

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут аерокосмічних технологій

Кафедра авіа- та ракетобудування

До захисту допущено
В. о. завідувача кафедри
_____ Олександр БОНДАРЕНКО
«__» _____ 2023 р.

Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Літаки і вертольоти»
спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»

на тему: «Система скидання вантажу для квадрокоптера»

Виконав: студент 4 курсу, групи АЛ-91

Скорняков Віктор Андрійович

Керівник Асистент Грицан Сергій Вадимович

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Асистент, Осокін Владислав Сергійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цьому
дипломному проекті немає
запозичень з праць інших
авторів без відповідних
посилань. Студент

(підпис)

Київ – 2023 року

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	4
ВСТУП.....	4
1. СКИДАННЯ ВАНТАЖІВ З ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	7
1.1. Використання систем скидання вантажів в авіації.....	7
1.2. Безпілотні літальні апарати як платформа для доставки та скидання вантажів.....	12
Висновок по розділу.....	19
2. СИСТЕМИ СКИДАННЯ ВАНТАЖІВ ДЛЯ МУЛЬТИКОПТЕРНИХ БПЛА.....	21
2.1. Огляд мультироторних БПЛА, що використовуються для скидання вантажів.....	21
2.2. Класифікація систем скидання вантажів для квадрокоптерів.....	25
2.3. Вибір системи скидання вантажів для оптимізації.....	28
Висновок по розділу.....	30
3. ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СКИДАННЯ ВАНТАЖІВ ДЛЯ КВАДРОКОПТЕРА.....	32
3.1. Технологія виробництва.....	32
3.2. Аналіз та оптимізація аеродинамічних характеристик обраної системи скидання вантажів.....	34
3.3. Розрахунок конструкції системи скидання вантажу на міцність.....	44
Висновок по розділу.....	47
ВИСНОВОК.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:.....	51
ДОДАТКИ.....	55

Перелік умовних скорочень

ЛА – літальний апарат;

БпЛА – безпілотний літальний апарат – повітряне судно, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються дистанційно за допомогою пункту дистанційного пілотування, розташованого поза повітряним судном, або повітряне судно, що здійснює політ автономно за відповідною програмою;

VTOL – Vertical Take-Off and Landing (вертикальний зліт та посадка);

ЧПУ – числове програмне управління;

FDM – Fused Deposition Modelling (моделювання плавного осадження);

SLA – Stereolithography (стереолітографія);

ABS – Акрилонітрилбутадієнстирол

PLA – полілактид

3D друк (або адитивне виробництво) – це процес створення фізичних об'єктів шляхом послідовного нанесення матеріалу в шарах на основі цифрового моделювання. У цьому процесі тривимірна модель об'єкта розбивається на тонкі шари, а потім матеріал додається шар за шаром, після чого відбувається з'єднання шарів і формування фізичного об'єкта.

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

ВСТУП

Зростаюче зацікавлення використанням квадрокоптерів у різних сферах діяльності ставить перед науково-технічною спільнотою завдання щодо вдосконалення їх функціональних можливостей. Одним із аспектів, що потребує оптимізації, є система скидання вантажу. Здатність квадрокоптера ефективно та безпечно скидати вантаж відкриває нові можливості для логістики, пошуку і рятування, досліджень та багатьох інших сфер.

Недосконалість існуючих систем скидання вантажу для квадрокоптерів з точки зору аеродинаміки призводить до зниження ефективності літального апарата, а перевищення параметрів міцності конструкції в порівнянні із цільовим навантаженням на неї, призводить до наднормових витрат матеріалів виробництва та підвищення ваги.

Для вирішення цих проблем необхідно оптимізувати конструкцію системи скидання вантажу з точки зору аеродинаміки та параметрів міцності, до дасть змогу підвищити загальну ефективність дрона-носія та покращити його літальні характеристики.

Метою даної дипломної роботи є оптимізація конструкції системи скидання вантажу для квадрокоптера з метою покращення його аеродинамічних характеристик, забезпечення високої міцності та стійкості конструкції, а також удосконалення технології виробництва. Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. Вивчити аналоги та існуючі виконання систем скидання вантажу для квадрокоптерів.
2. Дослідити технологію виробництва систем скидання вантажу.
3. Провести аеродинамічне випробування вихідного зразка та модифікованого варіанту системи скидання.
4. Розрахувати міцність конструкції системи скидання вантажу.

Результати даної дипломної роботи матимуть наукову та практичну значимість. Аналіз існуючих виконань систем скидання вантажу дозволить отримати уявлення про різні підходи до конструкції та їх переваги та недоліки. Вивчення технології виробництва дозволить встановити оптимальні методи виробництва систем скидання вантажу, відповідно до вимог часу. Проведення аеродинамічних випробувань вихідного зразка та модифікованого варіанту дозволить порівняти їх аеродинамічні характеристики та визначити найефективніший варіант та доцільність модифікації. Розрахунок на міцність забезпечить перевірку конструкції та її здатності до роботи під навантаженням.

Дипломна робота складається з наступних розділів: "Огляд літератури", "Аналіз існуючих виконань систем скидання вантажу для квадрокоптерів", "Вивчення технології виробництва", "Обдувка вихідного зразка та модифікованих варіантів системи скидання", "Розрахунок на міцність", "Висновки", "Список використаних джерел".

В першому розділі буде проведений огляд літератури, де будуть розглянуті наукові статті, публікації та патенти, що стосуються систем скидання вантажу для квадрокоптерів. Розділ "Аналіз існуючих виконань систем скидання вантажу для квадрокоптерів" міститиме опис різних підходів до конструкції та їх особливості. В наступному розділі "Вивчення технології виробництва" будуть розглянуті методи та процеси, що використовуються для виготовлення систем скидання вантажу. Розділ "Обдувка вихідного зразка та модифікованих варіантів системи скидання" описуватиме методику проведення експерименту з обдувки та аналізу отриманих результатів. В розділі "Розрахунок на міцність" буде представлений розрахунок секції конструкції системи скидання вантажу. Висновки роботи міститимуть підсумок отриманих результатів та висновки щодо ефективності оптимізованої системи скидання. В кінці роботи буде наведений список використаних джерел.

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ

1. СКИДАННЯ ВАНТАЖІВ З ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1. Використання систем скидання вантажів в авіації

Скидання вантажів з літальних апаратів має довгу історію і використовується в різних галузях, включаючи військову, гуманітарну та комерційну діяльність.

Скидання вантажів з повітря розпочалося з початком авіаційної ери у 20-му столітті. Перші спроби скинути вантаж з повітря відбувалися в рамках військових операцій. У період Першої світової війни (1914-1918), літаки використовувалися для скидання бомб на ворожі позиції. У більшості випадків це були досить неточні скиди з кабін літальних апаратів руками самих пілотів.

Протягом Другої світової війни (1939-1945), скидання вантажів з повітря отримало широке застосування. Сталося це зокрема під час здійснення військових операцій та підтримки партизанських рухів у різних країнах. Літаки, такі як американські С-47 "Скайтрейн" і британські Avro Lancaster, німецькі He-111, Junkers Ju-87 "Stuka", Ju-88, тощо використовувалися для скидання військового обладнання, зброї, продовольства та медичного забезпечення.

Під час Другої світової війни бомбардувальники відіграли важливу роль у веденні повітряних операцій. Системи скидання бомб на бомбардувальниках цього періоду були розроблені з метою ефективного випуску бомб на ворожі цілі.

Одним з найпоширеніших видів систем скидання бомб була механічна система. Вона включала в себе розраховану на певну кількість бомб заготовку, яка зберігалась у бомбовому відсіку. Пілот активував механізм скидання за допомогою важеля або кнопки у кабіні. Це викликало механічні процеси, що спричиняли відкриття створок відсіку та викидання бомб.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Бомби, як правило, випускалися вільним падінням через відкриті дверцята, що забезпечувало їх відділення від літака.



Рисунок 1.1 – Бомбовий відсік бомбардувальника Heinkel He-111

Авіаційні бомби SC 250 (рис. 1.1) встановлювалися у відсік вертикально. Вертикальне підвішування бомб забезпечувало більш рівномірний розподіл ваги по довжині літака, зменшуючи момент відносно центру тяжіння.

Існували й інші типи систем скидання, такі як пневматичні та електричні. У пневматичних системах повітряні бомби скидалися за допомогою стиснутого повітря. Пілот активував механізм скидання, і повітря під високим тиском вистрибувало з відповідного віконця або отвору, викидаючи бомбу. Електричні системи скидання використовували електричні механізми для відкривання створок та скидання бомб.

Окрім основних механізмів скидання, важливою частиною систем були навігаційні і бомбометальні прилади. Навігаційні прилади використовувалися для точного визначення місцезнаходження літака та цілей. Бомбометальні прилади, такі як приціли і бомбомети, забезпечували точність скидання бомб на цілі. Вони дозволяли пілоту встановлювати потрібні параметри скидання, такі як висота, швидкість і кут атаки, для досягнення найбільшої точності удару.

Оптичний бомбовий приціл, по суті, є приладом для вимірювання кутів, за допомогою якого визначають вектор відстані точки падіння боєприпасу при відомих параметрах руху літака у просторі та відомих атмосферних умовах. Горизонтальний шлях, пройдений бомбою під час падіння, називається відносом бомби.

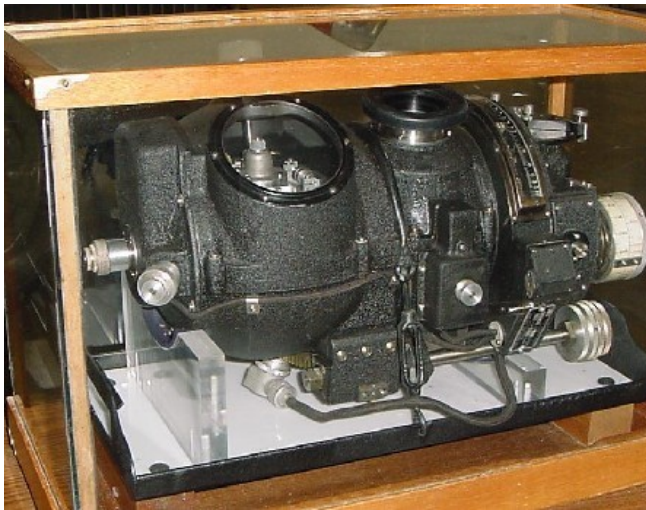


Рисунок 1.2 – Американський бомбовий приціл Norden часів Другої світової війни

Під час бомбометання з горизонтального польоту час падіння T та віднос бомби Δ є функціями висоти H та швидкості V , тобто параметрів, що визначають початкові умови бомбометання, а також характеристичного часу падіння бомби θ , що визначає аеродинамічні властивості бомби.

Характеристичним часом падіння бомби називається час падіння бомби, скинутої з горизонтально літаючого літака з висоти 2000 метрів при швидкості польоту 40 м/с в умовах стандартної атмосфери.

Задача прицілювання під час бомбометання полягає в тому, щоб до моменту скидання бомби, виконавши комплекс операцій з управління літаком, надати літаку і вектору повітряної швидкості таке положення, яке забезпечуватиме попадання скинутої бомби у задану точку. При цьому процес прицілювання полягає у визначенні дальності скидання та компенсації бокового зсуву. [23]

Важливо відзначити, що з часом, у роки Другої світової війни технології систем скидання бомб стали більш складними та автоматизованими. Введення комп'ютерів та електроніки у літаки дозволило покращити точність скидання бомб і забезпечити більшу ефективність бомбардування.

Одним з найдосконаліших бомбардувальників Другої світової війни з точки зору прицільності бомбометання вважається Ju-87 Stuka (Sturzkampfflugzeug). Цей літак був відомий своїм спеціалізованим обладнанням для прецизійного скидання бомб під кутом.

Система скидання бомб на Ju-87 Stuka включала наступні особливості:

1. Автоматичні гачки: Літак був оснащений автоматичними гачками, які утримували бомби на підвісі під крилами. Це дозволяло пілоту відкривати гачки віддалено для скидання бомб.

2. Спеціалізована система прицілювання: Stuka мав спеціальну систему прицілювання, яка допомагала пілоту точно визначати момент скидання бомб. Система прицілювання включала оптичні прилади, які дозволяли пілоту наводити бомби на ціль перед скиданням.

3. Кутове скидання: Однією з найважливіших характеристик Ju-87 Stuka була його здатність до кутового скидання бомб. Літак здатний летіти під крутим кутом і виконувати скидання бомб, що дозволяло йому бути досить точним у порівнянні з іншими типами літаків того часу.

4. Дзвінке сигнальне гудіння: Ju-87 Stuka також мав відомий сигнал, який називався "дзвінким сигнальним гудінням". Цей звуковий ефект використовувався для створення психологічного впливу на ворогів перед скиданням бомб, підсилюючи ефективність штурмових наступів.

Загалом, система скидання бомб на Ju-87 Stuka забезпечувала велику точність ураження наземних цілей. [16]

Під час Сталінградської битви в 1942-1943 роках, повітряна доставка вантажів грало важливу роль у забезпеченні оточених німецьких військ 6 армії під командуванням полковника-генерала Фрідріха Паулюса. Ця операція відома як "доставка Юнкерса" або "Сталінградський аеропорт".

Оточення німецьких військ у Сталінграді призвело до складної ситуації з постачанням військ землею. На місцевості були перешкоди для підходу наземного транспорту, а контроль над небесним простором мали радянські війська. Тому німці прийняли рішення використовувати повітряні шляхи для доставки необхідного обладнання, захисного спорядження, медичної допомоги та інших матеріалів до військових підрозділів в облозі.

Для цієї операції було задіяно літаки Junkers Ju 52 - німецький трьохдвигунний транспортний літак. Ці літаки здійснювали посадку на невеликому сталінградському аеропорту, який перебував під контролем

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

німецьких військ. Завантаженість літаків була максимальною, а посадка та зліт проводилися на непокритій злітно-посадковій смугі під ворожим вогнем. Це була небезпечна та виснажлива місія для німецьких пілотів. Згодом, коли використання злітно-посадкової смуги аеродрому стало неможливим, було вирішено скидати необхідні оточеним військам вантажі безпосередньо над районами їх розташування.

Повітряна доставка дозволила забезпечувати оточені війська необхідними ресурсами, проте обмеженість кількості літаків та обсягу перевезених вантажів робила цю операцію нестабільною.

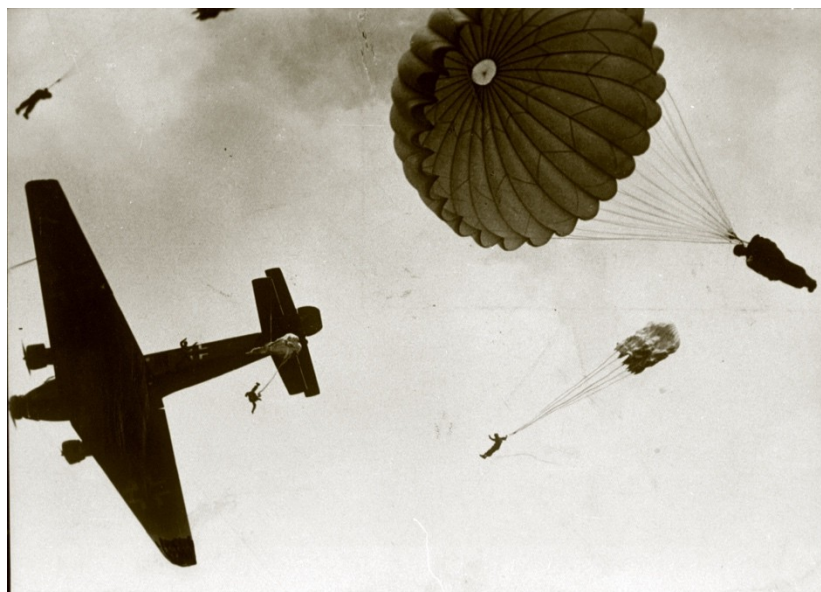


Рисунок 1.3 – Німецький військово-транспортний літак Ju-52 під час скидання повітряного десанту.

Це загальна інформація про конструкцію систем скидання бомб на бомбардувальниках часів Другої світової війни. Різні моделі літаків мали свої власні особливості та вдосконалення у системах скидання, але загальні принципи були подібні.

Після війни скидання вантажів з повітря стало важливим елементом гуманітарних та рятувальних операцій. Це було особливо актуально під час надзвичайних ситуацій, таких як природні катастрофи та голод. Міжнародні

організації, такі як Червоний Хрест та ООН, використовували повітряні судна для доставки допомоги на важкодоступні території.

Сьогодні скидання вантажів з літальних апаратів застосовується у різних галузях. Наприклад, у галузі лісового господарства літаки можуть скидати насіння дерев для відновлення лісів. Крім того, цей метод використовується для скидання хімічних речовин для засіву полів або боротьби з шкідниками.

Також існує комерційний сектор, де використовуються спеціалізовані вантажні літаки для перевезення великих вантажів на великі відстані.

З рештою технології скидання вантажів з літальних апаратів постійно розвиваються. Використання парашутів, спеціальних контейнерів, підвісних систем та автоматизованих пристроїв дозволяє збільшити точність і безпеку скидання вантажу.

Отже, скидання вантажів з літальних апаратів має багато різних застосувань від військових операцій до гуманітарної допомоги та комерційних перевезень. Цей процес продовжує розвиватися, щоб забезпечити ефективну та безпечну доставку вантажів повітряним транспортом.

1.2. Безпілотні літальні апарати як платформа для доставки та скидання вантажів

21 сторіччя відкрило у новому світлі безпілотну авіацію. Хоча у 20 столітті вже були спроби створити безпілотні літальні апарати, але переважно у військових цілях. Такими літальними апаратами можна вважати крилаті ракети V-1 німецького виробництва.



Рисунок 1.4 – Літак-снаряд V-1

Але на той момент технології не могли забезпечити гарної телеметрії та повноцінного керування літальним апаратом на великих відстанях, не кажучи вже про можливість передачі сигналу відеозв'язку. Наразі ж, супутниковий, цифровий зв'язок та досконалі системи і протоколи передачі даних на відстань, дають змогу виробникам створювати якісні та технологічні БПЛА з усіма перерахованими можливостями. Сучасні БПЛА поділяють за призначенням:

- 1) військові;
- 2) подвійного призначення;
- 3) цивільні.

Найбільшого розповсюдження набули наступні аеродинамічні схеми БПЛА:

- 1) літакова;
- 2) вертолітна;
- 3) багатороторна (мультикоптерна).

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ

Арк.

70

Літакова схема активно використовується у військових цілях. Вона дає вигоду у можливості знаходження у повітрі довгий час (автономності). Такі БпЛА виробляють різного розміру та з різними можливостями, від оперативного-тактичного до стратегічного рівня.



Рисунок 1.5 – БпЛА оперативного-тактичного рівня «Горлиця» виробництва ДП «Антонов», Україна



Рисунок 1.6 – БпЛА стратегічного рівня MQ-9 Reaper, виробництва Lockheed Martin, США

Відмінності комплексів різних рівнів полягають у наступному:

1. автономності;
2. максимальній дальності польоту;
3. практичній стелі;
4. можливості протидії засобам радіоелектронної боротьби противника;

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ

Арк.

70

5. можливості перенесення озброєння.

Великого розповсюдження у цивільних цілях цей вид БпЛА не набув.

Вертолітна схема БпЛА дозволяє йому зависати у повітрі, а також здійснювати зліт і посадку з маленьких майданчиків, як от з палуби корабля, ділянки автодороги, клаптика поля.

Наразі в Україні розробляють свій перший ударний безпілотний літальний апарат вертолітного типу [29].

Безпілотники вертолітного типу мають кілька переваг порівняно з беспілотниками літакового типу та мультироторними. Наведемо деякі з них:

1. Вертикальний зліт і посадка (VTOL): Безпілотники вертолітного типу можуть злітати та сідати вертикально, що дозволяє їм працювати в обмежених просторах і на малих висотах.

2. Стабільність: Безпілотники вертолітного типу можуть залишатися на місці або рухатися повільно в повітрі, що дозволяє їм виконувати завдання, які потребують точності та стабільності.

3. Маневреність: Безпілотники вертолітного типу можуть рухатися у будь-якому напрямку і здійснювати різні маневри, що дозволяє їм працювати в складних умовах.

4. Гнучкість: Безпілотники вертолітного типу можуть бути обладнані різноманітними сенсорами та обладнанням для виконання різноманітних завдань.

Недоліки безпілотників вертолітного типу також існують. Перелічимо основні з них:

1. Швидкість: Безпілотники вертолітного типу зазвичай не можуть летіти так швидко, як беспілотники літакового типу.

2. Ефективність палива: Безперервна робота двигунів великої потужності при виконанні вертикального зльоту та посадки може призводити до значного споживання палива [26].

3. Шум: Безперервна робота двигунів може призводити до значного шуму.

Мультикоптерна схема є найбільш розповсюдженою у цивільних цілях. Багатороторні БпЛА мають свої переваги та недоліки порівняно з літаковими та вертольотними БпЛА. Основні переваги багатороторних БпЛА полягають у їх високій маневреності, стабільності та здатності до виконання завдань у складних погодних умовах. Однак, багатороторні БпЛА мають меншу швидкість та менший радіус дії порівняно з літаковими БпЛА. [25]

Перші мультироторні літальні апарати почали створювати ще на початку 20 сторіччя. У 1920 році було створено перший квадрокоптер (quadro – чотири), що піднявся у повітря. Але протягом усього 20 сторіччя мультироторна схема літальних апаратів не набула розповсюдження через складність і недосконалість трансмісії.

Лише у 2010-их роках у якості авіамоделей з'явилися перші мультикоптери з безколекторними електродвигунами, що працювали на літій-полімерних акумуляторах. Згодом вони набули великого розповсюдження у багатьох сферах. Виробники змогли вмістити у ці БпЛА надбання сучасної мікроелектроніки, включно з точними електричними гіроскопами, оптичними приладами, системами автоматизованого керування.

Багатороторні БпЛА та БпЛА вертолїтного типу мають свої переваги та недоліки. Багатороторні БпЛА зазвичай мають більшу стійкість до вітру та можуть літати на великій висоті. Вони також можуть бути більш стабільними під час польоту на великій швидкості. З іншого боку, БпЛА вертолїтного типу можуть легше здійснювати вертикальний зліт та посадку, що робить їх корисними для моніторингу територій з обмеженим простором [].

Щодо розміру та маневреності, то багатороторні БпЛА зазвичай більші за розміром та менш маневренні порівняно з БпЛА вертолїтного типу [24].



Рисунок 1.7 – Найбільш розповсюджений цивільний дрон компанії DJI – Mavic 3

- 4) пошуково-рятувальні операції;
- 5) правоохоронні функції;
- 6) перевезення вантажів, тощо.

В останні роки ідея перевезення малогабаритних вантажів за допомогою мультикоптерних систем набула великої актуальності для компаній що займаються доставкою товарів, поштових служб. Таким чином з'явилася необхідність у створенні дронів здатних перевозити вантажі та модифікації вже існуючих зразків під ці потреби. Таким чином з'явилися системи кріплення та скидання вантажу.

Зокрема, кілька фірм почали приділяти більше уваги розробці дронів, призначених для доставки посилок в різних галузях, таких як електронна комерція і медичний сектор. Гігант електронної комерції, Amazon, зробив значний крок вперед, представивши свою демонстраційну платформу. У 2013 році Amazon був одним з перших гравців, які розгорнули систему доставки, де Prime Air від Amazon був розроблений для безпечної доставки посилок клієнтам протягом короткого періоду часу за допомогою

Отже, можна сказати, що обидва типи БПЛА мають свої переваги та недоліки і використовуються в різних сферах.

Наразі БПЛА мультикоптерної схеми використовуються у наступних сферах:

- 1) відеозйомка (рис. 1.4);
- 2) геопросторова розвідка;
- 3) аграрні роботи (рис. 1.5);



Рисунок 1.8 – Сільськогосподарський дрон DJI Agras T30

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ

Арк.
70

повністю автоматизованих дронів [19; 7]. Amazon Prime Air здійснив свою першу офіційну доставку в 2016 році, транспортувавши посылку до будинку в 10 милях від Кембриджського фулфілмент-центру.

У 2020 році, після запуску UPS та проектного крила Alphabet, Федеральне управління цивільної авіації надало Amazon федеральний дозвіл на реалізацію свого проекту Prime Air з доставки посилок дронами з метою ефективної та безпечної доставки посилок своїм клієнтам [2]. Інший проект, названий Parcelcopter, запущений у 2013 році гігантською німецькою логістичною компанією Deutsche Post DHL, передбачав транспортування літальних апаратів на острів Джуст у Північному морі [12]. Alphabet, хоча і не є компанією електронної комерції, також очікує великого майбутнього для дронів у доставці: у 2014 році було розкрито проект «Крило», який розробляв дрони, призначені для доставки посилок більшого розміру, ніж Prime Air від Amazon та Parcelcopter від DHL [17].

Інтернет-магазин Siroop, заснований в 2015 році роздрібним дистриб'ютором Coop і компанією стільникових телефонів Swisscom, розробив пілотний проект з онлайн-доставки покупок дронами за допомогою фургонів, у співпраці з німецьким виробником автомобілів Mercedes Benz [9]. У цьому проекті дрон використовує дах вантажівки доставки як посадкову платформу. Посилка обробляється водієм для того, щоб доставити її одержувачу.

Крім того, ресторанна індустрія також почала звертати увагу на режим доставки дронами. Дійсно, деякі гіганти швидкого харчування, такі як Domino's Pizza і McDonald's, реалізують високий потенціал доставки додому, залучаючи служби доставки дронами в перевантажених міських районах. Вони вже розробили експериментальні тести для доставки їжі у співпраці зі стартапами з безпілотних технологій, такими як Flytrex і Flirtey [10].

Крім того, транспортування медикаментів за допомогою дронів можливе між лікарнями [13]. У деяких країнах Африки уряди зобов'язані підтримувати низькі запаси ліків через високу вартість зберігання ліків.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Наприклад, доставка життєво важливих ліків може зайняти більше чотирьох годин, щоб дістатися до місця призначення на автомобілі. Для вирішення цієї проблеми в деяких країнах, таких як Руанда і Танзанія, запускаються логістичні системи на основі дронів для доставки вакцин в ізольовані села. На додаток до цього, у квітні 2019 року уряд Гани офіційно запустив свою службу доставки дронами у співпраці з американським стартапом Zipline для обслуговування лікарень та медичних центрів [6/3301/2798]. Мета полягала в тому, щоб побудувати службу екстреної доставки на вимогу для різних вакцин, препаратів крові та ліків.

Незважаючи на всі досягнення в технології безпілотників великими корпораціями, і навіть незважаючи на бум штучного інтелекту та економічну діяльність, багато країн світу ще не визначили конкретних законів та правил залучення цивільних дронів у свій повітряний простір. Це обмежує еволюцію такої перспективної логістичної галузі [5]. Як наслідок, можливість надійного розгортання систем доставки дронами все ще знаходиться на ранній стадії, і необхідні додаткові кроки для розробки та реальної інтеграції дронів у логістичну галузь [11]. Крім того, станції підзарядки або порти дронів будуть незамінною інфраструктурою для того, щоб дозволити компаніям електронної комерції та логістики вирішувати проблему обмеженої енергетичної автономії таких систем, що є важливою технічною та економічною проблемою для цих логістичних компаній та інших відповідних зацікавлених сторін.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70



Рисунок 1.9 – Система скидання вантажу під квадрокоптер DJI Mavic Air 2

Висновок по розділу

З появою пілотованої авіації з'явилася необхідність у можливості доставлення різноманітних вантажів повітрям до місць, де безпечно приземлення є неможливим, або ж не потрібним згідно мети польоту. Перш за все, у цивільній сфері, системи, призначені для скиду вантажів, отримали розповсюдження у поштових службах. Військова ж сфера застосування таких систем була набагато розгалуженішою. Системи скиду забезпечували гарантовану сепарацію боєприпасів від точок їх підвіски. Безпілотна авіація набула найбільшого розповсюдження саме у другій половині 20-го сторіччя. Затримка у розвитку даної авіаційної галузі була спричинена недостатнім розвитком електроніки та обчислювальних машин. Першими експлуатантами комерційних БПЛА стали військові. Вже у 21 сторіччі мікроелектроніка досягла того рівня розвитку, коли БПЛА може зібрати у себе вдома кожен. Перш за все БПЛА мультироторної схеми з'явилися на ринку авіамоделей у якості іграшок. Згодом були оцінені можливості такої схеми у наступних сферах: відеозйомка, безпековий сектор, пошукові операції, а також доставка вантажів за призначенням. Сьогодні існують як спеціалізовані БПЛА, що призначені для скидання вантажів, так і

варіанти модифікацій дронів, що не розраховані на перевезення корисного навантаження. Наразі системи скиду для комерційних БПЛА виробляють як на рівні спеціалізованих компаній-виробників (в тому числі й самих БПЛА), так і на рівні домашнього або дрібносерійного виробництва ентузіастами.

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

2. СИСТЕМИ СКИДАННЯ ВАНТАЖІВ ДЛЯ МУЛЬТИКОПТЕРНИХ БПЛА

2.1. Огляд мультироторних БпЛА, що використовуються для скидання вантажів

Мультироторні безпілотні літальні апарати (БпЛА) здобули значну популярність в сучасній авіаційній індустрії, завдяки своїй маневреності, ефективності та різноманітним можливостям використання. Одним з важливих аспектів функціональності мультироторних БпЛА є їх здатність до скидання вантажів. Ця можливість відкриває широкий спектр застосувань, включаючи доставку товарів, пошук і рятування, забезпечення логістичних потреб та багато іншого.

У цьому розділі був проведений огляд деяких мультироторних БпЛА, які спеціально призначені для скидання вантажів. Будуть розглянуті їх характеристики, особливості та можливості використання.

Одним з найпопулярніших моделей мультироторних БпЛА для скидання вантажів є DJI Matrice 600. Цей апарат є професійним рішенням, розробленим компанією DJI, яка є лідером у виробництві безпілотних систем. DJI Matrice 600 має шість роторів і може виконувати скидання вантажів вагою до 6 кг. Він оснащений високоточною системою GPS для точної навігації та стабільного польоту. Крім того, цей БпЛА має інтегровану систему передачі даних, яка забезпечує відеострім в реальному часі з камери, що дозволяє оператору моніторити процес скидання.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70



Рисунок 2.1 – Мультикоптер DJI Matrice 600 з встановленою системою скидання вантажу

Ще одним варіантом мультироторного БПЛА для скидання вантажів є Freefly Alta 6. Ця модель має шість роторів і може перевозити вантажі вагою до 9 кг. Freefly Alta 6 володіє високою стійкістю в повітрі та точністю контролю, що робить його відмінним вибором для завдань з доставки та скидання вантажів у важкодоступних місцях.



Рисунок 2.2 – Мультикоптер Freefly Alta 6 з встановленою камерою та системою стабілізації

Крім того, варто згадати про модель Yuneec H520, яка також має можливість скидання вантажів. Yuneec H520 є надійним і стійким БПЛА,

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

призначеним для використання в комерційних та професійних додатках. Він оснащений камерою високої якості та системою автопілоту для точного виконання завдань скидання вантажів.



Рисунок 2.3 Мультикоптер Yuneec H520 з пультом дистанційного керування

Встановлення системи скидання вантажу на малі комерційні дрони (наприклад, DJI Mavic 3) є новим перспективним напрямком для розширення можливостей цих БПЛА. Ті ж DJI Mavic 3 вже мають ряд корисних функцій, таких як високоякісна камера, довгий час польоту та стійкість в повітрі. За допомогою системи скидання вантажу можна значно розширити його потенціал для різних завдань.



Рисунок 2.4 Мультикоптер DJI Mavic 3

Одним із підходів до встановлення системи скидання вантажу на DJI Mavic 3 є використання зовнішнього пристрою, який може бути прикріплений до корпусу дрона. Цей пристрій зазвичай складається з механізму скидання, контролера та датчиків для точного визначення моменту скидання. Крім того, важливо забезпечити стабільне електричне живлення для системи скидання.

Перед встановленням системи скидання вантажу на малі комерційні БПЛА необхідно врахувати деякі важливі аспекти. По-перше, необхідно переконатися, що встановлення додаткових пристроїв не перевантажить дрон і не збільшить його вагу понад припустимі межі. Крім того, залежно від принципу роботи системи скидання, необхідно забезпечити її сумісність з програмним забезпеченням дрона та здатність контролювати процес скидання з пульта керування.

Важливо пам'ятати, що встановлення будь-яких додаткових пристроїв на безпілотні літальні апарати може впливати на їх безпеку та ліцензійні обмеження.

Загалом, встановлення системи скидання вантажу на малі комерційні БПЛА може розширити їх функціональність для використання в різних сферах, включаючи доставку товарів, рятувальні операції та інші.

Ці приклади лише невелика частина доступних на ринку мультироторних БПЛА для скидання вантажів. Кожен з цих апаратів має свої переваги та обмеження, і вибір конкретної моделі залежатиме від вимог вашого проекту та потреби вантажоперевезення.

У наступних розділах дипломної роботи буде розглянуто детальніші аспекти оптимізації системи скидання вантажу для квадрокоптера, включаючи аналіз проектних рішень, обдувку та розрахунків на міцність, з метою розробки оптимального дизайну системи скидання вантажу.

2.2. Класифікація систем скидання вантажів для квадрокоптерів

Ринок систем скидання вантажу для квадрокоптерів є досить широким. Їх виробляють як для конкретних типів дронів та досягають максимальної їх сумісності, так і універсальні зразки з відокремленою від самого квадрокоптера системою керування. Останній варіант є найменш прийнятним для використання, адже не дозволяє виконати скидання на великих дистанціях, на які може відлетіти сам дрон. Також існують системи скидання, що не прив'язані програмно ані до самого БПЛА, ані до іншого пульта керування. Спрацьовують на спалах діоду дрона через світлоприймач на системі скидання.

Постійний пошук альтернативних технічних рішень для скидання вантажів з БПЛА призвів до появи різноманітних технічних рішень щодо систем підвішування та відповідно скидання вантажів. Найбільш розповсюдженими із доступних на відкритому ринку є рішення із використанням підвісного блоку із окремим електричним двигуном, що за командою дистанційного керування приводить у рух запірний механізм, який, у свою чергу, звільняє вантаж [8]. Більш оригінальною є система скидання вантажу, яка не потребує додаткових двигунів чи електроніки, використовуючи наявну у більшості дронів здатність робити переворот навколо власної поздовжньої осі [4]. Зазвичай, такі пристрої кріплення та

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

скидання вантажу якщо і можуть бути захищені самі (наприклад, існують пристрої, захищені від вологи та пилю), то не передбачають додаткового захисту вантажу.

Іншим типом пристроїв для скидання вантажів із безпілотних літальних апаратів є бокси із рухомою нижньою кришкою, яка здатна розкриватися і вивільняти вантаж, що в ній знаходиться. При цьому можуть використовуватися навіть спеціальні контейнери (касети) із прикріпленими до них парашутами [14]. Такі пристрої хоч і більш дорогі, але дозволяють додатково захистити важливі або коштовні вантажі під час транспортування і скидання.

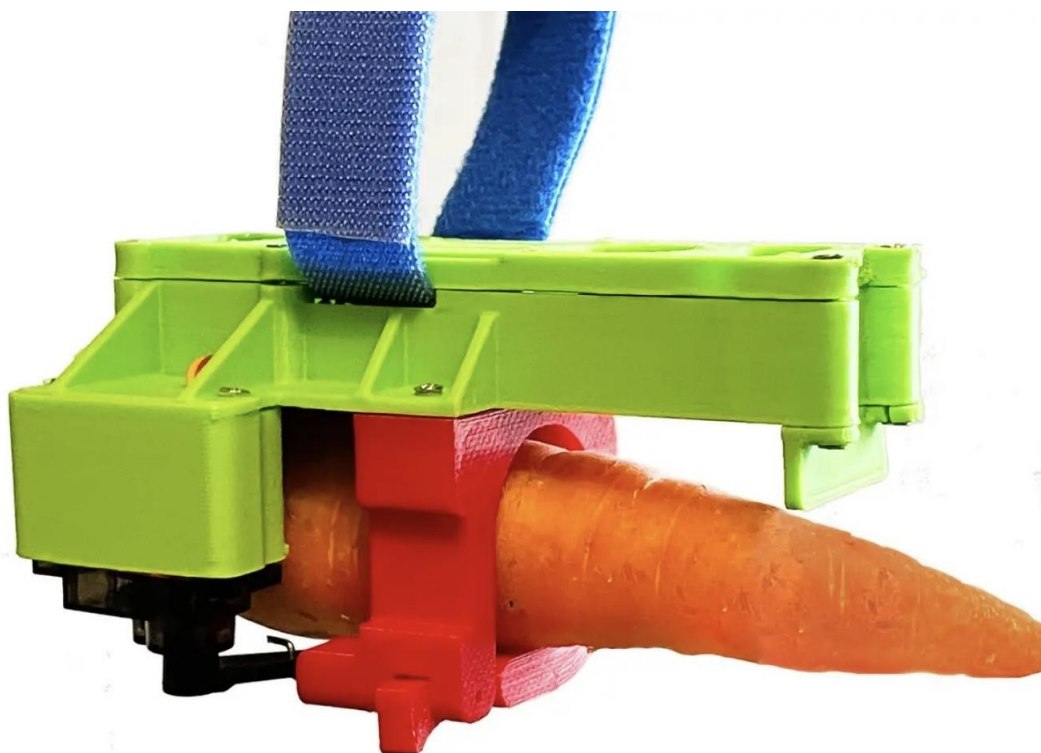


Рисунок 2.5 – Система скидання вантажу виготовлена методом 3D друку для DJI Mavic 3, що спрацьовує через світлоприймач.

Наразі на ринку представлена велика кількість систем скидання вантажу, що призначені для різних цілей. Вони різняться за:

- вагою;

Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ

- використаними матеріалами;
- принципом дії;
- максимальною дальністю використання;
- видом переносимого вантажу.



Рисунок 2.6 – Один з варіантів реалізації конструкції системи скидання зробленої методом 3D друку.

Системи скидання вантажу для квадрокоптерів виробляють як промислові компанії, так і на рівні виробництва ентузіастами, активно використовуючи технологію тривимірного друку. Отже, спираючись на власний досвід використання систем скидання для квадрокоптерів, можемо зробити наступні висновки щодо найкращого поєднання характеристик таких систем:

1) Якнайменша вага

Максимальне зменшення ваги системи скидання, дає змогу квадрокоптеру знаходитись у повітрі якнайдовше, що у свою чергу дозволяє

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

збільшити дальність польоту. Досягти мінімального значення ваги можна шляхом вибору відповідного матеріалу конструкції (при цьому не нехтуючи необхідними міцнісними характеристиками), а також вибором якнайменш легких запчастин.

2) Простота конструкції

Дана характеристика забезпечує більшу ремонтпридатність, що є вкрай важливим у польових умовах. Під простотою розуміється як найменша кількість рухомих деталей та можливість їх швидкої заміни. Отже й з'єднання мають бути надійними та не кріпити деталі «намертво». Кожен елемент має зніматися швидко і з мінімальним набором інструментів.

Отже розглянемо наступні системи скидання вантажу для дронів типу DJI Mavic:

Таблиця 2.1

Порівняння параметрів існуючих систем скидання вантажу

Назва	STARTRC 1110461	STARTRC 1109410	BRDRC	STARTRC 1116632	Подвійна V2 Система скидання
Ємність аккумулятора	100 mAh = 400 скидань	100 mAh = 400 скидань	80 mAh	80 mAh = 400 скидань	80 mAh
Вага системи скидання	74 г, (пластик)	56 г, (пластик)	103,5 г (ABS пластик)	30 г (ABS пластик)	86,5 г (ABS пластик)
Вага корисного навантаження	До 400 г вантажу	До 500 г вантажу	До 500 г вантажу	До 100 г	До 500 г вантажу

2.3. Вибір системи скидання вантажів для оптимізації

В ході проведення порівняльного аналізу існуючих систем скидання вантажу для квадрокоптерів, було зроблено наступні висновки:

- 1) Промислові зразки систем скидання вантажу зазвичай не можуть покрити необхідність у них, що виникає в умовах теперішнього часу. Фактори, що впливають на це: велика ринкова ціна за одиницю, малі об'єми виробництва.
- 2) Системи скидання, принцип дії яких полягає в активації шляхом використання пультів дистанційного керування, що є окремими від пульта керування самим БПЛА, не забезпечують максимальних значень дальності використання.

Системи скидання вантажу, виготовлені методом 3D друку, мають наступні переваги:

1. **Настроюваність:** 3D друк дозволяє створювати настроювані деталі з високою точністю і деталізацією. Це дозволяє розробникам налаштовувати систему скидання під конкретні вимоги і потреби, змінювати розміри, форму та дизайн, щоб досягти оптимальної продуктивності та ефективності [21].

2. **Швидкість прототипування:** 3D друк дозволяє швидко виготовляти прототипи системи скидання. Замість довгого і складного процесу виробництва, можна швидко виготовити та перевірити прототипи, вносячи зміни та вдосконалюючи конструкцію на практиці. Це прискорює процес розробки та дозволяє швидше досягти кінцевого рішення [20].

3. **Комплексність та легкість виготовлення:** 3D друк дозволяє виготовляти складні геометричні форми та внутрішні структури, які було б складно або неможливо виготовити іншими способами виробництва. Це дозволяє розробляти більш ефективні та оптимізовані системи скидання з використанням оптимальної маси та матеріалів.

4. **Вибір матеріалів:** 3D друк дозволяє використовувати різні типи матеріалів для виготовлення деталей системи скидання. Від PLA та ABS до нейлону та металевих порошоків, широкий вибір матеріалів дозволяє

підібрати оптимальний матеріал для конкретних вимог, включаючи міцність, гнучкість, вагу та інші характеристики [28].

5. Економічність: 3D друк може бути економічним способом виготовлення деталей системи скидання. Він зменшує витрати на виробництво та логістику, оскільки деталі можна виготовити локально та за потребою. Крім того, можна використовувати відновлювані матеріали та перероблювати несправні або зайві деталі, що додатково знижує витрати та має позитивний вплив на екологію [27].

3D-друк має широке застосування в аерокосмічній промисловості. Airbus використовує технологію 3D-друку для створення пластикових деталей на комерційних випробувальних літаках A310 і A350 XWB. Розробку та виготовлення прототипів деталей за допомогою 3D-друку можна уявити легшими, міцнішими та на 70% меншими витратами часу та на 80% дешевшими порівняно з іншими видами виробництва. Крім цього, Airbus також згадує, як 3D-друк сприяє навколишньому середовищу, оскільки він зменшив до 95% кількість своїх металевих відходів [1].

Окрім перерахованих переваг, варто звернути увагу на принцип дії обраної системи скидання, що полягає у спрацьовуванні світлочутливого елемента, встановленого у системі скидання, на спалах діода на самому . Тобто система скидання та сам БПЛА жодним чином програмно не пов'язані, при цьому немає необхідності використання окремого пульта дистанційного керування самою системою.

Для оптимізації було обрано зразок системи скидання вантажу для квадрокоптера типу DJI Mavic 3, що виготовляється методом 3D друку і має вищезгаданий принцип дії.

Висновок по розділу

Сьогодні існують як спеціалізовані БПЛА, що призначені для скидання вантажів, так і варіанти модифікацій дронів, що не розраховані на

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

перевезення корисного навантаження. Наразі системи скиду для комерційних БПЛА виробляють як на рівні спеціалізованих компаній-виробників (в тому числі й самих БПЛА), так і на рівні домашнього або дрібносерійного виробництва ентузіастами. Такі системи класифікуються за конструкцією, матеріалами та типом вантажів, для перевезення котрих вони розраховані. Найрозповсюдженішими на даний час, є:

- 1) Системи принцип дії яких заснований на спрацюванні світлочутливого елемента від світлодіода, вмонтованого в корпус квадрокоптера, що активується через пульт керування самим БПЛА.
- 2) Системи скидання дистанційного керування безпосередньо через пульт дрона.
- 3) Системи скидання, не пов'язані з БПЛА програмно чи будь-яким іншим чином, та мають власний пульт керування.

Спираючись на власний досвід використання систем скидання для квадрокоптерів, були зроблені висновки щодо основних характеристик систем скидання вантажу:

1) Якнайменша вага

Максимальне зменшення ваги системи скидання, дає змогу квадрокоптеру знаходитись у повітрі якнайдовше, що у свою чергу дозволяє збільшити дальність польоту.

2) Простота конструкції

Дана характеристика забезпечує більшу ремонтпридатність, що є вкрай важливим у польових умовах.

Для проведення оптимізації конституції було обрано систему скидання вантажу під виробництво методом 3D друку, беручи до уваги наступні переваги: широкий вибір матеріалів, економічність, можливість швидкого

створення прототипів, загальну розповсюдженість в Україні на даний момент.

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

3. ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ СКИДАННЯ ВАНТАЖІВ ДЛЯ КВАДРОКОПТЕРА

3.1. Технологія виробництва

Технологія виробництва систем скидання вантажів для квадрокоптерів може варіюватись залежно від конкретного виробника та моделі. Однак, основні принципи цієї технології зазвичай включають наступні елементи:

1. Механізм скидання:

Зазвичай, системи скидання вантажів для квадрокоптерів використовують механічний або електромагнітний механізм, щоб звільнити вантаж з дрона. Цей механізм може бути у вигляді пружинного механізму, який відкриває дверцята або рухається відповідно до команди пілота, або електромагнітного механізму, який контролює магнітне поле, щоб утримувати та випускати вантаж.

2. Управління скиданням:

Квадрокоптери зазвичай мають систему управління, яка дозволяє пілоту відкривати та закривати механізм скидання вантажів. Це може бути здійснено за допомогою пульта дистанційного керування або через програмне забезпечення дрона, яке дозволяє пілоту віддавати команди для скидання вантажу. Також існують системи скидання, принцип дії яких не пов'язаний з пультом керування дроном або ж взагалі принципом дистанційного керування. На таких системах завше встановлюється система замикання що спрацьовує на спалах світлодіода самого квадрокоптера через світлоприймальний елемент.

3. Підвіска та стійкість:

Важливим аспектом технології виробництва систем скидання вантажів для квадрокоптерів є забезпечення підвіски та стійкості дрона під час скидання. Це може включати використання спеціальних стійок або підвісних

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

механізмів, які дозволяють дрону стабільно тримати вантаж та запобігати небажаному руху під час скидання.

4. Вантажний контейнер:

Деякі системи скидання вантажів для квадрокоптерів можуть використовувати спеціальні контейнери для тримання вантажу. Ці контейнери зазвичай мають механізми фіксації, що дозволяють забезпечити безпеку та стійкість вантажу під час польоту.

Системи скидання вантажів для дронів можуть бути виготовлені з різних матеріалів, залежно від конкретного дизайну та вимог щодо функціональності. Ось деякі поширені матеріали, які можуть використовуватись:

1. Метал: Деякі компоненти системи скидання можуть бути виготовлені з металу, такого як алюміній або нержавіюча сталь. Метал є міцним і довговічним матеріалом, який може витримувати великі навантаження та забезпечувати стійкість системи.

2. Пластик: Пластикові компоненти можуть використовуватись для зниження ваги системи та забезпечення ергономічного дизайну. Такі матеріали, як ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол) або нейлон, можуть використовуватись для виробництва корпусних частин або кріплень.

3. Композити: Деякі системи можуть використовувати композитні матеріали, які поєднують міцність металу з легкістю та гнучкістю пластику. Наприклад, вуглепластик може використовуватись для виробництва легких та міцних компонентів системи скидання.

4. Текстиль: У деяких випадках для створення парашутних систем скидання можуть використовуватись текстильні матеріали, такі як нейлон або поліестер. Вони мають достатню міцність та еластичність для ефективного функціонування парашуту.

Вибір матеріалів залежить від різних факторів, таких як маса вантажу, вимоги щодо міцності та функціональності, бюджет та інші фактори, які враховуються при розробці системи скидання вантажу для дронів.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

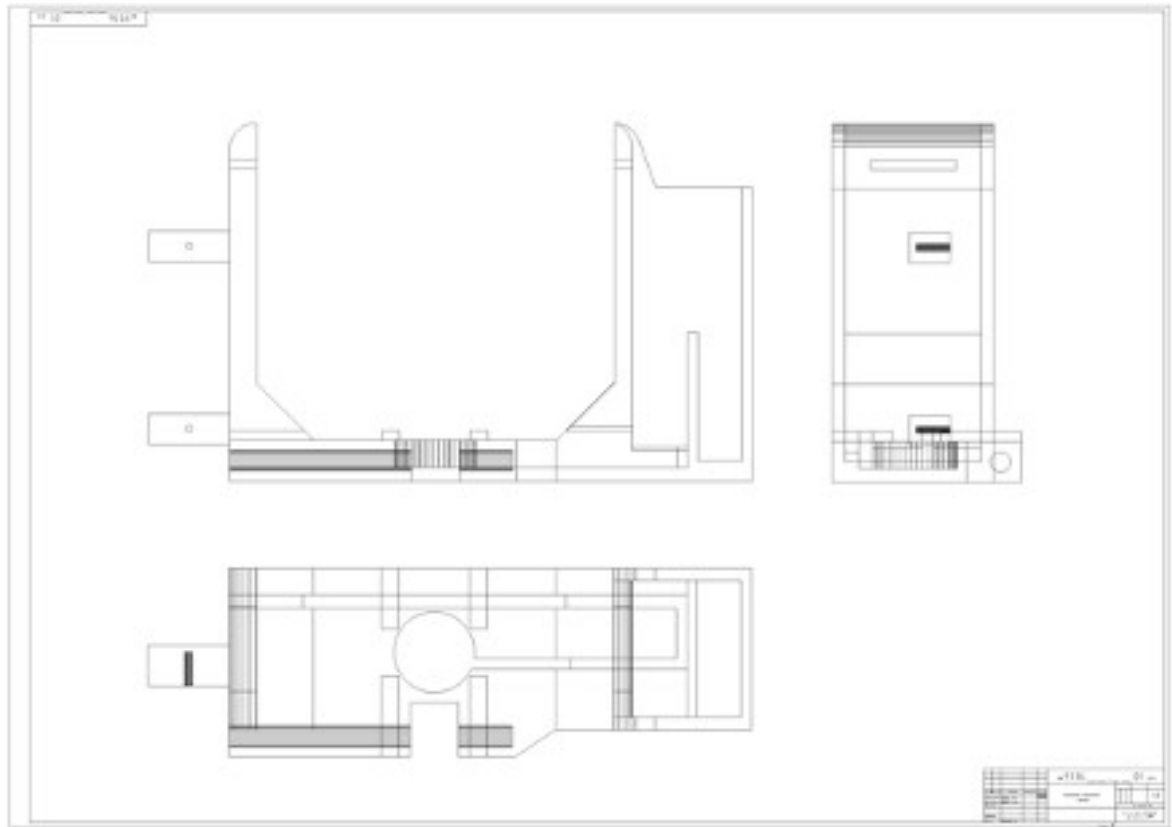


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд системи скидання вантажу

Як ми вже зазначали під час вибору системи скидання вантажів для оптимізації (див. підрозділ 2.3), 3D-друк є однією з форм адитивного виробництва. Об'єкти будуються невеликими шарами, укладаються один на одного. Це може бути досить повільним процесом, але він має багато переваг. Для порівняння, субтрактивний виробничий процес починається з твердого блоку матеріалу і видаляє його частини, поки не з'явиться кінцевий продукт. Деякими прикладами цього є ліплення з мармуру та фрезерування з ЧПУ. 3D-принтери технічно є типом верстатів з ЧПУ [18]

3D-друк існує вже давно. Ще з 1980-х років дизайнери та інженери мали доступ до комерційних 3D-принтерів, однак одразу після своєї появи вони коштували десятки тисяч доларів, а іноді вимагали дорогих контрактів на підтримку та обслуговування. Нещодавній вибух 3D-друку як хобі стався через закінчення терміну дії патенту. Мова йде про патент на фузійне депонування моделей (Fused Deposition Modeling, FDM), який закінчився у

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

2009 році. Цей патент належав компанії Stratasys і описував процес екструзії термопластика для створення тривимірних об'єктів шар за шаром. Закінчення цього патенту дозволило іншим компаніям використовувати цю технологію без необхідності сплачувати ліцензійні внески Stratasys, що призвело до зростання конкуренції та інновацій у галузі 3D друку [22]. Методи 3D-друку будуть продовжувати розвиватись, оскільки в найближчому майбутньому закінчується термін дії ще більшої кількості патентів.

Існує два типи процесу друку: фузійне депонування моделей та стереолітографія. Вони мають свої сильні та слабкі сторони, тому ось основи.

Fused Deposition Modelling, або FDM, є найпростішим і найпопулярнішим методом друку. Друкарський матеріал прошовується через гарячу трубку. Ця трубка розсовується, щоб намалювати необхідну форму, так само, як наклеювання повідомлення на торт. Температура змінюється залежно від матеріалу, однак 200C / 392F є приблизно середнім для споживчих машин, які друкують на пластику. На даний момент це найпопулярніший процес друку. Ціни на відповідні 3D принтери коливаються від 200 до декількох тисяч доларів США. Існує безліч різних виробників і моделей машин FDM. Вони друкують пластик шарами, кожен будується на попередньому, нижньому шарі. Таким чином, друк починається знизу і поступово рухається вгору.

Стереолітографія (SLA) сильно відрізняється від FDM. Процес починається з контейнера зі спеціальним рідким пластиком (відомим як фотополімерна смола). Ультрафіолетовий лазер направляє на верхню частину смоли, змушуючи її засвічену частину застигати. Так само, як і FDM, кожен шар виготовляється послідовно послідовно. Ці машини працюють зверху вниз, витягуючи деталь з рідини. Моделі, вироблені з використанням SLA, надзвичайно гладкі, з неймовірно високою роздільною здатністю. Вони швидше друкуються, ніж моделі FDM, однак вони менш поширені і дорожчі (як самі принтери, так і смола. Для виготовлення корпусу системи скидання вантажів ми використовуватимемо процес FDM.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Так само, як існують сотні різних стилів, розмірів і цін принтера, існують десятки матеріалів для друку. Найбільш розповсюдженими є ABS і PLA. Є й інші матеріали, що набирають популярність (нейлон для високої міцності, і пластики на основі деревини), однак вони не такі прості у використанні.

Полімолочна кислота (PLA) – це біорозкладаний пластик, отриманий з поновлюваних ресурсів, таких як цукрова тростина або кукурудзяний крохмаль. В результаті друк з його допомогою виділяє напівсолодкий запах. Це один з найпростіших матеріалів для друку, що зберігає при цьому високу міцність.

Акрилонітрилбутадієнстирол (ABS) – це матеріал, з якого виготовляють цеглинки Lego. Отриманий з викопного палива, він міцний і мало зношується. Він не біорозкладається, і друк з його допомогою може виділяти сильний запах паленого пластику. Хоча друк може бути складним, він все ще є одним із найпопулярніших варіантів матеріалів. Деталі, надруковані за допомогою ABS, можна досить легко відшліфувати і згладити, тому для виготовлення моделі системи скидання вантажу для квадрокоптера ми будемо використовувати саме ABS пластик.

Сам процес 3D друку складається з кількох етапів:

1. Проектування або отримання готової 3D-моделі.
2. Перетворення 3D-моделі у формат STL.
3. Перетворення моделі STL на G-код.
4. Друк моделі за допомогою G-коду на 3D принтері.
5. Післяобробка.

На першому етапі ми отримали модель системи скидання вантажу для квадрокоптера DJI Mavic 3 з бібліотеки 3D моделей для друку Thingiverse [UltiMaker Thingiverse Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.thingiverse.com/>. Модель відразу доступна в форматі STL, що дозволяє пропустити 2-й етап та одразу почати її слайсинг.

Слайсер – це програмне забезпечення, що перетворює файл STL у набір інструкцій, який називається G-кодом. G-код існує вже дуже давно і використовується на промислових машинах, а також на 3D принтерах. G-код часто є специфічним для конкретної моделі принтера.

Доступно багато різних слайсерів, однак в основному вони мають дуже схожий функціонал, що дозволяє налаштувати параметри друку в залежності від типу та моделі принтера, виду матеріалу, особливостей деталі та потрібної якості та швидкості друку. Основними параметрами, які підтримуються всіма слайсерами є:

Висота шару – визначає, наскільки товстий буде кожен шар. Менше значення призводить до більшої кількості шарів і більш високої якості друку (за рахунок швидкості). Хороший компроміс – 0,15 або 0,2 мм. Дуже якісні відбитки можуть використовувати висоту шару 0,05 мм, але друк буде проходити дуже повільно.

Товщина зовнішньої стінки встановлюється десь від двох до чотирьох товщин шару і може варіюватися відповідно до моделі. Якщо задати менший розмір, заливка може проступити назовні.

Товщина знизу/зверху. 3D-друковані об'єкти рідко бувають на 100% суцільними всередині. Це робиться для економії пластика і збільшення швидкості друку. Верхній і нижній шари суцільні, тому ви можете вказати, наскільки товстими вони повинні бути.

Щільність заповнення виражається у відсотках. Розробники моделей зазвичай вказують цю цифру, так як деякі деталі можуть вимагати більш високої щільності заливки. Значення від 20 до 30 відсотків, як правило, буває достатнім.

Візерунок заливки використовується для формування внутрішньої заливки. Шестикутники або дизайн у вигляді сот досить поширені.

Швидкість друку – дуже важлива настройка. Занадто швидкий друк майже завжди призводить до низької якості. Повільний друк покращить якість (але це не завжди може бути практичним). Швидкість друку 70 мм за

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

секунду буде досить високою. Швидкість 40 мм/с була б досить повільною, але дуже якісною.

Температура друку – це ще одна настройка, яка має великий вплив на якість. На жаль, вона варіюється в залежності від багатьох факторів, в т.ч. точності цифрового датчика температури. Різні матеріали мають різну температуру друку. Якщо температура занадто гаряча, моделі можуть виглядати обгорілими.

Підтримка – це ще одна настройка, яка потрібна для друку нашої моделі, бо в ній наявні звиси під кутом 90°. Для друку таких деталей необхідна опорна конструкція, інакше в них не буде опори і вони не надрукуються. Підтримка не потрібна для простих форм і калібрувальних деталей.

Діаметр нитки. Нитка в основному виробляється в двох діаметрах: 1,75 мм і 3,00 мм, причому 1,75 мм стає все більш поширеним, оскільки вона швидше нагрівається. Принтери зазвичай працюють лише з одним розміром. Неможливо змішувати різні розміри без зміни хотенда та екструдера. Це налаштування дозволяє встановити точний діаметр нитки. Зазвичай вимірюють діаметр нитки в трьох місцях – на початку, в середині і в кінці одного погонного метру і усереднюють результати.

Відсоток витрати використовується для регулювання споживання пластику. Цей параметр має за замовчуванням значення 100 відсотків. Його потрібно збільшити або зменшити, якщо спостерігається недостатня екструзія, або навпаки.

Розмір сопла. Більшість принтерів наразі поставляються з розміром сопла 0,4 мм, але насадки 0,3 мм стають все більш поширеними. Менша насадка підвищує якість друку, але на шкоду швидкості.

Багато слайсерів постачаються з шаблонами за замовчуванням для найбільш розповсюджених 3D принтерів.

Після завершення налаштування в слайсер завантажується STL файл із моделлю. Слайсер генерує G-код. Це набір інструкцій для друку моделі.

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Останнім кроком є власне 3D друк моделі. Для цього потрібно завантажити G-код на принтер і запустити друк. На рис. 3.X показаний готовий корпус і кришка відсіку батареї та електроніки.

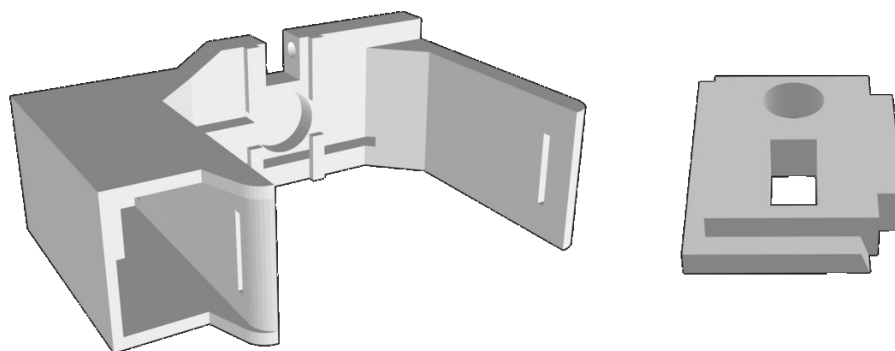


Рисунок 3.2 – Система скидання вантажу виготовлена методом 3D друку

Для подальшої збірки системи скидання вантажу для квадрокоптера необхідні наступні комплектуючі:

- Плата мікроконтролера Arduino Mini Pro – 1 од.
- Сервопривід SG90 9g – 1 од.
- Літій-полімерна батарея 3.7В 150 мАг – 1 од.
- Фоторезистор – 1 од.
- Мікро перемикач – 1 од.
- Світлодіод зелений 3 мм – 1 од.
- Резистор 0.125 Вт 330 Ом – 1 од.
- Електричний дріт
- Сталевий прут діаметром 2 мм, довжиною 50 мм – 1 од.

В плату мікроконтролера за допомогою Arduino IDE та USB2TTL адаптера. Код програми наведено в додатку А.

Далі методом пайки до плати мікроконтролера під'єднуються датчики, індикатори, виконавчі пристрої та елементи живлення. Схема електричних з'єднань наведена в додатку Б. Після цього система перевіряється. Якщо схема зібрана вірно, вона починає працювати одразу після ввімкнення

перемикача живлення. При цьому світлодіод має загорітися, а сервопривід – перейти в положення «замкнуто». Якщо засвітити фоторезистор яскравим світлом, то сервопривід має перейти в положення «відімкнуто».

Після перевірки елементи системи встановлюються в корпус, після чого вона готова до експлуатації.

3.2. Аналіз та оптимізація аеродинамічних характеристик обраної системи скидання вантажів

Дана система не є аеродинамічно досконалою. Виробники зазвичай не намагаються покращити аеродинамічні характеристики систем скидання вантажу, що стає причиною наступних явищ:

- 1) Відсутність обтічної конструкції системи скидання негативно впливає на аеродинамічні характеристики БПЛА, особливо на максимальних швидкостях. При цьому певні впливи, такі як незначна парусність системи скидання, прикріпленої до більш аеродинамічно досконалої конструкції самого коптера, можуть бути зменшені встановленою на БПЛА системою стабілізації.
- 2) Збільшення спротиву набігаючому струменю повітря негативно впливає на максимальний час знаходження БПЛА в повітрі.
- 3) При експлуатації БПЛА із встановленою на нього системою скидання вантажу, енерговитрати акумулятора збільшуються пропорційно до спротиву, що виникає через додатково встановлену систему.

Отже можна стверджувати що вдосконалення систем скидання для квадрокоптерів є доцільним та необхідним.

Аналізуючи конструкцію вищезгаданих зразків можемо зробити наступне заключення: системи скидання вантажу для квадрокоптерів в основному мають квадратичну форму корпусу та гострі грані кріплень, що не забезпечують якнайменші показники спротиву набігаючому повітрю.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

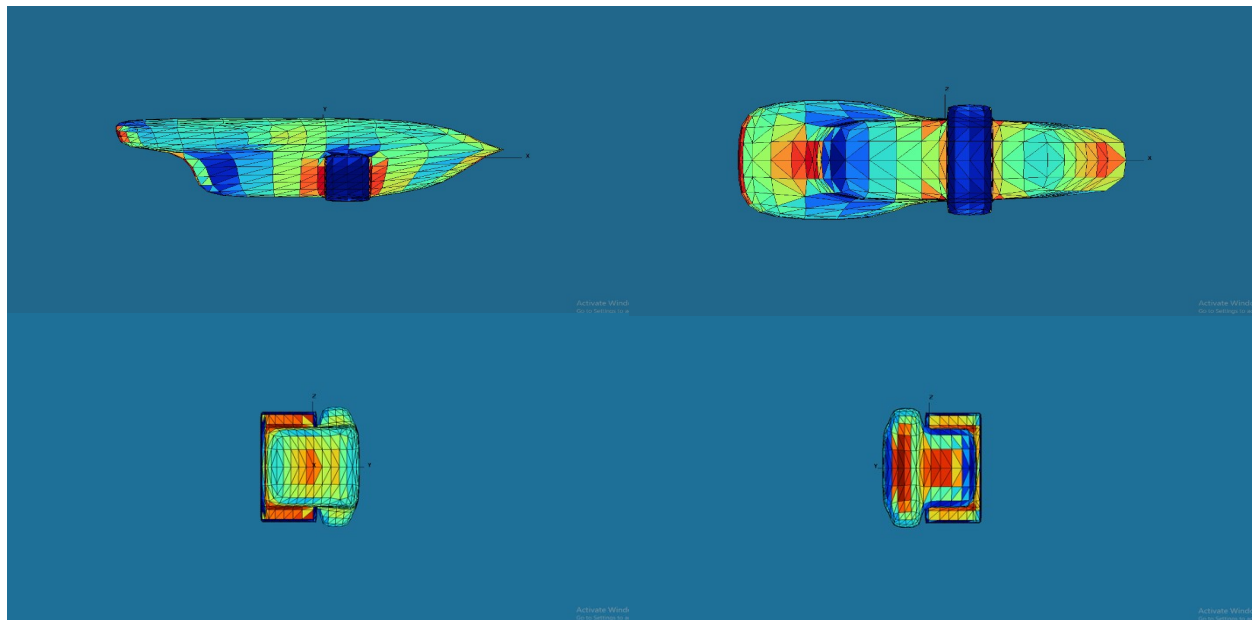


Рисунок 3.3 – Корпус квадрокоптера DJI MAVIC 3 з вихідним зразком системи скидання вантажу

Враховуючи вищезгадане, у комп'ютерному середовищі було модифіковано вихідний зразок системи скидання вантажу, а також проведено випробування на предмет покращення аеродинамічних якостей. Модифікація проводилась шляхом надання гострим граням вихідного зразка заокруглених форм, що мало позитивно вплинути на загальні аеродинамічні якості.

На рис. 3.3 проілюстровано наочний результат аеродинамічних випробувань вихідного зразка. Помаранчевий та червоні кольори на системі скидання демонструють значні значення опору системою скидання вантажу на швидкості 20 м/с.

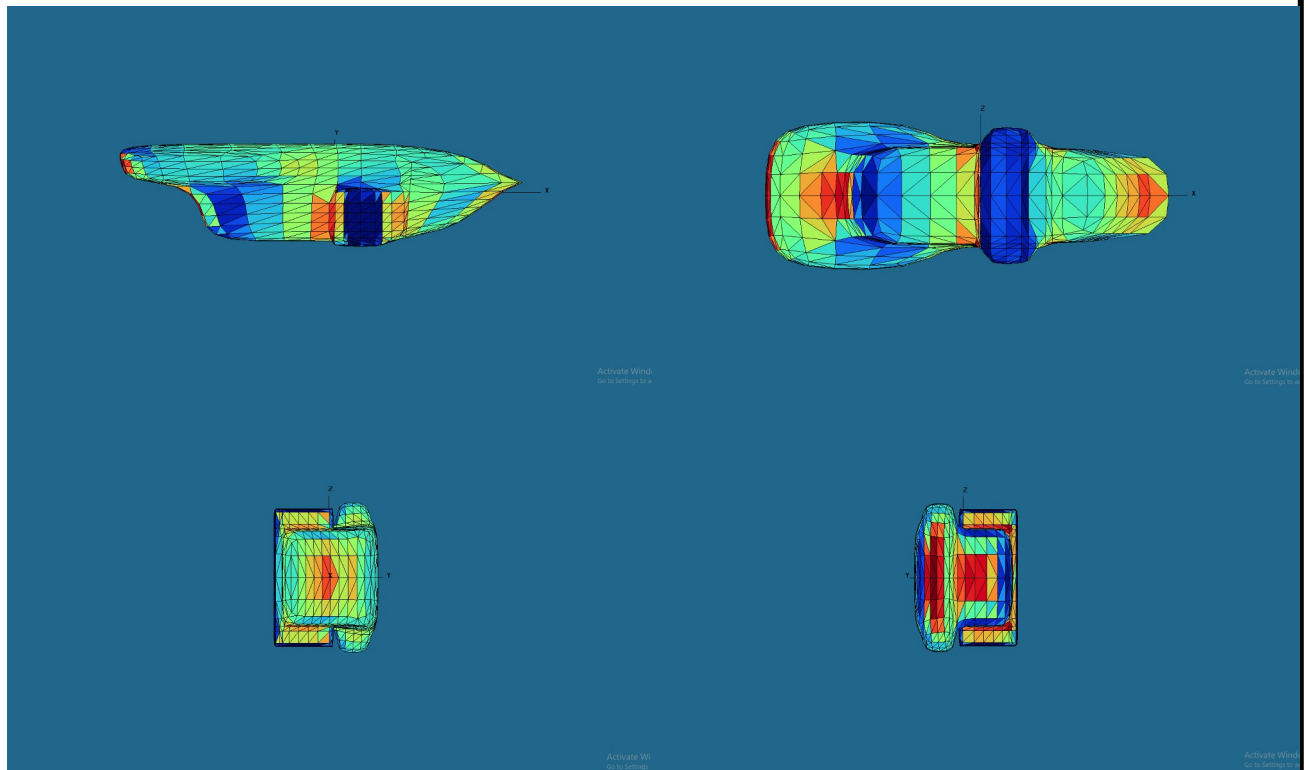


Рисунок 3.4 – Корпус квадрокоптера DJI MAVIC 3 із зразком системи скидання вантажу з покращеними аеродинамічними характеристиками.

На рис. 3.4 проілюстровано наочний результат аеродинамічних випробувань модифікованого зразка. На самій системі переважають жовті кольори, що свідчить про зменшення значень опору на швидкості вже 22 м/с. Візуальні результати аеродинамічних випробувань демонструють наявність позитивного результату.

За допомогою комп'ютерного програмного забезпечення були прораховані значення наступних параметрів:

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Таблиця 3.2

Порівняння результатів комп'ютерного моделювання аеродинамічних якостей вихідного зразка та його модифікації.

	Вихідна модель	Модифікована модель	Δ
Cx (коефіцієнт опору по осі X)	0,35	0,25	0,1
Cy (коефіцієнт опору по осі Y)	0,15	0,12	0,03
Cz (коефіцієнт опору по осі Z)	0,25	0,18	0,07
Швидкість польоту:	20 м/с	22 м/с	2 м/с

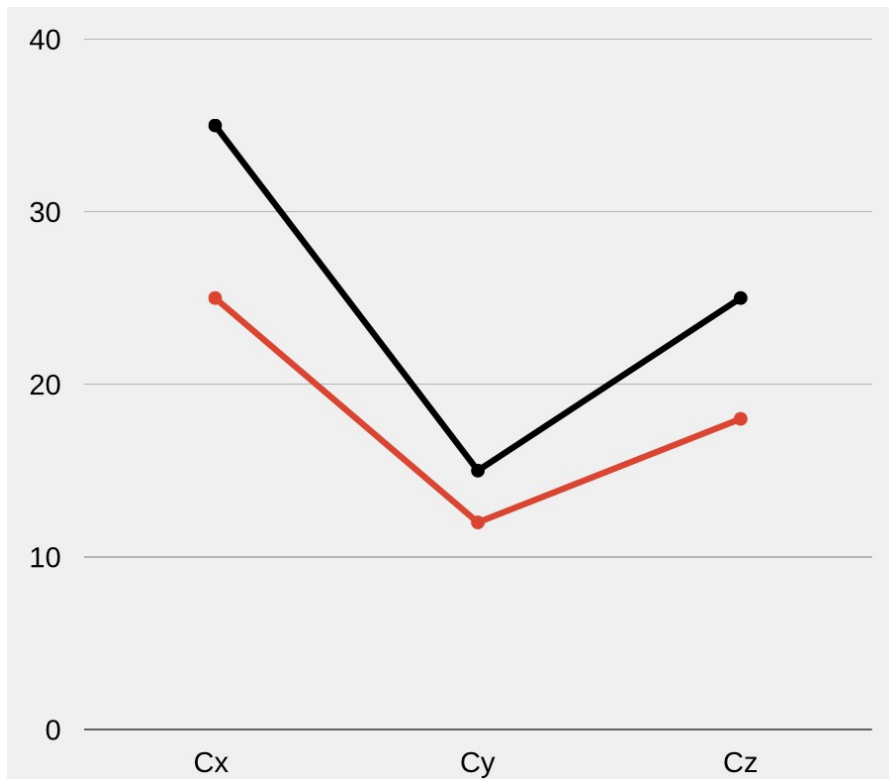


Рисунок 3.5 – Порівняльний графік коефіцієнтів опору Cx, Cy, Cz досліджуваних систем.

Виходячи з результатів порівняння дослідних зразків (рис. 3.5), можна стверджувати наступне:

Недосконала з аеродинамічної точки зору конструкція вихідного зразка, негативно впливає на наступні льотно-технічні характеристики квадрокоптера-носія:

- 1) Максимальний польотний час;
- 2) Енерговитрата, а отже й ресурс акумулятора квадрокоптера;
- 3) Загальна аеродинамічна ефективність зв'язки квадрокоптер-система скидання вантажу;
- 4) Діапазон операційних швидкостей.

3.3. Розрахунок конструкції системи скидання вантажу на міцність

Для розрахунку на міцність системи скидання оберемо за дослідний зразок не модифікований, вихідний варіант системи скидання. У виборі дослідного зразка ми керувались наступним судженням:

Якщо система скидання у найменш аеродинамічно досконалому варіанті здатна витримати навантаження в межах діапазону операційних швидкостей квадрокоптера DJI Mavic 3 – тоді здатність витримувати аналогічні навантаження системою скидання з покращеними аеродинамічними характеристиками є очевидною.

Для розрахунку на міцність була обрана секція системи скидання з найбільшим перерізом, а відповідно з найбільшим коефіцієнтом опору руху.

Вихідні дані розрахунку:

- 1) Лінійні розміри секції: 5 см * 2 см* 4 см, товщина стінок 4 мм.
- 2) Міцність при згинанні ABS пластику: 78 МПа
- 3) Швидкість носія: 20 м/с

За відомим розмірами та характеристиками ABS пластику, ми можемо провести оціночний розрахунок.

За формулою для моменту згину

$$M = F \cdot L / 4,$$

де M - момент згину,

F - сила,

L - довжина плеча, можемо визначити критичну силу, при якій може статися поломка:

$$F = (M \cdot 4) / L.$$

Припустимо, що критичний момент згину буде відповідати міцності при згинанні 78 МПа. Розмір плеча можна вважати половиною ширини секції системи скидання ($2 \text{ см} / 2 = 1 \text{ см} = 0.01 \text{ м}$).

$$F = (78 \text{ МПа} \cdot 4 \cdot (0.01 \text{ м})) / 0.05 \text{ м} = 62.4 \text{ Н}$$

Отримали критичну силу згину 62.4 Н. Тепер можемо порівняти це з діючою силою на секції системи скидання, що виникає від динамічного тиску повітря при швидкості 20 м/с.

Для розрахунку точної сили, що діє на поверхню короба, необхідно врахувати форму та орієнтацію короба щодо напрямку руху. Припустимо, що весь фронтальний бік короба зустрічає повітряний потік. Тоді можна застосувати формулу динамічного тиску повітря:

$$F = 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A,$$

де F - сила,

ρ - щільність повітря,

v - швидкість повітря,

A - площа поверхні короба, що зустрічає потік.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Щільність повітря прийmemo приблизно 1.225 кг/м^3 , а площа секції системи скидання, що зустрічає потік, дорівнює $2 \cdot (2 \text{ см} \cdot 4 \text{ см}) + 2 \cdot (2 \text{ см} \cdot 5 \text{ см}) = 48 \text{ см}^2 = 0.0048 \text{ м}^2$.

$$F = 0.5 \cdot 1.225 \text{ кг/м}^3 \cdot (20 \text{ м/с})^2 \cdot 0.0048 \text{ м}^2 \approx 2.94 \text{ Н}$$

Отримали діючу силу від динамічного тиску повітря, яка становить приблизно 2.94 Н.

Отже, критична сила згину складає 62.4 Н, а діюча сила від динамічного тиску повітря становить 2.94 Н. Таким чином, зазначена секція системи скидання повинна витримати навантаження при заданій швидкості 20 м/с.

При цьому варто розрахувати швидкість, при якій відбудеться деформація обраної секції системи скидання.

Щоб визначити швидкість, при якій секція системи скидання піддається деформації, можна використовувати межу міцності при розтягуванні ABS пластику, яка становить 46 МПа.

За формулою для напруження

$$\sigma = F / A,$$

де σ - напруження,

F - сила,

A - площа поперечного перерізу, можемо визначити критичну силу, яка призведе до деформації:

$$F = \sigma \cdot A$$

Для розрахунку точної сили, що спричиняє деформацію, необхідно врахувати площу поперечного перерізу секції, яка в даному випадку дорівнює $(2 \text{ см} \cdot 4 \text{ см}) = 8 \text{ см}^2 = 0.0008 \text{ м}^2$.

$$F = 46 \text{ МПа} \cdot 0.0008 \text{ м}^2 = 36.8 \text{ Н}$$

Отримали критичну силу розтягу, яка дорівнює 36.8 Н. Тепер можемо використати цю силу, щоб знайти відповідну швидкість, при якій секція системи скидання піддається деформації.

Враховуючи, що сила виникає від динамічного тиску повітря і може бути апроксимована як $F = 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A$, ми можемо вирішити рівняння для швидкості:

$$0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A = 36.8 \text{ Н};$$

$$0.5 \cdot 1.225 \text{ кг/м}^3 \cdot v^2 \cdot 0.0008 \text{ м}^2 = 36.8 \text{ Н};$$

$$v^2 \approx (36.8 \text{ Н}) / (0.5 \cdot 1.225 \text{ кг/м}^3 \cdot 0.0008 \text{ м}^2);$$

$$v^2 \approx 47\,346.94;$$

$$v \approx \sqrt{47\,346.94} \approx 217.6 \text{ м/с}.$$

Отже, приблизно при швидкості 217.6 м/с або більше, секція системи скидання з ABS пластику може піддатися деформації.

Висновок по розділу

Було проведено аеродинамічні випробування вихідного зразка системи скидання вантажу та його модифікованого варіанту. Модифікація

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

проводилась шляхом надання системі більш досконалої аеродинамічної форми, що передбачало заокруглення гострих кутів, що мало зменшити коефіцієнти опору руху. За допомогою спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення були виміряні аеродинамічні параметри, зокрема коефіцієнти опору руху. Ці дані дозволили порівняти ефективність обох зразків та підтвердити, що модифікований зразок має кращі аеродинамічні характеристики.

Далі було здійснено розрахунок на міцність системи скидання вантажу. Використовуючи відповідні інженерні формули та характеристики матеріалу (ABS пластик, як найрозповсюдженіший варіант матеріалу для 3Д друку), була оцінена здатність конструкції витримувати навантаження та запобігати деформаціям та поломкам. Результати розрахунків підтвердили достатню міцність та надійність системи скидання вантажу з великим міцністним запасом. Згідно з результатами розрахунків, для початку деформації системи, їй щ носієм необхідно розвинути швидкість більш ніж у 10 разів більшу за максимальну польотну швидкість DJI Mavic 3.

Таким чином, на основі проведених аеродинамічних випробувань та розрахунків на міцність можна обґрунтувати вибір модифікованого зразка системи скидання вантажу. Цей зразок демонструє покращені аеродинамічні характеристики, що може позитивно вплинути на ефективність доставки вантажу та безпосередньо на льотно-технічні характеристики самого носія. Крім того, виготовлення системи скидання на 3D-принтері сприяє швидкому прототипуванню та модифікації конструкції з урахуванням специфічних потреб та вимог проекту.

ВИСНОВОК

У рамках даної дипломної роботи було проведено комплексне дослідження та оптимізацію конструкції системи скидання вантажу для квадрокоптера. Для досягнення цілей були виконані кроки, які включали вивчення аналогів та існуючих виконань систем скидання, вивчення технології виробництва, проведення аеродинамічних випробувань вихідного зразка та його модифікації, а також розрахунок на міцність.

У першому етапі було проведено детальний аналіз аналогів та існуючих виконань систем скидання вантажу. Це включало огляд літературних джерел, та ринкових продуктів. В результаті вивчення було отримано інформацію про різні підходи до конструкції систем скидання вантажу, їх переваги та недоліки та обрано дослідний зразок системи для подальшої оптимізації.

Далі було проведено детальне вивчення технології виробництва систем скидання вантажу. В результаті дослідження було отримано уявлення про оптимальні методи виробництва, та матеріали які забезпечують якість, міцність та ефективність системи скидання вантажу.

Після цього були проведені аеродинамічні випробування вихідного зразка системи скидання вантажу та модифікованого варіанту. За допомогою спеціалізованого обладнання та програмного забезпечення було виміряно значення аеродинамічних параметрів, основними з яких були обрано коефіцієнти опору руху. Ці дані дозволили порівняти ефективність порівнюваних зразків та наочно підтвердити факт забезпечення модифікованим зразком найкращих аеродинамічних характеристик.

Останнім кроком був розрахунок на міцність системи скидання вантажу. З використанням відповідних інженерних формул і характеристик матеріалу, була оцінена здатність конструкції витримувати навантаження та уникати деформацій чи поломок. Результати розрахунків дозволили підтвердити достатню міцність та надійність системи скидання вантажу.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Отже, на основі проведеного вивчення аналогів, вивчення технології виробництва, аеродинамічних досліджень вихідного та модифікованого зразків, а також розрахунку на міцність можна зробити висновок, що модифікована конструкція системи скидання вантажу для квадрокоптера є оптимальною, а модифікація існуючих не досконалих аеродинамічно систем скидання вантажу є доцільною. Система демонструє покращені аеродинамічні характеристики та забезпечує достатню міцність для ефективного та безпечного скидання вантажу. Результати даної роботи мають практичне значення для подальшого вдосконалення та розвитку систем скидання вантажу для квадрокоптерів, а також можуть бути використані у процесі проектування подібних систем у майбутньому.

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- 1 A Beginner's Guide to 3D Printing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.raise3d.com/academy/a-beginners-guide-to-3d-printing/>
- 2 Amazon Prime Air. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>
- 3 Aurambout, J.J., Gkoumas, K., Ciuffo, B. Last mile delivery by drones: An estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. Eur. Transp. Res. Rev. 2019, 11, 1-21.
- 4 Christopher Burke, Hung Nguyen, Mary Magilligan, Rafiqul Noorani, Study of A Drone's Payload Delivery Capabilities Utilizing Rotational Movement [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8644318>
- 5 De Miguel Molina, B.; Seggara Oña, M. The drone sector in Europe. In Ethics and Civil Drones; de Miguel Molina, M., Santamarina Campos, V., Eds.; SpringerBriefs in Law; Springer: Cham, Switzerland, 2018; pp. 7–33
- 6 Demuyakor, J. The impact of Zipline Drone Technology on Digital Emergency Health Delivery in Ghana. Shanlax Int. J. Arts Sci. Humanit. 2020, 8, 242–253 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://shanlaxjournals.in/journals/index.php/sijash/article/view/3301/2798>
- 7 Dorling, K.; Heinrichs, J.; Geoffrey, G.M.; Magierowski, S. Vehicle routing Problems for Drone Delivery. arXiv 2016 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://arxiv.org/pdf/1608.02305>
- 8 Eric Mack, "How Delivery Drones Can Help Save The World", Forbes Magazine, 13 Feb 2018, [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.forbes.com/sites/ericmack/2018/02/13/delivery-drones-amazon-energy-efficient-reduce-climate-change-pollution/>
- 9 Farine, M. Du Café Livré Par Drone à Zurich. Le Temps. [Електронний

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

- ресурс] – Режим доступа: <https://www.letemps.ch/economie/cafe-livre-drone-zurich>
- 10 Flirtey. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.flirtey.com/about/>
 - 11 Giones, F.; Brem, A. From toys to tools: The co-evolution of technological and entrepreneurial developments in the drone industry. *Bus. Horiz.* 2017, 60, 875–884
 - 12 Heutger, M.; Kückelhaus, M. Unmanned aerial vehicle in logistics a DHL perspective on implications and use cases for the logistics industry. In *DHL Customer Solutions & Innovation; DHL Customer Solutions & Innovation: Bonn, Germany, 2014*
 - 13 Hii, M.S.Y.; Courtney, P.; Royall, P.G. An Evaluation of the Delivery of Medicines Using Drones. *Drones* 2020, 3, 52. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/3/52/pdf>
 - 14 Kua Payload Drop System For Multirotors [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.yangdaonline.com/kua-payload-drop-system-for-multirotors>
 - 15 L. Liu, Z. You, Drone transports medical supplies to Puerto Rico based on shortest path, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Institute of Physics Publishing, 2020.*
 - 16 Richard A. Franks. *The Junkers Ju 87 Stuka: A Complete Guide to the Luftwaffe’s Famous Dive-Bomber.* – Valiant Wings Publishing, 2020, 240 p.
 - 17 Stewart, J. Google Tests Drone Deliveries in Project Wing Trials. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.bbc.com/news/technology-28964260>
 - 18 *Ultimate Guide for Beginners in 3D Printing* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.makeuseof.com/tag/beginners-guide-3d-printing/>.
 - 19 Zhang, H.; Wei, S.; Yu, W.; Blasch, E.; Chen, G.; Shen, D.; Pham, K.

- Scheduling methods for unmanned aerial vehicle based delivery systems. In Proceedings of the IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC), Colorado Springs, CO, USA, 5–9 October 2014
- 20 Адитивне виробництво: технологія, матеріали та переваги 3D-друку. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://3dprint.infomir.eu/uk/aditivne-virobnicztvo>
- 21 Адитивні технології виробництва (3D-друк) Лекція 1. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/158653/mod_resource/content/0/add_tech_lec1.pdf
- 22 Адитивні технології: Перспективи і проблеми 3D-друку. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://nti.ukrintei.ua/wp-content/uploads/2018/05/2017-2_stat4_UA_povn.pdf
- 23 Бабичев А.К. Исторический очерк развития бомбардировочных прицелов. т.1, АН СССР, 1948, 280 с.]
- 24 Збірник наукових праць ВІТІ № 1, 2017. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.viti.edu.ua/files/rom/2017/2_2017.pdf
- 25 Кошеленко В.Є. Що таке БПЛА? Їх переваги та недоліки. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.rbc.ua/ukr/styler/shcho-take-bpla-ih-perevagi-nedoliki-16112017080000.html>
- 26 Мультикоптер вертикально запустить безпілотники літакового типу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nauka.ua/news/multikopter-vertikalno-zapustit-bezpilotniki-litakovogo-tipu>
- 27 Переваги і недоліки. Як 3D друк впливає на бізнес та наше життя. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://fialan.ua/ua/news/vagno-znat/3d-druck-ta-biznes/>].
- 28 Переваги та недоліки 3D-друку. [Електронний ресурс] – Режим

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

доступу: <https://3d4u.com.ua/uk/blog/post/101-preimusshestva-i-nedostatki-3d-pechati>

- 29 Перший ударний безпілотний вертоліт українського виробництва: яким буде і що зможе [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3259168-persij-udarnij-bezpilotnij-vertolit-ukrainskogo-virobnictva-akim-bude-i-so-zmoze.html>

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

ДОДАТКИ

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Лістинг програмного коду для плати мікроконтролера Arduino Pro Mini

```

/*****
* TITLE: DJI Mavic Air 2 Drop System
* Overview: The code allows you to operate a drone drop system using a
* DJI Mavic Air 2 controller and the built in LED at the bottom of the drone.
* Once you turn the unit on with the switch it will turn on the LED to show
* that the system is powered on. The Servo Motor will move to the open
* position (for 10 seconds) allowing you to add your package / string or ring
* and the LED will be on during this time.
* After 10 seconds the Servo Motor will move to the closed position and the
* LED will blink every 2 seconds. The loop will now start running.
*
* By default if there is enough light, the light sensor will activate the
* servo motor to turn to its open position.
* Once the light falls below the set value the Light Sensor will activate the
* servo motor to turn back to its closed position.
*
* By Jacques
* YouTube Video: https://youtu.be/ji68btj\_XhQ
* Thingiverse: https://www.thingiverse.com/thing:4852313
*****/
/*****
* Board Settings:
* Board: "Arduino Pro Mini"
* Processor: "ATMEGA328P 3.3V 8MHz"
* COM Port: "FT232RL FTDI Mini USB to TTL Serial Converter Adapter Module
3.3V"
*****/
#include <Servo.h>

Servo myservo;
int val;
int led = 12; // Pin the LED is connected to

void setup() {
  myservo.attach(9); // Pin used to communicate to the servo motor
  pinMode(led, OUTPUT); // Declare the LED as an output
  myservo.write(0); // Moving the servo to the open position
  digitalWrite(led, HIGH); // Turns on the LED
  delay(10000); // Adding 10s delay to load package
}

void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH); // Blinks LED delay(500);
  digitalWrite(led, LOW); // Blinks LED delay(500);
  val = analogRead(3); // Pin used for Light Sensor (LDR)
  Serial.println(val);

  if (val > 850) { // if above this value set servo shaft to 90 degrees
    myservo.write(0); // angle when light is off (closed position)
  } else { // if less then move back to 0 degrees
    myservo.write(90); // angle when light is on (open position)
  }
}

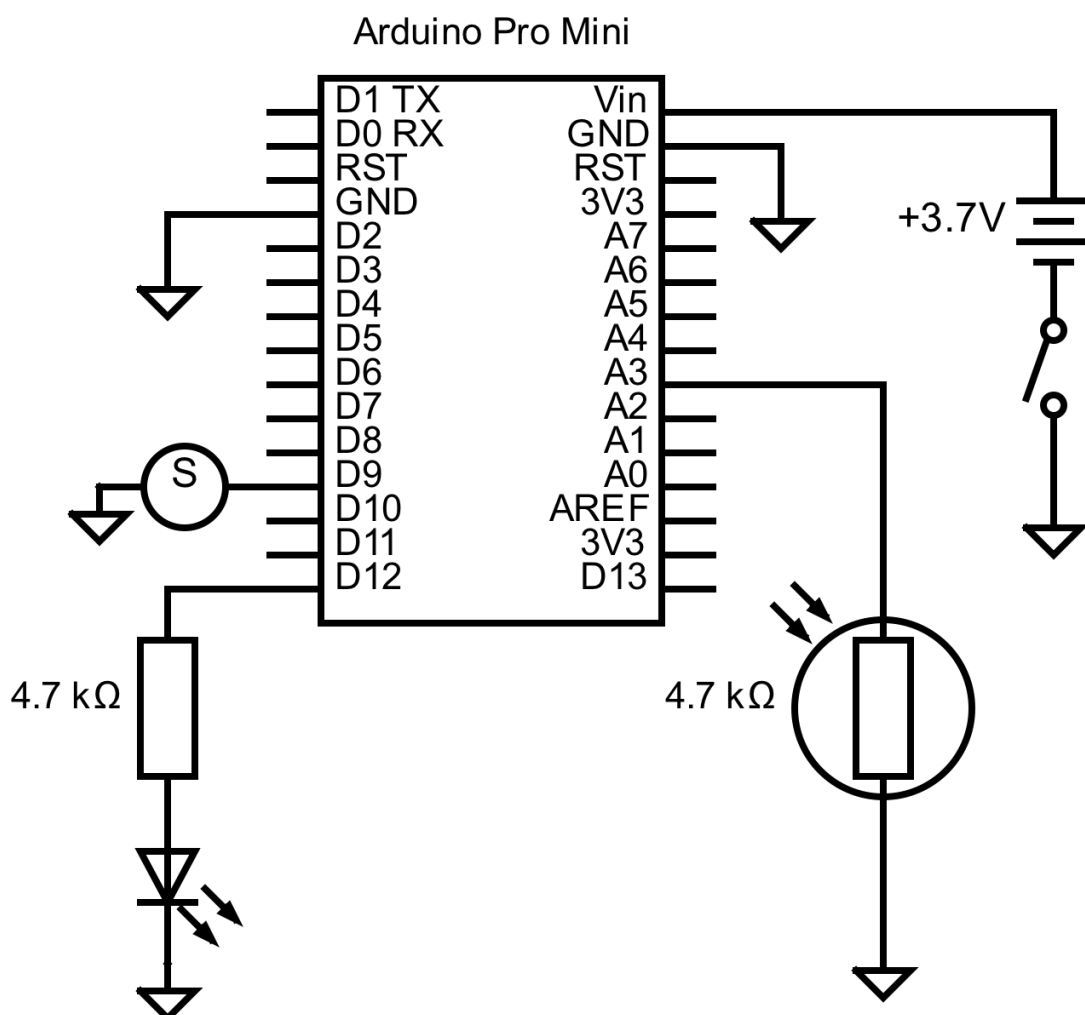
```

					АЛ91.____.____.14.004 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```
delay(2000); // adding a pause between opening and closing  
}
```

					АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		70

Схема електричних з'єднань між елементами системи



Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата

АЛ91. __. __. 14.004 ПЗ