

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

APPLIED MATHEMATICS

DOI: 10.20998/2079-0023.2025.01.20

УДК 519.6+004.93+621.865.8

О. А. ГАЛУЗА, доктор фізико-математичних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; e-mail: Oleksii.Haluza@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3809-149X>

О. Б. АХІЄЗЕР, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачка кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; e-mail: Olena.Akhiezer@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>

С. В. ПОГОРЕЛОВ, доктор фізико-математичних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; e-mail: Stanislav.Pohorielov@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0189-8655>

Н. Т. ПРОЦАЙ, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; e-mail: Nataliia.Protsai@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2057-3231>

О. М. ВОЛКОВОЙ, Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова; м. Харків, Україна; e-mail: oleksandr.volkovoi@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0063-8029>

ОЦІНКА ЯКОСТІ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ СПЕЦІАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА РУХОМИХ ЗАСОБАХ

Стаття присвячена оцінці якості систем стабілізації спеціального обладнання, що використовується на різних типах рухомих засобів, таких як бойові машини, зокрема бойові машини піхоти, танки тощо. Основна задача таких систем полягає в підтримці стабільного положення або орієнтації об'єкта, що дозволяє уникати зовнішніх впливів та компенсувати рух самого носія обладнання. Це особливо важливо для бойових засобів, де стабільність обладнання впливає на точність наведення і ефективність бойових дій. Серед функцій, що розглядаються, є згладжування та пом'якшення різких коливань і відхилень, а також стабілізація щодо цілі. У статті представлена математична модель та розроблене програмне забезпечення для оцінки якості систем стабілізації спеціального обладнання на рухомих засобах з використанням методу аналізу відхилень шляхом обчислення відхилень у процесі стабілізації, яка враховує рух носія. Метод передбачає вимірювання кутових відхилень прицілу відносно мішені в кожний момент часу. Основними показниками якості стабілізації в моделі є середнє кутове відхилення (mean angular deviation), стандартне відхилення, максимальне відхилення. Для динамічного відстеження мішені використовуються принципи кореляційного фільтра, який дозволяє визначати подібність між поточним кадром та еталонним зображенням об'єкта. Цей підхід дає змогу надійно ідентифікувати об'єкт навіть в умовах динамічної зміни положення. Кореляційний трекінг, описаний у статті, заснований на пошуку об'єкта у наступному кадрі шляхом максимізації подібності між поточним зображенням та еталоном. Застосування кореляційного фільтра забезпечує стабільне відстеження об'єкта і коригує налаштування для точного фокусування на цілі в умовах зміни освітлення та ракурсу.

Ключові слова: трекінг, відстеження об'єкта, якість стабілізації, відхилення, трекер каналної і просторової надійності (CSRT), кореляційний фільтр.

Вступ. У сучасному світі вимоги до точності та ефективності роботи спеціального обладнання (систем озброєння, відеокамер, тепловізорів, навігаційних систем тощо), встановленого на рухомому транспорті, зокрема військовому (танки, бронетранспортери, безпілотні системи тощо), постійно зростають. Одним із важливих аспектів є забезпечення стабільності обладнання під час руху [1–3].

Основні завдання систем стабілізації в контексті прицільних і навігаційних систем включають компенсацію руху носія, тобто стабілізацію прицілу або сенсора таким чином, щоб вони залишалися направленими на ціль навіть під час руху машини; усунення зовнішніх збурень – поглинання впливу нерівностей

рельєфу, вібрацій або інших факторів, що можуть порушувати точність стабілізації; покращення точності прицілювання – забезпечення плавного та точного наведення прицілу, що особливо важливо для цілей на великих відстанях; автоматизація супроводу цілі – стабілізована система може автоматично утримувати приціл на обраній цілі, звільняючи оператора від необхідності постійно вручну коригувати наведення [4].

Стабілізовані системи є критично важливими для підвищення точності наведення та забезпечення ефективності під час руху, коли нестабільність може призвести до втрати цілі [5]. Оцінка якості системи стабілізації спеціального обладнання на рухомих засобах – це задача аналізу динамічних коливань

© Галуза О. А., Ахієзер О.Б., Погорелов С. В., Процай Н.Т., Волковой О.М. 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



прицілу (або іншого обладнання) відносно мішені. Для оцінки якості стабілізації можуть використовуватися кілька ключових методів, які дозволяють виміряти різні параметри коливань. Основні методи оцінки стабілізації можуть базуватися на аналізі таких параметрів, як амплітуда коливань (максимальне кутове відхилення від цілі, середньоквадратичне відхилення від мішені або корінь із нього, тощо), частота коливань, час реакції стабілізаційної системи на зміну положення рухомого засобу, відносно відхилення та інші [6].

Для об'єктивного моніторингу якості стабілізації спеціального обладнання можуть використовуватися кілька типів сигналів та датчиків, які фіксують різні показники руху і позиції системи [7]:

1. Акселерометри – для вимірювання прискорень платформи в різних напрямках, що дозволяє враховувати коливання та коливальні збурення.

2. Гіроскопи – для визначення кутової швидкості, допомагають відстежувати повороти та нахили.

3. Датчики кутового положення (енкодери) – забезпечують точне вимірювання положення прицілу відносно платформи.

4. Камери або оптичні сенсори – фіксують рух прицілу відносно цілі, що дозволяє оцінити та кількісно визначити коливання та відхилення прицілу.

Якість стабілізації прицілу залежить від ряду технічних і експлуатаційних факторів, таких як точність датчиків, які визначають рівень коливань; ефективність алгоритмів управління, таких як PID-регулятори, які визначають здатність системи швидко й точно компенсувати збурення; швидкість роботи приводу компенсатора; швидкість руху платформи, рівень збурень і алгоритми корекції [8].

У статті розглянуто задачу розробки математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення для кількісного аналізу якості стабілізації спеціального обладнання рухомих засобів шляхом обробки відеопотоку з камери, синхронізованої з обладнанням.

На рис. 1 наведено приклад кадру з камери, що фіксує зображення поля зору прицілу озброєння бронетранспортера БТР-4Е. На кадрі зеленим виділено еталонну мішень, а червоним – мітку прицілу.



Рис. 1. Приклад поля зору камери прицілу зі щитом-мішенню (зелений прямокутник) та прицільною маркою (червоний прямокутник).

Для кожного кадру відеопотоку можна отримати поточне значення величини лінійного відхилення $\delta(t)$ мітки прицілу від фіксованої точки на об'єкті-мішені окремо для кожної осі (вертикальної та горизонтальної) у декартовій системі координат. Для оцінки якості систем стабілізації за значеннями $\delta(t)$ можуть використовуватися різні методи та підходи, основними з яких є статистичний аналіз відхилень, частотний аналіз, аналіз розподілу точності, кореляційний аналіз, методи на основі динамічних показників, методи на основі машинного навчання тощо [9–11].

Кожен з методів має свої переваги і певні недоліки і в сучасних системах можуть використовуватися як окремі методи, так і їх комбінація в залежності від основних цілей застосування систем стабілізації.

Метод статистичного аналізу відхилень передбачає часові вимірювання кутових та/або лінійних відхилень прицілу відносно мішені за період часу T .

Основними кількісними показниками якості є середнє (або медіанне) відхилення $\bar{\delta}$, середньоквадратичне відхилення σ_{δ} , максимальне відхилення тощо:

$$\bar{\delta} = \frac{1}{T} \int_0^T \delta(t) dt, \quad \sigma_{\delta} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\delta(t) - \bar{\delta})^2 dt}. \quad (1)$$

Чим меншим є відхилення, тим вища якість стабілізації. Середньоквадратичне відхилення σ_{δ} дає узагальнений показник якості стабілізації за весь інтервал часу, тоді як максимальне відхилення показує граничну похибку системи, що важливо в умовах інтенсивного бою.

В даній роботі використано саме цей метод, оскільки він дозволяє отримати точкові оцінки якості роботи системи стабілізації, що є найбільш зручним для подальшого прийняття рішень стосовно відповідності системи експлуатаційним вимогам.

Постановка задачі та мета дослідження. Для забезпечення високої якості та надійності роботи та стабілізації положення спеціального обладнання на рухомих засобах виникає потреба в розробці програмного продукту, що дозволить автоматично аналізувати відеозаписи (рис. 1) та оцінювати рівень стабілізації.

Метою роботи є розробка математичного, алгоритмічного та програмного забезпечення для оцінки якості роботи системи стабілізації спеціального обладнання рухомих засобів, яке дозволить проводити атестацію якості стабілізації транспортного засобу під час руху, використовуючи відеозаписи.

Для досягнення мети роботи програмний продукт має забезпечувати виконання наступних вимог:

- мати можливість виділити цільовий об'єкт для відстеження на кадрі;
- відстежувати цільовий об'єкт між кадрами;
- обчислювати відхилення положення цільового об'єкта від заданої точки на кадрі (не змінює положення впродовж відео);
- в реальному часі відображати графік відхилень положення цільового об'єкта;

- в реальному часі відображати графік «середньої лінії» відхилення;
- в реальному часі відображати графік похибки стабілізації (різниця між відхиленням та середньою лінією);
- в реальному часі обчислювати медіанне значення похибки стабілізації та порівнювати його з критичним, результат відображати в інтерфейсі;
- створювати pdf-звіт з усією обчисленою інформацією.

Таким чином, програмний продукт має автоматично аналізувати відео та визначати рівень стабілізації обладнання за критеріями, встановленими користувачем.

Математична модель. Аналіз якості стабілізації спеціального обладнання проводився за відеоматеріалом, отриманим з відеоканери під час руху. Камера синхронізована з обладнанням, що стабілізується. Для прикладу в роботі використано відеозапис з камери, що синхронізована з прицілом основного озброєння бронетранспортера БТР-4Е. Схема експерименту наведена на рис. 2.

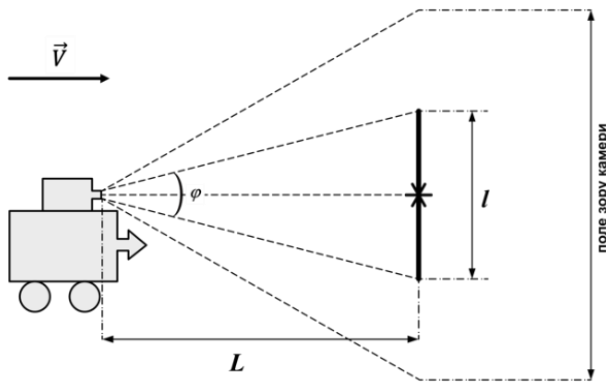


Рис. 2. Схема експерименту.

Для подальшого аналізу на рис. 2 введено наступні параметри: L – поточна відстань від рухомого засобу до квадратного щита-мішені, l – абсолютний лінійний розмір сторони мішені, φ – поточний кутовий розмір мішені, V – швидкість руху в напрямку мішені.

На рис. 3 показано схему поля зору камери прицілу та введено систему координат та основні параметри моделі для подальших розрахунків: M_x , M_y – координати центру мішені, (P_l, P_t) та (P_r, P_b) – координати лівого верхнього та правого нижнього кутів мішені, відповідно, dX , dY – відстані від центру мішені до центру прицільної марки по осях X та Y . Всі координати та відстані задано у пікселях.

Методи та алгоритми. В якості основного методу оцінки якості стабілізації було обрано метод статистичного аналізу відхилень, в якому передбачається вимірювання кутових відхилень прицілу відносно центру мішені в кожний момент часу в горизонтальній та вертикальній площинах. Основним показником якості стабілізації є медіанне кутове відхилення у кожній площині, яке порівнюється з пороговим значенням, заданим користувачем.

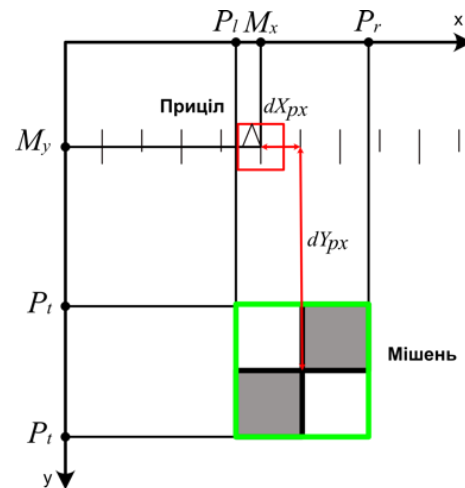


Рис. 3. Схема поля зору камери прицілу.

Формально задачу було розбито на дві підзадачі: відстеження мішені з визначенням лінійних відхилень прицілу в двох площинах та подальший аналіз відхилень.

В якості вхідних даних для першої підзадачі є:

- відео (впорядкований набір кадрів);
- початкове положення цільового об'єкта (прямокутник, що задано координатами лівого верхнього кута P_{lt} і правого нижнього кута P_{rb}) (рис. 3);
- положення прицілу, $M(M_x, M_y)$;
- розміри об'єкта в метрах, $s_x = s_y = s$;
- початкова відстань до об'єкта в метрах, L ;
- швидкість руху, v .

Вихідними даними є:

- часові ряди $\delta_x(t_k)$ та $\delta_y(t_k)$ відхилень положення центру цільового об'єкта від прицілу на кожному кадрі в кутових одиницях, де t_k – відносний час, який відповідає кадру з номером k .

Вхідними даними для підзадачі аналізу є:

- часові ряди відхилень $\delta_x(t_k)$ та $\delta_y(t_k)$.

Результатом підзадачі аналізу є:

- часові залежності випадкових компонент відхилень;
- тренди часових рядів відхилень;
- графіки вихідних рядів, трендів та випадкових компонент;
- медіанні значення похибок.

Розв'язок задачі складається з декількох етапів, до яких входять:

- відстеження об'єкта на відео;
- обчислення кутових відхилень;
- побудова трендів (середніх ліній);
- формування масивів випадкових компонент рядів.

Відстеження об'єктів на відео є типовою задачею комп'ютерного зору. Існує багато алгоритмів для її розв'язання, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Нами було використано один з найточніших та найсучасніших алгоритмів – треєкер каналної і просто-

рової надійності (Channel and Spatial Reliability Tracker – CSRT) [12].

CSRT – це трекер, який побудовано на основі DCF (Discriminative Correlation Filter) і використовує ідею кореляційних фільтрів для відстеження об'єктів, але з певними покращеннями [13]. DCF – це математичний метод, що використовується в задачах відстеження об'єктів для знаходження регіону з максимальною кореляцією між заданим зразком (шаблоном) та частинами зображення, що аналізується. Згідно DCF, об'єкт знаходиться там, де кореляція між шаблоном (зразком об'єкта) і зображенням максимальна. Основна суть DCF – це використання кореляційних фільтрів для розрізнення об'єкта та фону. Для підвищення обчислювальної ефективності, кореляційний фільтр переводиться в частотну область з використанням швидкого перетворення Фур'є (FFT), що дозволяє порівнювати шаблон з областю зображення в частотному просторі. Це знімає потребу в скануванні кожної позиції об'єкта у просторі: DCF обчислює згортку в частотному просторі, де вона перетворюється на простіше множення спектрів (покомпонентне множення матриць вхідного сигналу та фільтру), що значно прискорює обчислення. У частотному просторі кореляційні фільтри можуть оцінити сумісність шаблону з усією областю огляду одночасно, і після зворотного перетворення Фур'є отримують результат для всіх позицій. Результатом є карта кореляції, де піки показують найбільш схожі області, а найвищий пік відповідає оптимальному розташуванню шаблону відносно об'єкта.

CSRT додає до цього базового підходу розширені механізми. А саме, обчислює ваги для кожного просторового регіону об'єкта, що дозволяє підвищити точність в умовах складного фону чи зміни розміру об'єкта, та вибирає найбільш інформативні кольорові канали, що знижує вплив шуму та інших каналів, які можуть додати невизначеності.

Формально, задача полягає у мінімізації помилки між вихідним зображенням і зображенням, зваженим кореляційним фільтром:

$$\min_w \|Y - \Phi^{-1}(\hat{W} \circ \hat{X})\|^2 + \lambda \|W\|^2, \quad (2)$$

де: Y – еталонний шаблон об'єкта; X – кадр зображення; W – кореляційний фільтр; Φ – оператор швидкого перетворення Фур'є (FFT); $\hat{W}$ і $\hat{X}$ – перетворені у частотну область фільтр і кадр відповідно; $\circ$ – операція покомпонентного множення матриць; λ – регуляризаційний параметр для запобігання перенаванчання; $\|W\|^2$ – регуляризатор.

CSRT вводить оцінку просторової надійності для точнішого визначення відповідності об'єкта в кадрі. Просторова надійність вимірює наскільки добре різні регіони зображення відповідають референсному шаблону. Це дозволяє врахувати просторову невизначеність у фільтрах.

Оцінка просторової надійності визначається через функцію ваг, яка застосовується до фільтрів на кожній

ітерації. Вона може бути представлена як функція $r(x, y)$, де x і y – координати вхідного зображення.

Функція просторової надійності може бути представлена через вагову матрицю:

$$r(x, y) = \text{softmax}\left(-\alpha \cdot \|X(x, y) - Y(x, y)\|^2\right), \quad (3)$$

де $X(x, y)$ – піксель вхідного кадру з координатами x, y ; $Y(x, y)$ – піксель шаблону; α – параметр чутливості функції до відмінності між пікселями. $\text{softmax}()$ – це математична операція, яка перетворює набір чисел в ймовірності (всі значення на виході лежать в інтервалі $[0, 1]$, а їхня сума дорівнює 1):

$$\text{softmax}(z_i) = \frac{\exp(z_i)}{\sum_{j=1}^n \exp(z_j)}, \quad i = 1 \dots n, \quad (4)$$

де $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ – набір чисел, що підлягає масштабуванню [14].

Аналогічно з просторовою інформацією враховується інформація про кольорові канали об'єкта, що дозволяє краще відстежувати об'єкти, які змінюють форму або масштаб, зокрема в умовах зміни освітлення чи інших характеристик об'єкта. CSRT трекер моделює цільовий об'єкт, використовуючи особливості кольору для підвищення точності відстеження. Для кожного каналу за схемою (2) будується окремий кореляційний фільтр, який відповідає за виявлення об'єкта у відповідному каналі. Загальний результат трекінгу обчислюється як зважене середнє для всіх каналів.

Остаточна позиція об'єкта в кадрі визначається як позиція, яка максимізує відгук кореляційного фільтра:

$$(x_{best}, y_{best}) = \arg \max_{(x, y)} \Phi^{-1}(\hat{W} \circ \hat{X}). \quad (5)$$

CSRT добре адаптується до змін у масштабі об'єкта, забезпечуючи точне відстеження навіть під час зміни його розміру. У разі, якщо об'єкт не вдалося ідентифікувати, алгоритм повторно запускає трекер за останнім успішним кадром та відповідним обмежувальним прямокутником.

До певних обмежень методу можна віднести суттєву повільність у порівнянні з трекерами, такими як KCF (Kernelized Correlation Filters) чи MOSSE (Minimum Output Sum of Squared Error), оскільки враховує більшу кількість параметрів. Підвищена обчислювальна складність потребує більше ресурсів, що може бути проблемою для реального часу на слабких системах. Також у разі сильних змін у фоні або коли фон має схожі властивості з об'єктом, точність відстежування може знизитися.

Після побудови за допомогою CSRT-трекеру на кожному кадрі обмежувального прямокутника, верхній лівий і правий нижній кут якого мають координати $P_l(P_l, P_t)$, $P_r(P_r, P_b)$, відповідно, можна перейти до обчислення відхилень (рис. 3). Для цього спочатку обчислюється відстань по кожній осі від об'єкта до прицілу, який має координати $M(M_x, M_y)$:

$$dX_{px} = \left| \frac{(P_l + P_r)}{2} - M_x \right|, \quad dY_{px} = \left| \frac{(P_t + P_b)}{2} - M_y \right|. \quad (6)$$

Тепер відхилення переводимо до метрів:

$$dX_m = dX_{px} \cdot \frac{s}{\max(P_l - P_r, P_t - P_b)}, \quad (7)$$

$$dY_m = dY_{px} \cdot \frac{s}{\max(P_l - P_r, P_t - P_b)}, \quad (8)$$

після чого - до мілірадіан:

$$\delta_x(t_k) = 1000 \cdot \arctan\left(\frac{dX_m}{L(t_k)}\right), \quad (9)$$

$$\delta_y(t_k) = 1000 \cdot \arctan\left(\frac{dY_m}{L(t_k)}\right), \quad (10)$$

де $L(t_k)$ – відстань від камери до об'єкта для кадру t_k .

Таким чином ми отримуємо дві послідовності відхилень по осі OX та OY (рис. 3).

Після того, як обчислено відхилення мішені на кожному кадрі, перейдемо до оцінки якості стабілізації, яка буде проводитись незалежно для кожної осі. Для цього спочатку треба прибрати з ряду відхилень компоненту тренду, що не обумовлена роботою стабілізатора. Це можна зробити побудувавши і потім віднявши від ряду відхилень «середню лінію».

Для побудови середньої лінії був використаний алгоритм ковзного усереднення локальних екстремумів, який є ефективним при виявленні довгострокових трендів у даних, оскільки він фільтрує короткострокові коливання [15]. Подібно до класичного ковзного середнього, цей метод використовується для того, щоб згладити шум у даних. До його недоліків можна віднести чутливість до великої зашумленості, оскільки визначення точних локальних екстремумів може бути проблематичним, але методика побудови нашої моделі не передбачає наявності суттєвого шуму. В моделі використовуються дві ітерації алгоритму.

Алгоритм виявлення тренду методом ковзного усереднення локальних екстремумів складається з наступних кроків:

- знайти множину точок:

$$P \left\{ p(i, D_i) \left[[D_{i-1} < D_i > D_{i+1}] \cup [D_{i-1} > D_i < D_{i+1}] \right] \right\}, \quad (11)$$

де D_i – відхилення на i -му кадрі (окремо по кожній осі), i – номер кадру (рис. 4).

- побудувати множину точок

$$MP \left\{ mp_i = \frac{p_i + p_{i+1}}{2}, i = 1 \dots n \right\}, \quad (12)$$

де p_i - i -та точка з отриманих у попередньому пункті, n – кількість точок.

- побудувати кубічний сплайн, що буде проходити через усі точки множини MP [16].

- дискретизувати отримані сплайни так, щоб абсциси нового ряду F_1 співпадали з початковим рядом відхилень D .

- повторити пункти алгоритму, взявши в першому пункті ряд F_1 замість D . Після повторного згладжування, отриманий ряд назовемо F_2 .

Після побудови середньої лінії F_2 , можемо обчислити похибку стабілізації $Err_i = D_i - F_{2i}$. Відповідно до методики для подальших розрахунків з ряду необхідно відкинути значення, що за абсолютною величиною перевищують критичне значення, яке задає користувач перед запуском програми в налаштуваннях. Масив відхилень Err_i буде представляти собою вихідні дані з модуля детекції, який передається в якості вхідних даних до модуля аналізу.

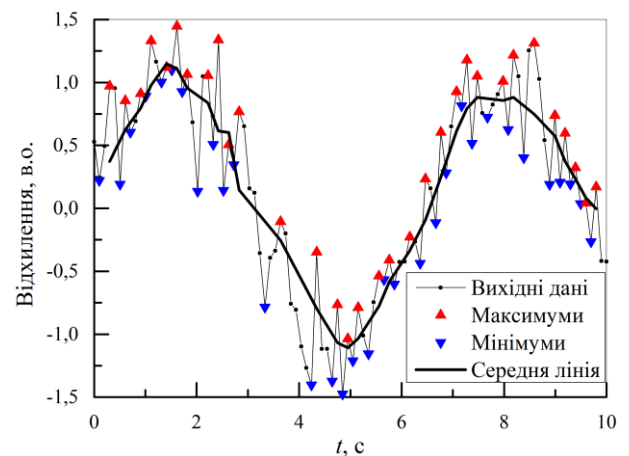


Рис. 4. Приклад роботи алгоритму ковзного усереднення локальних екстремумів часового ряду.

З множини відхилень Err_i в модулі аналізу будуватиметься графік абсолютних відхилень окремо для кожної осі, графік середньої лінії F_2 , та розраховуватиметься медіанне значення похибки, порівняння якого критичним, яке задає оператор, дозволяє робити ґрунтовний висновок стосовно якості стабілізації.

Програмна реалізація. Програмна реалізація алгоритму – Stabilizer_quality_control – програмний застосунок для Microsoft Windows, призначений для аналізу якості стабілізації транспортного засобу на основі відеоматеріалу, записаного на спеціально призначеному полігоні.

Застосунок розроблено з використанням мови програмування Python. Для реалізації інтерфейсу було використано бібліотеку PyQt 5. В програмі використано бібліотеку OpenCV [17] для трекінгу мішені на відео та бібліотеки Numpy та SciPy для реалізації моделі оцінки якості стабілізації [18]. Інтерфейс застосунку оснований на класі SimpleGUI.

Мінімальні системні вимоги:

- Процесор: Intel Pentium G620/ AMD A4-3400;
- RAM: 2 Гб;
- Місце на диску: 512 Мб;
- Операційна система: Windows 10/11.

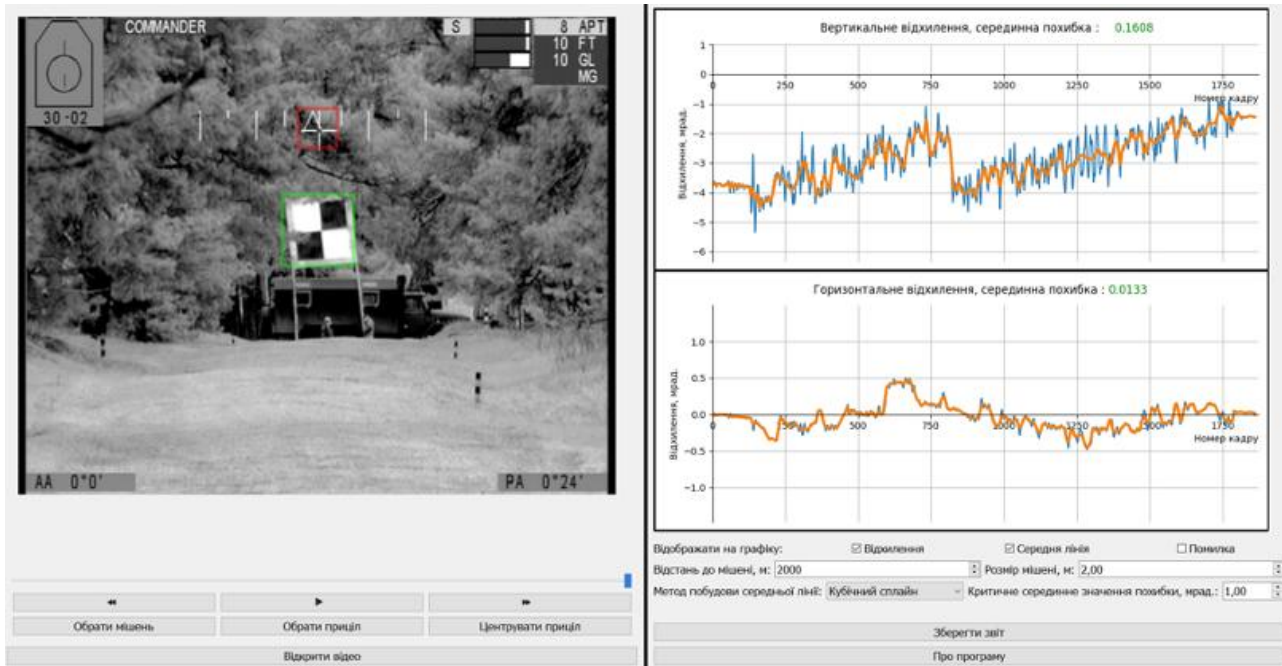


Рис. 5. Зовнішній вигляд головного вікна додатку.

Після запуску додатку відкривається головне вікно програми (рис. 5). Інтерфейс складається з двох частин. Зліва відображається поточний кадр відео, елементи керування процесом програвання та елементи визначення початкових положень мішені та прицільної марки. Праворуч знаходяться графіки кутових відхилень ($\delta_x(t_k)$ та $\delta_y(t_k)$), середніх ліній та випадкових компонент. Там же знаходяться елементи управління режимом відображення графіків, задання початкових значень параметрів експерименту (відстань до мішені L , розмір мішені l , критичне значення похибки), методу побудови середньої лінії та кнопка збереження звіту.

Для початку роботи з додатком треба відкрити відео файл, натиснувши відповідну кнопку. Після цього необхідно обрати на першому кадрі мішень для відстеження натиснувши кнопку «Обрати мішень» та послідовно натиснути на 4 кути мішені на першому кадрі відео (рис. 5). За необхідності можна переобрати й приціл. Після обрання мішені кнопки керування відео стануть активними. Для початку обробки відео треба натиснути кнопку «Пуск». В ході обробки відео на віджеті справа буде відображатись поточний графік відхилень, також за потреби на графіку можна також відобразити середню лінію та графік похибки стабілізації, це можна зробити за допомогою елементів управління, що розташовано під графіками.

За потреби, можна змінити метод побудови середньої лінії (випадний список «Метод побудови середньої лінії»), що суттєво вплине на значення похибки стабілізації та подальші результати обчислень.

Після закінчення обробки відео користувач має змогу зберегти результати обробки в окремому файлі (кнопка «Зберегти звіт»).

Висновки, перспективи подальших досліджень. У процесі роботи було створено математичне та алгоритмічне забезпечення для розв'язання задачі

аналізу якості системи стабілізації спеціального обладнання на транспортному засобі під час руху на основі аналізу відеопотоку з камери, яка є синхронізованою з обладнанням, що стабілізується.

На основі розробленої математичної моделі було створено програмний продукт, який реалізує розроблені алгоритми та дозволяє за обраним відео отримати результати аналізу якості стабілізації у вигляді графіків в інтерфейсі програми та зберегти їх у pdf-файлі.

Подальшим кроком розвитку програмного продукту планується додавання можливості використовувати інші методи виключення тренду та інші критерії оцінки якості стабілізації, такі як метод частотного аналізу, метод оцінки часу стабілізації, кореляційний аналіз.

Список використаної літератури

1. Dorczuk M. Modern weapon systems equipped with stabilization systems: division, development objectives, and research problems. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2020. Vol. 197, no. 3. P. 651–659. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3959.
2. Saluyk O. Mathematical description of systems for space stabilization of equipment assigned for operation on moving vehicles. *Electronics and Control Systems*. 2023. Vol. 3, no. 77. P. 53–59. DOI:10.18372/1990-5548.77.18004
3. Lan L., Jiang W., Hua F. Research on the line of sight stabilization control technology of optronic mast under high oceanic condition and big swaying movement of platform. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 6. 3182. DOI: 10.3390/s23063182
4. Dobrovodský K., Andris P. Stabilization of mobile weapon aiming. *Mechanisms and Machine Science*. 2021. Vol. 102. P. 259–265. DOI: 10.1007/978-3-030-75259-0_28
5. Koh Y. J., Lee C., Kim C. Video stabilization based on feature trajectory augmentation and selection and robust mesh grid warping. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2015. Vol. 24, no. 12. P. 5260–5273. DOI: 10.1109/TIP.2015.2479918
6. Sushchenko O., Averyanova Y., Ostroumov I., Kuzmenko N., Zaliskiy M., Solomentsev O., Kuznetsov B., Nikitina T., Havrylenko O., Popov A., Volosyuk V., Shmatko O., Ruzhentsev N., Zhyla S., Pavlikov V., Dergachov K., Tserne E. Algorithms for design of robust stabilization systems. *Lecture Notes in Computer*

- Science. Vol. 13375. P.198–213. DOI: 10.1007/978-3-031-10522-7_15
7. Sushchenko O., Goncharenko A. Design of robust systems for stabilization of unmanned aerial vehicle equipment. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2016. Vol. 2016. 6054081. DOI: 10.1155/2016/6054081
 8. Habashi A., Ashry M., Mabrouk M., Elnashar G. Comparative study among different control techniques for stabilized platform. *Engineering Science and Military Technologies*. 2018. Vol. 2, no. 1. P. 44–48. DOI: 10.21608/ejmtc.2017.409.1005
 9. Bezvesilna O., Petrenko O., Halytskyi V., Ilchenko M. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, no. 9 (103). P. 39–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.196086
 10. Tchigirinsky J., Chigirinskaya N., Evtyunin A. Stability assessment methods of technological processes. MATEC Web of Conferences. 2021. Vol. 346. 03013. DOI: 10.1051/mateconf/202134603013
 11. Song Z. Multi-Sensor Fusion and Deep Learning: A New Frontier in Stabilization Algorithm Optimization. *Applied and Computational Engineering*. 2024. Vol. 80. P. 136–142. DOI: 10.54254/2755-2721/80/2024CH0080
 12. Lukežič A., Vojir T., Zajc L., Matas J., Kristan M. Discriminative correlation filter tracker with channel and spatial reliability. *International Journal of Computer Vision*. 2018. Vol. 126. P. 671–688. DOI: 10.1007/s11263-017-1061-3
 13. Liu Y., Yan H., Zhang W., Li M., Liu L. An adaptive spatiotemporal correlation filtering visual tracking method. *PLoS ONE*. 2023. Vol. 18, no. 1. e0279240. DOI: 10.1371/journal.pone.0279240
 14. Bishop C. M. *Pattern recognition and machine learning*. Springer New York, NY, 2006. 798 p.
 15. Hall P., Peng L., Yao Q. Moving-maximum models for extrema of time series. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2002. Vol. 103, no. 1–2. P. 51–63. DOI: 10.1016/S0378-3758(01)00197-5
 16. Wang Y. *Smoothing Splines: Methods and Applications*. Chapman and Hall/CRC, 2011. 384 p. DOI: 10.1201/b10954
 17. Howse J., Minichino J. *Learning OpenCV 4 computer vision with Python*. Packt Publishing, 2020. 372 p.
 18. Johansson R. *Numerical Python: scientific computing and data science applications with Numpy, SciPy and Matplotlib*. Apress Berkeley, CA, 2018. 723 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-4246-9
 4. Dobrovodský K., Andris P. Stabilization of mobile weapon aiming. *Mechanisms and Machine Science*. 2021, vol. 102, pp. 259–265. DOI: 10.1007/978-3-030-75259-0_28
 5. Koh Y. J., Lee C., Kim C. Video stabilization based on feature trajectory augmentation and selection and robust mesh grid warping. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2015, vol. 24, no. 12, pp. 5260–5273. DOI: 10.1109/TIP.2015.2479918
 6. Sushchenko O., Averyanova Y., Ostroumov I., Kuzmenko N., Zaliskyi M., Solomentsev O., Kuznetsov B., Nikitina T., Havrylenko O., Popov A., Volosyuk V., Shmatko O., Ruzhentsev N., Zhyla S., Pavlikov V., Dergachov K., Tserne E. Algorithms for design of robust stabilization systems. *Lecture Notes in Computer Science*. 2022, vol. 13375, pp. 198–213. DOI: 10.1007/978-3-031-10522-7_15
 7. Sushchenko O., Goncharenko A. Design of robust systems for stabilization of unmanned aerial vehicle equipment. *International Journal of Aerospace Engineering*. 2016, vol. 2016, 6054081. DOI: 10.1155/2016/6054081
 8. Habashi A., Ashry M., Mabrouk M., Elnashar G. Comparative study among different control techniques for stabilized platform. *Engineering Science and Military Technologies*. 2018, vol. 2, no. 1, pp. 44–48. DOI: 10.21608/ejmtc.2017.409.1005
 9. Bezvesilna O., Petrenko O., Halytskyi V., Ilchenko M. Devising and introducing a procedure for measuring a dynamic stabilization error in weapon stabilizers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, vol. 1, no. 9(103), pp. 39–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.196086
 10. Tchigirinsky J., Chigirinskaya N., Evtyunin A. Stability assessment methods of technological processes. MATEC Web of Conferences. 2021, vol. 346, 03013. DOI: 10.1051/mateconf/202134603013
 11. Song Z. Multi-Sensor Fusion and Deep Learning: A New Frontier in Stabilization Algorithm Optimization. *Applied and Computational Engineering*. 2024, vol. 80, pp. 136–142. DOI: 10.54254/2755-2721/80/2024CH0080
 12. Lukežič A., Vojir T., Zajc L., Matas J., Kristan M. Discriminative correlation filter tracker with channel and spatial reliability. *International Journal of Computer Vision*. 2018, vol. 126, pp. 671–688. DOI: 10.1007/s11263-017-1061-3
 13. Liu Y., Yan H., Zhang W., Li M., Liu L. An adaptive spatiotemporal correlation filtering visual tracking method. *PLoS ONE*. 2023, vol. 18, no. 1, e0279240. DOI: 10.1371/journal.pone.0279240
 14. Bishop C. M. *Pattern recognition and machine learning*. Springer New York, NY, 2006. 798 p.
 15. Hall P., Peng L., Yao Q. Moving-maximum models for extrema of time series. *Journal of Statistical Planning and Inference*. 2002, vol. 103, no. 1–2, pp. 51–63. DOI: 10.1016/S0378-3758(01)00197-5
 16. Wang Y. *Smoothing Splines: Methods and Applications*. Chapman and Hall/CRC, 2011. 384 p. DOI: 10.1201/b10954
 17. Howse J., Minichino J. *Learning OpenCV 4 computer vision with Python*. Packt Publishing, 2020. 372 p.
 18. Johansson R. *Numerical Python: scientific computing and data science applications with Numpy, SciPy and Matplotlib*. Apress Berkeley, CA, 2018. 723 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-4246-9

References (transliterated)

1. Dorczuk M. Modern weapon systems equipped with stabilization systems: division, development objectives, and research problems. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2020, vol. 197, no. 3, pp. 651–659. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3959.
2. Saluyk O. Mathematical description of systems for space stabilization of equipment assigned for operation on moving vehicles. *Electronics and Control Systems*. 2023, vol. 3, no. 77, pp. 53–59. DOI: 10.18372/1990-5548.77.18004
3. Lan L., Jiang W., Hua F. Research on the line of sight stabilization control technology of optronic mast under high oceanic condition and big swaying movement of platform. *Sensors*. 2023, vol. 23, no. 6, 3182. DOI: 10.3390/s23063182

UDC 519.6+004.93+621.865.8

O. A. HALUZA, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine; e-mail: Oleksii.Haluza@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3809-149X>

O. B. AKHIEZER, Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine; e-mail: olena.akhiezer@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>

S. V. POHORIELOV, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine; e-mail: Stanislav.Pohorielov@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0189-8655>

N. T. PROTSAL, Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine; e-mail: natalia.protsai@khpi.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2057-3231>

O. M. VOLKOV, Kharkiv Morozov Machine Building Design Bureau, Kharkiv, Ukraine; e-mail: oleksandr.volkovoi@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0063-8029>

Надійшло (received) 15.05.2025

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF THE STABILIZATION SYSTEM OF SPECIAL EQUIPMENT ON MOBILE VEHICLES

The article is devoted to the assessment of the quality of stabilization systems of special equipment used on various types of vehicles, such as combat vehicles, in particular infantry fighting vehicles (IFVs). The main task of such systems is to maintain a stable position or orientation of the object, which avoids external influences and compensates for the movement of the equipment carrier itself. This is especially important for combat assets, where the stability of the equipment affects the accuracy of guidance and the effectiveness of combat operations. Among the features considered are smoothing and mitigating abrupt fluctuations and deviations, as well as stabilizing relative to the target. The article presents a mathematical model and developed software for assessing the quality of stabilization systems of special equipment on mobile vehicles using the method of deviation analysis by calculating deviations in the stabilization process, which takes into account the movement of the carrier. The method involves measuring the angular deviations of the sight relative to the target at each point in time. The main indicators of stabilization quality in the model are mean angular deviation, standard deviation, and maximum deviation. For dynamic target tracking, the principles of a correlation filter are used, which allows you to determine the similarity between the current frame and the reference image of the object. This approach makes it possible to reliably identify an object even in conditions dynamic position change. The correlation tracking described in the article is based on finding an object in the next frame by maximizing the similarity between the current image and the reference. The use of a correlation filter ensures stable subject tracking and adjusts the settings to accurately focus on the target in conditions of changing lighting and angle.

Keywords: tracking, object tracking, stabilization quality, deviation, channel and spatial reliability tracker (CSRT), correlation filter.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Галуза Олексій Анатолійович / Haluza Oleksii Anatoliyovych
Автор 2 / Author 2: Ахїєзер Олена Борисівна / Akhiezer Olena Borysivna
Автор 3 / Author 3: Погорєлов Станіслав Вікторович / Pohorielov Stanislav Viktorovich
Автор 4 / Author 4: Процай Наталія Тимофіївна / Protsai Nataliia Tymofiiivna
Автор 5 / Author 5: Волковой Олександр Миколайович / Volkovoi Oleksandr Mykolayovych

ЗМІСТ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.....	3
<i>Мельников О. С., Дорофеев Ю. И., Марченко Н. А.</i> Статистичний підхід до виявлення аномалій у водорозподільних мережах	3
УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	10
<i>Левтеров А. И., Плехова Г. А., Костикова М. В., Окунь А. О.</i> Система контролю політики кібербезпеки з елементами штучного інтелекту корпоративної мережі зв'язку	10
УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	17
<i>Ivashchenko O. V., Filip S., Ratushnyi B. V.</i> Development of an educational chatbot with a contextual intent system on the Dialogflow platform.....	17
<i>Комаровський Д. Є., Галуза О. А., Ахїєзер О. Б.</i> Волонтерський рух як мережа постачання: аналіз, виклики та перспективи	25
МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	31
<i>Мартиненко Г. Ю., Гаркуша В. Ю.</i> Використання методів штучного інтелекту для прогнозу граничного статичного навантаження балки з гомогенного матеріалу за критерієм фон Мізеса на основі даних конструкційного міцнісного аналізу	31
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ	40
<i>Мельников О. Ю., Козуб Д. С.</i> Дослідження впливу різних факторів на рівень захворюваності під час пандемії за допомогою штучних нейронних мереж і мови програмування та аналізу даних R	40
<i>Вербівський В. В., Воловищikov В. Ю., Шапо В. Ф., Левінський М. В., Левінський В. М.</i> Адаптивна динамічна оптимізація ресурсів в системах з multi-tenancy архітектурою	46
<i>Golian N. V., Tisheninova V. O.</i> Integrated graph-based testing pipeline for modern single-page applications	51
<i>Шелехов І. В., Прилепа Д. В., Тимченко О. А.</i> Ієрархічний факторний класифікаційний аналіз в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології.....	60
<i>Наumenko I. B., Ковалевський С. О.</i> Ієрархічне інформаційно-екстремальне машинне навчання БПЛА для семантичної сегментації цифрового зображення регіону за декурсивною структурою даних	66
<i>Коваленко А. С.</i> Оптимізація процесу анотації зображень біологічних об'єктів методами комп'ютерного зору.....	77
<i>Голіков М. С., Донець В. В., Стрілець В. Є.</i> Інтелектуальний аналіз оптичних зображень на основі гібридного підходу	83
<i>Яценко В. В., Пархоменко Д. В., Кушнерьов О. С., Койбічук В. В., Гриценко К. Г.</i> Порівняння сучасних ігрових рушіїв з власним ядром для нативної розробки ігор на платформі Android.....	88
<i>Мірошниченко Д. О., Толстолузька О. Г.</i> Оцінка ефективності методології «Інфраструктура як Код» для створення та керування хмарною інфраструктурою	95
<i>Zherzherunov P. Y., Shmatko O. V.</i> Designing the architecture and software components of the dockerised blockchain mediator	101