

УДК 355.02+004.91

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).67-74](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).67-74)**Е. Г. ЛЮТФАЛІЄВ**, аспірант<https://orcid.org/0009-0009-9070-6632>*(Інститут прикладного системного аналізу  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», м. Київ)*

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІТРУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ АЛГОРИТМІВ ПОБУДОВИ ТРАЄКТОРІЙ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОМПЕНСАЦІЇ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ

*У статті проаналізовано вплив вітру на дієвість алгоритмів побудови траєкторій безпілотних літальних апаратів літакового типу. Проведено огляд актуальних способів компенсації зовнішніх чинників, зокрема вітру, із застосуванням адаптивних та оптимізаційних технік. Створено математичні моделі впливу вітру на динаміку польоту БПЛА. Докладно викладено методи компенсації з PID-регуляторами, фільтр Калмана та моделі передбачення на основі машинного навчання. Проведено обчислення та розрахунки щодо відхилення БПЛА від траєкторії. Схематичні зображення наочно демонструють траєкторію БПЛА у вітровому полі та результативність методів компенсації. Надано практичні поради щодо впровадження компенсації вітру у існуючі системи управління БПЛА та окреслено можливості подальших досліджень у напрямку створення гібридних методів компенсації та їх подальша інтеграція у бортові контролери.*

**Ключові слова:** БПЛА, компенсація вітру, планування траєкторії, PID-регулятор, фільтр Калмана, машинне навчання, енергоспоживання, моделювання.

### ВСТУП

Використання безпілотних літальних апаратів літакового типу (fixed-wing UAV) у цивільних, військових, промислових та наукових сферах стрімко зростає. Однією з ключових проблем залишається забезпечення точності та безпеки польоту в умовах впливу зовнішніх факторів, зокрема вітру. Вітер може суттєво змінювати траєкторію руху БПЛА, збільшувати його енергоспоживання та знижувати ефективність виконання задач. Саме тому розробка алгоритмів, які здатні компенсувати вплив вітру, є актуальним завданням сучасної науки та техніки [1–6].

Метою статті є комплексний аналіз впливу вітру на ефективність алгоритмів побудови траєкторій безпілотних літальних апаратів, а також обґрунтування з математичної точки зору сучасних методів компенсації впливу вітру на рух БПЛА, розробка та їх експериментальна перевірка. Особлива увага приділена підвищенню точності, енергетичної ефективності та безпеки польоту БПЛА шляхом впровадження адаптивних і оптимізаційних підходів до планування траєкторій та управління польотом у складних умовах впливу вітру на рух БПЛА.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

За останні роки у науковому просторі з'явилась низка сучасних підходів до планування траєкторій БПЛА з урахуванням впливу вітру на його траєкторію. Зокрема, у роботі Н. Haghighi та співавторів [1] розглянуто оптимізацію траєкторії для максимального паріння у вітряних умовах. Х. Dai та співавтори [2] запропонували енергоефективний підхід до планування траєкторії для БПЛА з урахуванням тривимірного моделювання впливу вітру, а Y. Zhang, J. Lyu та L. Fu [6] запропонували методи для збору даних у морському середовищі. Н. М. Р. С. Jayaweera та S. Hanoun [3] дослідили планування траєкторії БПЛА в умовах сильного вітру, а F. Lian та співавтори [4] і Н. Pu та співавтори [5] розробили енергосвідомі та гібридні алгоритми для динамічних і сильних вітрових полів. Українські дослідники також мають наукові дослідження у цій області: Л. М. Рижков і К. В. Пономаренко [7] проаналізували вплив вітру на точність наведення БПЛА, а Р. В. Куліш [12] запропонував модель урахування бічного вітру при плануванні маршрутів БПЛА. Важливий внесок у розуміння впливу складних і змінних вітрових полів на стабільний рух БПЛА під час польоту зробили А. Chakrabarty і J. Langelan [9], а також J. Liu та співавтори [11], які дослідили екстремальні вітрові умови у міському середовищі. Особлива увага сучасних наукових досліджень приділена методам компенсації зовнішніх факторів: PID-регуляторам, фільтрам Калмана, а також алгоритмам на основі машинного навчання, для прогнозування та корекції траєкторії БПЛА під час руху на траєкторії [3–5, 13–15]. Проведений аналіз наукових літературних джерел свідчить про зростання уваги наукової спільноти до нових розробок адаптивних, енергоефективних та інтелектуальних алгоритмів планування траєкторій БПЛА для експлуатації у складних вітрових умовах.

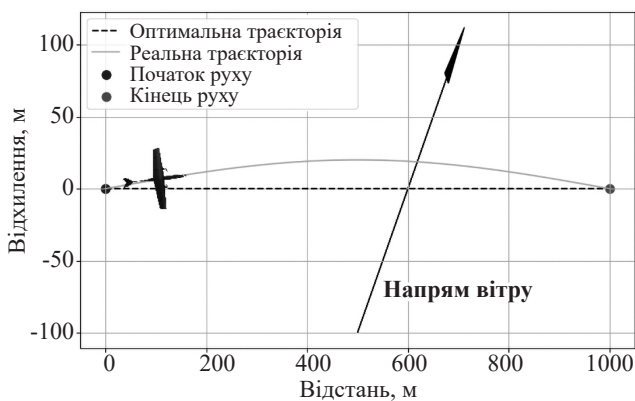
### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основою для моделювання траєкторії БПЛА літакового типу у вітровому полі є аналіз сучасних досліджень у цій галузі. На динаміку польоту БПЛА впливають не тільки основні характеристики БПЛА, такі як маса, площа крила, крейсерська швидкість, довжина маршруту і початкова висота БПЛА, а й основні характеристики вітру – середня швидкість і напрямок вітру відносно маршруту руху БПЛА [1, 4]. При цьому, для правильного відтворення реальних умов необхідно враховувати не лише постійний вітер, а й пориви, які можуть суттєво впливати на відхилення БПЛА від заданої траєкторії та його енергоспо-

живання [3]. В наведеному експерименті буде розглянуто три типові сценарії руху БПЛА: відсутність вітру – коли вплив вітру на рух БПЛА відсутній, постійний вітер під заданим кутом до напрямку руху БПЛА та пориви вітру різної сили й напрямку. Такий підхід дає змогу оцінити ефективність алгоритмів компенсації впливу вітру на рух БПЛА у різних умовах, що відповідає рекомендаціям сучасних публікацій [5, 11]. Основні параметри, наведені в табл. 1, обрані на основі типових характеристик малих і середніх БПЛА літакового типу, які широко використовуються для задач спостереження, картографування та логістики [3, 11], наприклад Skywalker EVE-2000 або UAV Penguin B від UAV Factory Ltd.

Т а б л и ц я 1. Основні параметри БПЛА літакового типу та вітрового середовища

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці виміру
Маса БПЛА	$m$	4,5	кг
Площа крила	$S$	0,9	м <sup>2</sup>
Крейсерська швидкість	$V_{cr}$	18	м/с
Довжина маршруту	$L$	1000	м
Початкова висота	$H_0$	100	м
Середня сила вітру	$V_{wind}$	0 / 5 / 10 / 15	м/с
Кут вітру до маршруту	$\alpha$	0 (зустрічний) / 45 / 90 (боковий)	градуси
Тривалість польоту	$T$	розраховується	с
Енергоспоживання	$E$	розраховується	Вт·год



Р и с. 1. Схема траєкторії БПЛА у вітровому полі

Математичне моделювання руху БПЛА у вітровому полі ґрунтується на класичних рівняннях механіки руху літальних апаратів у просторі з урахуванням зовнішніх збурень. Вектор швидкості літального апарата відносно землі визначається як сума векторів власної швидкості БПЛА ( $V$ ) та швидкості вітру ( $V_{вітер}$ ) [9]:

$$\vec{V}_{\text{БПЛА}} = \vec{V} + \vec{V}_{\text{вітер}}. \quad (1)$$

Це дає нам змогу моделювати як прямолінійний політ БПЛА у спокійну безвітрену погоду, так і складні траєкторії руху БПЛА у динамічних умовах зміни вітру. Вектор положення БПЛА  $r$  у момент часу  $t$  розраховується за формулою:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{V}_{\text{БПЛА}}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

де  $\vec{r}_0$  – початкове положення БПЛА,  $\vec{V}_{\text{БПЛА}}(\tau)$  – швидкість БПЛА у момент часу  $\tau$ .

Не менш важливим аспектом при розрахунках є розрахунок додаткових енергетичних витрат БПЛА на компенсацію вітру, що особливо актуально для тактичних завдань з обмеженим запасом енергії [2, 6]. Для визначення енергоспоживання БПЛА з урахуванням змінної сили та напрямку вітру застосуємо інтегральні залежності [4, 5]. Додаткові енергетичні витрати на компенсацію впливу вітру  $E_W$ :

$$E_W = \int_0^T P_W(t) dt, \quad (3)$$

де  $P_W(t)$  – потужність, що витрачається на компенсацію вітру у момент часу  $t$ ,  $T$  – загальний час польоту.

Загальне енергоспоживання  $E_{\text{total}}$  є сумою базового енергоспоживання БПЛА  $E_{\text{base}}$  і додаткового енергоспоживання через вплив вітру  $E_W$ :

$$E_{\text{total}} = E_{\text{base}} + E_W. \quad (4)$$

Потужність для компенсації впливу вітру  $P_W(t)$ :

$$P_W(t) = k \cdot |\vec{V}_W(t)|^3, \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт аеродинамічних характеристик БПЛА,  $|\vec{V}_W(t)|$  – модуль швидкості вітру у момент часу  $t$ .

Розраховуємо відхилення напрямку руху БПЛА від оптимальної траєкторії як середнє відхилення реальної траєкторії від оптимальної. Це дасть змогу кількісно оцінити ефективність різних алгоритмів компенсації впливу вітру на рух БПЛА [3, 7]:

$$\Delta d = \frac{1}{T} \int_0^T |\vec{r}_{\text{реальна}}(t) - \vec{r}_{\text{оптимальна}}(t)| dt, \quad (6)$$

де  $\Delta d$  – середнє відхилення від оптимальної траєкторії,  $T$  – час польоту,  $\vec{r}_{\text{реальна}}(t)$  – положення БПЛА у момент часу  $t$ ,  $\vec{r}_{\text{оптимальна}}(t)$  – положення БПЛА на оптимальній траєкторії у момент часу  $t$ .

Такий підхід широко застосовується у сучасних дослідженнях для порівняння різних методів планування та управління польотом [4, 11].

Компенсація впливу вітру на траєкторію руху БПЛА є однією з ключових задач сучасної теорії управління. Серед найбільш поширених підходів вирішення цих задач є застосування PID-регуляторів, фільтра Калмана та методів прогнозування на основі машинного навчання. PID-регулятори дозволяють оперативному реагувати на відхилення від заданої траєкторії, забезпечуючи стабільність і точність польоту навіть у змінних умовах [3, 14]. Управляючий сигнал PID-регулятора розраховується за формулою:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

де  $u(t)$  – керуючий сигнал,  $e(t)$  – відхилення від заданої траєкторії,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових відповідно.

Фільтр Калмана використовується для оцінки поточних параметрів вітру на основі даних, які надходять з датчиків БПЛА, що дозволяє адаптувати коригування напрямку руху БПЛА у реальному часі [7, 14].

Оцінка стану після корекції на кроці  $k$ :

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (z_k - H\hat{x}_{k|k-1}), \quad (8)$$

де  $\hat{x}_{k|k-1}$  – прогнозована оцінка стану до корекції на кроці  $k$ ,  $K_k$  – коефіцієнт Калмана на кроці  $k$ ,  $z_k$  – виміряне значення на кроці  $k$ ,  $H$  – матриця спостережень.

Коефіцієнт Калмана:

$$K_k = \frac{P_{k|k-1}H^T}{HP_{k|k-1}H^T + R}, \quad (9)$$

де  $P_{k|k-1}$  – дисперсія оцінки стану до корекції на кроці  $k$ ,  $H$  – матриця спостережень,  $R$  – дисперсія шуму вимірювань.

$$P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + Q, \quad (10)$$

де  $P_{k-1|k-1}$  – дисперсія оцінки стану після корекції на попередньому кроці  $k-1$ ,  $Q$  – дисперсія процесу, що характеризує невизначеність моделі.

У сучасних наукових роботах також активно застосовуються алгоритми прогнозування на основі машинного навчання, які дозволяють передбачати зміну умов вітру і заздалегідь коригувати траєкторію літального апарата [5, 6]. Практична ефективність таких методів підтверджується численними експериментальними дослідженнями [4, 5, 11], де показано суттєве зниження відхилення БПЛА від траєкторії руху та енергоспоживання при використанні адаптивних алгоритмів.

Прогноз швидкості вітру розраховується через функцію прогнозу машинного навчання поточних та попередніх значень швидкості вітру  $V_{\text{вітер}}(t)$  з урахуванням додаткових метеорологічних параметрів:

$$\vec{V}_{\text{вітер}}(t + \Delta t) = ML(\vec{V}_{\text{вітер}}(t), \text{метеодані}). \quad (11)$$

Для чисельних розрахунків руху БПЛА літакового типу у різних умовах впливу вітру на траєкторію руху було створене симуляційне середовище, яке дає змогу змінювати параметри вітру, початкові умови руху та власні характеристики БПЛА. Модель симуляції руху БПЛА складається з вхідних даних моделі – це початкове положення БПЛА та відповідний сценарій впливу вітру на траєкторію руху, розрахунків бокової складової вітру, алгоритму компенсації, який формує коригуючий сигнал, оновлення положення БПЛА на траєкторії руху та розрахунків енергоспоживання БПЛА під час руху. Після проходження БПЛА маршруту, фіксується відхилення БПЛА від оптимальної траєкторії руху та енергія, яка була витрачена БПЛА на проходження маршруту.

Для проведення порівняльного аналізу алгоритмів компенсації впливу вітру на рух БПЛА (PID-регулятор, фільтр Калмана, LSTM) у єдиній моделювальній системі було розраховано компоненти вітру  $V_{wx} = V_w \cdot \cos(\alpha)$  – зустрічна складова та  $V_{wy} = V_w \cdot \sin(\alpha)$  – бокова складова для різних сценаріїв вітру, наведених в табл. 1.

Для кожного сценарію симуляції руху БПЛА в умовах впливу вітру задається швидкість вітру, кут напрямку вітру до траєкторії руху БПЛА, розраховуються складові компоненти вітру.

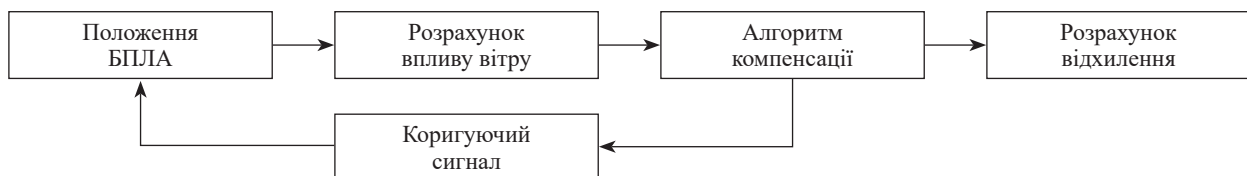
Т а б л и ц я 2. Складові компоненти вітру

$V_w$ , м/с	$\alpha$ , °	$V_{wx}$ , м/с	$V_{wy}$ , м/с
5	0	5.00	0.00
5	45	3.54	3.54
5	90	0.00	5.00
10	0	10.00	0.00
10	45	7.07	7.07
10	90	0.00	10.00
15	0	15.00	0.00
15	45	10.61	10.61
15	90	0.00	15.00

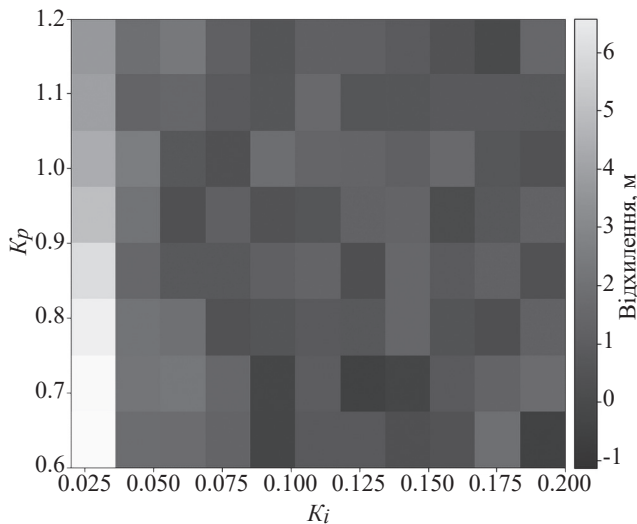
Побудована математична модель руху БПЛА включає в себе час польоту БПЛА, положення БПЛА на траєкторії у відповідний проміжок часу, відхилення БПЛА від початкової траєкторії руху, споживання БПЛА енергії, витраченої на компенсацію дії вітру на рух БПЛА. Алгоритми компенсації впливу вітру на рух БПЛА були побудовані наступним чином.

PID-регулятор – на кожному кроці симуляції руху БПЛА розраховується відхилення БПЛА від заданої траєкторії руху. PID-регулятор формує коригуючий сигнал, з врахуванням фізичних та льотних характеристик БПЛА. Коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових –  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ , підібрані емпірично наступним чином: для кожної комбінації швидкості і кута вітру із табл. 2 беремо значення бокової складової вітру  $V_{wy}$  і встановлюємо такі діапазони значень коефіцієнтів –  $K_p = [0,5-1,2]$  із кроком 0,1,  $K_i = [0-0,2]$  із кроком 0,02,  $K_d = [0-0,1]$  із кроком 0,01. Для кожної комбінації значень коефіцієнтів виконуємо 10 симуляцій польоту БПЛА тривалістю 55,56 с довжиною маршруту 1000 метрів. Фіксуємо значення середнього бокового відхилення і енергоспоживання для кожної симуляції.

Комбінація значень коефіцієнтів, яка дає мінімальне відхилення при допустимому енергоспоживанні обирається за дослідницьку. Отримані оптимальні значення:  $K_p = 1,0$ ,  $K_i = 0,10$ ,  $K_d = 0,05$  забезпечують мінімальне відхилення БПЛА від траєкторії руху без осциляцій. Проведені симуляції для граничних значень  $K_p = 1,2$ ,  $K_i = 0,20$ ,  $K_d = 0,10$  показали, що система стає схильною до осциляцій (перерегулювання), нестабільності або навіть розгойдування (відхилення починає зростати, а не зменшуватись), а значення керуючого сигналу перевищують фізичні показники досліджуваного БПЛА.



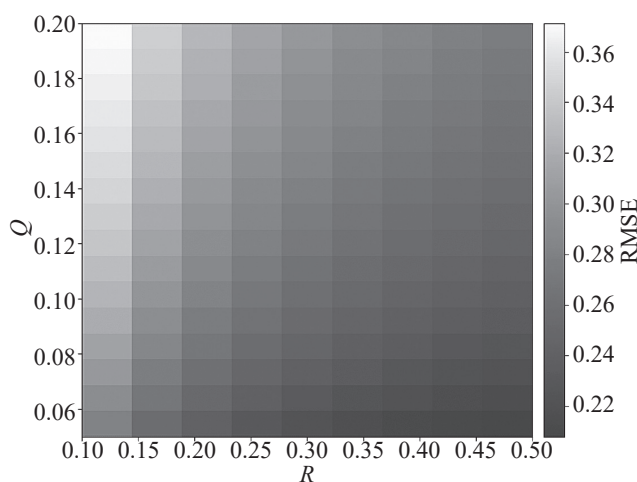
Р и с . 2. Схема симуляційного середовища



Р и с . 2. Теплова карта підбору коефіцієнтів  $K_p$  та  $K_i$  при  $K_d = 0.05$ , вітер 5 м/с, кут  $45^\circ$

Наприклад, кут відхилення керма перевищує допустимі  $20\text{--}30^\circ$ . Система стає чутливою до шуму та збурень, що може призвести до аварійної ситуації.

Фільтр Калмана – на кожному кроці симуляції руху БПЛА вимірюється швидкість вітру. Фільтр Калмана розраховує справжню швидкість вітру, яка використовується для коригування траєкторії. Значення  $Q$  та  $R$  були визначені емпіричним шляхом на реальних метеоданих з Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA), які містять природний шум і варіації. Для кожної комбінації параметрів  $Q = [0,05\text{--}0,2]$  з кроком 0,01 та  $R = [0,1\text{--}0,5]$  з кроком 0,05 запускається симуляція вимірювання вітру з шумом (реальні метеодані + синтетичний шум), де на кожному кроці фільтр Калмана оцінює справжню швидкість вітру. Після завершення симуляції фіксується середня похибка оцінки (RMSE).

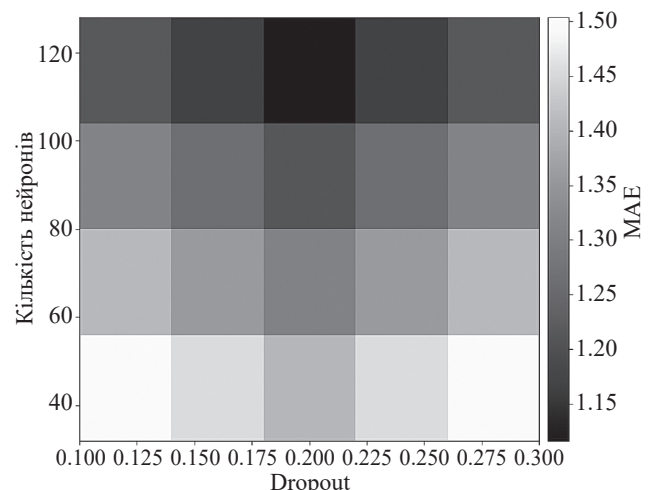


Р и с . 3. Теплова карта підбору значень  $Q$  та  $R$

Комбінація значень  $Q = 0.05$  та  $R = 0.5$  дала найменшу помилку фільтрації (RMSE < 0.22).

3. LSTM-мережа – на кожному кроці симуляції руху БПЛА LSTM прогнозує швидкість вітру у проміжки часу з інтервалом 5 с. Поточна траєкторія руху

БПЛА коригується з урахуванням прогнозу положення БПЛА відносно впливу вітру. Застосована архітектура ML моделі – 2 шари (64 нейрони, активація tanh, return\_sequences=True та 32 нейрони, активація tanh, return\_sequences=False), Dropout 0.2, Adam, learning rate 0,001. Навчальна вибірка складала 50 000 значень, з яких 80 % становили реальні метеодані з NOAA (дані про швидкість вітру з метеостанції KSEA (Seattle-Tacoma International Airport) за 2023 рік з інтервалом 1 хвилина) та OpenWeatherMap (дані про швидкість і напрямок вітру для Києва, Україна, за 2023 рік з інтервалом 1 хвилина), та 20 % синтезовані пориви вітру. Навчання в 500 епох, batch 64 і середньоквадратична похибка MSE як функція втрат. На вхід ML моделі подається послідовність з 20 попередніх значень швидкості вітру, тобто 20 секунд історії. Реальні метеодані – [3.2, 3.5, 4.1, 5.0, 6.2, 7.1, 8.0, 7.5, 6.8, 5.9, 5.2, 4.8, 4.3, 3.9, 3.5, 3.2, 3.0, 2.8, 2.7, 2.5]. Синтезовані дані генеруються за наступних умов – базова швидкість вітру = 8 м/с, пориви = np.random.normal(0, 5), ймовірність появи пориву – 0.1 кожні 10 секунд, довжина серії: 10 000 значень – [8.0, 8.2, 7.9, 13.5, 8.1, 8.0, 8.3, 8.1, 2.5, 8.0, 8.2, 8.0, 8.1, 8.0, 8.0, 8.0, 8.0, 8.0, 8.0]. Дані для навчання нормалізуються (мін-макс нормалізація) та формуються вікна по 20 точок. На тестовій вибірці фіксуються значення MAE та MSE.



Р и с . 4. Теплова карта визначення кількості нейронів для ML моделі

Теплова карта ілюструє, що ML модель має найкращу точність при шарі у 128 нейронів, але для балансу швидкості та точності ML моделі вибір було встановлено на кількості шару в 64 нейрони.

Наведемо розрахунки відхилення БПЛА від заданої траєкторії руху для сценарію слабого вітру 5 м/с під кутом  $45$  градусів –  $V_{wy} = 5 \cdot \sin(45^\circ) = 3.54$  м/с, аеродинамічний коефіцієнт  $k = 0.1$ . Початкове бокове відхилення за 1 с  $e(1) = V_{wy} \cdot 1 = 3.54$  м. PID-сигнал  $u(1) = 1.0 \cdot 3.54 + 0.1 \cdot 3.54 + 0.05 \cdot 3.54 = 1.15 \cdot 3.54 = 4.071$  м/с. Оновлення положення:  $y_{t+1} = y_t + (3.54 - 4.071) \cdot dt$ . Якщо PID-регулятор ідеально компенсує 95 % бокового вітру, то залишковий дрейф:  $V_y, PID = 0.05 \cdot 3.54 = 0.177$  м/с, при цьому відхилення БПЛА від траєкторії руху складатиме  $e_{PID} = 0.177 \cdot 55.56 \approx 9.83$  м. Але, враховуючи шум і неідеальність умов

Т а б л и ц я 3. Порівняльна таблиця для всіх сценаріїв постійного вітру

$V_w$ , м/с	$\alpha^\circ$	Відхилення $e(t)$ , м			Енергоспоживання $E(t)$ , Дж		
		PID	Калман	LM	PID	Калман	LM
5	45	14.1	12.0	7.1	271	271	244
10	45	28.8	25.5	14.4	2158	2158	1942
15	45	43.3	39.0	21.7	7305	7305	6575
5	90	20.2	17.2	10.1	763	763	687
10	90	40.4	36.0	20.2	6112	6112	5501
15	90	60.5	53.7	30.3	20,625	20,625	18,563

впливу вітру на рух БПЛА, з симуляції отримуємо:  $e_{PID} \approx 14.1$  м. Після фільтрації вимірювань Калманом, залишковий дрейф може бути меншим –  $V_y, Kalman = 0.04 \cdot 3.54 = 0.142$  м/с, а з урахуванням реальних умов експлуатації БПЛА відхилення  $e_{Kalman} \approx 12.0$  м. Помилка фільтрації RMSE із симуляції склала 1.31.

З табл. 3 чітко видно перевагу застосування LM моделі, яка забезпечує найменше відхилення БПЛА від заданої траєкторії руху за, приблизно, однакового енергоспоживання у всіх сценаріях впливу постійного вітру під визначеним кутом до напрямку руху БПЛА. PID-регулятор є достатнім для слабкого вітру, а фільтр Калмана є ефективним лише при малому шумі вимірювань.

Для порівняння розрахунків за різними параметрами вітру, було проведено додаткові симуляції для поривів вітру та відсутності впливу вітру на траєкторію руху БПЛА. Вхідні дані для експериментального моделювання такі самі, як і в попередніх розрахунках і відповідають реальним параметрам сучасних БПЛА [1, 3]. Для кожного сценарію було розраховано час польоту, енергоспоживання та відхилення від оптимальної траєкторії.

Т а б л и ц я 4. Час польоту та енергоспоживання

Сценарій	Ефективна швидкість, $V_{ef}$	Час польоту, $T$	Енергоспоживання, $E$
Без вітру	18 м/с	55.6 с	1.85 Вт·год
Вітер 5 м/с під кутом $45^\circ$	21.54 м/с	46.4 с	1.70 Вт·год
Пориви вітру	18 м/с	61.42 с	2.1 Вт·год

У сценарії «Пориви вітру» ефективна швидкість БПЛА збігається із ефективною швидкістю сценарію «Без вітру» – 18 м/с тому, що середнє значення поривчастого вітру зазвичай коливається навколо нуля (тобто пориви вітру змінюють напрямок і силу, але в середньому не дають постійного зсуву швидкості у певному напрямку). Це типова спрощена модель для оцінки впливу турбулентності на напрямок руху літального апарата, коли немає сталого вітру, а є лише короткочасні відхилення БПЛА від напрямку руху. Однак, у реальних умовах пориви вітру можуть як збільшувати, так і зменшувати ефективну швидкість БПЛА на окремих ділянках маршруту, а також викликати додаткові витрати енергоспоживання через постійні корекції траєкторії маршруту. Тому для більш точного моделювання

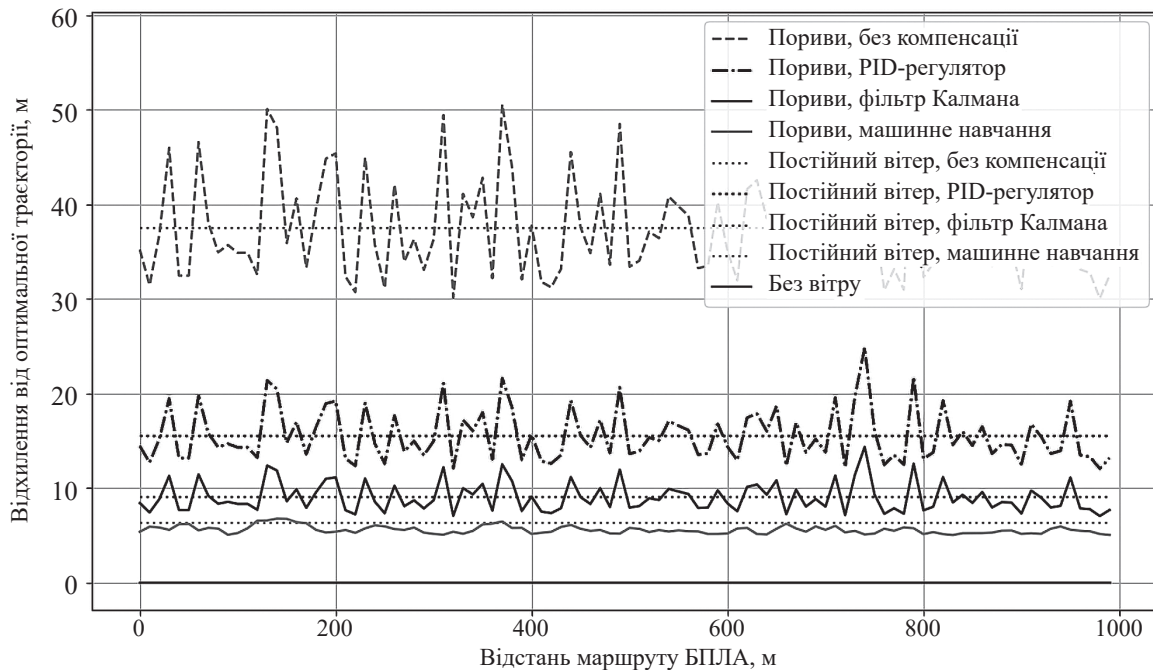
польоту БПЛА було враховано середньоквадратичне відхилення швидкості вітру та вплив кожного пориву окремо, а не лише його середнє значення. Як результат, це призвело до збільшення часу польоту та енергоспоживання БПЛА у порівнянні із сценарієм «Без вітру».

Особливу увагу приділено порівнянню ефективності різних методів компенсації впливу вітру на рух БПЛА: базового (без компенсації), з PID-регулятором, з фільтром Калмана та з використанням прогнозу на основі машинного навчання. Результати експериментів дають змогу стверджувати, що у порівнянні із звичайними алгоритмами, адаптивні методи компенсації впливу вітру дозволяють знизити відхилення від траєкторії руху БПЛА до 70 %. Зниження енергоспоживання при цьому можливо відповідно до 20 %. Схематичні та графічні ілюстрації результатів проведених експериментів підтверджують ефективність запропонованих підходів і можуть бути використані для подальшої оптимізації систем управління БПЛА. Використання алгоритмів машинного навчання для прогнозування змін параметрів вітру дозволяє БПЛА заздалегідь коригувати свою траєкторію, зменшуючи тим самим відхилення від заданої траєкторії руху навіть у складних умовах поривчастого вітру. У сучасних дослідженнях [5, 6, 11] показано, що застосування моделей LSTM або GRU для короткострокового прогнозу швидкості та напрямку вітру дозволяє знизити середнє відхилення від траєкторії руху БПЛА на 10–30 % у порівнянні із класичними адаптивними методами.

Т а б л и ц я 5. Результати моделювання для сценарію «Пориви вітру»

Метод компенсації	Середнє відхилення, м	Енергоспоживання, Вт·год.
Без компенсації	60	2.34
PID-регулятор	25	2.10
Фільтр Калмана	12	2.05
Машинне навчання (ML)	8	2.00

Модель машинного навчання, аналізуючи поточні та попередні значення швидкості вітру, прогнозує майбутні пориви вітру, що дозволяє БПЛА заздалегідь змінювати свої параметри курсу і швидкості. Це забезпечує найменше середнє відхилення від оптимальної траєкторії руху та найнижче енергоспоживання БПЛА серед усіх розглянутих методів.



Р и с . 5. Відхилення від оптимальної траєкторії для БПЛА літакового типу

## ВИСНОВКИ

У статті проведено комплексний аналіз впливу вітру на ефективність алгоритмів побудови траєкторій руху безпілотних літальних апаратів літакового типу. На відміну від більшості попередніх робіт, де аналіз проводився або для одного алгоритму, або без порівняння на реальних параметрах БПЛА, проведено симуляцію трьох типів алгоритмів компенсації відхилення БПЛА від траєкторії руху для одного класу реальних БПЛА у трьох різних сценаріях вітру. Доведено, що при постійному або поривчастому вітрі відхилення БПЛА від оптимальної траєкторії руху має властивість накопичуватися вздовж маршруту, що може призводити до значних помилок позиціонування та підвищення енергоспоживання БПЛА, особливо за відсутності відповідної компенсації впливу вітру. Використання класичних методів компенсації впливу вітру на напрямку руху БПЛА, таких як PID-регулятор і фільтр Калмана, дозволяє суттєво зменшити темпи накопичення відхилення БПЛА від траєкторії руху, однак навіть ці підходи не завжди забезпечують достатню точність у складних умовах дії вітру або на довгих маршрутах руху БПЛА. Систематичний перебір параметрів PID-регулятора та фільтра Калмана для кожного сценарію дозволив отримати оптимальні налаштування для різних умов польоту та показати, як змінюється ефективність алгоритмів залежно від сили та напрямку вітру. Найкращі результати продемонстрували алгоритми на основі машинного навчання, які здатні прогнозувати зміни параметрів вітру на кілька секунд наперед і проактивно коригувати траєкторію польоту БПЛА. Для навчання LM-мережі застосовано реальні метеодані NOAA та OpenWeatherMap із поєднанням синтезованих даних з генератора поривів вітру, що збільшило точність прогнозу та адаптивність алгоритму до реальних погодних умов. Це дозволяє не лише зменшити середнє та максимальне відхилення БПЛА від оптималь-

ної траєкторії, а й знизити енергоспоживання БПЛА за рахунок більш плавних і ефективних маневрів. Графік із симуляції є результатом чисельного інтегрування динаміки системи з урахуванням усіх ефектів – накопичення інтегральної складової, обмеження сигналу, реальної поведінки корекцій напрямку руху БПЛА у часі.

Чисельні експерименти показали, що адаптивна компенсація впливу вітру дозволяє знизити відхилення БПЛА від траєкторії руху до 70 % і енергоспоживання до 20 % у порівнянні із звичайними алгоритмами. Відповідно, застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє зменшити накопичене відхилення від траєкторії руху у 2–3 рази порівняно з класичними підходами, а середнє відхилення БПЛА від траєкторії руху за маршрутом може бути знижене до 8–10 м навіть у складних умовах поривчастого вітру. Це підтверджує доцільність впровадження інтелектуальних систем прогнозування параметрів вітру у сучасні бортові контролери БПЛА літакового типу для підвищення точності, безпеки та енергоефективності автономних польотів на великі відстані. Практичні рекомендації стосуються впровадження компенсації впливу вітру у реальні системи управління БПЛА літакового типу. Перспективи подальших досліджень – розробка гібридних методів компенсації впливу вітру на рух БПЛА та їх інтеграція у бортові контролери безпілотних літальних апаратів.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Haghghi, H., Delahaye, D., Moschetta, J.-M. & Asadi, D. (2025). UAV Trajectory Optimization for Maximum Soaring in Windy Environment. *Unmanned Systems*. № 13(2). Pp. 399—412. <https://doi.org/10.1142/S2301385025500232>
2. Dai, X., Duo, B., Yuan, X. & Di Renzo, M. (2023). Energy-Efficient UAV Communications in the Presence of Wind: 3D Modeling and Trajectory Design. *arXiv*

- preprint arXiv:2304.06909. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.06909>
3. Jayaweera, H. M. P. C. & Hanoun, S. (2022). Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Windy Environments. *Drones*. № 6(5). P. 101. <https://doi.org/10.3390/drones6050101>
  4. Lian, F., Li, B., Yang, Q., Zhu, H. & Du, D. (2024). WALPA\*: An Energy-Aware Path-Planning Algorithm for UAVs in Dynamic Wind Environments. *Drones*. № 8(3). P. 92. <https://doi.org/10.3390/drones8030092>
  5. Pu, H., Liu, X., Yang, S., Luo, C., He, Y., Chen, M. & Zheng, X. (2026). A Wind Field–Perception Hybrid Algorithm for UAV Path Planning in Strong Wind Conditions. *Algorithms*. № 19(2). P. 97. <https://doi.org/10.3390/a19020097>
  6. Zhang, Y., Lyu, J. & Fu, L. (2021). Energy-Efficient Trajectory Design for UAV-Aided Maritime Data Collection in Wind. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. № 20(10). Pp. 6402—6416. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3187954>
  7. Рижков Л. М., Пономаренко К. В. Аналіз основних властивостей траєкторій і впливу вітру на точність наведення БПЛА при застосуванні різних методів самонаведення. *Механіка гіроскопічних систем*. 2012. № 25. С. 39—49. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7160>
  8. Серєда А. В., Даценко І. П. Дослідження впливу вітру на управління безпілотним літальним апаратом у віртуальному середовищі Unity3D. *Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології*. 2024. № 1(07). С. 99—102. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-14>
  9. Chakrabarty, A. & Langelaan, J. UAV flight path planning in time varying complex wind-fields. 2013 American Control Conf. (ACC). Washington. DC. USA. June 17-19. 2013. Pp. 2574—2580. <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580221>
  10. Siqueira, J. C. D. C. (2017). Modeling of Wind Phenomena and Analysis of Their Effects on UAV Trajectory Tracking Performance. MS Thesis, Statler College of Engineering and Mineral Resources, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia Univ. <https://doi.org/10.33915/etd.7347>
  11. Liu, J., Li, Y., Yang, H., Wu, J. & Qu, Q. (2026). Research on the Impact of Urban Extreme Wind Fields on UAVs' Flight Stability in Typical Scenarios. *Applied Sciences*. № 16(1). P. 145. <https://doi.org/10.3390/app16010145>
  12. Куліш Р. В. Модель урахування бічного вітру при плануванні маршрутів польоту безпілотного літального апарата. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2024. № 1. С. 16. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.016>
  13. Yu Jian, Сітнікова О. Метод прогнозування траєкторій та ухилення БПЛА для промислових автономних місій у динамічному середовищі. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2026. № 1(35). С. 100. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2026.1.100>
  14. Ролік О., Смолій В., Смолій Н. Метод короткострокового планування траєкторії БПЛА. Адаптивні системи автоматичного управління. 2025. № 2(47). С. 185—203. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.47.2025.340207>
  15. Gao, J., Liu, X., Xia, Y., Shang, S., Pang, T. & Yang, B. (2026). A Wind-Aware Path Planning Method for UAVs in Urban Environments. 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Electrical Automation and Artificial Intelligence (ICEAAI). 16–18 January 2026. Pp. 1—6. <https://doi.org/10.1109/ICEAAI68945.2026.11442519>

## REFERENCES

1. Haghghi, H., Delahaye, D., Moschetta, J.-M. & Asadi, D. (2025). UAV Trajectory Optimization for Maximum Soaring in Windy Environment. *Unmanned Systems*. № 13(2). Pp. 399—412. <https://doi.org/10.1142/S2301385025500232>
2. Dai, X., Duo, B., Yuan, X. & Di Renzo, M. (2023). Energy-Efficient UAV Communications in the Presence of Wind: 3D Modeling and Trajectory Design. *arXiv preprint arXiv:2304.06909*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.06909>
3. Jayaweera, H. M. P. C. & Hanoun, S. (2022). Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Windy Environments. *Drones*. № 6(5). P. 101. <https://doi.org/10.3390/drones6050101>
4. Lian, F., Li, B., Yang, Q., Zhu, H. & Du, D. (2024). WALPA\*: An Energy-Aware Path-Planning Algorithm for UAVs in Dynamic Wind Environments. *Drones*. № 8(3). P. 92. <https://doi.org/10.3390/drones8030092>
5. Pu, H., Liu, X., Yang, S., Luo, C., He, Y., Chen, M. & Zheng, X. (2026). A Wind Field–Perception Hybrid Algorithm for UAV Path Planning in Strong Wind Conditions. *Algorithms*. № 19(2). P. 97. <https://doi.org/10.3390/a19020097>
6. Zhang, Y., Lyu, J. & Fu, L. (2021). Energy-Efficient Trajectory Design for UAV-Aided Maritime Data Collection in Wind. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. № 20(10). Pp. 6402—6416. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3187954>
7. Ryzhkov, L. M., & Ponomarenko, K. V. (2012). “Analiz osnovnykh vlastyivostei traiektorii i vplyvu vitru na tochnist navedennia BPLA pry zastosuvanni riznykh metodiv samonavedennia” [Analysis of the main properties of trajectories and the influence of wind on the accuracy of UAV guidance using various homing methods]. *Mekhanika gyroskopichnykh system*. № 25. Pp. 39—49. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/7160>
8. Sereda, A. V., & Datsenko, I. P. (2024). “Doslidzhennia vplyvu vitru na upravlinnia bezpilotnym litalnym aparatom u virtualnomu seredovyshchi Unity3D” [Effect of wind on UAV control in Unity3D environment]. *Infocommunication and Computer Technologies*. № 1(07). Pp. 99—102. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-14>
9. Chakrabarty, A. & Langelaan, J. UAV flight path planning in time varying complex wind-fields. 2013 American Control Conf. (ACC). Washington. DC. USA. June 17-19. 2013. Pp. 2574—2580. <https://doi.org/10.1109/ACC.2013.6580221>
10. Siqueira, J. C. D. C. (2017). Modeling of Wind Phenomena and Analysis of Their Effects on UAV Trajectory Tracking Performance. MS Thesis, Statler College of Engineering and Mineral Resources, Department of Mechanical and

- Aerospace Engineering. West Virginia Univ. <https://doi.org/10.33915/etd.7347>
11. Liu, J., Li, Y., Yang, H., Wu, J. & Qu, Q. (2026). Research on the Impact of Urban Extreme Wind Fields on UAVs' Flight Stability in Typical Scenarios. *Applied Sciences*. № 16(1). P. 145. <https://doi.org/10.3390/app16010145>
  12. Kulish, R. V. (2024). "Model urakhuvannia bichnoho vitru pry planuvanni marshrutiv polotu bezpilotnoho litalnoho aparatu" [The model of crosswind accounting for flight route planning of unmanned aerial vehicle]. *Control, Navigation and Communication Systems*. № 1. P. 16. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.016>
  13. Yu Jian, Сітнікова О. Метод прогнозування траєкторій та ухилення БПЛА для промислових автономних місій у динамічному середовищі. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2026. № 1(35). С. 100. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2026.1.100>
  14. Rolik, O., Smolii, V., & Smolii, N. (2025). Short-term UAV trajectory planning method. *Adaptive Systems of Automatic Control*. № 2(47). Pp. 185—203. <https://doi.org/10.20535/1560-8956.47.2025.340207>
  15. Gao, J., Liu, X., Xia, Y., Shang, S., Pang, T. & Yang, B. (2026). A Wind-Aware Path Planning Method for UAVs in Urban Environments. 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Electrical Automation and Artificial Intelligence (ICEAAI). 16–18 January 2026. Pp. 1—6. <https://doi.org/10.1109/ICEAAI68945.2026.11442519>

**Liutfaliiev E. G.**

**ANALYSIS OF WIND INFLUENCE ON THE EFFICIENCY OF TRAJECTORY PLANNING ALGORITHMS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES AND DEVELOPMENT OF EXTERNAL FACTOR COMPENSATION METHODS**

*This paper studies the effect of wind on the success rate of path planning algorithms for a fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle (UAV). We thoroughly review the literature on state-of-the-art wind compensation approaches, including adaptive schemes as well as optimization techniques, with a particular emphasis on fixed-wing UAVs. Wind effects on the flight dynamics and power consumption are modeled. Here we show how to compensate for such external perturbations as wind via PID controllers, Kalman filters*

*and machine learning prediction models in details. The simulation setup, the input parameters (mass, wing span, cruise speed, wind parameters), and the scenarios (steady wind, wind gusts, no wind) are introduced in the experimental section. In the calculations are provided the trajectory distortion, both energy consumption and flying time. Schematic illustrations of the UAV trajectory in wind fields as well as the efficiency of compensation methods.*

*The results illustrate that adaptive compensation can reduce the trajectory errors and the energy consumption of up to 70 % and 20 %, respectively, when compared to the baseline algorithms. The paper ends with practical guidelines for the implementation of wind compensation in actual UAV control systems and by listing opportunities for future research, including extensions of hybrid compensation methods and their incorporation into onboard flight controllers.*

**Keywords:** *fixed-wing UAV, wind compensation, trajectory planning, PID controller, Kalman filter, machine learning, energy consumption, simulation.*

**Відомості про авторів:**

**Лютфалієв Еміль Георгійович**

аспірант інституту прикладного системного аналізу Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
м. Київ, Україна  
<https://orcid.org/0009-0009-9070-6632>  
email: emile@ukr.net

**Information about the authors:**

**Liutfaliiev Emil**

PhD Student  
Institute for Applied System Analysis  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»  
Kyiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0009-0009-9070-6632>  
email: emile@ukr.net

*Стаття прийнята до редколегії 11.05.2026.*

*Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.*

*Стаття опублікована 30.06.2026.*