

**В. А. Романько**

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0008-5749-284X>

**Д. В. Коваль**, канд. техн. наук

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова

<https://orcid.org/0009-0009-5133-9542>

**О. В. Левченко**, д-р військ. наук, проф.

Воєнна академія імені Євгенія Березняка

<https://orcid.org/0000-0001-6254-591X>

## **ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗИДУАЛЬНОГО НЕЙРОННОГО ФІЛЬТРА КАЛМАНА В НАВІГАЦІЙНОМУ МОДУЛІ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА**

*У роботі розглянуто практичну реалізацію зовнішнього навігаційного модуля безпілотної літальної апарату на основі резидуального нейронного фільтра Калмана. Як експериментальну платформу використано малогабаритний одноплатний обчислювальний модуль класу Raspberry Pi-подібних платформ, який взаємодіє з польотним контролером, візуальним каналом і супутниковим навігаційним модулем. Основну увагу зосереджено не на польотних випробуваннях, а на відтворенні стендовій архітектурі, апаратно-програмній інтеграції та практичній сенсорній конфігурації з інерціальним, супутниковим, барометричним і візуальним каналами.*

*Показано, що для цілей поточного етапу достатньо використання наявного програмного стека польотного контролера, відтворюваного стендового контуру та окремого незалежного контуру для подальшого програмного розвитку. Підтверджено працездатність візуального та барометричного каналів, зв'язок із польотним контролером та діагностичну присутність магнітометра, а супутниковий канал – лише на рівні стендової видимості без вимоги стабільного приймання навігаційного розв'язку. Зафіксовано, що обрана платформа є придатною до ролі зовнішнього обчислювального контуру, на якому може бути реалізовано оброблення сенсорних даних і подальший розвиток навігаційного модуля.*

*Отримані результати формують відтворювану стендову основу для переходу до наступного етапу дослідження, пов'язаного з першим польотним зразком. Водночас політ, штатний робочий канал зв'язку між зовнішнім модулем і автопілотом, а також перехід на інший програмний стек автопілота свідомо винесено за межі цієї роботи.*

**Ключові слова:** *резидуальний нейронний фільтр Калмана; зовнішній навігаційний модуль; безпілотної літальної апарату; одноплатний обчислювальний модуль; візуальний канал; супутникова навігація; барометричний канал.*

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** Підвищення стійкості навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах деградації супутникового каналу є одним із основних завдань сучасних бортових систем. У ході експлуатації супутникові вимірювання можуть втрачати достовірність під впливом радіоелектронної протидії, багатопроменевості, короткочасних затіньень або триваліших збоїв. За таких обставин навігаційний контур, що спирається лише на штатні засоби польотного контролера, не завжди забезпечує потрібну стійкість оцінювання стану [1, 2].

Стаття висвітлює не ізольований результат, а третю ланку послідовного циклу досліджень, присвячених розвитку резидуального нейронного фільтра Калмана (РНФК) від формалізації ідеї до практичної реалізації. Базовий задум адаптивного використання РНФК було зафіксовано в патентній заявці України а202506585 [3]. У першій статті авторів [4] надано початкове модельне підтвердження працездатності підходу на стенді 1.1. У ній РНФК розглянуто як резидуальну нейронну надбудову над класичним фільтром Калмана та показано орієнтовне зниження середньоквадратичної похибки оцінювання координат і швидкостей близько на 15–40% порівняно з класичним фільтром Калмана. Друга стаття циклу [5] перенесла дослідження на спрощений тривимірний модельний контур стендів 2.1 та 2.2, у якому було розвинено архітектуру РНФК і проаналізовано його роботу в сценаріях деградації навігаційних каналів. Отже, якщо обидві публікації відповідали переважно на питання про принципову працездатність та очікуваний ефект методу в модельному середовищі, то поточна стаття зосереджена на іншому питанні: чи можна перевести цей підхід у відтворювану стендову апаратно-програмну архітектуру зовнішнього навігаційного модуля. Саме тому в цій роботі увагу зосереджено на переході від модельного етапу до стендів 3.1 і 3.2, а наступним етапом циклу має стати стенд 4.1 як перший польотний зразок.

У такий спосіб цикл робіт утворює послідовну доказову базу: від патентної формалізації ідеї до початкового модельного ефекту стенда 1.1, далі – до поглибленого тривимірного моделювання на стендах 2.1, 2.2, потім – до відтворюваної апаратно-програмної стендової реалізації на стендах 3.1, 3.2 та зрештою – до польотної перевірки на стенді 4.1.

У цій статті розглянуто один із практичних варіантів застосування запатентованого РНФК: за погіршення якості супутникового каналу фільтр має зменшувати довіру до супутникових вимірювань і підсилювати роль візуального та барометричного каналів у формуванні навігаційної оцінки. Поточна робота доводить не повне натурне відпрацювання цього механізму, а побудову стендової архітектури, на якій такий режим може бути коректно реалізований і перевірений на наступному етапі.

Як експериментальну платформу використано Orange Pi Zero, яка розглядається як представник класу Raspberry Pi-подібних малогабаритних модулів для зовнішнього бортового оброблення даних. Такий вибір методично виправданий, оскільки метою є не порівняння конкретних торговельних моделей, а перевірка принципової придатності легкого зовнішнього обчислювального модуля до реалізації РНФК у практичному контурі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні основи фільтра Калмана, його рекурсивної схеми прогнозу та корекції, а також подальший розвиток безперервного

варіанта закладено в класичних працях Р. Калмана і Р. Б'юсі [6, 7]. Саме ці результати стали базою для сучасних інерціально-супутникових, візуально-інерціальних і комбінованих навігаційних систем.

З-поміж робіт українських авторів, релевантних до теми цієї статті, насамперед слід відзначити дослідження Є. Б. Артамонова, А. К. Жултинської, Т. І. Залозного, А. В. Радченка та К. М. Радченка, у яких розглянуто інтеграцію даних GPS та IMU в зашумленому середовищі [1]. Для інерціальних навігаційних систем БПЛА І. В. Зімчук і Т. М. Шапар виконали параметричний синтез алгоритмів фільтрації, а також окремо дослідили алгоритми фільтрації вимірювань акселерометричних датчиків у безплатформних інерційних системах [8, 9]. В умовах спотворення або навмисного підроблення супутникових вимірювань практичну цінність мають і результати М. Туряниці та Б. Четверікова щодо застосування фільтра Калмана для уточнення даних ГНСС-знімання з урахуванням спуфінгу [2].

Для візуального каналу та нейромережевого супроводу вітчизняного дослідницького контуру важливими є праці науковців із Житомирського військового інституту та зі спорідненого наукового середовища. Зокрема, С. В. Ковбасюк, Р. М. Осадчук, М. П. Романчук і Л. М. Наумчак розглянули алгоритм формування набору апріорних даних нейронної мережі для оброблення цифрових аерознімків [10]. Робота І. А. Пількевича, А. М. Токаря, О. В. Франжі та Р. І. Лободи присвячена навчально-тренувальній системі для підготовки операторів безпілотних авіаційних комплексів (БПАК) і фіксує прикладний контекст розгортання вітчизняних БПАК, хоча не вирішує завдання бортового мультисенсорного оцінювання стану [11].

У закордонних роботах останніх років основну увагу зосереджено на мультисенсорних архітектурах GNSS / IMU / CAM / BARO, візуально-інерціальній локалізації в середовищах із деградацією або втратою супутникового каналу, а також на гібридизації класичних фільтрів із нейромережевими модулями. Так, S. A. Negru, P. Geragersian, I. Petrunin і W. Guo запропонували гібридну федеративну архітектуру, що інтегрує GNSS, IMU, монокулярну камеру та барометр для підвищення живучості навігації БПЛА [12]. A. Tonini, M. Castelli, J. S. Bates, N. Lin і M. Painho дослідили візуально-інерційну локалізацію літальних апаратів в умовах відсутності або недоступності супутникового каналу [13], а E. Gallo й A. Barrientos – візуально-інерціальну навігацію для фіксованокрилих БПЛА на основі віртуального візуального сенсора [14]. Для гібридних фільтрів із компонентами, що навчаються, показовою є також праця Y. Aburasain, M. Bilal і K. Kim, у якій досліджено інтеграцію нейронної мережі з фільтром Калмана для підвищення точності передбачення в динамічних системах [15].

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що на сьогодні достатньо опрацьовано окремі аспекти інерціально-супутникової інтеграції, візуально-інерціальної навігації, барометричного супроводу та нейромережевої корекції класичних фільтрів. Водночас недостатньо висвітленим залишається практичний перехід від патентно-алгоритмічної ідеї РНФК до відтворюваної стендової архітектури зовнішнього навігаційного модуля, у якій поєднуються польотний контролер, легкий зовнішній обчислювальний модуль, візуальний канал і барометричний канал у сценарії деградації супутникових вимірювань.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою роботи є доведення практичної реалізованості зовнішнього навігаційного модуля на основі РНФК у стендовій архітектурі з використанням Orange Pi Zero, польотного контролера SpeedyBee F405 V3, камери HBVCAM F2316HD / OV2710 та супутникового модуля Weitian BE-252Q.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

побудувати стендову архітектуру зовнішнього навігаційного модуля, у якій польотний контролер, зовнішній обчислювальний модуль, візуальний, супутниковий і барометричний канали утворюють мінімально достатній практичний контур;

узгодити канонічну мультисенсорну архітектуру IMU / GNSS / MAG / CAM із реальною доступною конфігурацією інерціального, супутникового, барометричного та візуального каналів;

виконати апаратно-програмну інтеграцію вузлів стенда, визначити мінімально достатню конфігурацію обладнання та зафіксувати критерії приймання стендового контуру;

експериментально підтвердити працездатність побудованого контуру й показати, що він є придатною основою для подальшої реалізації режиму перерозподілу довіри від деградованого супутникового каналу до візуального та барометричного каналів.

Наукова новизна дослідження полягає в перенесенні РНФК із патентно-модельного та тривимірного модельного контуру у відтворювану стендову архітектуру зовнішнього навігаційного модуля, а також в узгодженні канонічної сенсорної схеми серії робіт із реальною апаратною конфігурацією цієї статті. Практичне значення роботи зводиться до формування відтворюваної апаратно-програмної основи, придатної до наступного переходу від стендового рівня до польотного етапу.

### **Виклад основного матеріалу**

**Архітектура зовнішнього навігаційного модуля.** У запропонованій архітектурі польотний контролер (Flight Controller – FC) SpeedyBee F405 V3 забезпечує низькорівневу стабілізацію та є джерелом інтегрованих сенсорів. Зовнішній модуль Orange Pi Zero виконує роль додаткового обчислювального контуру, на якому може бути реалізовано РНФК, попереднє оброблення візуальних даних і логіку оцінювання довіри до вимірювань. Камера HBVCAM F2316HD / OV2710 формує візуальний канал, а модуль Weitian BE-252Q забезпечує супутникову навігаційну прив'язку через польотний контролер.

У межах цього циклу робіт РНФК пройшов послідовний шлях від патентного опису та математичної ідеї до початкового модельного, а далі до поглибленого тривимірного модельного, потім до стендового рівня перевірки. Еволюцію стендів і етапів циклу робіт узагальнено в табл. 1.

У такій інтерпретації стенд 1.1 фіксує перший технічний результат циклу: у статті [4] для нього показано орієнтовне зниження середньоквадратичної похибки оцінювання координат і швидкостей на 15–40% порівняно з класичним фільтром Калмана, а також підвищення стійкості до викидів у супутникових вимірюваннях та зростання шуму інерціальних датчиків [4]. Стенди 2.1 і 2.2 поглиблюють цей результат у тривимірному модельному контурі, а стенди 3.1 і 3.2, розглянуті в цій статті, переводять цикл у відтворювану апаратно-програмну площину.

## Еволюція стендів і етапів циклу робіт

Код стенда	Робоча назва	Призначення	Місце в циклі
Стенд 1.1	Початковий модельний стенд РНФК	Імітаційне моделювання НФК як резидуальної надбудови над класичним оцінювачем з одержанням перших кількісних оцінок точності й завадостійкості	Перший кількісний доказ першої статті і методична передумова РНФК
Стенд 2.1	Базовий тривимірний стенд	Спрощене тривимірне моделювання сценаріїв: номінальний режим, інтенсивні маневри, деградація супутникового каналу, комбінована деградація каналів	Основний модельний доказ другої статті циклу
Стенд 2.2	Стенд для багатощарового перцептрона	Формування і перевірка навчальної вибірки для варіанта Multilayer Perceptron (MLP) РНФК	Допоміжний стенд другої статті циклу
Стенд 3.1	Канонічний стендовий контур	Відтворюваний стендовий контур із діагностичними процедурами та пакетом артефактів	Головне джерело доказів цієї статті
Стенд 3.2	Незалежний чистий контур	Відокремлений контур для перевірки незалежної структури виконання	Додаткове джерело доказів цієї статті
Стенд 4.1	Перший польотний зразок	Перехід до обмежених польотних випробувань і нового каналу штатної взаємодії	Наступний етап циклу

Для цілісності циклу доцільно розрізнити три класи стендів. Стенди 1.1, 2.1 та 2.2 належать до модельного класу, у якому головним доказом є кількісна оцінка ефекту алгоритму. Стенди 3.1 і 3.2 – до апаратно-стендового класу, у якому головним доказом є відтворюваність реального контуру, наявність каналів і коректність інтеграції вузлів. Стенд 4.1 має становити польотний клас, у якому головним доказом уже буде працездатність у реальному русі й польотних обмеженнях.

Окреслене питання пропонуємо розв'язати через чітке розмежування двох рівнів опису сенсорної системи. У канонічному описі серії РНФК розглядається як архітектура з інерційним вимірювальним модулем (Inertial Measurement Unit – IMU), супутниковою навігаційною системою (Global Navigation Satellite System – GNSS), магнітометром (Magnetometer – MAG) і камерою (Camera – CAM). Натомість у поточній роботі центральною є практична експериментальна конфігурація з інерціальним, супутниковим, барометричним і візуальним каналами, яка відповідає реально зібраному стенду. За такого підходу MAG не виключається концептуально, але не виноситься в центральний канал аналізу, тоді як барометричний канал розглядається як штатне джерело висотної інформації першого етапу [4, 5]. Склад практичної сенсорної конфігурації та ролі окремих каналів відображено в табл. 2.

Таблиця 2

## Практична сенсорна конфігурація зовнішнього навігаційного модуля

Канал	Джерело даних	Практична роль у поточному дослідженні	Статус
IMU	Польотний контролер SpeedyBee F405 V3	Базовий інерціальний канал	Обов'язковий

Канал	Джерело даних	Практична роль у поточному дослідженні	Статус
GNSS	Beitian BE-252Q через польотний контролер	Супутникова навігаційна прив'язка на стендовому рівні	Обов'язковий
Барометр польотного контролера	Інтегрований барометр польотного контролера	Штатний висотний канал першого етапу	Обов'язковий
CAM	HBVCAM F2316HD / OV2710, підключена до Orange Pi Zero	Візуальний канал зовнішнього модуля	Обов'язковий
MAG	MAG у контурі польотного контролера	Діагностичний або фоновий канал	Не центральний

Функціональний розподіл в системі є таким: польотний контролер забезпечує штатні контури стабілізації та доступ до IMU, GNSS і барометричного каналу; зовнішній модуль приймає візуальний потік, взаємодіє з контролером і формує зовнішню навігаційну оцінку; CAM забезпечує візуальний канал для виокремлення ознак та оцінювання переміщення; барометр використовується як практичний висотний канал; MAG зберігається як фоновий або діагностичний канал. Структурну схему цієї конфігурації наведено на рис. 1.

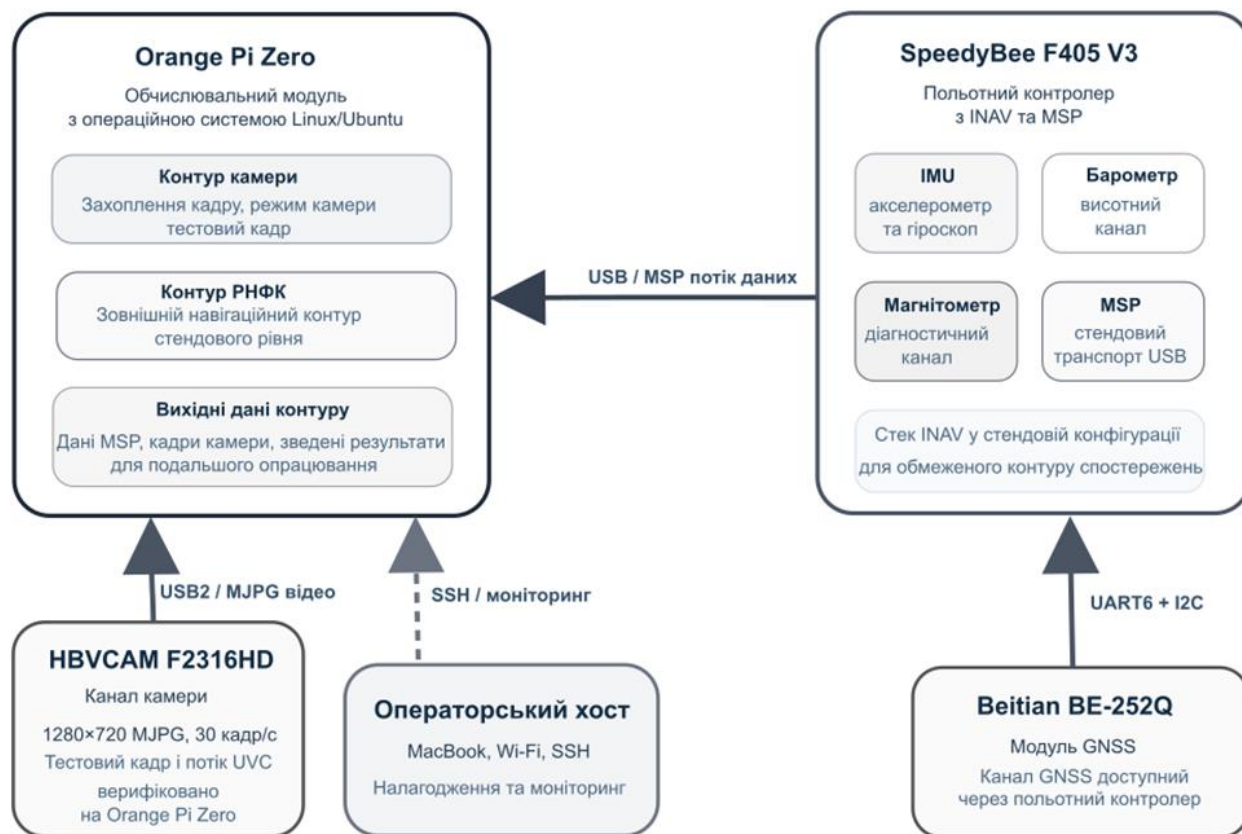


Рис. 1. Структурна схема зовнішнього навігаційного модуля БпЛА в експериментальній конфігурації

Теоретичною основою запропонованого підходу є поєднання фільтра Калмана з резидуальною нейронною корекцією та механізмом адаптивного перерозподілу довіри до

сенсорних каналів. У рамках цього дослідження вважаємо за доцільне обмежитися тими елементами методу, які безпосередньо пов'язані з архітектурною роллю зовнішнього модуля. Нехай вектор стану включає координати, швидкості та орієнтаційні параметри апарата, а вектор вимірювань формується на основі каналів IMU, GNSS, барометричного каналу і САМ. Класична частина оцінювання виконується на основі прогнозу динаміки та корекції за доступними вимірюваннями, а нейронна резидуальна частина формує поправку до базового оцінювання з урахуванням інновацій та ознак якості сенсорного набору [4, 6, 7, 15].

У найзагальнішому вигляді дискретну модель динаміки зовнішнього навігаційного контуру можна подати в такий спосіб:

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k, \quad (1)$$

де  $x_k$  – вектор стану на кроці  $k$ ;

$F_k$  – матриця переходу стану;

$B_k$  – матриця керування;

$u_k$  – вектор керувальних або службових впливів;

$w_k$  – шум процесу.

Модель вимірювань для мультисенсорного контуру запишемо в такому вигляді:

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (2)$$

де  $z_k$  – вектор вимірювань;

$H_k$  – матриця спостереження;

$v_k$  – шум вимірювань.

Слід зауважити, що вектор  $z_k$  формується з інерціального, супутникового, барометричного та візуального каналів, а практична конфігурація стенда визначає, які саме компоненти цього вектора реально доступні на кожному кроці.

Базове рекурсивне оцінювання в класичному фільтрі Калмана виконується через кроки прогнозу і корекції:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k, \quad (3)$$

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k, \quad (4)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (5)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}), \quad (6)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}, \quad (7)$$

де  $\hat{x}_{k|k-1}$  – прогноз стану перед урахуванням вимірювань;

$\hat{x}_{k|k}$  – оцінка стану після корекції;

$P_{k|k-1}$  – коваріаційна матриця похибки прогнозу;

$P_{k|k}$  – коваріаційна матриця похибки після корекції;

$Q_k$  – коваріаційна матриця шуму процесу;

$R_k$  – коваріаційна матриця шуму вимірювань;

$K_k$  – матриця коефіцієнтів Калмана;

$I$  – одинична матриця.

У логіці РНФК класична оцінка доповнюється резидуальною нейронною поправкою:

$$\hat{x}_{k|k}^{\text{RNFK}} = \hat{x}_{k|k} + \Delta x_k^{\text{NN}}, \quad (8)$$

$$\Delta x_k^{\text{NN}} = f_{\theta}(r_k, q_k), \quad (9)$$

$$r_k = z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}, \quad (10)$$

де  $\hat{x}_{k|k}^{\text{RNFK}}$  – скоригована оцінка стану в РНФК;

$\Delta x_k^{\text{NN}}$  – нейронна резидуальна поправка;

$f_{\theta}(\cdot)$  – нейромережевий модуль з параметрами  $\theta$ ;

$r_k$  – вектор інновацій;

$q_k$  – ознаки якості та доступності сенсорних каналів.

Саме величини  $r_k$  і  $q_k$  дають змогу в РНФК зменшувати довіру до деградованого супутникового каналу і посилювати внесок візуального та барометричного каналів у формування підсумкової навігаційної оцінки.

Принципова роль зовнішнього модуля полягає в тому, що він дає змогу додатково обробляти інформацію візуального каналу, оцінювати якість вимірювань і перебудовувати довіру до каналів у разі погіршення якості супутникових даних, не втручаючись безпосередньо в низькорівневий контур стабілізації. У логіці запатентованого РНФК це означає зменшення ваги деградованого супутникового каналу та посилення ролі візуального й барометричного каналів у формуванні оцінки стану. Для цієї статті важливо, що стендова архітектура вже містить саме той мінімально достатній набір каналів, на якому такий режим може бути реалізований у наступних роботах.

**Апаратно-програмна реалізація та методика стендової перевірки.** У поточній роботі Orange Pi Zero використано як доступну експериментальну платформу для відпрацювання зовнішнього навігаційного контуру. Отримані результати стосуються не лише цієї конкретної плати, а й ширшого класу малогабаритних Raspberry Pi-подібних платформ, придатних до побудови зовнішніх бортових обчислювальних модулів.

Мінімально достатній комплект поточної роботи слід відділяти від сервісного оточення. До обов'язкової конфігурації належать вузли зовнішнього навігаційного модуля і штатні сенсорні джерела, тоді як сервісний доступ і окреме живлення потрібні для стендової верифікації, збирання артефактів і підтримки відтворюваності. Склад цієї апаратної конфігурації узагальнено в табл. 3.

Для забезпечення відтворюваності на одноплатному модулі Orange Pi Zero використано програмне середовище на основі операційної системи Linux / Ubuntu, а саме Armbian Linux v25.5.1 for Orange Pi Zero з ядром 6.12.23-current-sunxi. У межах цієї статті

вказана характеристика фіксує саме програмну основу зовнішнього модуля і доповнює апаратну схему стенда, але не замінює її.

Таблиця 3

Мінімально достатня апаратна конфігурація стенда поточного етапу дослідження

Вузол	Роль у системі	Інтерфейс / підключення	Статус у цьому дослідженні
Одноплатний обчислювальний модуль Orange Pi Zero	Зовнішній обчислювальний модуль	Центральний вузол стенда	Обов'язковий
Польотний контролер SpeedyBee F405 V3	Джерело інтегрованих сенсорів і канал обміну із зовнішнім модулем	Хостовий роз'єм універсальної послідовної шини (Universal Serial Bus – USB) на Orange Pi Zero, з'єднаний із роз'ємом USB-C польотного контролера	Обов'язковий
CAM HBVCAM F2316HD / OV2710	Візуальний канал	Порт USB 2.0	Обов'язковий
Супутниковий модуль Beitian BE-252Q	Супутниковий канал	Інтерфейс до польотного контролера	Обов'язковий
Барометр польотного контролера	Штатний висотний канал	Інтегрований у польотний контролер	Обов'язковий
MAG польотного контролера	Фоновий діагностичний канал	Інтегрований або штатний зовнішній контур польотного контролера	Не центральний
Акумуляторний блок	Стендове живлення Orange Pi Zero	Кабель USB-A – mini-USB для живлення	Лише для стендового живлення
Операторський комп'ютер	Сервісний доступ і збір матеріалів	Бездротова мережа та віддалений доступ	Сервісний

У стенді 3.1 CAM підключена до порту USB 2.0 плати Orange Pi Zero, а польотний контролер – до Orange Pi Zero через канал USB / MSP, де MSP означає протокол MultiWii Serial Protocol. Супутниковий модуль Beitian BE-252Q підключено до SpeedyBee F405 V3 через шостий порт універсального асинхронного приймально-передавального інтерфейсу (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter – UART) і двопровідну послідовну шину (Inter-Integrated Circuit – I2C).

Варто зауважити, що описана конфігурація є саме стендовою, тому не потрібно її плутати з майбутньою польотною архітектурою. Схему підключень стенда 3.1 наведено на рис. 2.

Практична складова дослідження ґрунтується на двох стендах. Стенд 3.1 є канонічним стендовим контуром, у якому зосереджено основні діагностичні перевірки, пакет артефактів і базові докази працездатності всієї апаратної конфігурації. Стенд 3.2 є незалежним чистим контуром, який відокремлює подальшу структуру виконання від первинного стендового оточення. Саме ця пара стендів формує канонічне джерело практичних результатів поточної роботи, але головним джерелом рисунків і кількісних приміток є стенд 3.1. Розмежування ролей стендів показано на рис. 3, а їх місце в циклі робіт наведено в табл. 1.

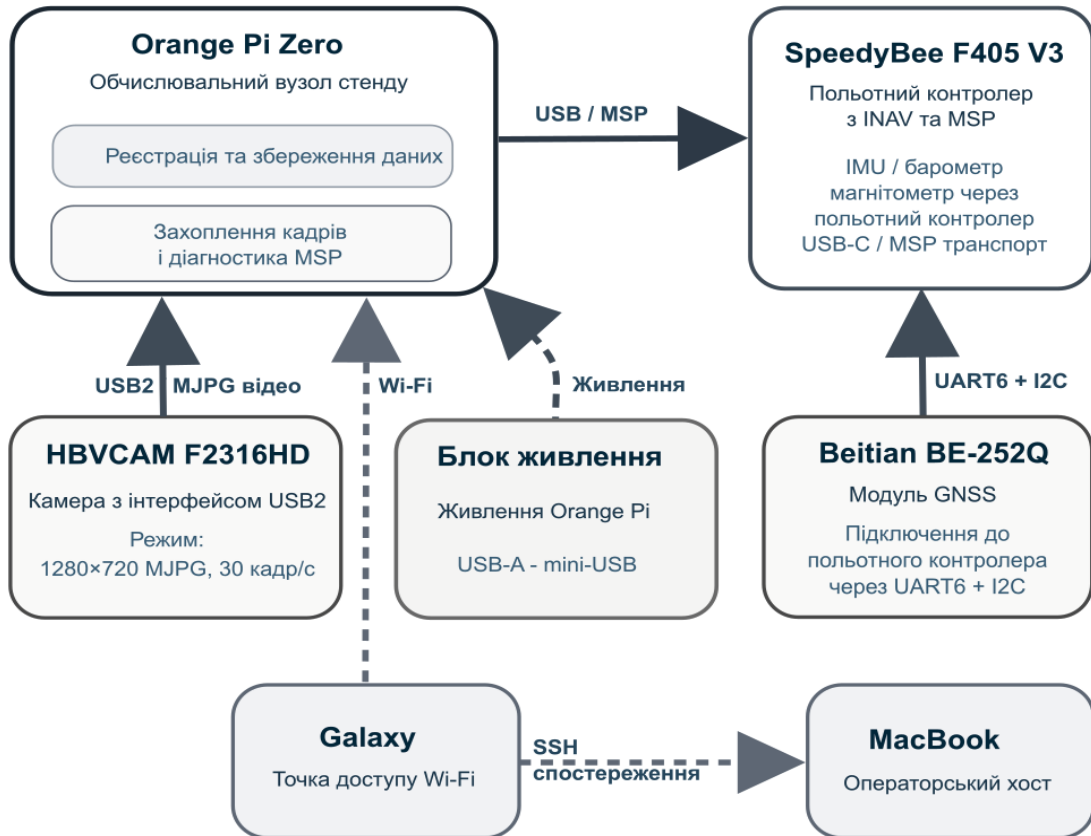


Рис. 2. Схема підключень стенда 3.1 для апаратно-програмної перевірки зовнішнього навігаційного модуля

Для взаємодії між Orange Pi Zero і польотним контролером у поточній стендовій конфігурації використано канал USB / MSP.

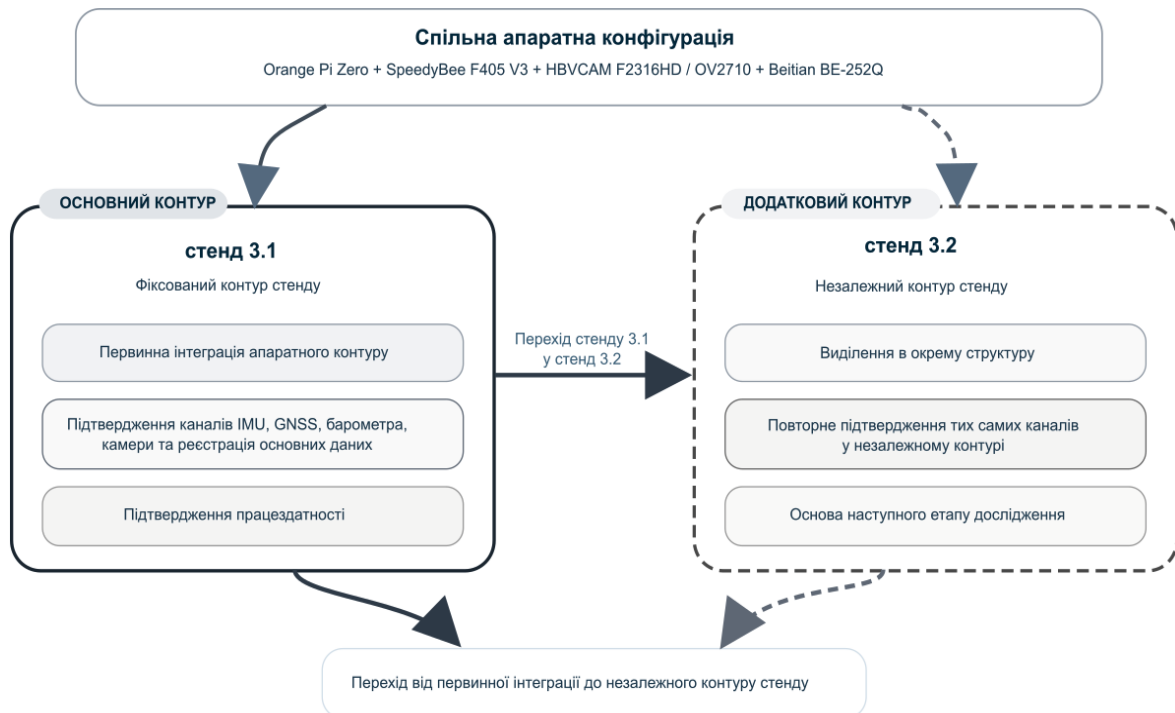


Рис. 3. Розмежування стендів 3.1 і 3.2 у структурі практичної реалізації

Такий вибір є достатнім для цього дослідження, оскільки його мета полягає не в побудові штатного робочого каналу зв'язку, а в підтвердженні працездатності зовнішнього навігаційного контуру. Перехід на UART як основний канал взаємодії свідомо винесений у наступний етап, пов'язаний із першим польотним зразком.

Редакційна межа між цією статтею і наступною польотною роботою повинна фіксуватися чітко: на цьому етапі доводиться завершений стендовий контур, але не штатний польотний канал взаємодії і не політ. Візуалізацію цієї межі наведено на рис. 4, а порівняння параметрів двох етапів – у табл. 4.



Рис. 4. Перспективи подальших досліджень: від стенової архітектури до першого польотного зразка

Таблиця 4

Межа між цим етапом дослідження та перспективною публікацією

Параметр	Поточна стаття	Наступна публікація
Канонічні стенди	Стенд 3.1, стенд 3.2	Стенд 4.1
Стек польотного контролера	Стек автопілота INAV, тобто навігаційно-орієнтоване програмне забезпечення польотного контролера, є достатнім	ArduPilot або окремо обґрунтований польотний стек
Канал між Orange Pi Zero і польотним контролером	Стендовий USB / MSP допустимий	Основним є UART
Рівень доказу	Завершений стендовий контур, діагностика пристроїв, відтворювані артефакти	Польотний контур виконання, відмовостійкість, обмежені польотні випробування
Обов'язковість польоту	Ні	Так

Фактична перевірка CAM показала, що базовим робочим режимом для Orange Pi Zero є 1280 × 720 у форматі Motion JPEG (MJPG) зі швидкістю 30 кадрів за секунду. Режими 60 кадрів за секунду для цієї CAM не підтверджено ні на MacBook, ні на Orange Pi Zero, тому їх не слід закладати як обов'язкову вимогу архітектури.

Методика стенової перевірки включає перевірку CAM, зв'язку з польотним контролером через USB / MSP, IMU, супутникового каналу (GPS), барометричного каналу

(BARO) та MAG. Канонічний стендовий контур стенда 3.1 вважається завершеним, якщо команда верхнього рівня doctor повертає статус pass, а артефакти всіх ключових перевірок, тестовий кадр, оглядові дані FC / MSP і компактні рисунки збережені локально. Незалежний стенд 3.2 вважається підготовленим, якщо його команда doctor також повертає статус pass, підтверджуючи, що структура виконання не залежить від канонічного стендового контуру. Критерії приймання цього контуру надано в табл. 5.

Таблиця 5

## Критерії приймання стенда поточного етапу дослідження

Перевірка	Очікуваний результат	Джерело доказу
CAM	CAM визначається і дає валідний потік	camera_check.json, camera_test.jpg
UART / USB / MSP	Польотний контролер визначається через USB / MSP	uart_check.json, bench_doctor.json
IME	IMU читається через польотний контролер	imu_check.json
GPS	GNSS видимий у MSP-контурі	gps_check.json
BARO	Барометричний канал читається через польотний контролер і MSP	baro_check.json
MAG	MAG має валідний raw / status сигнал	mag_check.json
Стенд 3.1 doctor	Канонічний стенд повертає статус pass	bench_doctor.json
Стенд 3.2 doctor	Незалежний чистий контур повертає статус pass	stand_doctor.json

**Результати стендової перевірки.** Практичним результатом дослідження є побудова та відтворене підтвердження стендової архітектури зовнішнього навігаційного модуля БпЛА на базі Orange Pi Zero у взаємодії з польотним контролером SpeedyBee F405 V3, CAM HBVCAM F2316HD / OV2710 і супутниковим модулем Weitian BE-252Q. На відміну від суто модельної постановки, у цій роботі показано, що зазначені апаратні компоненти можуть бути інтегровані в єдиний апаратно-програмний контур із відтвореними процедурами перевірки та збереженням діагностичних артефактів.

Для стенда 3.1 підтверджено працездатність стендового контуру, у якому доступні канал CAM, зв'язок із польотним контролером через USB / MSP, базова діагностична видимість каналів IMU, супутникової навігації, барометричного висотного каналу та MAG через польотний контролер. Канонічний прогін 3.1 сформував локально збережений пакет артефактів: bench\_doctor.json, статуси каналів у форматі JavaScript Object Notation (JSON), тестовий кадр, оглядові дані FC / MSP у форматах JSON і Comma-Separated Values (CSV) та три компактні векторні рисунки у форматі Scalable Vector Graphics (SVG) для розділу результатів. Для стенда 3.2 підтверджено можливість винесення подальшого контуру виконання в незалежну структуру без змішування з первинним стендовим середовищем, однак окремий вторинний пакет артефактів для нього поки не є обов'язковою умовою завершення цього етапу дослідження. Отже, у роботі доведено не повний польотний зразок, а завершений і відтворений стендовий рівень практичної реалізації зовнішнього навігаційного модуля з інерціальним, супутниковим, барометричним та візуальним каналами.

У короткому оглядовому прогоні тривалістю 4,6 с для стенда 3.1 отримано показники  $gps\_active\_ratio = 1,0$ ,  $gps\_fix\_ratio = 0,0$  і  $satellites\_max = 0$ . Це означає, що GNSS у межах цієї статті слід інтерпретувати як стендову видимість через FC / MSP, а не як доказ стабільного супутникового навігаційного розв'язку. Одночасно тестовий кадр CAM і статусні дані

у форматі JSON підтверджують працездатність CAM, а IMU, барометричний канал і MAG подані як реальні діагностичні канали канонічного стендового контуру.

Два додаткові успішні прогони стенда 3.1 зі статусом pass підтверджують відтворюваність канонічної стендової процедури на рівні, достатньому для цього етапу дослідження. Часову діаграму активності каналів наведено на рис. 5, GNSS тут трактується як стендова видимість каналу через MSP, а не як доказ стабільного супутникового навігаційного зв'язку.

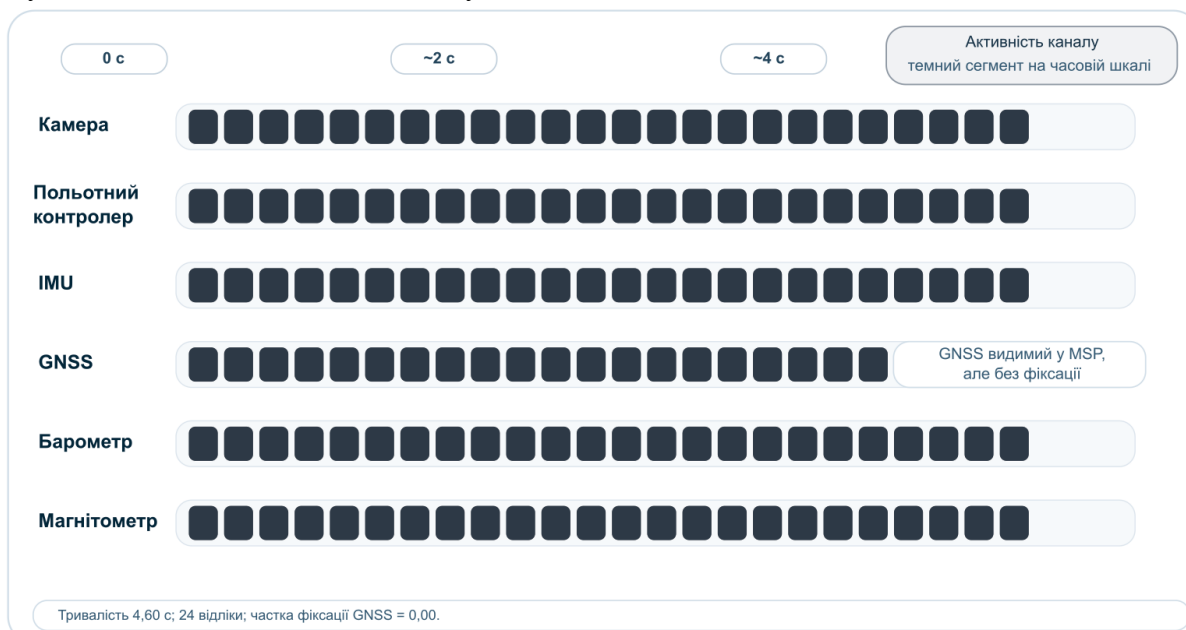


Рис. 5. Часова діаграма активності каналів стенда 3.1 під час канонічного прогону

Огляд вибраних реальних сигналів показано на рис. 6, призначеному для компактної ілюстрації реальних часових рядів, а не для польотної валідації.

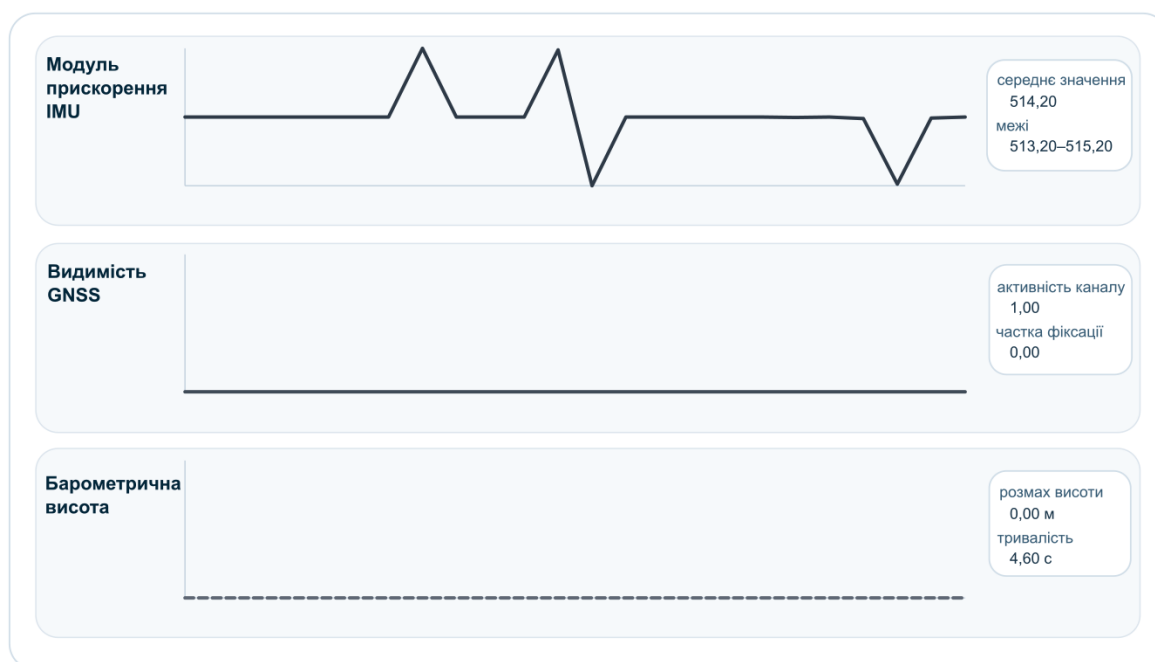


Рис. 6. Огляд вибраних реальних сигналів IMU, GNSS і барометричного каналу, зчитаних у канонічному стендовому контурі стенда 3.1

Узагальнювальну діаграму стану стенда та повторних прогонів показано на рис. 7.

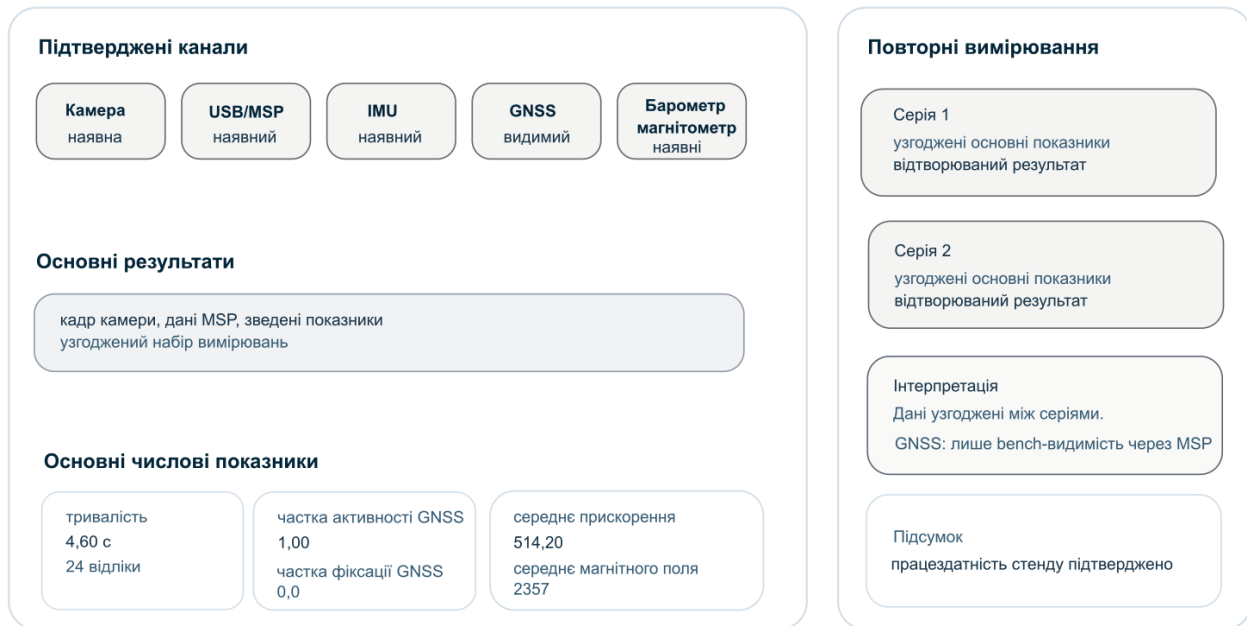


Рис. 7. Компактна узагальнена діаграма стану стенда 3.1 і повторних успішних прогонів, що підтверджують відтворюваність завершеного стендового контуру

Важливим результатом є також узгодження канонічної мультисенсорної архітектури РНФК із реально доступною експериментальною конфігурацією. Якщо в загальному методичному контурі серії робіт розглядається конфігурація IMU / GNSS / MAG / CAM, то для цієї статті практично відпрацьовано конфігурацію з інерціальним, супутниковим, барометричним і візуальним каналами, у якій барометричний канал використовується як штатне джерело висотної інформації, а MAG зберігається як діагностичний або фоновий канал. Це не звужує концепції методу, а переводить її у форму, придатну до реальної стендової реалізації.

Якщо розглядати цикл робіт як єдиний ланцюг доказів, то саме стенд 1.1, описаний у [4], дав початкову кількісну оцінку технічного результату методу. Для нього показано орієнтовне зниження середньоквадратичної похибки оцінювання координат і швидкостей на 15–40% порівняно з класичним фільтром Калмана; у сценарії інтенсивних маневрів RMSE координат за горизонталлю вона зменшувалася з 12,4 м до 7,1 м, а похибка швидкості – з 1,8 м/с до 1,1 м/с. Для сценарію з викидами GNSS максимальне відхилення траєкторії знижувалося приблизно з 65 м до 38 м. У межах описаного дослідження ці дані не переоцінюються, а використовуються як вихідна модельна основа для переходу до стендів 3.1, 3.2.

Результати попереднього тривимірного моделювання, наведені в [5] щодо РНФК для підвищення завадостійкості навігації БпЛА, додатково показують очікуваний прикладний ефект від його використання. Для тривимірного стенда в сценаріях «Деградація супутникового каналу» і «Комбінована деградація каналів» відносно базового розширеного фільтра Калмана (Extended Kalman Filter – EKF) отримано орієнтовне зменшення середньоквадратичної похибки (Root Mean Square Error – RMSE) координат на 74,9%, зниження RMSE швидкості близько на 47,0%, зменшення максимального

відхилення – на 61,2%, а кількості зривів фільтрації – приблизно на 96,4%. Для реального стенда ці значення слід трактувати не як прямий результат, а як кількісне обґрунтування доцільності побудови зовнішнього навігаційного модуля на основі РНФК.

Отримані результати є практичним підтвердженням архітектурної та сенсорної придатності стенда до подальшого відпрацювання алгоритмів навігаційної підтримки в умовах деградації супутникового каналу. У межах цієї публікації не ставилося за мету натурне доведення повного механізму заміщення GNSS візуальним і барометричним каналами. Натомість сформовано відтворювану апаратно-програмну базу, на якій такий механізм може бути досліджений на наступному етапі.

Головний практичний висновок проведеного дослідження полягає в тому, що Orange Pi Zero є методично придатною платформою для побудови відтворюваної стендової архітектури РНФК. Водночас ця публікація не претендує на доведення польотної готовності системи, а фіксує завершений і відтворюваний рівень стендової реалізації.

**Висновки.** У роботі практично обґрунтовано стендову архітектуру зовнішнього навігаційного модуля БпЛА на базі Orange Pi Zero, польотного контролера SpeedyBee F405 V3, CAM HBVCAM F2316HD / OV2710 і модуля Weitian BE-252Q. Показано, що для цілей описаного етапу дослідження достатнім і методично коректним є стендовий рівень верифікації, у якому центральною є практична конфігурація з інерціальним, супутниковим, барометричним і візуальним каналами.

Підтверджено відтворюваність двох взаємопов'язаних стендів: 3.1 як канонічного стендового контуру для діагностичних процедур, 3.2 як незалежного чистого контуру для наступного етапу виконання.

Узгоджено наскрізну логіку циклу робіт, у якій стенд 1.1 фіксує перший кількісний модельний результат першої статті [4], стенди 2.1 і 2.2 поглиблюють його у тривимірному модельному контурі, а 3.1 і 3.2 переводять метод у відтворювану апаратно-програмну площину цього етапу дослідження.

Отже, загальна структура циклу робіт уже має послідовний вигляд: від алгоритмічної ідеї та її модельного підтвердження до тривимірної перевірки стійкості, далі до реальної стендової відтворюваності та зрештою до польотної верифікації. Саме така послідовність досліджень робить внесок окремих статей несуперечливим і взаємодоповнювальним.

Підтверджено присутність і працездатність каналу CAM, зв'язку з польотним контролером через USB / MSP, а також каналів IMU, барометричного каналу і діагностичної видимості MAG через польотний контролер; для GNSS доведено стендову видимість каналу в MSP-контурі без вимоги стабільного супутникового навігаційного зв'язку.

Сформовано практичну апаратно-програмну основу для подальшого дослідження механізмів підтримки навігації в разі деградації супутникового каналу, однак повне натурне відпрацювання заміщення GNSS візуальним і барометричним каналами заплановано на майбутнє.

Отже, у межах цієї статті підтверджено не кінцевий польотний ефект запатентованого РНФК, а коректність одного з практичних шляхів його застосування: побудову зовнішнього навігаційного модуля, у якому в разі деградації супутникового каналу може бути реалізовано перерозподіл довіри на візуальний і барометричний канали.

**СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ**

1. Використання фільтра Калмана для інтеграції даних GPS та IMU в зашумленому середовищі / Є. Б. Артамонов, А. К. Жултинська, Т. І. Залозний, А. В. Радченко та ін. // Технічна інженерія. 2024. Т. 2 (94). С. 69–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-69-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-69-80)
2. Туряниця М., Четверіков Б. Застосування фільтра Калмана для уточнення даних ГНСС-знімання з урахуванням спуфінгу // Вісник Львів. політехніки. 2025. Вип. 49. С. 61–70. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/118523> (дата звернення: 01.03.2026).
3. Романько В. А. Спосіб адаптивного наведення високодинамічного апарата з використанням резидуального нейронного фільтра Калмана : заявка на винахід України а202506585 (заявл. 29.12.2025; перебуває на кваліфікаційній експертизі).
4. Романько В. А., Срібний О. М. Інтеграція нейронного фільтра Калмана в систему наведення високодинамічних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 29. С. 125–139. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.09>
5. Романько В. А., Жовноватюк Р. М. Резидуальний нейронний фільтр Калмана для підвищення завадостійкості навігації БпЛА // Технічна інженерія. 2026. № 1 (97). С. 382–396. [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-382-396](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-382-396)
6. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, No. 1. P. 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
7. Kalman R. E., Bucy R. S. New Results in Linear Filtering and Prediction Theory // Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83, No. 1. P. 95–108. <https://doi.org/10.1115/1.3658902>
8. Зімчук І. В., Шапар Т. М. Параметричний синтез алгоритмів фільтрації для інерціальних навігаційних систем безпілотних літальних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2025. Вип. 28 (I). С. 37–50. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.04>
9. Зімчук І. В., Шапар Т. М., Ковба М. В. Алгоритм фільтрації вимірювань акселерометричних датчиків у безплатформених інерціальних системах навігації безпілотних літальних апаратів // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2024. Вип. 27 (I). С. 44–55. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.04>
10. Алгоритм формування набору апріорних даних нейронної мережі для обробки цифрових аерознімків / С. В. Ковбасюк, Р. М. Осадчук, М. П. Романчук, Л. М. Наумчак // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2022. Вип. 23. С. 77–88. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.06>
11. Навчально-тренувальна система для підготовки операторів безпілотних авіаційних комплексів / І. А. Пількевич, А. М. Токар, О. В. Франжі, Р. І. Лобода // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. Житомир : ЖВІ, 2021. Вип. 20. С. 83–97. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.08>
12. Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture / S. A. Negru, P. Geragersian, I. Petrunin, W. Guo // Sensors. 2024. Vol. 24, No. 3. Article 981. <https://doi.org/10.3390/s24030981>

13. Visual-Inertial Method for Localizing Aerial Vehicles in GNSS-Denied Environments / A. Tonini, M. Castelli, J. S. Bates, N. N. Lin et al. // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 20. Article 9493. <https://doi.org/10.3390/app14209493>
14. Gallo E., Barrientos A. Long-Distance GNSS-Denied Visual Inertial Navigation for Autonomous Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: SO(3) Manifold Filter Based on Virtual Vision Sensor // Aerospace. 2023. Vol. 10, No. 8. Article 708. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080708>
15. Aburasain Y., Bilal M., Kim K. Optimizing Prediction Accuracy in Dynamic Systems through Neural Network Integration with Kalman and Alpha-Beta Filters // PLOS ONE. 2024. Vol. 19, No. 10. e0311734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311734>

*Стаття надійшла до редакції 11.05.2026.*

*Прийнято до друку 20.05.2026.*

*Дата публікації 30.06.2026.*

## REFERENCES

1. Artamonov, Ye. B., Zhultynska, A. K., Zaloznyi, T. I., & Radchenko, A. V., et al. (2024). Vykorystannia filtra Kalmana dlia intehratsii danykh GPS ta IMU v zashumlenomu seredovysshchi [Using the Kalman Filter for Integrating GPS and IMU Data in a Noisy Environment]. *Tekhnichna inzheneriia [Technical Engineering]*, 2 (94), 69–80. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-69-80](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-69-80) [in Ukrainian].
2. Turianytsia, M., & Chetverikov, B. (2025). Zastosuvannia filtra Kalmana dlia utochnennia danykh HNSS-znimannia z urakhuvanniam spufinhu [Application of the Kalman Filter to Refine GNSS Survey Data Taking into Account Spoofing]. *Visnyk Lviv. Politekhniky [Lviv. Polytechnics Bulletin]*, 49, 61–70. Retrived from <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/118523> [in Ukrainian].
3. Romanko, V. A. (2025). *Sposib adaptivnoho navedennia vysokodynamichnoho aparata z vykorystanniam rezydualnoho neironnoho filtra Kalmana: zaiavka na vynakhid Ukrainy [Method of Adaptive Guidance of a High-Dynamic Platform Using a Residual Neural Kalman Filter. Patent Application of Ukraine]* a202506585 (Declared 29.12.2025; Under Examination) [in Ukrainian].
4. Romanko, V. A., & Sribnyi, O. M. (2025). Intehratsiia neironnoho filtra Kalmana v systemu navedennia vysokodynamichnykh aparativ [Integration of a Neural Kalman Filter into Guidance of High-Dynamic Platforms]. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 29, 125–139. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.29.09> [in Ukrainian].
5. Romanko, V. A., & Zhovnovatiuk, R. M. (2026). Rezydualnyi neironnyi filtr Kalmana dlia pidvyshchennia zavadostiikosti navihatsii BpLA [Residual Neural Kalman Filter for Improving UAV Navigation Robustness]. *Tekhnichna inzheneriia [Technical Engineering]*, 1 (97), 382–396. [https://doi.org/10.26642/ten-2026-1\(97\)-382-396](https://doi.org/10.26642/ten-2026-1(97)-382-396) [in Ukrainian].

6. Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82, 1, 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
7. Kalman, R. E., & Bucy, R. S. (1961). New Results in Linear Filtering and Prediction Theory. *Journal of Basic Engineering*, 83, 1, 95–108. <https://doi.org/10.1115/1.3658902>
8. Zimchuk, I. V., & Shapar, T. M. (2025). Parametrychnyi syntez alhorytmiv filtratsii dlia inertsiialnykh navihatsiinykh system bezpilotnykh litalnykh aparativ []. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 28 (I), 37–50. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2025.28.04> [in Ukrainian].
9. Zimchuk, I. V., Shapar, T. M., & Kovba, M. V. (2024). Alhorytm filtratsii vymiriuvan akselerometrychnykh datchykyv u bezplatformenykh inertsiialnykh systemakh navihatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ [Filtering Algorithm of Accelerometrical Sensors Measurements in Platformless Inertial Navigation Systems Unmanned Aircraft]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 27 (I), 44–55. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.04> [in Ukrainian].
10. Kovbasiuk, S. V., Osadchuk, R. M., Romanchuk, M. P., & Naumchak, L. M. (2022). Alhorytm formuvannia naboru apriornykh danykh neuronnoi merezhi dlia obrobky tsyfrovyykh aereznimkyv [An Approach to Forming a Prior Dataset of Neural Network for Processing Digital Aerial Photos]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 23, 77–88. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2022.23.06> [in Ukrainian].
11. Pilkevych, I. A., Tokar, A. M., Franzhi, O. V., & Loboda, R. I. (2021). Navchalno-trenavalna systema dlia pidhotovky operatoriv bezpilotnykh aviatsiinykh kompleksiv [A Training System for Preparing Operators of Aerial Vehicle Systems]. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system: zb. nauk. prats [Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems: Scientific Journal of Korolov Zhytomyr Military Institute]*, 20, 83–97. Zhytomyr: KZhMI. <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2021.20.08> [in Ukrainian].
12. Negru, S. A., Geragersian, P., Petrunin, I., & Guo, W. (2024). Resilient Multi-Sensor UAV Navigation with a Hybrid Federated Fusion Architecture. *Sensors*, 24, 3. Article 981. <https://doi.org/10.3390/s24030981>
13. Tonini, A., Castelli, M., Bates, J. S., & Lin, N. N., et al. (2024). Visual-Inertial Method for Localizing Aerial Vehicles in GNSS-Denied Environments. *Applied Sciences*, 14, 20. Article 9493. <https://doi.org/10.3390/app14209493>
14. Gallo, E., & Barrientos, A. (2023). Long-Distance GNSS-Denied Visual Inertial Navigation for Autonomous Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: SO(3) Manifold Filter Based on Virtual Vision Sensor. *Aerospace*, 10, 8. Article 708. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080708>

15. Aburasain, Y., Bilal, M., & Kim, K. (2024). Optimizing Prediction Accuracy in Dynamic Systems through Neural Network Integration with Kalman and Alpha-Beta Filters. *PLOS ONE*, 19, 10. e0311734. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0311734>

**V. A. Romanko, D. V. Koval, O. V. Levchenko**

**APPLICATION OF RESIDUAL NEURAL KALMAN FILTER IN A UAV NAVIGATION MODULE**

*The paper considers a practical implementation of an external navigation module for an unmanned aerial vehicle based on a residual neural Kalman filter. The experimental platform is a compact single-board computing module of the Raspberry Pi-like class interacting with a flight controller; a visual channel, and a satellite navigation module. The study focuses not on flight tests but on a reproducible bench architecture, hardware-software integration, and a practical sensor configuration combining inertial, satellite, barometric, and visual channels.*

*It is shown that at the current stage it is sufficient to use the existing flight-controller software stack, a reproducible canonical bench contour, and a separate independent contour for further software development. The operability of the visual channel, communication with the flight controller; the barometric channel, and the diagnostic presence of the magnetometer is confirmed, whereas the satellite channel is confirmed only at the level of bench visibility without the requirement of a stable navigation fix. The selected platform is therefore suitable for the role of an external computational contour on which sensor-data processing and further development of the navigation module can be implemented.*

*The obtained results form a reproducible bench basis for transition to the next research stage associated with the first flight prototype. At the same time, actual flight, a standard working communication channel between the external module and the autopilot, and migration to another autopilot software stack are deliberately kept outside the scope of this paper.*

**Keywords:** *residual neural Kalman filter; navigation module; unmanned aerial vehicle; single-board computing module; visual channel; satellite navigation; barometric channel.*