

СВАЧІЙ ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0004-4470-0305>e-mail: oleg.svachiy.ninety-nine19@gmail.com**БОЙКО ЮЛІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>e-mail: boiko_julius@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОНСТРУКЦІЮ БПЛА НА ОСНОВІ СИМУЛЯЦІЇ В SOLIDWORKS MOTION ТА ДАНИХ З MEMS-АКСЕЛЕРОМЕТРА

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють важливу роль у сьогоденні. Вони охоплюють велику вибірку галузей, такі як оборона, сільське господарство, медицина, наукові дослідження та промисловість. Ефективність БПЛА та стабільність їх польоту завжди забезпечується завдяки використанню мікроелектромеханічних датчиків (MEMS), такі як гіроскопи та акселерометри. У більшості випадків саме мікроелектромеханічні гіроскопи є основним інструментом в роботі БПЛА, а саме його стабілізації, акселерометри ж в свою чергу виступають допоміжним інструментом. MEMS-акселерометри мають великий потенціал у аналізі конструкції дрона, а саме для визначення сил, що діють на БПЛА під час польоту. У цій роботі проведено дослідження особливостей впливу сил на безпілотний літальний апарат з допомогою використання тривимірної моделі квадрокоптера та виконання симуляцій у середовищі SolidWorks Motion. При базових симуляціях враховувались масові характеристики конструкції та силу тяжіння, що діє на квадрокоптер. Також, було розглянуто сили, що було отримано з допомогою реалізації сценаріїв руху, такі як прямолінійний політ, прискорення та маневр зміни напрямку руху. Основна мета роботи це визначення сил, що виникають під час польоту БПЛА, за допомогою даних знятих з акселерометра, шляхом оцінювання зміни прискорення, що було отримано з MEMS-акселерометра. Враховуючи дані сили можна краще зрозуміти реальні умови використання БПЛА, що дає можливість покращення конструкції, функціоналу системи та алгоритмів руху. Результати роботи демонструють, що мікроелектромеханічні акселерометри можуть використовуватись не лише як допоміжні пристрої, а також як інструмент аналізу сил, що діють на апарат та динаміки їх зміни.

Ключові слова: сили навантаження, MEMS, SolidWorks Motion симуляції, Безпілотний літальний апарат (БПЛА).

SVACHII OLEH**BOIKO JULIY**

Khmelnitskyi National University

RESEARCH ON LOADS ON UAV STRUCTURE BASED ON SOLIDWORKS MOTION SIMULATION AND MEMS ACCELEROMETER DATA

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) play a significant role in modern technological and industrial development. They are applied in various fields such as defense, agriculture, healthcare, scientific research, and manufacturing. The performance and flight stability of UAVs are largely achieved by the use of microelectromechanical sensors (MEMS), including gyroscopes and accelerometers. Typically, MEMS gyroscopes are considered the primary component responsible for stabilizing the UAV, while accelerometers are regarded as secondary elements. However, MEMS accelerometers have considerable potential for analyzing structural loads and determining the forces acting on the UAV during various phases of flight. This study presents an approach for evaluating the force impact on a UAV using a 3D quadcopter model and simulation in SolidWorks Motion. During the base simulations, the structural mass properties and gravitational forces were considered to replicate realistic flight behavior. Furthermore, the simulation included several motion scenarios such as straight-line motion, acceleration, and turning maneuvers, allowing the observation of resulting force dynamics. The key focus of this research is the extraction and interpretation of force vectors during UAV movement based on acceleration data recorded by MEMS accelerometers. By analyzing these variations in acceleration, it becomes possible to estimate external forces affecting the drone's structure. This contributes to a deeper understanding of the UAV's real-world operating conditions and enables further optimization of design elements, system functionality, and motion control strategies. The study confirms that MEMS accelerometers are not limited to orientation stabilization but can also serve as effective tools for dynamic force analysis and performance evaluation of UAV systems.

Keywords: loading forces, MEMS, SolidWorks Motion simulation, Unmanned Aerial Vehicle (UAV).

Стаття надійшла до редакції / Received 03.06.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.06.2025

Постановка проблеми

Подальше дослідження в сфері БПЛА все частіше потребують оптимізації оцінки сил, що діють на БПЛА в результаті руху. Такі дослідження дають можливість покращення та оптимізації роботи БПЛА та їх конструкції. Основними силами, що прикладаються до корпусів безпілотних літальних апаратів спричинені саме тягою двигунів, гравітацією та інерцією. Саме мікроелектромеханічні (MEMS) акселерометри дають можливість оцінки сил описаних вище.

У сучасній практиці акселерометри часто розглядаються як вторинні компоненти, що є допоміжними для стабілізації положення в просторі[1], замість повноцінного використання їх динамічного вихідного сигналу. Дані акселерометра, не беруться до уваги, що призводить до неповного розуміння сил, які діють на

БПЛА під час його руху. В роботі запропоновано підхід дослідження сил, що діють на БПЛА, даний підхід поєднує CAD-системи з реальними даними з сенсорів.

Аналіз досліджень та публікацій

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) піддаються впливу складних аеродинамічних та інерційних сил під час руху, що робить аналіз сил, що діють на корпус критично важливими для забезпечення надійності та ефективності таких систем. Вбудовані мікроелектромеханічні (MEMS) акселерометри фіксують прискорення БПЛА, спричинені тягою, гравітацією та інерцією.

Застосування інерційних систем на базі MEMS-акселерометрів дасть можливість отримання реальних даних прискорення в заміні на дані симуляції в різних середовищах, таких як MATLAB/Simulink [2]. Також, варто зазначити, що сучасні MEMS-акселерометри мають високу чутливість [3], [4], що дає якісну оцінку динаміки об'єктів.

На жаль, проблема аналізу сил, що впливають на конструкцію безпілотного літального апарату за допомогою симуляцій в CAD-системах[5], [6] та реальних даних з модулів MEMS-акселерометрів мало висвітлена в літературних джерелах.

Формулювання цілей статті

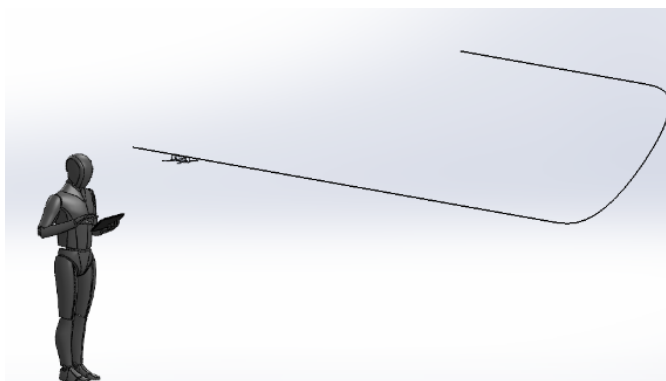
Метою роботи є дослідження методу підвищення якості аналізу навантажень, що діють на БПЛА шляхом симуляції руху об'єкта в SolidWorks Motion та даних отриманих з реального модуля MEMS-акселерометрів, для можливостей оцінювання сил, що діють на корпус БПЛА під час руху та його конструктивних покращень в подальшому.

Виклад основного матеріалу

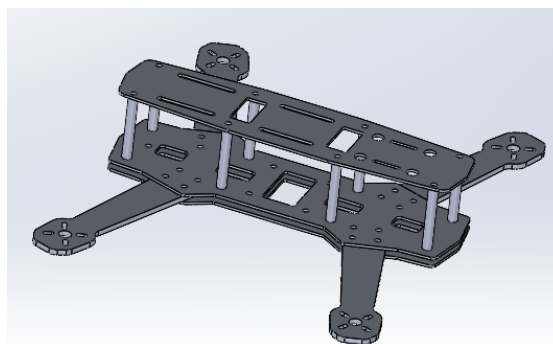
В даній роботі запропоновано нову методику дослідження впливу сил, що утворені в наслідок руху БПЛА. Для досліджень було застосовано ідеальні значення з датчика акселерометра та CAD-системи, що у результаті дає можливість точної оцінки реальних навантажень, що діють на конструкцію БПЛА.

Для проведення аналізу навантажень шляхом отриманих з симуляції руху об'єкту було обрано програмне середовище SolidWorks Motion. Дане середовище дає можливість внесення даних переміщення, швидкості або прискорення системи та отримання з цих даних векторів сил, що діють на об'єкт, рух якого досліджується.

Задання системи координат у симуляції відбувається з допомогою розміщення 3D-модель оператора БПЛА(Рис. 1,а). Даний об'єкт необхідний в симуляції для отримання даних відносно точки відліку, що в даному випадку відіграє роль оператора БПЛА.



а)



б)

Рис. 1. а) – графічне зображення 3D моделі оператора БПЛА;
б) – графічне зображення 3D моделі БПЛА

Подальшими обов'язковими кроками є задання матеріалу з якого виготовлена рама дрона, що зображений на рис. 1,б. 3D модель квадрокоптера було взято з відкритих джерел. В даній роботі обрано матеріал "1060 Alloy", адже це досить розповсюджена марка алюмінію. Після надання матеріалу модель отримала вагу, що дорівнює 174.52 грами. Варто зазначити, для спрощення симуляції та зменшення навантаження на процесор електронно-обчислювальної машини для опису запропонованої методики вирішено використати лише корпус квадрокоптера.

Було обрано датчик інерційної системи на базі MEMS LSM6DS3TR-C, що має 3 осі акселерометра та 3 осі гіроскопа. Цього цілком достатньо, щоб отримати сили, що прикладені до БПЛА шляхом симуляції динаміки руху квадрокоптера. Для побудови траєкторії руху в солідворкс використано симуляцію за допомогою методу дослідження "Motion Analysis" в інструменті "SolidWorks Motion". Даний інструмент дає можливість внесення даних, що були зняті за допомогою MEMS. Для цього в симуляцію додано елемент "Linear Motor" з налаштуванням руху "Data Point" та заповнено таблицю згідно отриманих даних(Рис. 2) для осей X, Y та Z. Для більшого наближення сил, що впливають на корпус дрона також було додано елемент, що враховує силу тяжіння "Gravity".

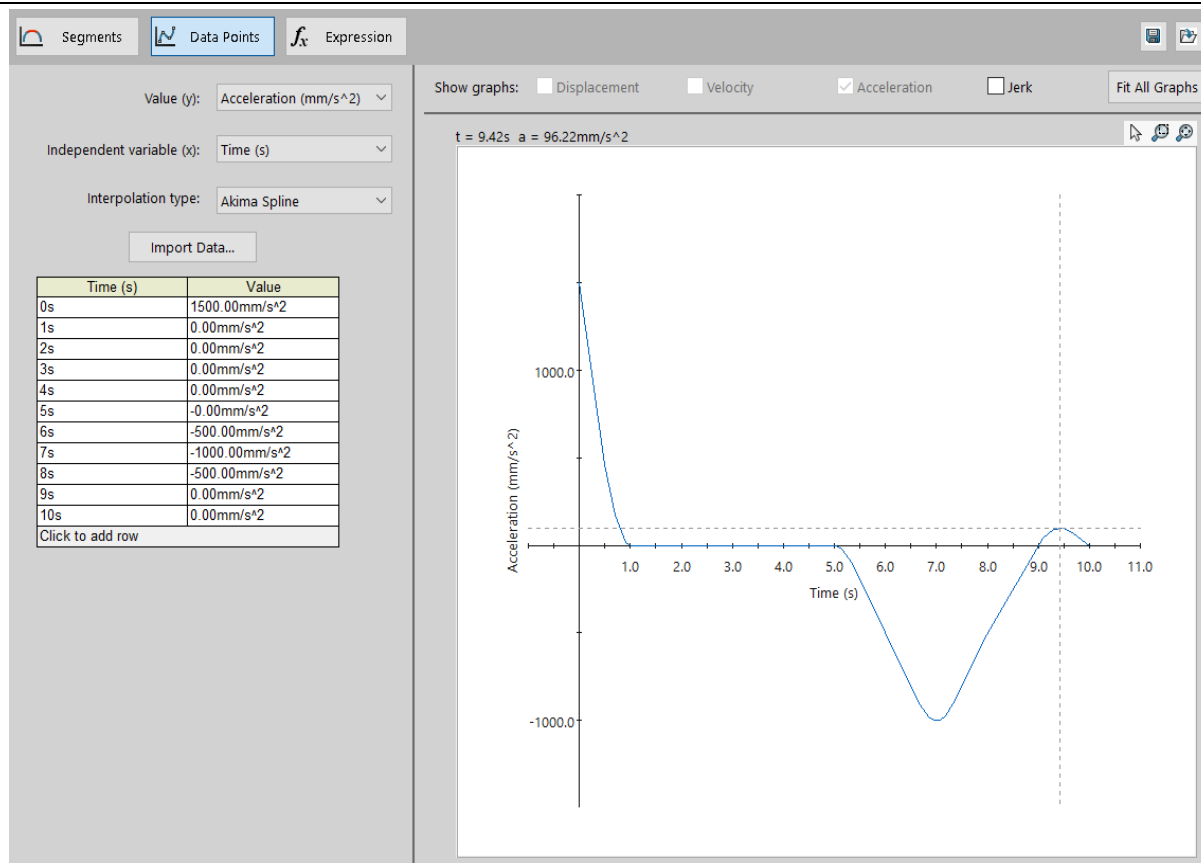


Рис. 2. Зображення графічного інтерфейсу, що відповідає за імпорт реальних даних прискорення

Щоб наочно відобразити результати та графіки, було обрано тестові значення прискорення, що виконують функцію віртуального модуля інерційної системи. В таблиці 1 наведено імпортовані дані для кожної осі відносно початку відліку координат(спостерігача).

Таблиця 1

Скорочена таблиця даних, що імпортовані в таблицю "Data Point"

Час, с	Прискорення по осі X, мм/с²	Прискорення по осі Y, мм/с²	Прискорення по осі Z, мм/с²	Час, с	Прискорення по осі X, мм/с²	Прискорення по осі Y, мм/с²	Прискорення по осі Z, мм/с²
0	1500	0	0	5	0	0	0
0.33	777.77	0	0	5.33	-129.6	1333.33	1333.33
0.66	222.22	0	0	5.66	-314.8	1333.33	1333.33
1	0	0	0	6	-500	0	0
1.33	0	0	0	6.33	-703.7	-1333.33	-1333.33
1.66	0	0	0	6.66	-907.4	-1333.33	-1333.33
2	0	0	0	7	-1000	0	0
2.33	0	0	0	7.33	-907.4	0	0
2.66	0	0	0	7.66	-703.7	0	0
3	0	0	0	8	-500	0	0
3.33	0	0	0	8.33	-333.33	0	0
3.66	0	0	0	8.66	-166.6	0	0
4	0	0	0	9	0	0	0
4.33	0	0	0	9.33	0	0	0
4.66	0	0	0	9.66	0	0	0

Після внесення даних прискорення отримано графічне відображення швидкості, для прикладу створено графік по осі X(Рис. 3).

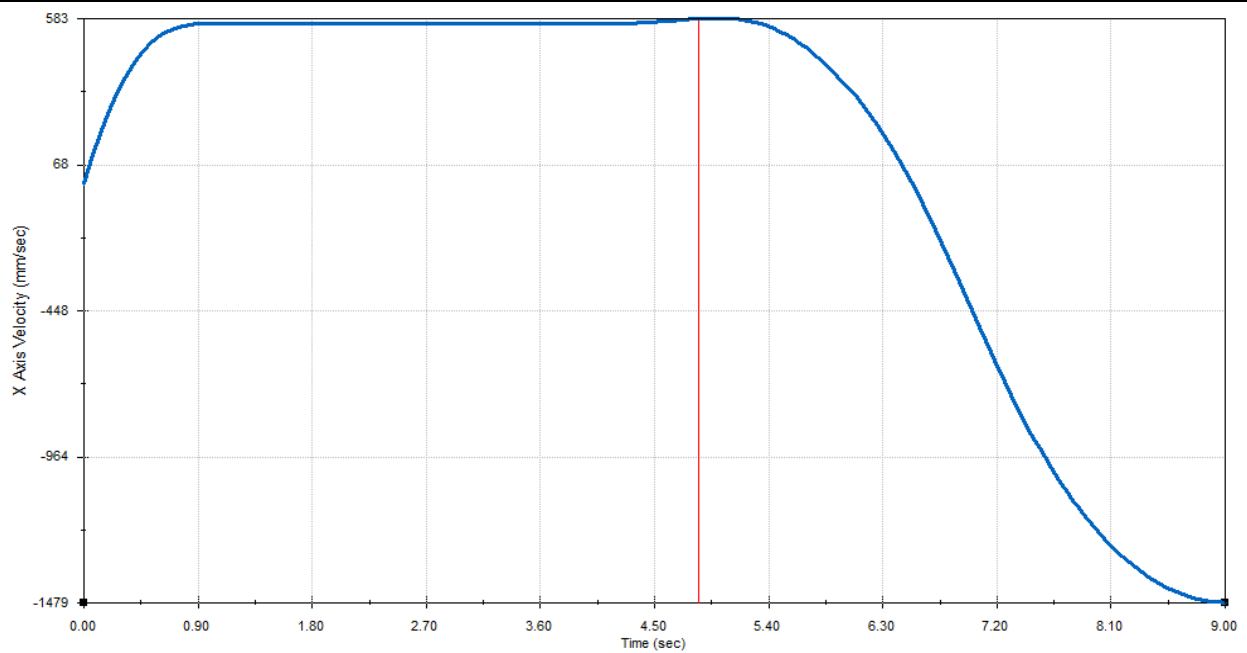
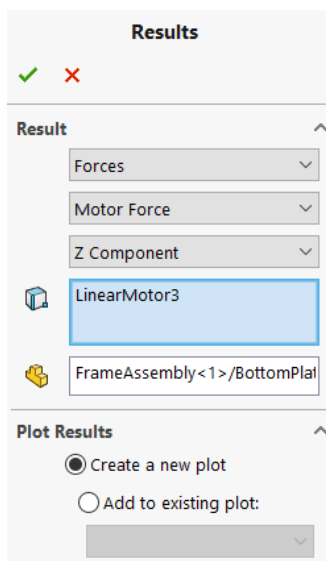
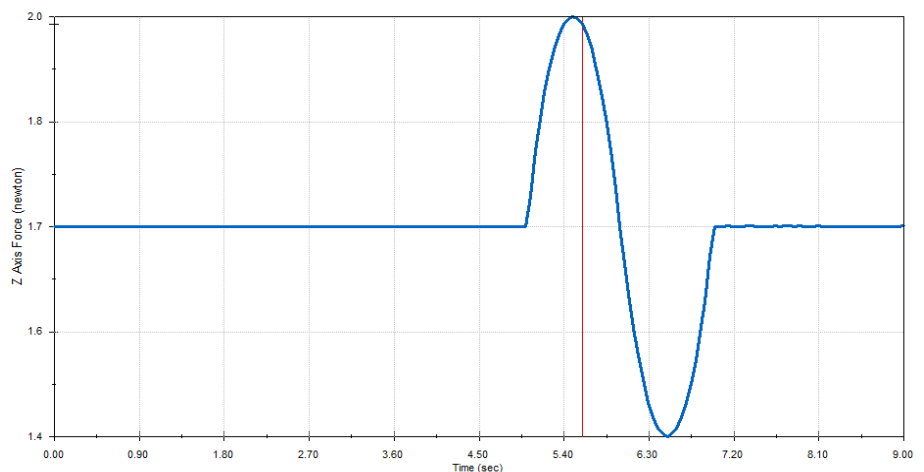


Рис. 3. Зображення графіку швидкості по осі X

Після внесення даних та запуску методу дослідження “Motion Analysis” протягом 10 секунд, створено графіки сил по осі X, Y та Z. Для отримання графіку використано інструмент “Plot” та налаштовано згідно рис.4, а, в даному випадку створюється графік сили (Рис.4, б) для осі Z на якому зображено силу необхідну, щоб протидіяти силі тяжіння, враховуючи вагу корпусу БПЛА.



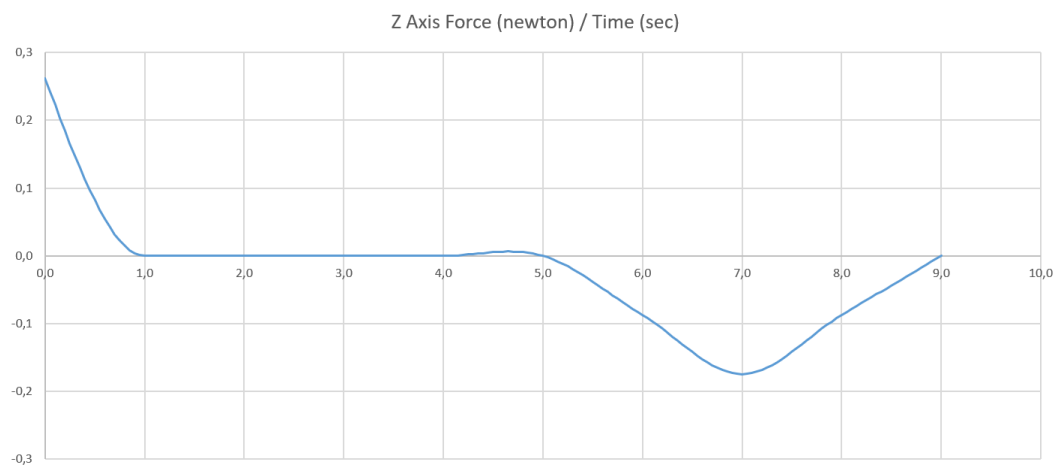
а)



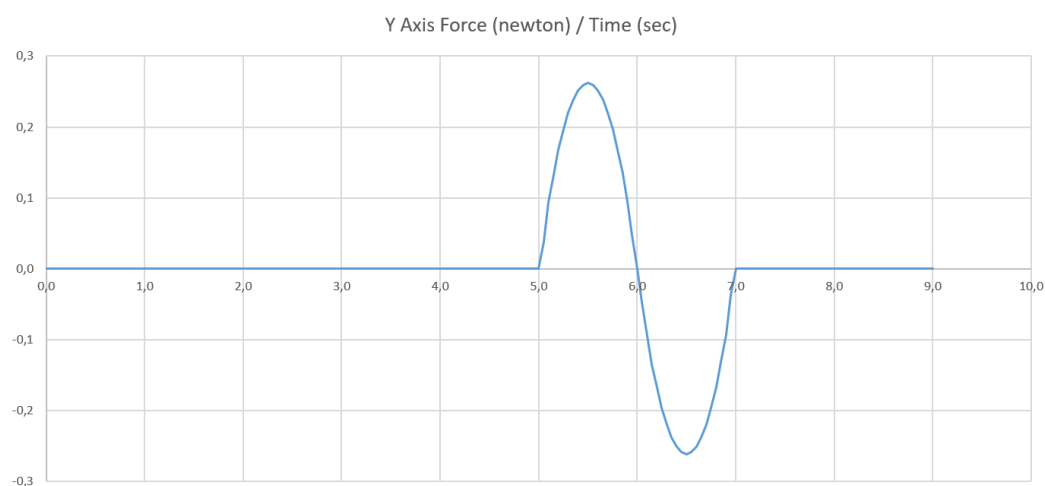
б)

Рис. 4. а) – графічне зображення інтерфейсу налаштування виведення графіку сили;
б) – зображення графіку сили по осі Z

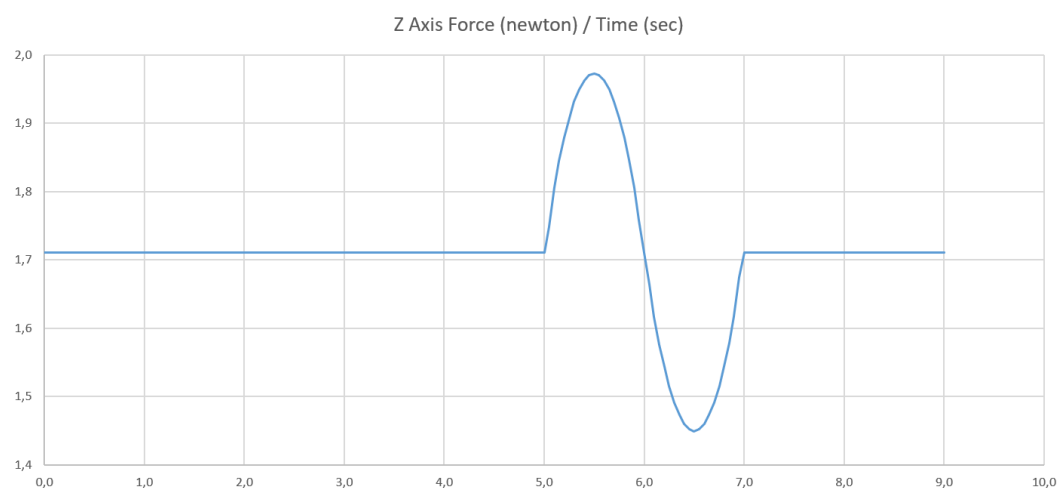
Таким чином з SolidWorks Motion експортовано масиви значень для всіх осей руху та створено графіки для осей X, Y та Z (рис. 5, а, б, в). Дані отримано в форматі “.csv” для подальшої можливості роботи з векторами сил та отримання їх результуючих.



а)



б)



в)

Рис. 5. Зображення графіків сили:
а) – для осі X; б) – для осі Y; в) – для осі Z

Згідно методів обчислення кутів нахилу дрона, з врахуванням того, що інерційна система розраховує кутове прискорення з допомогою гіроскопа та відбулось логування розподілення потужностей на кожен двигун БПЛА, можна стверджувати, що використовуючи результуючі сил, що отримані внаслідок симуляції, що створена з отриманих даних інерційної MEMS-системи, можна розраховувати навантаження на конструкцію безпілотної літальної апарату.

У процесі подальшого аналізу динаміки руху БПЛА доцільно використовувати матричний підхід для уніфікації обчислення сил у тривимірному просторі.

Імпортовані таблиці, надають дані про сили по кожній осі(1):

$$F = m(A + G) = [F_{x1} F_{y1} F_{z1} F_{x2} F_{y2} F_{z2} \dots F_{xn} F_{yn} F_{zn}] , \quad (1)$$

Завдяки цьому є можливість обчислення результуючої сили протягом всього часу виконання симуляції(2):

$$F_{res}^{(i)} = \|\vec{F}^{(i)}\| = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2 + F_{zi}^2} , \quad (2)$$

що також можна представити як стовпчик(3):

$$\vec{F}_{res} = [F_{res}^{(1)} F_{res}^{(2)} \dots F_{res}^{(n)}] , \quad (3)$$

Цей підхід дозволяє зручно працювати з масивами даних, виконувати обробку в середовищах програмування Python або MATLAB, а також забезпечує можливість подальшого аналізу перевантажень, проектування підсиленних елементів конструкції.

Висновки

У роботі було запропоновано комплексний підхід до аналізу силових впливів навантаження на безпілотний літальний апарат (БПЛА), що базується на поєднанні моделювання в середовищі SolidWorks Motion з даними, отриманими від MEMS-акселерометра.

За допомогою тривимірної моделі та симуляції руху було отримано динамічні характеристики, що дозволяють обчислити вектор сил, які діють на конструкцію БПЛА у кожен момент часу.

Цей підхід демонструє, що MEMS-акселерометри можуть використовуватись не лише як допоміжні сенсори стабілізації, але й як повноцінні інструменти аналізу навантаження на корпус безпілотного літального апарату. Використання CAD-середовища дозволило відтворювати реальні умови роботи апарату та оцінити навантаження на конструктивні елементи корпусу. Це, у свою чергу дає можливість подальшого покращення конструкції та провести аналіз втрати стійкості корпусу із застосуванням методів скінченних елементів в інструменті “Simulation” програмного середовища SolidWorks.

Запропонована методика є ефективним інструментом для підвищення точності інженерного аналізу та оптимізації конструкції БПЛА.

Для покращення даного дослідження варто взяти до уваги вплив сили повітря(4) врахувавши аеродинамічні властивості з допомогою SolidWorks Flow:

$$\vec{F}_{wind} = -\frac{1}{2} \rho C_d A \vec{v}^2 , \quad (4)$$

Таким чином, результуюча сила з урахування аеродинамічного опору набуває вигляду(5):

$$\vec{F}_{res} = m(\vec{a}_{meas} + \vec{g}) + \vec{F}_{wind} , \quad (5)$$

Наступним етапом дослідження є обробка отриманих результатів навантаження у програмних середовищах Python або MATLAB/Simulink, що дозволить виконати фільтрацію даних акселерометра, оцінити динамічну поведінку БПЛА як фізичної системи та інтегрувати обчислені навантаження в інструменті “Simulation” програмного середовища SolidWorks.

Література

1. Parkhomey I., Boiko J., Zeniv I., Bondarenko T. Method for measuring voltages in channels of a hemispherical resonator gyroscope with an arbitrary orientation axes // *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS)*. – 2023. – Vol. 29, no. 2. – P. 715–724.
2. Computer-Aided Design, Multibody Dynamic Modeling, and Motion Control Analysis of a Quadcopter System for Delivery Applications [Електронний ресурс] / Carmine Maria Pappalardo, Ahmed Ammar, Salvatore Cuciniello, Paolo Arena // *Machines*. – 2023. – Vol. 11, no. 4. – P. 464. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/4/464>
3. Alsalem A., Zohdy M. Sensitivity Analysis of MEMS Accelerometer for the Vibration Measurement of VTOL UAV [Електронний ресурс] // *2023 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP)*, Nashville, TN, USA, 26–30 June 2023. – [S. l.] : IEEE, 2023. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10156561> (як приклад; актуалізуйте за потреби).
4. Пархомей І., Бойко Ю., Ткачук В., Свачій О. Методика підвищення точності автоматизованого керування робототехнічними системами додаткових модулів БПЛА // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. – 2024. – Т. 337, № 3(2). – С. 99–108. – DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-14.
5. Eslami A., Rawat K. Design Validation of Quadcopter Drones Using CAD Simulation – a Project-Based Approach [Електронний ресурс] // *6th European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Lisbon, Portugal, 18–20 July 2023. – Michigan, USA, 2023. – Режим доступу: <https://ieomsociety.org/lisbon2023/papers/>
6. Kusmirek S., Makiela W., Rykala Ł., Borkowski P. Dynamic Flight Tracking: Designing System for Multirotor UAVs with Pixhawk Autopilot Data Verification [Електронний ресурс] // *IEEE Access*. – 2024. – P. 1. – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/>

References

1. Parkhomey I., Boiko J., Zeniv I., Bondarenko T. Method for measuring voltages in channels of a hemispherical resonator gyroscope with an arbitrary orientation axes // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS). – 2023. – Vol. 29, no. 2. – P. 715–724.
2. Computer-Aided Design, Multibody Dynamic Modeling, and Motion Control Analysis of a Quadcopter System for Delivery Applications [Elektronnyi resurs] / Carmine Maria Pappalardo, Ahmed Ammar, Salvatore Cuciniello, Paolo Arena // Machines. – 2023. – Vol. 11, no. 4. – P. 464. – Rezhym dostupu: <https://www.mdpi.com/2075-1702/11/4/464>
3. Alsalem A., Zohdy M. Sensitivity Analysis of MEMS Accelerometer for the Vibration Measurement of VTOL UAV [Elektronnyi resurs] // 2023 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP), Nashville, TN, USA, 26–30 June 2023. – [S. l.] : IEEE, 2023. – Rezhym dostupu: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10156561> (yak pryklad; aktualizuiete za potreby).
4. Parkhomei I., Boiko Yu., Tkachuk V., Svachii O. Metodyka pidvyshchennia tochnosti avtomatyzovanoho keruvannia robototekhnichnymy systemamy dodatkovykh moduliv BPLA // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – 2024. – T. 337, № 3(2). – S. 99–108. – DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-14.
5. Eslami A., Rawat K. Design Validation of Quadcopter Drones Using CAD Simulation – a Project-Based Approach [Elektronnyi resurs] // 6th European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Lisbon, Portugal, 18–20 July 2023. – Michigan, USA, 2023. – Rezhym dostupu: <https://ieomsociety.org/lisbon2023/papers/>
6. Kusmirek S., Makiela W., Rykała Ł., Borkowski P. Dynamic Flight Tracking: Designing System for Multirotor UAVs with Pixhawk Autopilot Data Verification [Elektronnyi resurs] // IEEE Access. – 2024. – P. 1. – Rezhym dostupu: <https://ieeexplore.ieee.org/>