часі.

Методи та засоби інтелектуального вимірювання параметрів руху мобільних платформ розглянуто у працях [5, 11, 18]. Розглянуті методи чутливі до змін умов оточення, таких як погода, освітлення або характер поверхні.

Методи визначення координат та підвищення їх точності для рухомих наземних об'єктів висвітлено у роботах [6, 7, 27]. Такі методи є складними у розгортанні, використанні та потребують великих зусиль для їх налагодження. Дослідження та розроблення методів орієнтації мобільних робототехнічних систем в навколишньому середовищі [13, 20, 26] показує, що особливістю таких методів є неточне визначення координат за рахунок нагромадження похибок.

У роботах [9, 14, 28] розглянуто питання планування шляху та встановлення методів контролю за уникненням перешкод. Розглянуті у цих роботах алгоритми планування маршруту є недосконалими, оскільки ці алгоритми не завжди обирають оптимальний шлях руху.

Використання нейронних мереж для задач оброблення просторових даних розглянуто в роботах [3, 12, 19]. Недоліком використання нейронних мереж є те, що вони потребують великої кількості даних для тренування та значної обчислювальної потужності.

Проте, як показує аналіз робіт [15, 17, 23], потребують подальшого вдосконалення методи та відповідні засоби визначення координат МП, особливо за умови дії завад та неповноти даних, що побудовані з використанням сучасних інформаційних технологій. З аналізу публікацій [8, 22] випливає необхідність пошуку методів та засобів для реалізації вимірювання параметрів руху наземних МП з урахуванням вимог та обмежень щодо конкретних техніко-експлуатаційних характеристик. При цьому, використання додаткової інформації щодо параметрів руху МП дасть змогу уточнювати її географічні координати у процесі пересування за умови дії завад.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Формулювання вимог до системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад. Основними вимогами, які висувуються до системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад є забезпечення:

- високої точності вимірювань параметрів руху, таких як швидкість, пришвидшення, кутова швидкість і прогнозування географічних координат для досягнення цілі, правильного руху та уникнення зіткнень;
- стійкості до зміни погодних умов, нерівності місцевості та інші чинників, які впливають на точність вимірювань;
- адаптації до змін в середовищі та за умови використання;
- високої частоти збирання даних з інтелектуальних навігаційних давачів;
- калібрування сенсорів і засобів вимірювання параметрів руху МП;

- інтеграції з сучасними супутниковими системами (GPS) для отримання точних географічних координат;
- вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП в реальному часі з використанням нейронних мереж;
- коригування параметрів вимірювання та прогнозування в режимі реального часу на підставі змін в навколишньому середовищі;
- уникнення небезпечних ситуацій (зіткнення з перешкодами чи іншими МП, збоїв у сенсорах чи навігаційних системах);
- підтримання зв'язку з іншими МП та операторами для корегування траєкторії руху в режимі реального часу;
- управління споживанням енергії сенсорами та іншими компонентами системи;
- високих техніко-експлуатаційних характеристик системи;
- захисту від можливих атак, які впливають на вимірювання, рух і прогнозування географічних координат МП;
- захисту конфіденційності географічних даних;
- гнучкості та масштабованості з можливістю інтеграції додаткових сенсорів і функціональних блоків;
- можливості працювати в різних масштабах, від невеликих просторів до великих територій;
- сумісності роботи з різними типами МП.

Розроблення системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад потребує широкого використання сучасної елементної бази (мікроконтролерів, систем на кристалі, програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) тощо), розроблення нових методів і алгоритмів з використанням нейронних мереж для вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат.

Вимірювання та корегування параметрів руху, прогнозування географічних координат МП у режимі реального часу на підставі змін в навколишньому середовищі накладає обмеження на тривалість вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат $t_{ВПК}$, який не повинен перевищувати час, відведений на реакцію на зміни t_{P3} , тобто:

$$t_{ВПК} \leq t_{P3}. \quad (1)$$

Під час розроблення системи інтелектуального вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП необхідно мінімізувати апаратні затрати на її розроблення та забезпечити роботу в реальному часі. Для оцінювання розробленої системи пропонуємо використати критерій ефективності використання обладнання $E_{СВП}$, який зв'язує тривалість вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат з витратами обладнання і дає оцінку елементам системи за продуктивністю. Кількісно величина ефективності використання обладнання $E_{СВП}$ визначають так:

$$E_{СВП} = \frac{R_{СВП}}{t_{ВПК} W_{СВП}}, \quad (2)$$

де: $R_{СВП}$ – складність алгоритмів вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат; $t_{ВПК}$ – тривалість вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат; $W_{СВП}$ – апаратні витрати на реалізацію системи інтелектуального вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат.

Вихідною інформацією для розроблення системи інтелектуального вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП є:

- маса та габарити МП;
- перелік вимірювальних параметрів руху – швидкості руху, пришвидшення, кутової швидкості, пройденого шляху, географічних координат МП;

- інформація про середовище руху МП (план місцевості, перешкоди, місця розташування маркерів або інших об'єктів, з якими МП може взаємодіяти);
- дані про взаємодію МП з операторами для корегування траєкторії руху в режимі реального часу;
- інформація про типи та кількість сенсорів, що використовують вимірювання параметрів руху МП;
- тип GPS модуля для отримання точних географічних координат;
- частота збирання даних з інтелектуальних навігаційних дачачів;
- частота та точність вимірювання параметрів руху МП;
- частота та точність визначення географічних координат;
- період, на який здійснюють прогнозування (передбачення) майбутнього положення МП на підставі його попередніх рухових патернів (англ. Pattern);
- нейромережеві алгоритми підвищення точності вимірювання параметрів руху та географічних координат;
- нейромережеві алгоритми прогнозування (передбачення) майбутнього положення МП;
- величини масивів вхідних даних N;
- інтенсивності вхідних потоків даних;
- вимоги до зовнішніх інтерфейсів системи інтелектуального вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП;
- розрядність вхідних даних і необхідна точність обчислень;
- технічні вимоги до апаратних засобів, такі як обсяг пам'яті, швидкість оброблення даних, розміри та маса пристроїв, енергоефективність тощо.

Процес розроблення системи інтелектуального вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП охоплює такі основні етапи:

1. Аналіз вимог до системи: на цьому етапі визначають вимоги до характеристик системи, такі як швидкість оброблення даних, перелік параметрів руху, точність вимірювання, кількість і типи навігаційних сенсорів. Також на цьому етапі визначають функції системи та її можливості.
2. Проектування апаратних засобів: на цьому етапі визначають основні характеристики апаратних засобів системи, такі як тип мікроконтролерів, кількість і типи сенсорів, тип модуля GPS, внутрішньо системні інтерфейси, засоби збирання та збереження, бездротові інтерфейси зв'язку з оператором та інших елементів.
3. Розроблення нейромережевих алгоритмів підвищення точності вимірювань і прогнозування географічних координат МП: на цьому етапі розробляють алгоритм, який враховує параметри МП та особливості місцевості пересування. Для розроблення алгоритмів підвищення точності вимірювань і прогнозування географічних координат МП пропонуємо використати нейромережі на підставі парадигми моделі послідовних геометричних перетворень (МГП).
4. Розроблення програмного забезпечення: на цьому етапі розробляють програмне забезпечення для реалізації алгоритмів підвищення точності вимірювань і прогнозування географічних координат МП. Програмне забезпечення повинно забезпечувати взаємодію з сенсорами, модулем GPS, виконувати збір даних, вимірювання параметрів руху і прогнозування географічних координат МП.
5. Тестування та налаштування: на цьому етапі перевіряється робота системи інтелектуального вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП за умови, близьких до реальних. Після тестування система налаштовується на вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат з підвищеною точністю.
6. Впровадження та експлуатація: на цьому етапі система нейронного управління запроваджується у роботу та виконують її експлуатацію.

Вибір підходів та принципів розроблення системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад. Розроблення системи пропонуємо здійснювати на базі інтегрованого підходу, який охоплює:

- методи нейромережевого оброблення та аналізу даних від сенсорів та модуля GPS;
- методи машинного навчання нейронних мереж;
- методи нейромережевого прогнозування руху та просторових координат на підставі історичних даних;
- методи сингулярного спектрального аналізу для підвищення точності вимірювання параметрів руху;
- методи навігації, методи попереднього оброблення та розпізнавання зображень;
- методи збирання та оброблення даних із давачів за умови дії завад і неповноти інформації;
- сучасну елементну базу (мікроконтролери, системи на кристалі, ПЛІС тощо);
- методи та засоби автоматизованого проектування апаратних і програмних засобів МП.

Реалізацію системи пропонуємо виконувати на підставі проблемно-орієнтованого підходу, який передбачає поєднання програмних і апаратних засобів. Процес взаємопроникнення програмних (універсальних) і апаратних (спеціалізованих) засобів забезпечує високу ефективність використання обладнання.

Розроблення системи пропонуємо здійснювати за такими принципами:

- об'єднання даних з різних джерел, таких як глобальні системи навігації GNSS (англ. *Global Navigation Satellite System*), сенсорів руху, магнітометрів, що забезпечить підвищення точності вимірювань та стійкості до впливу зовнішніх чинників;
- інтеграції з картографічними сервісами, що забезпечить отримання додаткової інформації про маршрути, дороги та інше;
- корекції помилок для підвищення точності вимірювань географічних координат;
- адаптації до змін у середовищі руху МП;

- взаємодії, за якого МП повинна мати змогу передавати інформацію про географічні координати, а також отримувати команди від оператора;
- системності, за якого між компонентами системи утворюються такі зв'язки, які забезпечують взаємодію, ефективне вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП;
- змінного складу обладнання, що передбачає наявність ядра системи та змінних модулів (компонентів), за допомогою яких ядро адаптується до вимог конкретного застосування;
- модульності, який передбачає розроблення компонентів системи у вигляді функціонально завершених модулів, що мають вихід на стандартний інтерфейс;
- відкритості програмного забезпечення, що передбачає можливість нарощування та його вдосконалення, максимального використання стандартних драйверів та програмних засобів;
- сумісності, що передбачає використання під час розроблення компонентів інформаційно-технологічних інтерфейсів, завдяки яким компоненти можуть взаємодіяти між собою;
- спеціалізації та адаптації апаратно-програмних засобів до структури алгоритмів вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП;
- використання комплексу базових проектних рішень.

Розроблення структури системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад.

Метою розроблення є створення інтелектуальної системи, яка забезпечить точне вимірювання параметрів руху, прогнозування географічних координат, ефективну взаємодію з навколишнім середовищем і оптимальне управління рухом МП за умови дії завад. Для реалізації таких вимог інтелектуальна система повинна мати змінний склад обладнання, що передбачає наявність ядра системи та набору змінних модулів (компонентів), за допомогою яких ядро адаптується до вимог конкретного застосування.

Розроблено структуру системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад, яку наведено на рис. 1.



Рис. 1. Структура системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад / Structure of the system of intelligent determination of the coordinates of the MP in the conditions of interference

Основними компонентами системи є набір навігаційних давачів і таких модулів: бездротового зв'язку та захисту даних; оброблення, аналізу та відновлення втрачених даних; нейромережевого підвищення точності вимірювання параметрів руху; нейромережевого підвищення точності визначення географічних координат; нейромережевого прогнозування географічних координат і маршруту руху МП; збирання та збереження даних; визначення географічних координат і управління рухом МП.

Модуль бездротового зв'язку та захисту даних забезпечує передачу зашифрованих даних між МП і командним пунктом. Передачу зашифрованих даних виконують переважно з використанням стандартів бездротового зв'язку, таких як LoRa або спеціалізованих.

Модуль збирання та збереження даних забезпечує збір і збереження даних від навігаційних давачів і збереження результатів оброблення та прогнозування від модулів системи з заданою частотою. Такий модуль реалізують на підставі багатопортової пам'яті (БПП) з безконфліктним доступом до запам'ятовуючого середовища. Для забезпечення безконфліктного доступу використовують принцип часового розподілу часу доступу до запам'ятовуючого середовища між компонентами системи (навігаційними давачами, модулями: бездротового зв'язку та захисту даних; оброблення, аналізу та відновлення втрачених даних; нейромережевого підвищення точності вимірювання параметрів руху; нейромережевого підвищення точності визначення географічних координат; нейромережевого прогнозування географічних координат МП; управління рухом МП), які під'єднують до модуля збирання даних.

Модуль оброблення, аналізу та відновлення втрачених даних забезпечує оброблення, аналіз і відновлення втрачених даних, що надходять від навігаційних давачів, які працюють за умови завад.

Модуль нейромережевого підвищення точності вимірювання параметрів руху МП використовує сингулярний спектральний аналіз, який ґрунтується на дослідженні часового ряду методом головних компонент для підвищення точності вимірювання параметрів у реальному часі. Вимірювання параметрів руху МП виконують щонайменше раз на секунду.

Модуль нейромережевого підвищення точності вимірювання географічних координат від GPS використовує сингулярний спектральний аналіз для підвищення точності вимірювання у реальному часі. Вимірювання географічних координат з допомогою GPS виконують щонайменше раз на секунду.

Модуль нейромережевого прогнозування географічних координат маршруту руху МП забезпечує прогнозування географічних координат на час дії завад. Модуль порівнює прогнозовані координати з реальними координатами та на підставі порівняння здійснює коригування процесу прогнозування. Цей модуль на підставі даних про стан навколишнього середовища та координат цілі прогнозує маршрут руху МП.

Модуль визначення географічних координат і управління рухом МП забезпечує визначення координат як з допомогою GPS, так і з допомогою навігаційних давачів. У модулі виконують порівняння координат, отриманих від GPS та навігаційних давачів і на їхній основі здійснюють коригування координат, отриманих на підставі оброблення даних від навігаційних давачів. Да-

ний модуль забезпечує рух МП до цілі за заданим маршрутом і у разі зміни стану навколишнього середовища корегує маршрут.

Удосконалення методу нейромережевого спектрального аналізу для підвищення точності параметрів руху. Для підвищення точності вимірювання параметрів руху та географічних координат обираємо метод нейромережевого спектрального аналізу. Цей метод доцільно застосовувати для оцінювання параметрів динамічних об'єктів за умови завад та неповної інформації. Як динамічний об'єкт розглянуто давачі відстані, які широко застосовують в багатьох системах, зокрема вони є незалежними компонентами МП. У робототехнічних системах можна використовувати ультразвукові, лазерні та інші типи давачів відстані, які відрізняються точністю вимірювання. Зважаючи на завади, які зумовлені як конструкцією самого давача, так і впливом зовнішнього середовища, у роботі давачів відстані виникають певні шуми, які зменшують точність вимірювання. Пропонуємо для збільшення точності вимірювання давачів відстані виявляти та видаляти шуми у вихідному сигналі за допомогою нейромережевого спектрального аналізу.

Для вимірювання відстані в МП, яка розроблена для дистанційного дослідження об'єктів, використовують ультразвуковий давач, який має такі параметри: максимальна відстань виявлення перешкоди – 2 м, діаграма спрямованості – 30°, похибка вимірювання – 2%.

Вхідні дані (виміри) для нейромережевого спектрального аналізу було отримано з давача, який закріплений на нерухомій платформі, до рухомої перешкоди. Для оцінювання даних з давача було отримано 934 пари значень, де перший елемент пари – відстань, виміряна давачем, а другий – дійсна відстань. З давача отримуємо значення часу проходження ультразвукового сигналу, яке переводять у відстань шляхом ділення на заданий коефіцієнт. Дані з давача наведено на рис. 2, де по осі x – номери вимірів, а по осі y – виміряні значення. При цьому середньоквадратична похибка виміряних даних, порівняно з дійсними, становить 1,96%.

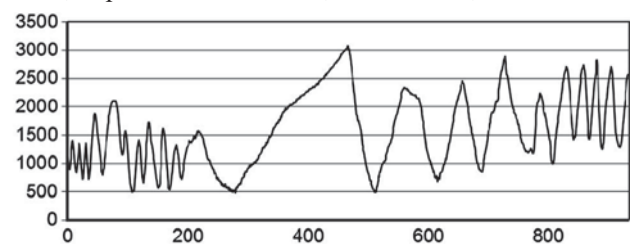


Рис. 2. Графік даних з давача відстані / Distance sensor data graph

В основі системи для підвищення точності вимірювання давачів відстані лежить базова структура мережі на підставі МГП в автоасоціативному режимі її застосування, для якої експериментальним шляхом визначають розмір вікна L , тобто, кількість головних компонент, на які буде розкладатися сигнал (рис. 3).

Вибір розміру вікна здійснюють так, щоб забезпечити найкращі результати підвищення точності. Експериментально (шляхом порівняння результатів обчислення при різних розмірах вікна) було визначено, що найкращі результати мережа забезпечує за величини вікна десять, тобто, коли вхідний сигнал розкладається на десять головних компонент. При цьому нейромережа МГП, яка реалізує спектральний аналіз для підвищення точності вимірювання, буде складатися з трьох шарів, кожен з яких містить десять нейронних елементів.

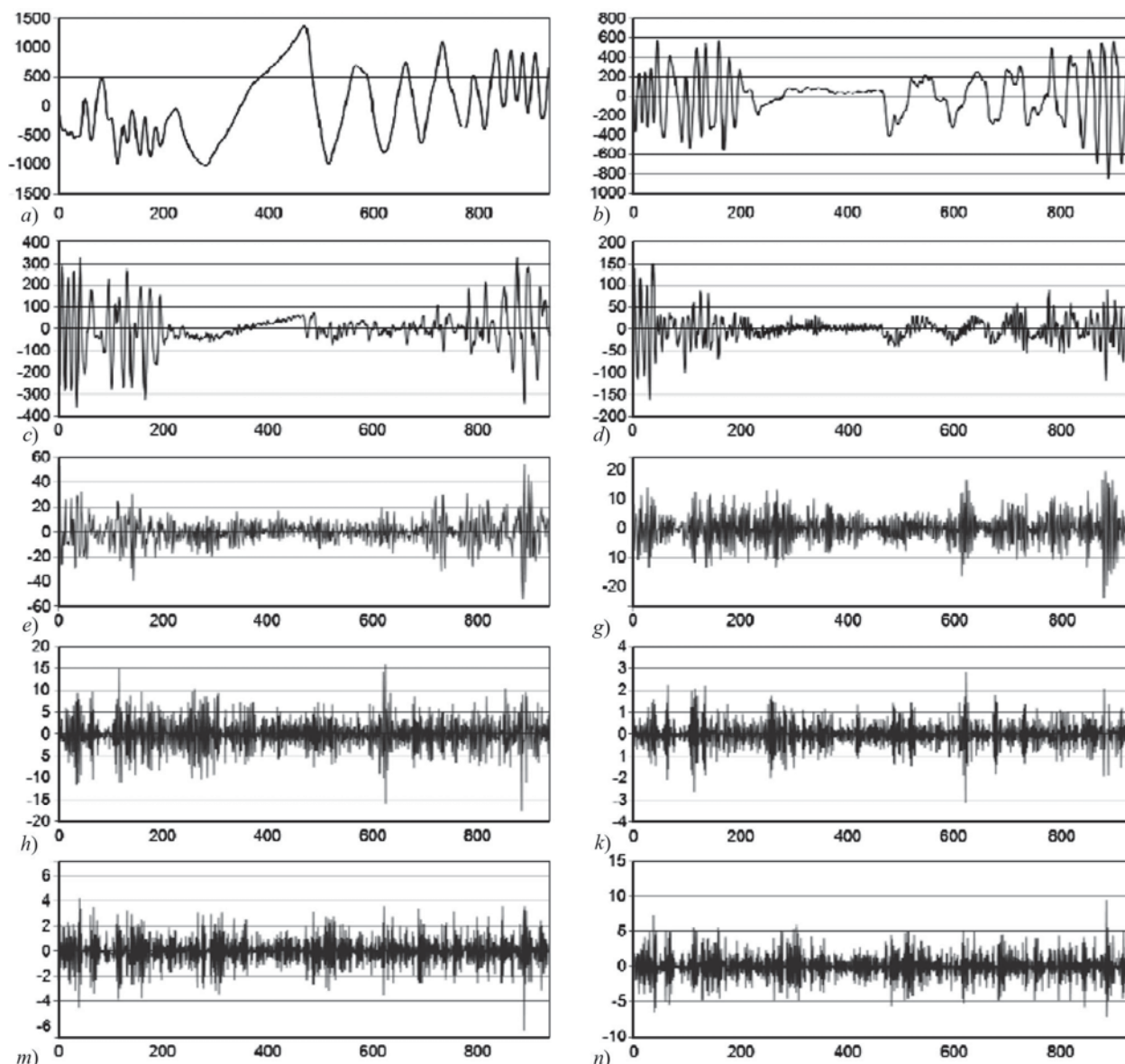


Рис. 3. Графіки десяти головних компонент сигналу з давача відстані / Graphs of the ten main signal components from the distance sensor

Шляхом подання на вхід розробленої нейромережі даних з давача відстані (див. рис. 2) отримують десять головних компонентів вхідного сигналу, графіки яких подано на рис. 3. Порівняння отриманих головних компонентів з початковими даними (див. рис. 2) показує, що перший елемент майже повторює форму вхідного сигналу (тобто, він є трендом), а наступні компоненти дедалі менше на нього подібні. Останні головні компоненти, швидше за все, є звичайним шумом.

Значення відстані, отримане з давача, є сумою значень всіх десяти головних компонентів та певної константи. Цю константу обчислюють під час навчання нейромережі, а значення всіх головних компонентів є відхиленням більше або менше у бік від цієї константи.

Насамкінець, підвищуємо точність вимірюваних даних шляхом відкидання з початкового сигналу тих головних компонентів, які є шумом і не несуть корисної інформації. Для цього потрібно від значення початкового сигналу віднімати значення головних компонент, починаючи з останнього, і аналізувати, за якого значення похибка вимірюваних даних відносно дійсного значення є мінімальною. Обчислені значення середньоквадратичних похибок вимірювання наведено у таблиці. За результатами цієї таблиці можна однозначно зробити висновок,

що корисну інформацію несуть тільки перші три головні компоненти. Отже, за допомогою використання нейромережевого спектрального аналізу вдалося зменшити похибку вимірювання відстаней, отриманих з ультразвукового давача, з 1,96 до 0,79 %.

Таблиця. Середньоквадратична похибка вимірюваних відстаней у разі врахування різної кількості головних компонент / Root mean square error of measured distances considering different number of principal components

Кількість врахованих ГК	Похибка відносно реальних даних, %
10	1,96
9	1,95
8	1,95
7	1,95
6	1,93
5	1,87
4	1,77
3	0,79
2	4,89
1	15,22

Використання сингулярного спектрального аналізу є доцільним у задачах оцінювання та прогнозування вихідних параметрів динамічних об'єктів, особливо у випадку, коли невідомим є кількість та співвідношення

впливу вхідних параметрів на систему. Нейромережевий спектральний аналіз має низку переваг порівняно з класичними методами: він є швидким, неітеративним, без нагромадження похибок і помітних обмежень на вимірність.

Обговорення результатів дослідження. Порівняння вдосконаленого методу нейромережевого сингулярного спектрального аналізу [24] з класичними методами підвищення точності вимірювання [10, 16] параметрів руху МП показує, що вдосконалений метод є неітеративним, має більшу швидкість і не нагромаджує похибки. Для збільшення точності вимірювання географічних координат МП на підставі вимірювання параметрів її руху доцільно постійно порівнювати їх з координатами, отриманими від систем геопозиціонування та здійснювати їх коригування на величину похибки [1]. Точність визначення географічних координат за умови дії завад системам геопозиціонування може бути підвищена за рахунок коригування (і зменшення похибки) шляхом врахування додаткових даних [25] від сенсорів переміщення МП.

У роботі [21] наведено особливості оцінювання параметрів руху БПЛА на підставі вимірювань TDOA мережі давачів за наявності аномальних вимірювань. Автори вважають, що стрімкий розвиток технологій БПЛА та широкий доступ до них різноманітних споживачів породжують новий клас загроз. Для їх нейтралізації створюються комплексні системи захисту БПЛА, до складу яких входять пасивні та активні системи вимірювання. Як пасивну систему використовують бездротову сенсорну мережу, що дає змогу з високою точністю визначати місцезнаходження БПЛА на підставі вимірювань TDOA (англ. *Time Difference of Arrival*). Проте в реальних умовах можуть виникати ненормальні (грубі) результати вимірювань, які призводять до розбіжності алгоритмів фільтрації Калмана для параметрів руху БПЛА. На підставі математичного апарату змішаних марковських процесів у дискретному часі розроблено квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на підставі TDOA-вимірювання сенсорної мережі за наявності аномальних похибок вимірювань. Аналіз ефективності отриманого алгоритму та його порівняння з алгоритмом фільтрації Калмана виконано за допомогою статистичного моделювання.

У роботі [4] розглянуто особливості розпізнавання та локалізація об'єктів для завдання "вибери та розмісти" (Pick and Place) за допомогою примітивів динамічного руху на підставі відмінностей. Автори розробили структуру для тривимірного (3D) розпізнавання об'єктів, локалізації та антропоморфних маніпуляцій за допомогою YOLOv5, двох недорогих веб-камер і маніпулятора Franka Emika (FE) Panda. Автономні завдання вибору та розміщення виконують у спосіб, подібний до людини, за допомогою контролю імпедансу та планування траєкторії на підставі нових примітивів динамічного руху DMP (англ. *Dynamic Movement Primitives*). Високоточна система бачення розроблена з двома веб-камерами з використанням трикутного зв'язку для визначення положення об'єкта. Алгоритм DMP на підставі відмінностей і план виконання завдання використовують для вивчення унікальних траєкторій для різних об'єктів на підставі демонстрації людиною та координат об'єкта. Завдяки об'єднанню цих компонент успішно викону-

ються експериментальні дослідження завдань "вибери та розмісти" для двох різних об'єктів.

У роботі [2] проаналізовано вбудовану FPGA (англ. *Field-Programmable Gate Array*) швидку оцінку координат точкового об'єкта для лінійного ІЧ-давача. Автори описують відносно простий алгоритм і особливості його реалізацію у бортовому апаратному забезпеченні на підставі FPGA для швидкого обчислення оцінок координат точкового джерела в зображенні, сформованому вбудованим ІЧ-давачем. Алгоритм заснований на ітераційному методі найменших квадратів, використовує модель, яка описує випадки, коли пляма поміщена як на три, так і на два квадрати, невелику кількість вибірок для імпульсів каналу, зрушень напруги та корельованого білого шуму для кожного фотоелемента. Дослідження містить результати моделювання та опис апаратного забезпечення на підставі CPLD (англ. *Complex Programmable Logic Device*), яке дає змогу замінити рутинне оброблення всього зображення.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вдосконалено метод нейромережевого сингулярного спектрального аналізу, який за рахунок відкидання головних компонент, що вносять шуми, забезпечує підвищення точності вимірювання параметрів руху мобільних платформ та на їх підставі виконують уточнення координат за умови дії завад.

Практична значущість результатів дослідження – використання даних з інтелектуальних радіолокаційних, навігаційних, магнітно-індукційних і механічних давачів руху МП та вдосконаленого методу сингулярного спектрального аналізу забезпечує коригування просторових координат МП за умови дії завад системами геопозиціонування.

Висновки / Conclusions

Сформульовано вимоги, запропоновано використання інтегрованого та проблемно-орієнтованого підходів, вибрано принципи реалізації системи, вдосконалено метод нейромережевого сингулярного спектрального аналізу для підвищення точності вимірювання параметрів руху і визначення координат МП за умови дії засобів радіоелектронної боротьби та створення завад роботі систем супутникової навігації.

Розроблена система забезпечує підвищення точності геопросторової орієнтації за умови дії завад за рахунок використання додаткової інформації (параметрів руху МП), яка надходить з інтелектуальних радіолокаційних, навігаційних, магнітно-індукційних і механічних давачів та використання методу сингулярного спектрального аналізу.

Визначено, що основними вимогами, які ставлять до системи інтелектуального визначення координат МП за умови дії завад, є забезпечення високої точності вимірювань параметрів руху, адаптації до змін в середовищі та за умови використання, збирання даних з інтелектуальних навігаційних давачів у реальному часі, інтеграції з сучасними супутниковими системами визначення географічних координат, вимірювання параметрів руху та прогнозування географічних координат МП в реальному часі, уникнення небезпечних ситуацій, високих техніко-експлуатаційних характеристик системи.

Запропоновано розроблення системи здійснювати на базі інтегрованого підходу, який охоплює: методи нейромережевого оброблення та аналізу даних від навігаційних сенсорів; методи машинного навчання нейронних мереж; методи навігації; методи збирання та оброблення даних із давачів за умови дії завад і неповноти інформації; сучасну елементну базу.

Вибрано проблемно-орієнтований підхід для реалізації системи, який передбачає поєднання програмних і апаратних засобів та такі основні принципи розроблення: адаптації до змін у середовищі; системності; змінного складу обладнання; модульності; відкритості програмного забезпечення; сумісності; спеціалізації та адаптації апаратно-програмних засобів до структури алгоритмів; використання комплексу базових проектних рішень.

Розроблено структуру системи, основними компонентами якої є модулі: навігаційних давачів; бездротового зв'язку та захисту даних; оброблення, аналізу та відновлення втрачених даних; нейромережевого підвищення точності вимірювання параметрів руху та визначення географічних координат; нейромережевого прогнозування географічних координат і маршруту руху; збирання та збереження даних; визначення географічних координат і управління рухом.

Вдосконалено метод нейромережевого сингулярного спектрального аналізу, який за рахунок відкидання головних компонентів, що вносять шуми, забезпечив підвищення точності вимірювання параметрів руху. Показано, що використання сингулярного спектрального аналізу є доцільним у задачах підвищення точності вимірювання параметрів руху та прогнозування вихідних параметрів динамічних об'єктів. Визначено, що нейромережевий спектральний аналіз, порівняно з класичними методами, не має обмежень на вимірність, є швидким, неітеративним і не нагромаджує похибок.

References

- Andriyetskyi, B. (2018). Architecture of a neuronetwork complex for forecasting time sequences based on neuronetwork spectral analysis. *Bulletin of the Lviv State University of Life Safety*, Vol. 7, 8–12. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk/article/view/664>
- Bekhtin, Y. S., Babayan, P. V., & Strotov, V. V. (2017, June). Onboard FPGA-based fast estimation of point object coordinates for linear IR-sensor. *Microprocessors and Microsystems*, Vol. 51, 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2017.04.009>
- Bonilla, M. S. I., Pérez, D. G., Cambero, I. De J. R., & Jiménez, J. T. (2022). Training of a convolutional neural network for autonomous vehicle Driving. *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa, Mexico, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ROPEC55836.2022.10018748>
- Chen, Q., Wan, L., & Pan, Ya-Jun. (2023). Object Recognition and Localization for Pick-and-Place Task using Difference-based Dynamic Movement Primitives. *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 56, Issue 2, 10004–10009. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.865>
- Doroshenko, A., Tkachenko, R., Tsymbal, Yu., & Batiuk, D. (2017). Intelligent components of integrated automated control systems for energy systems. *Series of Computer Sciences and Information Technologies (SCSIT)*, 2017, Vol. 864, Number 1, 90–96. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jul/13748/12.pdf>
- Gao, S., Ma, K., Gao, Y., Shen, X., Yang, M., & Xu, F. (2022). A Robot Coordinate Measurement System Based on Pull Wire Sensor and Its Parameter Identification Method. *12th International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Baishan, China, 514–519. <https://doi.org/10.1109/CYBER55403.2022.9907412>
- Guo, Q., Wang, W., & Ma, C. (2021). Dynamic Parameter Identification and Collision Detection of Robot. *6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)*, Shanghai, China, 2021, 68–73. <https://doi.org/10.1109/CRC52766.2021.9620144>
- Hrytsenko, V. I., Bazhan, L. I., & Ershova, O. L. (2019). Cyber-physical system – distributed system of intelligent control. *Control Systems and Computers*, 2, 3–15. <https://doi.org/10.15407/usim.2019.02.003>
- Huang, Z., & Wei, Y. (2023). Route Planning and Control of Intelligent Robot Based on Artificial Intelligence and Virtual Simulation. *International Conference on Evolutionary Algorithms and Soft Computing Techniques (EASCT)*, Bengaluru, India, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EASCT59475.2023.10393743>
- Jędrzejewski, K. (2018). A New Method of Increasing the Measurement Accuracy in Adaptive Measurement Systems with Bank of Sensors. *International Conference on Signals and Electronic Systems (ICSES)*, Kraków, Poland, 96–101. <https://doi.org/10.1109/ICSES.2018.8507324>
- Kostov, B., & Hristov, V. (2021). Implementation of 3D measuring sensor for calibrating robot coordinate systems. *5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, Ankara, Turkey, 795–798. <https://doi.org/10.1109/ISMSIT52890.2021.9604638>
- Liu, X., Wang, L., Fan, Y., & Liang, S. (2023). Research on Map partitioning and Preprocessing Algorithms for Global Path Planning. *4th International Conference on Electronic Communication and Artificial Intelligence (ICECAI)*, Guangzhou, China, 244–250. <https://doi.org/10.1109/ICECAI58670.2023.10176863>
- Liu, Y., et al., (2022). Convolutional Neural Network Based Unmanned Ground Vehicle Control via Deep Reinforcement Learning. *4th International Conference on Control and Robotics (ICCR)*, Guangzhou, China, 2022, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICCR55715.2022.10053931>
- Lu, X., Bao, H., He, Y., Huang, J., Wang, Q., & Mai, K. (2021). Intelligent route planning model of industrial robot based on inertia moment parameter optimization. *IEEE International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI)*, Fuzhou, China, 630–634. <https://doi.org/10.1109/CEI52496.2021.9574467>
- Manon, Kok; Jeroen, D. Hol; & Thomas, B. (2017). Schön, Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation. <https://doi.org/10.1561/20000000094>
- Meilin, X., et al. (2020). Research on the Comprehensive Processing Method of Measurement Information Based on Multi-Source Sensor. *IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, China, 426–431. <https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141758>
- Mochurad, L., Hladun, Y., & Tkachenko, R. (2023). An Obstacle-Finding Approach for Autonomous Mobile Robots Using 2D LiDAR Data. *Big Data and Cognitive Computing*, 7(1), 43–48. <https://doi.org/10.3390/bdcc7010043>
- Poulet, O., Guérin, F., & Guinand, F. (2021). Experimental and Simulation Platforms for Anonymous Robots Self-Localization. *29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, PUGLIA, Italy, 949–954. <https://doi.org/10.1109/MED51440.2021.9480244>
- Rashkevich, Yu. M., Tkachenko, R. O., Tsmots, I. G., & Peleshko, D. D. (2014). Neuro-like methods, algorithms and structures of signal and image processing in real time: Monograph. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 256 p. URL: <https://vlp.com.ua/node/12514>
- Tkachenko, R., Tkachenko, P., & Izonin, I. (2017). Neural network means of artificial intelligence. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 240 p. URL: <https://vlp.com.ua/node/17380>
- Tovkach, I. O., Zhuk, S. Y., Neuimin, O. S., & Chmelov, V. O. (2020). Estimation of UAV Movement Parameters Based on TDOA Measurements of the Sensor Network in the Presence of Abnormal Measurements. *2020 IEEE 15th International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, Baishan, China, 514–519. <https://doi.org/10.1109/CYBER55403.2022.9907412>

- rence on *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 235–239. <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235430>
22. Tsmots, I. G., Opotyak, Y. V., Seneta, M. Ya., Oliynyk, Y. Yu., & Gazda, N. B. (2023). The structure and features of the main stages of testing the specialized software of the mobile robotics platform. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(5), 46–53. <https://doi.org/10.36930/40330506>
 23. Tsmots, I. G., Opotyak, Yu. V., Shtohrinets, B. V., Dzyuba, A. O., & Oliynyk, Yu. Yu. (2023). Basic structure of the neurofuzzy control system for a group of mobile robotic platforms. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 5(1), 77–85. <https://doi.org/10.23939/ujit2023.01.077>
 24. Tsmots, I., Medykovsky, M., Andriiyskyi, B., & Skorokhoda, O. (2015). Architecture of neural network complex for forecasting and analysis of time series based on the neural network spectral analysis, *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, Ukraine, 236–238. <https://doi.org/10.1109/CADSM.2015.7230844>
 25. Wang, E., Zhao, W., & Cai, M. (2013). Research on improving accuracy of GPS positioning based on particle filter. *IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Melbourne, VIC, Australia, 1167–1171. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566543>
 26. Xia, F., Li, S., & Li, H. (2021). Autonomous Obstacle Avoidance Control Strategy for Intelligent Vehicle Based on Lateral and Longitudinal Safety Distance Model. *IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology (ICE-SIT)*, Chongqing, China, 509–513. <https://doi.org/10.1109/ICESIT53460.2021.9696529>
 27. Xu, Y., Liu, P., Zhang, X., Zha, C., & Tian, Z. (2019). Formation Control and Obstacle Avoidance for Multi-agent Systems in Unknown Environment. *IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, Beijing, China, 925–930. <https://doi.org/10.1109/ICUS48101.2019.8995967>
 28. Zhao, Y., Wang, X., Wang, R., Yang, Y., & Lv, F. (2021). Path Planning for Mobile Robots Based on TPR-DDPG. *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Shenzhen, China, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IJCNN52387.2021.9533570>

I. H. Tsmots¹, V. M. Teslyuk¹, Yu. V. Opotyak¹, Yu. I. Budaretskyi¹, A. O. Dzuba², O. O. Oliynyk¹

¹ Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

² Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine

METHODS AND MEANS FOR DETERMINING MOBILE PLATFORMS COORDINATES IN THE CONDITIONS OF INTERFERENCE

The requirements for the system of intelligent determination of the coordinates of mobile platforms under the conditions of interference are formulated; the main stages of the system development are defined. It is proposed to develop the system on the basis of an integrated approach, which includes as follows: methods of neural network processing and data analysis from navigation sensors; methods of machine learning of neural networks; methods of navigation; methods of collecting and processing data from sensors in conditions of interference and incomplete information; modern element base. A problem-oriented approach was chosen for the implementation of the system, which involves a combination of software and hardware tools and the following basic principles of development: adaptation to changes in the environment; systematicity; variable composition of equipment; modularity; software openness; compatibility; specialization and adaptation of hardware and software tools to the structure of algorithms; use of a set of basic design solutions. The structure of the system has been developed, the main components of which are modules, is to be the next: navigation sensors; wireless communication and data protection; processing, analysis and recovery of lost data; neural network improvement of measurement accuracy of movement parameters; neural network improvement of the accuracy of determining geographical coordinates; neural network prediction of geographic coordinates and route of movement; data collection and storage; determination of geographic coordinates and traffic management. The method of neural network singular spectral analysis has been improved, which has ensured an increase in the accuracy of the measurement of movement parameters due to the rejection of the main components that introduce noise. It is shown that the use of singular spectral analysis is expedient in the tasks of increasing the accuracy of measurement of movement parameters and forecasting the initial parameters of dynamic objects. It was determined that neural network spectral analysis has no limitations on measurement in comparison with classical methods, is fast, non-iterative and does not accumulate errors.

Keywords: mobile platform; object coordinates; neural network methods; measurement of movement parameters; the effect of interference; the structure of the intellectual system.