

Міністерство освіти і науки України  
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка  
Фізико-математичний факультет  
Кафедра комп'ютерних наук

Дипломна робота  
магістра

**з теми: «МЕТОДИ І ЗАСОБИ СТВОРЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ  
СИМУЛЯТОРІВ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ»**

Виконав: здобувач вищої освіти  
2 курсу, групи КН1-М22  
спеціальності 122 Комп'ютерні науки  
**Задворний Антон Олексійович**

Керівник: **Федорчук В.А.**,  
професор кафедри комп'ютерних наук,  
доктор технічних наук, професор

Рецензент: **Оптасюк С.В.**,  
кандидат фізико-математичних наук,  
доцент, завідувач кафедри фізики

Кам'янець-Подільський – 2023

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>РОЗДІЛ 1. МОДЕЛЮВАННЯ КВАДРОКОПТЕРА ЯК ДИНАМІЧНОГО ОБ'ЄКТА .....</b>	<b>6</b>
1.1. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ .....	6
1.2. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ РЕАЛЬНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ПРИСТРОЮ .....	10
<b>РОЗДІЛ 2. МОЖЛИВІ СПОСОБИ КЕРУВАННЯ КВАДРОКОПТЕРОМ В АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>	<b>12</b>
2.1. ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ. ....	12
2.2. РЯТУВАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ.....	14
2.3. АЛГОРИТМ ВПЛИВУ ПІД-КОНТРОЛЕРА НА КВАДРОКОПТЕР .....	16
2.4. МЕТОД ОЦІНКИ ВІДСТАНИ ПОСАДКИ КВАДРОКОПТЕРА .....	18
<b>РОЗДІЛ 3. ЧИСЕЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТИ .....</b>	<b>19</b>
3.1. МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ .....	20
3.2. МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РЯТУВАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ .....	24
3.4. ВИСНОВКИ З РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ .....	35
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>37</b>
<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>40</b>
ДОДАТОК А СТРУКТУРА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ В SIMULINK (MATLAB).....	40
А.1 СТРУКТУРА БЛОКА ANGLE VELOCITIES .....	40
А.2 СТРУКТУРА БЛОКА MODEL .....	44
ДОДАТОК Б МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ БЕЗПЕЧНОГО ПРИЗЕМЛЕННЯ .....	50

## ВСТУП

Поштовхом до розвитку безпілотної авіації у всьому світі стала потреба в легких та відносно дешевих літальних апаратах, що мають достатні маневрені характеристики та здатні виконувати широкий спектр завдань.

За допомогою дронів вертолітного типу люди вирішують безліч завдань у різних сферах діяльності. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) успішно застосовуються в ході військових операцій в усьому світі, а також не менш успішно виконують завдання цивільного призначення. З роками перелік можливих застосувань буде лише збільшуватися. Високі польотні характеристики за відносно малої складності виготовлення і найчастіше невисокої вартості лише посилили популярність БПЛА.

Протягом останніх десятиліть завдання управління безпілотними літальними апаратами стає актуальнішим. Керування БПЛА – це завдання для добре підготовлених професіоналів. Наприклад, в армії США операторами БПЛА є діючі пілоти ВПС після річної підготовки та спеціальних тренінгів. У багатьох аспектах керування БПЛА навіть складніше, ніж звичайне пілотування літака.

На сьогоднішній день більшість існуючих безпілотних літальних апаратів пілотуються вручну, за допомогою пультів дистанційного керування, що працюють через радіоканали. При ручному управлінні БПЛА виникають труднощі, пов'язані з підготовкою операторів, недостатньою робочою дальністю, а також обмеженнями, що пов'язані з погодними умовами.

Однак конструкція БПЛА, що ґрунтується на кількох тягових двигунах, додатково передбачає низку значних вимог до здійснення роботи системи управління в рамках задоволення необхідності постійної стабілізації апарату в просторі. У зв'язку з цим ведеться розробка як методів загального призначення (переміщення БПЛА у просторі), так і допоміжних алгоритмів (стабілізація, управління аварійними ситуаціями тощо).

Як відомо, більшість аварій БПЛА, стаються через помилки пілотів–операторів та механічні відмови.

У роботі розглядається питання моделювання переміщень квадрокоптера для подальшої побудови такої системи управління, яка дозволяла б мінімізувати ймовірність негативних наслідків у разі серйозних несправностей. Природно вважати, що така (відмовностійка) система управління може працювати тільки на апаратах, які конструктивно допускають роботу в певному (аварійному) режимі, при якому порушено штатну роботу деяких підсистем апарату.

**Мета:** дослідити методи і засоби моделювання для відображення їх в симуляторах динамічних об'єктів у вигляді комп'ютерної анімації.

**Об'єкт дослідження.** Процеси створення комп'ютерних симуляторів.

**Предмет дослідження.** Середовище MATLAB з доповненням Simulink, для моделювання аварійних ситуацій.

**Завдання дослідження:** полягає у розробці комп'ютерної візуалізації динамічного об'єкта.

**Структура роботи:** Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі досліджується БПЛА як об'єкт керування.

- Визначення можливих переміщень об'єкта та моделі,
- Побудова математичної моделі, що описує квадрокоптер як тверде тіло з 6-ма ступенями свободи;
- Вибір параметрів системи на основі реальної конфігурації пристрою.

Другий розділ розкриває такі питання:

- Класифікація аварійних ситуацій;
- Визначення аварійної ситуації з погляду математичної моделі квадрокоптера.
- Опис алгоритмів керування квадрокоптером в аварійних ситуаціях.

- Формалізація методу оцінки відстані посадки квадрокоптера для подальшого використання в алгоритмах стійкості до відмов приземлення.

Третій розділ присвячений чисельним експериментам:

- Моделювання аварійних ситуацій.
- Моделювання аварійного переміщення з алгоритмом «ручного» приземлення.
- Моделювання аварійної ситуації з використанням відмовного алгоритму на основі ПД–контролера.
- Експеримент щодо оцінки відстані приземлення БПЛА в аварійній ситуації.

Додатковою метою є написання зручного програмного забезпечення щодо чисельних експериментів.

## ВИСНОВКИ

Основні результати роботи:

1. Описана математична модель квадрокоптера та визначені параметри, що відповідають реальній конфігурації апарата (п. 1.1 та п. 1.2);
2. Наведена класифікація аварійних ситуацій;
3. З точки зору математичної моделі визначена аварійна ситуація, способи порятунку та оцінка прогнозуємої області падіння (приземлення) квадрокоптера з врахуванням визначення можливих переміщень апарата (п. 2.1 – 2.4);
4. Проведено чисельне моделювання різноманітних аварійних ситуацій (п. 3.1);
5. Здійснено впровадження методології рятувального приземлення у математичну модель квадрокоптера (п. 3.2);
6. Здійснені чисельні експерименти, що демонструють можливості оцінки очікуваної області падіння (п. 3.3);
7. Здійснено аналіз отриманих результатів (п.3.4);
8. Для реалізації поставлених задач було розроблено ПЗ на основі програмного пакета MATLAB R2019b з доповненням Simulink v.10.0 (див. додатки А та Б).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Beji L., Abichou A. Trajectory and Tracking of a Mini-Rotorcraft // Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. 2005. – P. 2618–2623.
2. Bresciani T. Modeling, identification and control of a quadrotor helicopter : Master's thesis / T. Bresciani ; Lund University. — Sweden, Lund, 2008. — 184 pp.
3. Sklyarov A. A., Sklyarov S. A. Sinergeticheskiy podkhod k upravleniyu bespilotnym letatel'nyim apparatom v srede s vneshnimi vozmushheniyami [Synergistic approach to the quadrocopter control in environment with external perturbations]. News of SFedU. Technical science, 2012, no. 8, pp. 159–170.
4. Корченко А. Г. Обобщённая классификация беспилотных летательных аппаратов / А. Г. Корченко, О. С. Ильяш // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2012. – Вип. 4. – С. 27–36. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS\\_2012\\_4\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2012_4_9)
5. Weibel R., Hansman J. Safety Considerations for Operation of Unmanned Aerial Vehicles in the National Airspace System // MIT ICAT–2005–1, 2005. [online] <http://hdl.handle.net/1721.1/30364>
6. Maddalon J.M., Hayhurst K.J., Koppen D.M., et al. Perspectives on Unmanned Aircraft Classification for Civil Airworthiness Standards // National Aeronaut. Space Administrat., Langley Res. Center, Hampton, Virginia, 2013. [online] <https://shemesh.larc.nasa.gov/people/jmm/NASA-TM-2013-217969.pdf>
7. Baranov O. V., Smirnov N. V., Smirnova T. E., Zholobov Ye. V. Design of Fail-Safe Quadrocopter Configuration // Intelligent Distributed Computing XIII (IDC 2019) / Ed. by Igor Kotenko, Vasily Desnitsky, Costin Badica, Didier El Baz, Mirjana Ivanovic. — Studies in Computational Intelligence. — Germany : Springer Nature, 2020. — jan. — P. 13–22. DOI: 10.1007/978-3-030-32258-8\_2.
8. Baranov O. V., Smirnov N. V., Smirnova T. E., Zholobov Ye. V. Design of a quadrocopter with PID-controlled fail-safe algorithm // Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications. — 2020. — jul. — Vol. 11, no. 2. — P. 23–33. DOI: 10.22667/JOWUA.2020.06.30.023.
9. Zulu A., John S. A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors // Syst. Control. [online] <http://arxiv.org/abs/1602.02622v1>

10. Ranjbaran M., Khorasani K. Fault recovery of an underactuated quadrotor aerial vehicle // 49th IEEE Conf. Decision Control (CDC–2010). Atlanta, 2010. P. 4385–4392.
11. Freddi A., Lanzon A., Longhi S. A feedback linearization approach to fault tolerance in quadrotor vehicles // IFAC World Congr. 2011. V. 44. No. 1. P. 5413–5418.
12. Scaramuzza D., Achtelik M., Doitsidis L., et al. Vision–controlled micro flying robots: from system design to autonomous navigation and mapping in gps–denied environments. [online]  
[http://robotics.ethz.ch/scaramuzza/DavideScaramuzzafiles/publications/pdf/IEEERAMs submitted.pdf](http://robotics.ethz.ch/scaramuzza/DavideScaramuzzafiles/publications/pdf/IEEERAMs%20submitted.pdf)
13. Marks A., Whidborne J.F., Yamamoto I. Control allocation for fault tolerant control of a VTOL octorotor // Proc. UKACC Int. Conf. Control. Cardiff(UK), 2012. P. 357–362.
14. Izadi H.A., Zhang Y., Gordon B.W. Fault tolerant model predictive control of quad–rotor helicopters with actuator fault estimation // IFAC World Congr. 2011. V. 18. No. 1. P. 6343–6348.
15. Chamseddine A., Zhang Y., Rabbath C.A., et al. Flatness–based trajectory planning/replanning for a quadrotor unmanned aerial vehicle // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. 2012. V. 48. No. 4. P. 2832–2848.
16. Zhang Y., Chamseddine A., Rabbath C., et al. Development of advanced FDD and FTC, techniques with application to an unmanned quadrotor helicopter testbed // J. Franklin Institut. 2013. V. 350. No. 9. P. 2396–2422.
17. Salazar–Cruz S., Kendoul F., Lozano R., et al. Real–Time Control of a Small–Scale Helicopter Having Three Rotors // Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots Syst. Beijing (China), 2006. P. 2924–2929.
18. Escareo J., Sanchez A., Garcia O., et al. Triple tilting rotor mini–UAV: Modeling and embedded control of the attitude // Proc. Amer. Control Conf. 2008. P. 3476–3481.



19. Kataoka Y., Sekiguchi K., Sampei M. Nonlinear Control and Model Analysis of Trirotor UAV Model // Proc. 18 Int. Federat. Autom. Control World Congr. 2011. V. 44. No. 1. P. 10391–10396.

20. Ulrich E.R., Humbert J.S., Pines D.J. Pitch and Heave Control of Robotic Samara Micro Air Vehicles // J. Aircraft. 2010. V. 47. No. 4. P. 1290–1299.

21. Лазарев Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с.