УДК 629.7.025.1:621.83
DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771502025347458

Д. Д. Задніпровський[1], *магістр*, **Д. І. Конотоп**[2], *к.т.н.*

РОЗРОБКА КОНЦЕПЦІЇ МЕХАНІЗМУ СКЛАДАНОГО КРИЛА БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Ua Із зростанням попиту на цивільні безпілотні авіаційні комплекси, зокрема, для пошуково-рятувальних і розвідувальних завдань, посилюється потреба у підвищенні їхньої мобільності – компактності під час транспортування та швидкості розгортання, незалежно від способу та місця запуску. Скоротити час розгортання та збільшити компактність під час транспортування можливо завдяки впровадженню в конструкцію БПЛА складаного крила із відповідним механізмом складання/розкладання. Метою роботи є розроблення та опис концептуального механізму складаного крила БПЛА для забезпечення його швидкого розгортання. За допомогою ІС *CAD*/*CAM*/*CAE* було здійснено моде-

[1] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*

лювання складових механізму та їх поєднання у єдину збірку. В результаті, було розроблено концепцію механізму розкладання складаного крила з усіма основними складовими, що дозволяє адаптувати його до БПЛА різних вагових категорій.

En With the growing demand for civil unmanned aerial systems, particularly for search-and-rescue and reconnaissance missions, the need to enhance their mobility—both in terms of compactness during transport and speed of deployment, regardless of the launch method or location—is increasing. Reducing deployment time and increasing transport compactness can be achieved by incorporating a folding wing into the UAV design, along with an appropriate folding/unfolding mechanism. The objective of this work is to develop and describe a conceptual folding wing deployment mechanism for UAVs to ensure rapid deployment. Using a CAD/CAM/CAE IS, the components of the mechanism and their integration into a single assembly were modeled. As a result, a concept for the folding wing deployment mechanism was developed, including all the main components, allowing it to be adapted for UAVs of different weight categories

Вступ

Розвиток безпілотної авіації та зростаюча тенденція залучення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у цивільній сфері, зокрема для виконання розвідувальних й пошуково-рятувальних операцій [1], що часто вимагають компактності під час транспортування й швидкості у разі розгортання. Одним із ключових способів забезпечення такої можливості є запровадження у конструкцію БПЛА складаного крила й механізму його складання/розкладання. Застосування складаного крила дозволяє зменшити габарити літального апарату (ЛА) під час транспортування чи зберігання, спрощує запуск у польових умовах, зокрема повітряний запуск.

У сучасних розробках відомі різні типи механізмів складання, варіації яких наведені у тексті нижче. Основним недоліком таких систем є складність та зменшена надійність за рахунок великої кількості рухомих частин, що у свою чергу веде до збільшення маси системи. Тому розробка відносно простого у виготовленні, надійного механізму із мінімальною кількістю рухомих частин є актуальним інженерним завданням.

Метою роботи є розроблення та опис концептуального механізму розкладання складаного крила БПЛА для забезпечення його швидкого розгортання. Запропонована конструкція механізму має концептуальний характер і розглядається як етап формування загальної кінематичної схеми. Подальші дослідження передбачають глибшу деталізацію конструкції, виконання розрахунків навантажень, аналіз міцності окремих елементів та оптимізацію параметрів механізму з урахуванням масо-габаритних обмежень і технологічних аспектів виготовлення.

Огляд наявних рішень

Існують чисельні варіації механізмів складаного крила із різними підходами до їх реалізації. Втім, у межах даної статті механізми складаного крила можемо умовно поділити на наступні типи (рис. 1):

1. біонічні [2];
2. конвертаційні (*VTOL*/*CTOL*) [3];
3. шарнірні [4];
4. телескопічні [5];
5. двовісні [6];
6. одновісні [7].

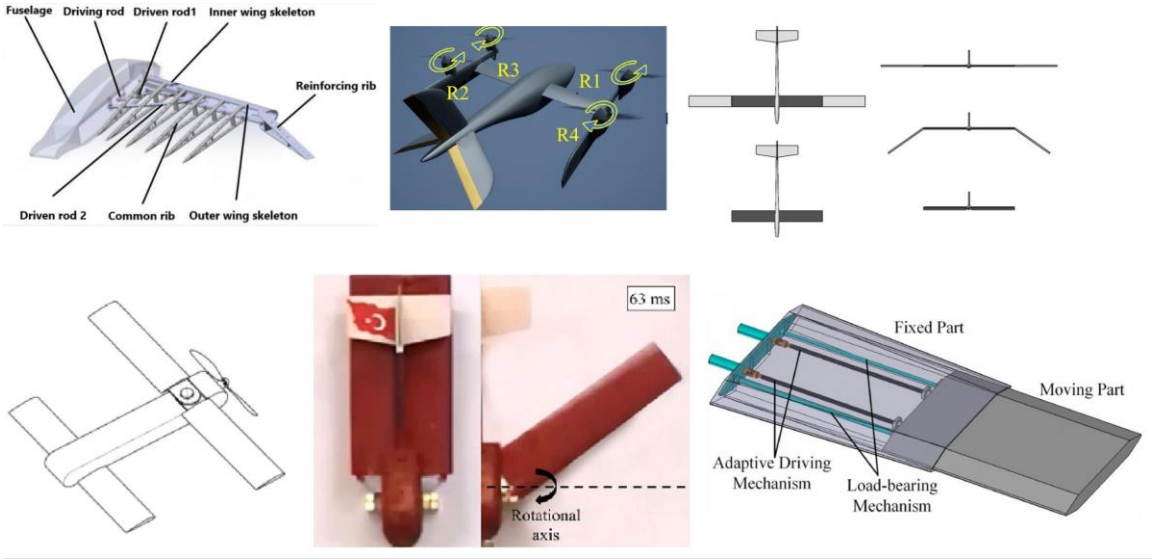

Рис. 1. Приклади механізмів складаного крила (1 – 6 із лівого верхнього кута за годинниковою стрілкою)

Біонічні механізми мають дуже обмежене застосування у міру складності виконання та їх непрактичності, тому зазвичай такий механізм застосовується лише у дослідних прототипах. Конвертаційні механізми мають практичне застосування, загалом у БПЛА, що мають можливість переходу із режиму вертикального зльоту/посадки у режим планерування. Така конфігурація дозволяє швидко здійняти апарат у повітря та здійснити посадку у майже будь-якій місцевості, однак, навіть у складеному виді БПЛА залишається відносно широким. Шарнірний механізм передбачає складання крила обертанням навколо шарнірного з’єднання консолей. Такий підхід вимагає забезпечення достатньої міцності шарнірного з’єднання та профілю крила із плоским дном, щоб забезпечити щільне прилягання консолей у складеному виді, але, так само, як і у випадку із конвертаційним механізмом, габарити апарату залишаються суттєвими по ширині. Такий самий висновок можемо зробити про телескопічний механізм, що у складеному виді є суттєво широким, а конструкція механізму складна та вимагає використання кількох приводів, що ву свою чергу збільшує вагу БПЛА.

Двовісний механізм є відносно простим у виконанні, має кращі габаритні характеристики відносно попередньо розглянутих типів. Втім, у складеному стані консолі крил виходять за межі габаритів фюзеляжу за рахунок довжини хорди крила. Вирішенням цієї проблеми є одновісне розташування консолей, яке дозволяє максимально зменшити габарити БПЛА під час транспортування.

Механізм одновісного складаного крила є відносно простим у виконанні й ефективним у порівнянні із іншими типами механізмів. До недоліків даного механізму можемо віднести різноплощинне розташування консолей крила у польоті, що негативно впливає на аеродинамічні характеристики, дещо ускладнює балансування й здійснює нерівномірне навантаження на вісь обертання консолей. Логічним наступним кроком є усунення цього недоліку шляхом проектування механізму одновісного складаного крила, що забезпечує розташування консолей крила в одній площині у розкритому стані. Таким чином, відповідно до мети статті формуємо задачу із уточненим типом механізму.

Постановка задачі

У межах даної статті здійснюється розроблення та опис концептуального механізму одновісного складаного крила БПЛА для забезпечення його швидкого розгортання та розташування консолей крила в одній площині у розкритому стані.

Аналітична частина

Одновісний механізм складаного крила є системою дисків, що формують вісь та платформи до яких кріпляться консолі крила, замків, приводів та пружних елементів. Для переходу консолей в одну площину у розкритому стані нижній диск повинен мати отвір/паз, що відповідатиме формі валу верхнього диску дозволяючи йому вільно здійснити посадку в нього у кінцевому положенні. У початковому положенні, верхній диск зміщений вгору відносно нижнього й спирається на нього, утворюючи контактну площу у формі напівкруга із зовнішнім та внутрішнім радіусом. Фіксація дисків у початковому і кінцевому положенні здійснюватиметься штифтами й натиском пружин. Для забезпечення падіння та подальшої фіксації верхнього диску до нього має бути прикладена сила поршня під натягом пружини стиску. У разі руху навколо осі диски приводяться шляхом зсуву фіксуючого штифта й тягою пружин розтягу.

Для опису взаємозалежності характеристик пружин від габаритних параметрів механізму, опишемо просту систему із двома напівдисками із однаковим внутрішнім $R_в$ та зовнішнім $R_з$ радіусом, що притиснуті разом

осьовою пружиною із силою $F_{\text{ПрО}}$, й до яких по краях прикладено силу пружин розтягу, котрі приводять диски в рух. (рис. 2).

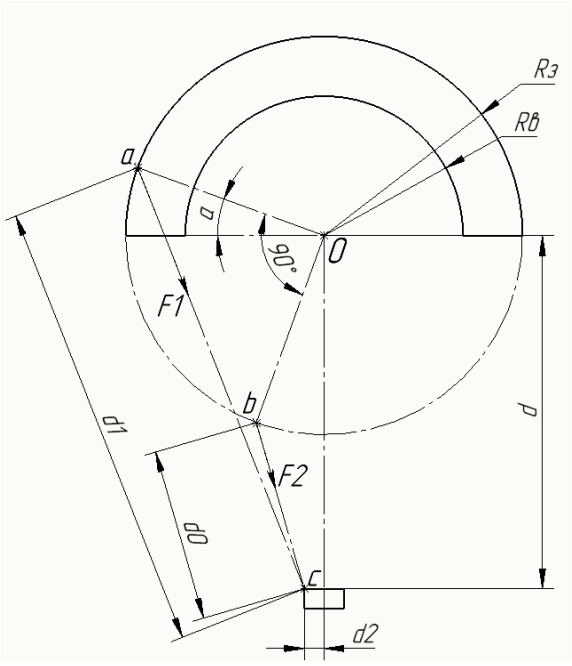

Рис. 2. Наближена схема основних розмірів механізму та напрямку сил (вид зверху)

Згідно схеми, точки кріплення пружини розтягу «*c*» на кронштейні й «*a*» і «*b*» у зведеному та розкритому стані відповідно. Положення другої пружини розтягу, що приводить в рух інший диск є дзеркальним відносно лінії довжиною «*d*». Точки «*a*» і «*b*» зміщені по діаметру на кут α, а точка «*c*» зміщена від осі симетрії на відстань d_2 із метою уникнення зачеплення пружин розтягу та забезпечення залишкового натягу у кінцевому положенні. У розкритому стані, пружина розтягу має довжину d_0, а у зведеному стані d_1. Відстань d позначає відстань між центром осі обертання та перпендикулярною площиною де розташована точка «*c*». Визначити відстані d_0 та d_1 можливо наступними формулами:

$$d_0 = \sqrt{\left(d - R_3\cos(a)\right)^2 + \left(R_3\sin a - d_2\right)^2};$$

$$d_1 = \sqrt{\left(d + R_3\sin(a)\right)^2 + \left(R_3\cos(a) - d_2\right)^2}.$$

Сила притискання осьової пружини у складеному положенні вираховується із урахуванням вимог забезпечення достатньої притискної сили пружиною у розкладеному виді. Силу притискання пластин у такому випадку визначаємо як:

$$F_{\text{ПрО}} = k\left(\left|x + h_{\text{д}}\right|\right);$$

де $h_{\text{д}}$ – висота одного диску,

x – попереднє стискання пружини у розкритому стані.

Звідси, знаючи притискну силу та розміри дисків, можемо вирахувати мінімальну дотичну силу, яку необхідно докласти до краю одного із дисків, щоб зрушити його з місця. Припустивши рівномірний розподіл тиску між дисками, дотичну силу можемо вирахувати за формулою [8]:

$$F_\tau = \frac{2}{3}\mu F_{\text{ПрО}} \frac{R_З^3 - R_В^3}{R_З\left(R_З^2 - R_В^2\right)},$$

де μ – коефіцієнт тертя між двома поверхнями.

Зважаючи на те, що фактично диски приводяться у рух двома пружинами, отриману мінімальну дотичну силу можемо поділити навпіл, тоді отримаємо мінімальну необхідну силу натягу пружини розтягу:

$$F_{\tau/2} = \frac{F_\tau}{2}.$$

Оскільки дія пружини у зведеному стані не є дотичною – потрібно здійснити розрахунок проекції мінімальної необхідної дотичної сили на лінію, що з'єднує точки «a» і «c».

Нехай кут b – це кут між вектором F_1 та F_τ, тоді

$$F_1 = \frac{F_{\tau/2}}{\cos(b)}.$$

Для кращого спрацювання пружини краще брати силу натягу із запасом:

$$F_{\text{ПрР}} = F_1 \times 1{,}2 \ldots 1{,}3.$$

де $F_{\text{ПрР1}}$ – сила натягу пружини розтягу у зведеному стані.

У розкладеному стані, пружина розтягу має залишатись у натягу, тобто задовольняти умові $x > 0$.

Геометрична модель

Відповідно до опису механізму вище, пропонується наступна форма верхнього та нижнього дисків (рис. 3):

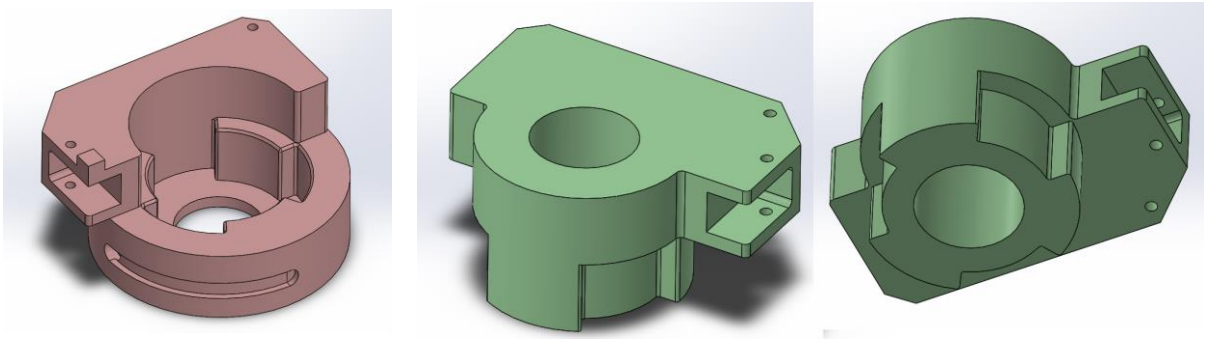

Рис. 3. Нижній та верхній диски

Паз нижнього диску із відповідним валом верхнього виконані у формі кола із трапецієвидними вирізами [9], що дозволяє надійно сполучити обидва диски.

Диски виготовляються із алюмінію методом фрезерування у кілька технологічних проходів. У нижньому диску передбачено отвір, який забезпечує його центрування відносно валу осьового диску (рис. 4).

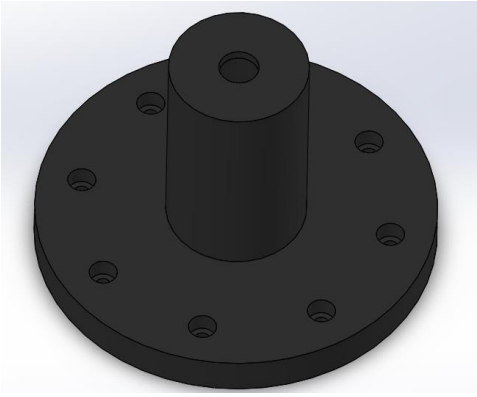

Рис. 4. Осьовий диск

Верхній диск аналогічно встановлюється на осьовий диск. Кожен із дисків умовно ділиться на дві функціональні зони: верхню - на якій розміщено місце кріплення консолі (не відображено на моделі), бокові заглиблення для встановлення пружин і отвори для монтажу штифтів, та нижню, призначену для реалізації пазового з'єднання та центрування по вісі обертання.

Осьовий диск жорстко фіксується на спеціально передбаченій платформі за допомогою гвинтів під шестигранний ключ, для яких у його основі виконано заглиблені посадкові місця.

У перерізі механізм має вигляд, представлений на рис. 5.

Рис. 5. Механізм притискання верхнього диску
Ліворуч – зведений стан, праворуч – складений стан

Для забезпечення натягу та спрацювання пружини всередині осьового валу передбачено шайбу, яка за допомогою різьбового з'єднання з'єднується із притискним поршнем. З метою запобігання обертанню шайби всередині порожнини осьового валу вздовж його стінки виконано поздовжнє заглиблення, форма якого відповідає виступу на шайбі (рис. 6).

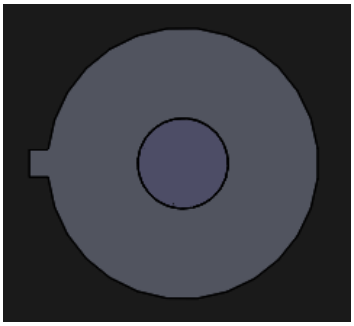

Рис. 6. Поперечний переріз порожнини осьового валу

Верхній і нижній диски фіксуються у складеному стані за допомогою короткого штифта та приводяться в дію пружинами розтягу, які закріплюються з одного боку на окремому кронштейні, розташованому перед дисками, а з іншого – на штифтах, встановлених у бокових заглибленнях кожного з дисків (рис. 7).

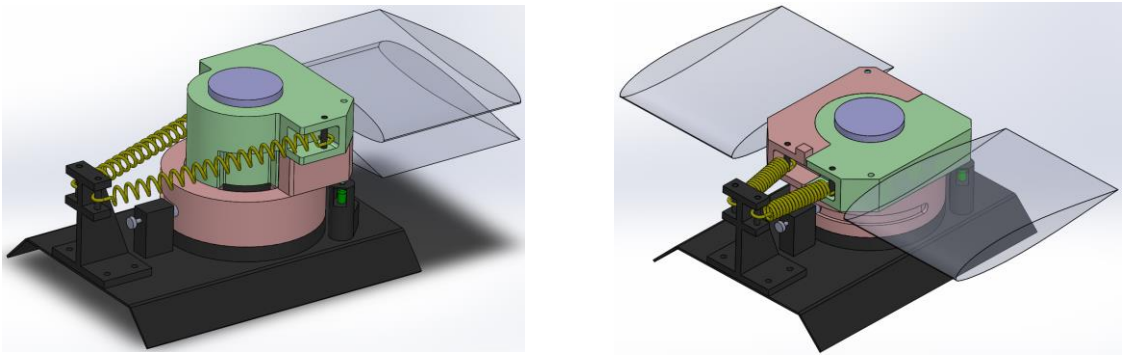

Рис. 7. Загальний вид механізму у початковому та кінцевому стані (темно-сірим кольором позначено статичні елементи)

Ініціація процесу розкладання відбувається спрацюванням актуатора, який проштовхує два послідовно розташовані штифти до моменту, коли один із них припиняє утримувати диски у положенні (рис. 8).

Рис. 8. Положення актуатора (замкнуте – ліворуч, відкрите – праворуч)

Посадка штифтів виконується перехідною або із легким натягом [10], що запобігає їх самовільному випадінню з отворів і водночас знижує вимоги до потужності, а отже – і до габаритів актуатора. Альтернативно, замість актуатора може використовуватися сервопривід із кривошипним або кулачковим механізмом, чи інші типи приводів. Для фіксації механізму у зведеному стані над актуатором розміщено кронштейн із отвором, через який проходить штифт нижнього диску (рис. 9).

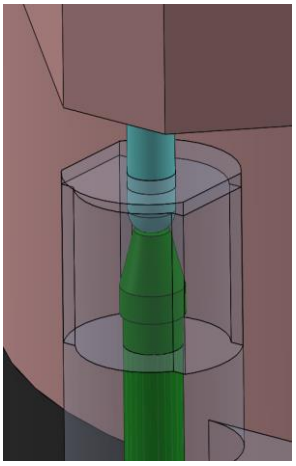

Рис. 9. Обмежувальний кронштейн

За відсутності зазначеного кронштейну під час транспортування консолі крила зазнаватимуть коливань під дією натягу пружин.

Під час спрацювання механізму на верхній частині нижнього диску передбачено виступ, який обмежує хід верхнього диску, запобігаючи його надмірному переміщенню.

Для зниження сили удару та віддачі у разі контакту внутрішніх бокових стінок дисків доцільно встановити гумові прокладки або використати інші елементи демпфування.

З метою обмеження обертання верхнього та нижнього дисків навколо осі у розкладеному стані у нижній частині нижнього диску вздовж його стінки фрезерується поздовжній слот. Ззовні диску розміщується блок із підпруженим круглим валом, який ковзає всередині цього слоту. Підпружений вал обмежує вертикальний рух нижнього диску та забезпечує його фіксацію у розкладеному положенні. (рис. 9)

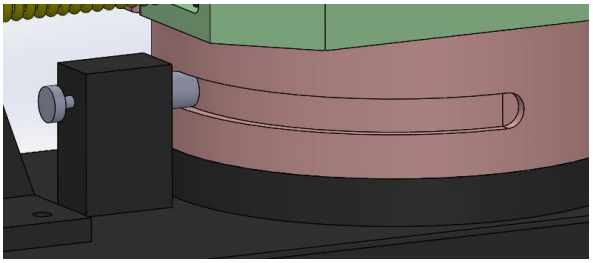

Рис. 9. Ковзний паз та підпружений вал

Результати розробки концептуального механізму

У результаті *CAD*-моделювання отримано геометричну модель механізму складаного крила, яка визначає геометрію конструкції, складові елементи та характер їх взаємодії. Запропонована схема забезпечує розкладання консолей навколо спільної осі із подальшим вирівнюванням у спільній площині. Це усуває характерний недолік типової одновісної системи, де консолі після розкриття залишаються зміщеними по висоті. Така зміна кінематичної схеми потенційно покращує аеродинамічні, льотні та міцнісні характеристики БПЛА, у конструкцію якого може бути інтегрований даний механізм.

Висновки

У роботі представлено концептуальну конструкцію одновісного механізму складаного крила безпілотного літального апарату призначеного для швидкого та надійного розгортання консолей у польотне положення. Проведений огляд існуючих рішень показав, що поширені типи механізмів або мають надлишкову складність, або не забезпечують достатнього зменшення габаритів під час транспортування, або залишають різноплощинне положення консолей після розкладання. Запропонована схема є габаритно вигідною й усуває ключовий недолік одновісних конструкцій: пазово-замковий вузол забезпечує вирівнювання консолей у одній площині без надмірного ускладнення механізму.

Розроблений концепт включає геометрію верхнього та нижнього дисків, осьовий диск, механізм осьового притискання, систему штифтів та пружин розтягу, а також спосіб ініціації розкладання й фіксації у розкритому стані. Отримана 3*D*-модель демонструє повну кінематичну послідовність роботи вузла та дозволяє інтегрувати його у БПЛА різних масогабаритних категорій. Аналітична частина встановлює залежності між параметрами пружин, розмірами контактних площин дисків та необхідними силами для ініціації руху, що створює основу для подальших інженерних розрахунків.

Запропонований механізм потенційно забезпечує кращу аеродинамічну якість, зручність транспортування та швидкість приведення апарата в робочий стан. Подальші дослідження повинні включати оптимізацію геометрії, розрахунок навантажень, аналіз міцності, оцінку зносостійкості контактних поверхонь та експериментальну перевірку функціонування прототипу.

Список використанної ітератури

1. *K. Al-Dosari*, *Z. Hunaiti*, and *W. Balachandran*, “Systematic Review on Civilian Drones in Safety and Security Applications,” MDPI Open Access Journals 2023, [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2504-446X/7/3/210
2. *X. Zhang*, *Y. Li*, and *H. Chen*, “A New Type Bionic Foldable Wing Design for High Maneuverable Unmanned Aerial Vehicle”, MDPI Open Access Journals, 2023. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/13/14/8345
3. *Z. Lin*, *T. Li*, and *Y. Hu*, “Multi-Level Switching Control Scheme for Folding Wing VTOL UAV Based on Dynamic Allocation”, MDPI Open Access Journals, 2024. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2504-446X/8/7/303
4. *A. Geva*, *H. Abramovich*, and *R. Arieli*, “Investigation of a Morphing Wing Capable of Airfoil and Span Adjustment Using a Retractable Folding Mechanism” MDPI Open Access Journals, 2019, [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2226-4310/6/8/85
5. *C. Li*, *H. Xiao*, *H. Guo*, *J. Tao*, *C. Liu*, and *G. Yang*, “The mechanical characteristics analysis of the telescopic wing with adaptive driving mechanism” Advances in Mechanical Engineering, 2025, [Online]. Available: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/16878132251342411
6. *A. A. Demircali* and *H. Uvet*, “Mini Glider Design and Implementation with Wing-Folding Mechanism” MDPI Open Access Journals, 2018. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2076-3417/8/9/1541
7. *H. Zhang*, “Dynamic Analysis of Wing Deployment of High-Altitude Balloon-UAVs”, MATEC Web of Conferences, 2018. [Online]. Available: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2018/57/matecconf_meae2018_05004/matecconf_meae2018_05004.html
8. *M. Bąk*, “Torque capacity of multidisc wet clutch with reference to friction occurrence on its spline connections,” Scientific Reports, 2021. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/s41598-021-00786-6
9. *V. Sebera* and *M. Šimek*, “Finite Element Analysis of Dovetail Joint Made with the Use of CNC Technology,” Researchgate, 2010. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/269628585_Finite_element_analysis_of_dovetail_joint_made_with_the_use_of_CNC_technology
10. *Y. I. Adamenko*, *O. M. Herasymchuk*, *S. V. Maidanyuk*, *N. V. Minitska*, *V. A. Pasichnyk*, and *O. A. Plivak*, “Допуски, посадки та технічні вимірювання. Практикум. Частина 1”, Івано-Франківськ, Україна: «Симфонія форте», 2016.