

Кравченко Юрій Васильович*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна*

ORCID 0000-0002-0281-4396

Дахно Наталія Борисівна*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна*

ORCID 0000-0003-3892-4543

Обідін Дмитро Миколайович*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»**Харків, Україна*

ORCID 0000-0002-9923-9024

Дахно Геннадій Володимирович*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна*

ORCID 0009-0004-8145-051X

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ

Анотація. Стаття присвячена розробці комплексної системи моніторингу навколишнього середовища та навігації з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА), яка забезпечує функціональну стійкість в умовах активної протидії противника. Автори пропонують концептуальні засади для розроблення інтегрованої системи, що поєднує підсистему сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення та підсистему автономної навігації на основі GPS-сигналів. Система включає мобільні сенсори, псевдоліти, сервери наземного керування та приймачі інформації, розташовані як на БПЛА, так і на землі. Ключовою ідеєю є забезпечення стійкості системи до радіоелектронних перешкод та бойових ушкоджень шляхом використання гнучкої структури, де елементи можуть динамічно змінювати свій стан (активний/пасивний) та місце розташування за допомогою БПЛА. З метою реалізації адаптивного управління мережею в умовах невизначеності запропоновано використання нейро-нечіткої системи ANFIS, яка забезпечує підвищення стійкості функціонування мережі до зовнішніх дестабілізуючих впливів шляхом поєднання переваг нечіткого виведення та нейромережевого навчання.

Автори аналізують існуючі підходи до побудови подібних систем, зокрема методи захисту від перешкод та алгоритми керування мережами, але наголошують на необхідності врахування факторів активної протидії противника, що є новим у порівнянні з попередніми дослідженнями. Особливу увагу приділено застосуванню штучного інтелекту для адаптивного керування мережею в умовах невизначеності. Результати дослідження показують, що запропонована система забезпечує похибку навігації в межах 5–25 метрів та достовірність моніторингової інформації до 0,9 на території до 150 км². Це робить її ефективним інструментом для підвищення обороноздатності України. Робота має важливе значення для розвитку інформаційних технологій у сфері національної безпеки, пропонуючи інноваційні рішення для захисту критичної інфраструктури та підвищення ефективності ведення бойових дій.

Ключові слова: функціональна стійкість, псевдосупутникова радіонавігаційна система, сенсорна система моніторингу, розподілені інформаційні системи, псевдоліти.

Kravchenko Yurii*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine*

ORCID 0000-0002-0281-4396

Dakhno Natalia*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine*

ORCID 0000-0003-3892-4543

Obidin Dmytro*National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"**Kharkiv, Ukraine*

ORCID 0000-0002-9923-9024

Dakhno Hennadii

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ORCID 0009-0004-8145-051X

CONCEPTUAL PRINCIPLES OF MONITORING AND AUTONOMOUS NAVIGATION SYSTEMS

Abstract. The article is devoted to the development of a comprehensive system of environmental monitoring and navigation using unmanned aerial vehicles (UAVs), which ensures functional stability in conditions of active enemy counteraction. The authors propose conceptual principles for the development of an integrated system that combines a subsystem of sensory monitoring of the combat line and a subsystem of autonomous navigation based on GPS signals. The system includes mobile sensors, pseudolites, ground control servers and information receivers located both on the UAV and on the ground. The key idea is to ensure the system's resistance to radio-electronic interference and combat damage by using a flexible structure, where elements can dynamically change their state (active/passive) and location using the UAV. In order to implement adaptive network control under uncertainty, the use of a neuro-fuzzy ANFIS system is proposed, which provides increased stability of the network's functioning to external destabilizing influences by combining the advantages of fuzzy inference and neural network learning.

The authors analyze existing approaches to building such systems, in particular methods of protection against interference and algorithms for network control, but emphasize the need to take into account factors of active enemy countermeasures, which is new compared to previous studies. Particular attention is paid to the use of artificial intelligence for adaptive network control in conditions of uncertainty. The results of the study show that the proposed system provides a navigation error within 5–25 meters and the reliability of monitoring information up to 0.9 on an area of up to 150 km². This makes it an effective tool for increasing the defense capability of Ukraine. The work is of great importance for the development of information technologies in the field of national security, offering innovative solutions for protecting critical infrastructure and increasing the effectiveness of combat operations.

Keywords: functional stability, pseudo-satellite radio navigation system, sensor monitoring system, distributed Information systems, pseudolites.

1. Вступ

Вирішення завдань розвідки та навігації на лінії бойового зіткнення використовуючи сучасні дослідження в галузі інформаційних технологій є критично важливими для національної безпеки та оборони України. Комплексна система сенсорного моніторингу та автономної навігації на основі GPS-сигналів з використанням БПЛА є розподіленою мережевою інформаційною системою, яка забезпечує військових споживачів безперервною навігаційною та розвідувальною інформацією в режимі реального часу в районі лінії бойового зіткнення. Пропонується технологічно впровадити інтегроване функціонування сенсорної мережі розвідки та псевдосупутникової радіонавігаційної системи, що захищені від завад та перешкод. В такій системі БПЛА використовується як носій та/або засіб оперативної доставки (переміщення) радіонавігаційних точок та бездротових сенсорів моніторингу навколишнього середовища. Стратегія мінімізації впливу противника на систему реалізується шляхом забезпечення її властивості функціональної стійкості та стійкості до радіоелектронної протидії противника. Принципова парадигма функціональної стійкості полягає у перерозподілі ресурсів інформаційної системи для нейтралізації наслідків дій противника. Застосування технологій штучного інтелекту дозволить вирішити проблему в цілому і забезпечити ефективне функціонування системи в позаштатних ситуаціях.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Постановка проблеми

Аналіз результатів отриманих вченими за даною тематикою, дозволяє звернути увагу на наступне. Існує цілий ряд методів, методик та моделей для вирішення задач автономної навігації на базі форматів GPS-сигналів та моніторингу природних ресурсів та навколишнього середовища за допомогою бездротових сенсорних мереж із урахуванням впливу зовнішніх дестабілізуючих факторів. Ці методи базуються на загальних теоріях радіонавігації, комп'ютерних мереж, управління, надійності, розпізнавання образів, багатокритеріальної оптимізації та мережевого планування. Вони досить успішно справляються із знаходженням оптимальних або квазіоптимальних рішень для детермінованих та стохастичних задач. Останніми роками з'являються прогресивні публікації досліджень, що базуються на засадах теорій нечіткої логіки, експертних оцінок, машинного навчання та нейронних мереж. На думку провідних експертів саме такі підходи актуальні в умовах часткової або повної відсутності статистичних даних та можуть максимально використовувати інтелектуальний досвід. В [1, 2] запропоновано метод розгортання псевдолітів на основі алгоритму NSGA-II. Алгоритм NSGA-II є генетичним алгоритмом багатокритеріальної оптимізації. Порівняно зі стандартним генетичним алгоритмом, рівень покриття цього алгоритму є вищим, а точність позиціонування –

кращою [3]. Зі збільшенням кількості базових станцій перевага цього алгоритму стає більш очевидною, а ефект покращення рівня покриття сигналу та точності позиціонування підвищується. Вказані вище методи досить ефективні для використання в подібних задачах, але поставлена задача зокрема передбачає врахування впливу електромагнітних перешкод, інших дестабілізуючих факторів у реальному середовищі, також має бути врахована складність встановлення псевдолітів. В [4] пропонується багатофункціональна мережева технологія, яка вирішує проблему синхронізації часу, але існують певні обмеження району функціонування. Характерною рисою розглянутих публікацій є також лише наземне розташування псевдолітів, що не переміщаються в часі і просторі. З іншого боку, є наукові роботи в галузі воєнних та технічних наук щодо систем моніторингу місцевості. Так, у [5, 6] запропоновано структурно-функціональну схему системи екологічного моніторингу бойових дій. Розроблено архітектуру інформаційно-вимірювальної системи екологічного моніторингу бойових дій та особливості взаємодії її складових через інформаційно-комунікаційну систему ЗС України. Сформовано вимоги до інформаційно-вимірювальної системи моніторингу та запропоновано архітектуру еколого-інформаційної системи на основі концепції сховища даних, що узагальнює інформацію про вплив бойових дій на екологічний стан навколишнього середовища. У [7] досліджено аспекти розробки працездатності гібридних сенсорних мереж як підсистем систем моніторингу критичної інфраструктури. Запропонована архітектура базується на технології периферійних обчислень і поєднує в собі стаціонарні та мобільні компоненти: наземну сенсорну мережу та мережу на БПЛА. Проаналізовано алгоритми збору даних, проблеми масштабування, надійності датчиків та оптимізації системи у цілому. У [8] пропонуються моделі та методи для підвищення продуктивності бездротових сенсорних мереж на основі декомпозиції нижніх рівнів моделі OSI. Але фактор активної протидії противника у [7, 8] не враховано. Пропонуються засади щодо завадозахищеності бездротових мереж [9]. Хоча авторами було створено нові методи, методики та моделі побудови мережевих систем, можливість використання моделей штучного інтелекту для системи навігації та спостереження в умовах активного впливу засобів протидії противника, а також повного забезпечення функціональної стійкості не реалізовано. Ідея використання інформації щодо достовірності елементів бази знань в функціонально стійкій мережевій системі спостереження та навігації на лінії бойового зіткнення та суміжних територіях також вважається актуальною та новою.

Отже, проблема забезпечення властивості функціональної стійкості, стійкості від радіоелектронної та вогневої протидії противника комплексної системі сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення та автономної навігації у форматі GPS-сигналів з використанням БПЛА в умовах активної протидії противника є актуальною.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка концептуальних засад для створення комплексної функціонально стійкої системи моніторингу та навігації з використанням БПЛА, здатної ефективно функціонувати в умовах активної радіоелектронної та вогневої протидії противника.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- дослідити та проаналізувати функціональну стійкість системи;
- дослідити роботу псевдосупутникової навігаційної системи, а саме: оптимальні схеми розміщення псевдолітів, методи компенсації перешкод у радіофірі, точність позиціонування в умовах електронної боротьби;
- дослідити сенсорну мережу розвідки – способи інтеграції даних від різних типів сенсорів.
- дослідити взаємодію підсистем, як компонентів інформаційної системи, на базі протоколів обміну даними, синхронізацію роботи наземних і повітряних елементів, механізми узгодження навігаційних і розвідувальних даних;
- дослідити методи уникнення перешкод і протидії при застосуванні БПЛА;
- дослідити застосування моделі машинного навчання для аналізу ситуації та прийняття рішень в умовах невизначеності;

Особлива увага у дослідженні приділяється розробці комплексних рішень, що поєднують переваги розподілених сенсорних мереж, сучасних методів радіонавігації та інтелектуальних алгоритмів керування для досягнення максимальної ефективності в умовах впливу різних дестабілізуючих факторів.

4. Концептуальні засади комплексної системи моніторингу та навігації

4.1 Функціональна стійкість системи

Проблема забезпечення властивості функціональної стійкості, стійкості від радіоелектронної та вогневої протидії противника інтегрованої інформаційної системи сенсорного спостереження за лінією бойового зіткнення та автономної навігації у форматі GPS-сигналів з використанням БПЛА в умовах активної протидії противника має науково-прикладний характер. В основі проблеми лежить суперечлива ситуація між вимогами при побудові функціонально стійкої системи [10–12] а саме: між вимогою зменшення впливу противника на елементи системи, що може відбуватися по мірі віддалення від лінії бойового зіткнення та необхідності забезпечення споживачів навігаційною та розвідувальною інформацією в районі бойових дій. Також існує невідповідність існуючого науково-методичного апарату умовам розв'язання часткових завдань розробки комплексної системи сенсорного спостереження на лінії бойового зіткнення та автономної навігації на основі форматів GPS-сигналів з використанням БПЛА, що вимагає розробки нових моделей та методів.

Будемо розглядати комплексну систему сенсорного моніторингу (розвідки) лінії бойового зіткнення та автономної навігації у форматі GPS-сигналів з використанням БПЛА і застосування до такої системи моделей та методів інтелектуального забезпечення властивості функціональної стійкості [10–13] в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів.

Запропонована система має структуру (рис. 1) в якій: 1 – мобільні сенсори розміщені на БПЛА; 2 – псевдоліти розміщені на БПЛА; 3 – сервери центру наземного керування; 4 – псевдоліти розташовані на землі; 5 – розташовані на землі сенсори; 6 – приймачі результатів моніторингу та навігаційної інформації.

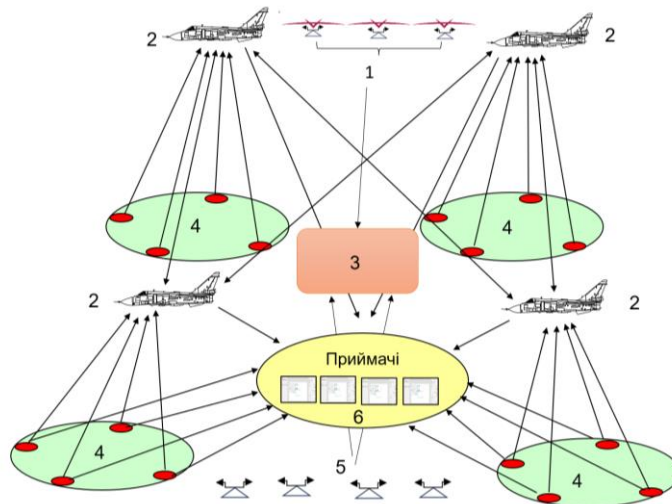


Рис. 1. Структура системи розвідки та навігації

Для забезпечення військових користувачів повною і достовірною розвідувальною та навігаційною інформацією в районі лінії бойового зіткнення шляхом впровадження комплексної системи автономної навігації та моніторингу [14] розроблених у межах даної концепції інтелектуальних моделей та методів забезпечення функціональної стійкості необхідно:

- розробити імітаційну модель комплексної системи сенсорного моніторингу (розвідки) лінії бойового зіткнення та автономної навігації у форматі GPS-сигналів з використанням БПЛА;
- удосконалити існуючі та розробити нові моделі та методи інтелектуального забезпечення комплексній системі властивості функціональної стійкості, а саме:
 - побудувати функціонально стійку структуру комплексної системи;
 - забезпечити завадостійкий обмін даними та керування елементами мережі комплексної системи розвідки та навігації;
 - забезпечити керування БПЛА в умовах активної протидії противника;
 - ідентифікувати позаштатні ситуації в системі в цілому та в розрізі підсистем, у тому числі спричинені активною протидією з боку противника;
 - визначити типи та характеристики існуючої надмірності в системі із метою подальшого керування такою надмірністю;
 - забезпечити формування відновлюючого керування системою;

4.2 Парадигма комплексної системи

Інтегрована система автономної навігації на основі форматів GPS-сигналів та розвідки на базі сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення буде відповідати вимогам споживачів щодо достовірності та оперативності отримання навігаційної та розвідувальної інформації, якщо система

матиме властивість функціональної стійкості на основі розроблених у межах цієї концепції інтелектуальних моделей та методів.

Система автономної навігації на основі форматів GPS-сигналів і сенсорна система моніторингу (розвідки) лінії бойового зіткнення являються суміщеними у просторі і часі і призначені для функціонування в одному й тому самому регіоні місцевості. По-друге, обидві системи мають схожі мережеві вузли (сенсори та радіонавігаційні точки – псевдоліти), які передають відповідну інформацію за допомогою радіосигналів. З огляду на це, доцільно забезпечувати сумісне ефективне функціонування обох систем, протидію перешкодам та бойовим ушкодженням одночасно. Також важливим є те що обидві системи використовують угруповання БПЛА для доставки, розміщення та оперативної зміни місця розташування сенсорів та псевдолітів. Ті ж самі БПЛА можуть вирішувати розвідувально-ударні завдання залежно від оперативної обстановки. Для вирішення проблеми автори пропонують використання технології забезпечення інтегрованого функціонування псевдосупутникової радіонавігаційної системи [15] та мережевої сенсорної системи розвідки [16]. Це дозволить підвищити точність визначення просторового положення об'єктів, забезпечити стійкість навігаційного забезпечення в умовах активного радіоелектронного протистояння, а також покращити ефективність збору, обробки та передавання розвідувальної інформації в реальному часі.

БПЛА передбачається використовувати не тільки як ударно-розвідувальний засіб, але і як носій сенсорів та радіонавігаційних точок – псевдолітів. Підвищення ефективності такої системи можливе за рахунок реалізації динамічної топології і структури мережі псевдолітів та сенсорів. Мережа постійно змінює свою структуру. А її вузли, відповідно, змінюють своє положення та стан із активного увімкненого до пасивного вимкненого і навпаки у режимі реального часу. Такі зміни спричинені і керуються змінами стану довколишнього середовища, що в свою чергу покликано мінімізувати негативний вплив противника та/або вплив інших зовнішніх і внутрішніх шкідливих чинників. Задача керування гнучкою структурою інтегральної системи полягає в наступному: в реальному часі визначати таку структуру системи, яка забезпечує максимальну точність обчислення задачі навігації та найвищу достовірність розвідувальної інформації при мінімальних втратах і найменшою ціною. Тут потрібно правильно враховувати і оцінювати зовнішні і внутрішні фактори, таких як конкретна місцевість з її рельєфом та особливостями, надійність, стійкість до відмов, живучість, захищеність від перешкод компонентів підсистем, а також протидія з боку противника.

Структура системи це модель, яка описує склад підсистем і зв'язки між ними. Управління цією системою реалізує гнучкі зміни структури через переміщення псевдолітів, сенсорів та інших елементів повітряного і наземного базування за допомогою безпілотних літальних апаратів включаючи визначення координат розташування псевдолітів і траєкторій руху БПЛА, а також визначення надлишкового складу псевдолітів та алгоритмів переходу їх з пасивного в активний режим. Координати розташування псевдолітів обчислюються в результаті розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації, зокрема забезпечення максимальної точності навігації при мінімізації впливу зовнішніх факторів витрат. Алгоритми керування сенсорною мережею спостереження враховують моделі обробки інформації від сенсорів і визначають оптимальні місця їх розташування та переміщення, відповідно обраховують відповідну траєкторію руху БПЛА для оптимального переміщення псевдолітів та сенсорів. Додатково розраховується надлишковий склад псевдолітів та сенсорів з метою зменшення впливу ймовірних втрат на ефективність системи в цілому.

Отже, сучасні підходи, методи і моделі теорії штучного інтелекту, бездротових сенсорних мереж, псевдосупутникових та багатопозиційних радіонавігаційних систем, а також теорія функціональної стійкості складних технічних систем не узгоджені між собою щодо особливостей побудови та експлуатації як псевдосупутникових та бездротових сенсорних систем, так і комплексної системи автономної навігації на основі форматів GPS-сигналів та розвідки на базі сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення. Інтелектуальне керування дозволяє створити гнучку структуру сенсорів і псевдолітів, які можуть змінювати своє місце розташування та перемикатися з пасивного, вимкненого стану в активний, увімкнений режим залежно від умов зовнішнього середовища. Це спрямовано на зменшення можливого негативного впливу з боку противника. Існуючі напрацювання авторів статті в межах цієї концепції закладають основу для подальшого удосконалення та вирішення наявних проблем.

4.3 Методи уникнення перешкод і протидії при застосуванні БПЛА

Концепція синтезу структури цієї комплексної системи відрізняється від підходів побудови існуючих багатопозиційних систем тим, що забезпечує функціональну стійкість за допомогою структурної надмірності і формування відновлюючого керування для мінімізації наслідків бойових ушкоджень. Особливістю понятійного апарату функціональної стійкості псевдосупутникової радіонавігаційної системи є його універсальність, що дозволяє застосовувати його до будь-яких

багатопозиційних радіонавігаційних систем. Це забезпечує можливість математичної формалізації цільової функції та обмежень в задачі оптимізації структури, а також дозволяє кількісно і якісно оцінювати показник функціональної стійкості.

Проблему синтезу структури комплексної системи автономної навігації на базі форматів GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення з використанням БПЛА пропонується вирішувати на основі моделей і методів, що базуються на градієнтних алгоритмах, теорії матроїдів, та методі збільшення рангу k-однорідного матроїда [17]. Метод збільшення рангу k-однорідного матроїда дозволяє краще оптимізувати структуру системи, обробляти більші обсяги даних та підвищувати стійкість до завад. Також варто врахувати, що метод послідовного збільшення рангу покращує здатність системи адаптуватися до змінних умов, підвищувати точність навігації або забезпечувати ефективніше використання ресурсів.

Запропоновані моделі та методи враховують не тільки точність виконання навігаційних задач споживачами, але й структурну надмірність системи, а також можливість використання цієї надмірності в умовах бойових пошкоджень псевдосупутників. Захищеність від перешкод може бути забезпечена шляхом детектування радіосигналів за допомогою наближення спектральної функції [18]. Отримані результати вимагають подальшого розвитку, зокрема в напрямку використання технологій штучного інтелекту для комплексного вирішення завдань навігації та моніторингу лінії бойового зіткнення.

4.4 Застосування нечіткої логіки та нейронних мереж для аналізу ситуації та прийняття рішень у невизначених умовах

Один з підходів до підвищення ефективності управління мережами є використання віртуалізації мережевих пристроїв, а саме концепції програмно-конфігурованих мереж (SDN) та віртуалізації мережевих функцій (NFV), які дозволяють використовувати неспеціалізоване обладнання, включно з обладнанням на архітектурі x86, ARM, RISC-V та роблять мережі більш ефективними за рахунок оптимального використання та розподілення ресурсів. За рахунок цього, з'являється можливість використання власних моделей та методів для керування мережами зв'язку. Важливо також звернути увагу на використання нейромережевих методів, методів нечіткої логіки й методів імітаційного моделювання.

У зв'язку з цим пропонується використання концептуальної моделі керування мережевими ресурсами, яка базується на гібридній нейронній мережі з використанням нечіткої логіки та системи нечіткого продукційного виведення ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System). Такий підхід дає змогу динамічно реагувати на потреби мережі та є менш чутливим до швидкого застарівання даних про її стан.

Структура ANFIS складається з 5 шарів (рис. 2):

Шар 1: Фазифікація (Fuzzification Layer). Перетворює входні дані на нечіткі значення за допомогою функцій належності

$$P_{ij} = \mu_{A_{ij}}(X_i),$$

де X_i – i -та входна змінна, A_{ij} – j -та нечітка множина для змінної X_i , $\mu_{A_{ij}}$ – функція належності для A_{ij} , P_{ij} – вихід цього вузла (ступінь належності).

Шар 2: Правила (Fuzzification Layer). Кожен вузол тут представляє правило типу:

"Якщо $x \in A$ і $y \in B$, то...". Кожен нейрон обчислює вагу правила w_i як добуток усіх

відповідних ступенів належності з 2-го шару

$$w_i = \prod_{j=1}^n \mu_{A_{ij}}(X_j).$$

Шар 3: Нормалізація (Normalization Layer). Кожен вузол нормалізує ваги правил

$$w_i = \frac{w_i}{\sum_j w_j}.$$

Шар 4: Дефазифікація (Defuzzification Layer). Кожен вузол обчислює наслідок правила, зазвичай у вигляді лінійної функції f_i

$$f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i).$$

де p_i, q_i, r_i — параметри, що навчаються.

Шар 5: Вихід (Output Layer) Підсумовування результатів.

$$Y = \sum_i f_i$$

Навчання параметрів здійснюється за допомогою гібридного алгоритму, який поєднує метод найменших квадратів (для лінійних параметрів наслідків) та зворотне поширення помилки (backpropagation) – для параметрів функцій належності. Застосування штучного інтелекту для адаптивного управління мережею в умовах невизначеності підвищує стійкість системи до зовнішніх впливів.

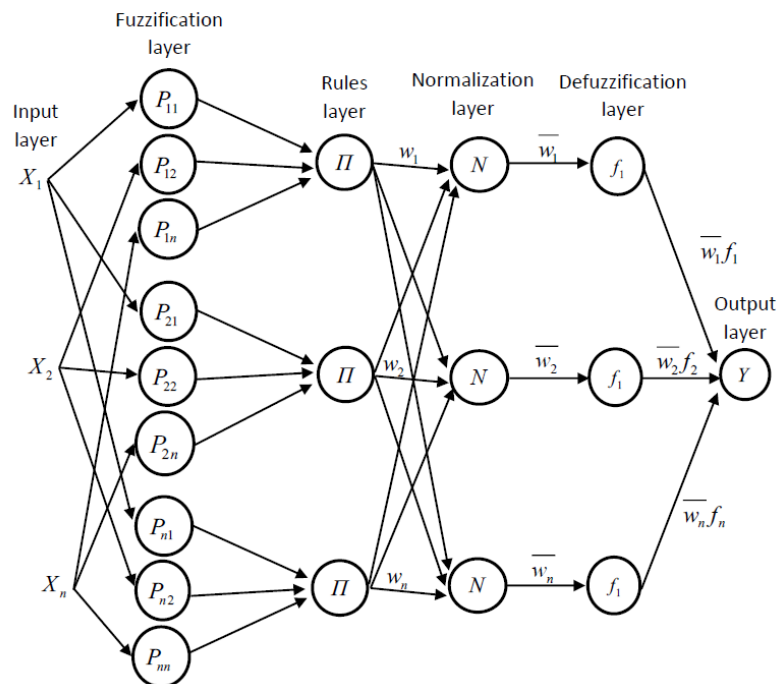


Рис. 2. Архітектура нейронної мережі ANFIS

На основі існуючих напрацювань авторів дослідження, зокрема за допомогою комп'ютерного моделювання та розробки алгоритмів інтелектуального керування гнучкою структурою інтегрованої системи автономної навігації на базі формату GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення з використанням БПЛА [19], було визначено, що ця інтегрована система забезпечує похибку обчислення задачі навігації приймачами GPS-сигналів у межах 5 – 25 метрів, а достовірність моніторингової інформації складає до 0,9 на території до 150 км².

5. Висновки

Результати дослідження мають значну цінність в умовах сучасного впровадження інформаційних технологій у всі сфери суспільства, особливо у сфері національної безпеки та оборони. Наукові дослідження в цій галузі покликані вирішити важливі оборонні, соціально-економічні, наукові і технологічні проблеми, що є критично важливим для обороноздатності України. Запропоновані концептуальні засади для створення функціонально стійкої системи, яка поєднує переваги розподілених сенсорних мереж, сучасних методів радіонавігації та інтелектуальних алгоритмів управління. Система демонструє високу ефективність у умовах активної протидії противника, що робить її цінним інструментом для сучасних військових операцій.

Список використаної літератури

1. S. Liu, L. Wang, and Z. Yao. Research on layout method of ground-based pseudolite positioning system based on NSGA-II algorithm . Application Research of Computers, 2020. vol. 37, pp. 1839–1843.
2. L.Yang, K.Yang, D.Sun. Research on the Station Layout Method of Ground-Based Pseudolite Positioning System Based on NSGA-II Algorithm. Wireless Communications and Mobile Computing. Vol. 2021, Article ID 1520859, 7 pages, <https://doi.org/10.1155/2021/1520859>
3. Kravchenko Y., Leshchenko O., Dakhno N., Pliushch O., Trush O., Yermakov Y. Development of Model of Artificial Ecosystem on the Basis of Genetic Algorithm. IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory, ATIT 2022 - Proceedings, 2022, pp. 199–203.

4. H.Zhang, B.Yu, S. Pan, C.Sheng, H.Lu, Y.Li. A Pseudolite Indoor Wide-Area Networking Technology Based on Signal Multilevel Features. *Wireless Communications and Mobile Computing*. Vol. 2022, Article ID 2190025, 12 pages, <https://doi.org/10.1155/2022/2190025>
5. Чумаченко С.М., Яковлев Є.О., Пиріков О.В., Парталян А.С. Особливості реалізації мережі екологічного моніторингу бойових дій для Збройних Сил України. *Екологічна безпека та природокористування*, 2022, № 2 (42), С. 23-34.
6. S. Chumachenko; O. Lunova; R. Murasov; T. Kurtseitov; I. Honcharenko. A Method for Assessing Threats for Critical Infrastructure Objects on the Example of an Enemy's Attack on the Sludge Storage Facilities of the Avdiivka Coke Chemical Plant. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2024. vol. 32, №4. <https://doi.org/10.15421/112360>
7. Skorobogatko, S., Fesenko, H., Kharchenko, V., Yakovlev, S. Architecture and Reliability Models of Hybrid Sensor Networks for Environmental and Emergency Monitoring Systems. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2024, 60(2), pp. 293–304. <https://doi.org/10.34229/KCA2522-9664.24.2.13>
8. Dudnik, A., Makhovych, O., Bakhov, I., Ryabokin, Y. Usachenko, O. Models and Methods for Improving Performance of Wireless Computer Networks Based on the Decomposition of Lower Layers of the OSI Reference Model. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2022, 12(1), pp. 152-162. https://ijetae.com/files/Volume12Issue1/IJETAЕ_0122_15.pdf
9. J. Logeshwaran, T. Kiruthiga. Interference-Resistant Communication framework for Sensor Nodes in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Research in Science & Engineering*. Vol: 02, No. 03, 2022. pp. 61-75. <https://doi.org/10.55529/ijrise23.61.75>
10. Kravchenko Y. V., Mykus S. A., Leschenko O. A. Functional stability of information and telecommunication systems. *East European Scientific Journal*. 2016. №.2(6). pp.47–52.
11. Sobchuk A. V., Sobchuk V. V., Barabash A. O., Liashenko I. Functionally sustainable wireless sensor network technologies aspects analysis. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2019. pp. 46–48. <http://dx.doi.org/10.31174/SEND-NT2019-193VII23-11>
12. Собчук А. В., Коваль М. О., Кравченко Ю. В., Барабаш О. В. Математична модель функціонально стійкої безпроводної сенсорної мережі. Системи управління, навігації та зв'язку. 2017. Вип. 6. С. 122-126. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2017_6_29.
13. Собчук А. В. Математична модель та характеристика особливостей функціонально стійких бездротових сенсорних мереж, як мереж окремого класу. *Збірник наукових праць "Новітні технології"*. 2018. №2. С. 130–137.
14. Kravchenko, Y., Leshchenko, O., Yaroshchuk, N., Krasnopyorov, P. Information Modelling through GIS for Visualizing Air Alarms. *CEUR Workshop Proceedings* this link is disabled, 2022, 3347, pp. 279–289.
15. Кравченко Ю. В., Лаврінчук О. В., Залужний Р. М. Концепція синтезу локальної багатопозиційної радіонавігаційної системи. *Системи озброєння і військова техніка*. 2009. № 2(18). С. 75–78.
16. Dudnik A., Kravchenko Y., Trush O., Leshchenko O., Dahno N. and Ryabokin Y. Routing Method in Wireless IoT Sensor Networks. *IEEE 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC)*. 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SAIC57818.2022.9922998.
17. Кравченко Ю.В. Застосування методу послідовного збільшення рангу k-однорідного матроїда в задачі синтезу структури псевдосупутникової радіонавігаційної системи. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2008. № 2(2). С. 19–22.
18. Haykin, Simon, and Zhi Cui, editors. *Cognitive Radio Communications and Networks: Principles and Practice*. Wiley-IEEE Press, 2010., pp.87-117
19. Кравченко Ю., Дахно Н. Стратегія інтелектуального керування гнучкою структурою комплексної системи автономної навігації у форматі GPS-сигналів та сенсорного моніторингу лінії бойового зіткнення з використанням БпЛА. *Повітряна міць України*. 2024. № 1(6). С. 5–13.