

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут аерокосмічних технологій

Кафедра авіа- та ракетобудування

«На правах рукопису»
УДК 623.746-519

До захисту допущено:
В. о. завідувача кафедри
_____ Петро ЛУК'ЯНОВ
«__» _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Літаки і вертольоти»

зі спеціальності 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»

**на тему: «Вибір параметрів планеру безпілотної повітряної судна із
врахуванням масштабування»**

Виконала:

студентка II курсу другого (магістерського) рівня, групи АЛ-21мп
Астахова Ольга Олегівна _____

Керівник:

Професор, д.т.н., професор кафедри АРБ
Сухов Віталій Вікторович _____

Рецензент:

Професор, д.т.н., професор кафедри СКЛА
Збруцький Олександр Васильович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студентка _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут аерокосмічних технологій
Кафедра авіа- та ракетобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка»

Освітньо-професійна програма «Літаки і вертольоти»

ЗАТВЕРДЖУЮ
В. о. завідувача кафедри
_____ Петро ЛУК'ЯНОВ
«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студентці

Астаховій Ользі Олегівні

1. Тема дисертації: «Вибір параметрів планеру безпілотного повітряного судна із врахуванням масштабування», науковий керівник дисертації професор кафедри Сухов Віталій Вікторович, д.т.н., проф., затверджені наказом по університету від «03» листопада 2023 р. №5134-с.
2. Термін подання студенткою дисертації 26 грудня 2023 р.
3. Об'єкт дослідження: Безпілотне повітряне судно схеми «літаюче крило»
4. Вихідні дані: розмах крила – 2,1 м,

■

площа крила – 0,8 _____ ,
довжина фюзеляжу – 0,8 м,
висота польоту – 200 м,
маса корисного навантаження – 1,5 кг,
максимальна злітна маса – 3 кг,
швидкість польоту – 70 км/год,
матеріал планеру – композиційний.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 5.1. Огляд літератури з розробки БПС. Класифікація БПС, напрямки їх використання.
 - 5.2. Обґрунтування вибору аеродинамічної схеми.
 - 5.3. Методика розрахунку динамічно-подібних моделей БПС.
 - 5.4. Розробка розрахункової моделі БПС схеми «літаюче крило».
 - 5.5. Розрахунок аеродинамічних характеристик подібних БПС. Аналіз та порівняння отриманих результатів.
 - 5.6. Розробка технологічного процесу виготовлення планеру БПС.
 - 5.7. Стартап-проект.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

6.1. Огляд літератури. Класифікація БПС, напрямки їх використання

6.2. Конструктивно-технологічний аналіз сучасних БПС.

6.3. Просторові моделі подібних БПС.

6.4. Аеродинамічні характеристики подібних БПС та їх порівняння.

6.5. Технологія виробництва БПС.

6.6. Експериментальна модель БПС.

7. Орієнтовний перелік публікацій

7.1. Стаття у фаховому виданні.

7.2. Доповідь на науково-технічній конференції з публікацією тез.

8. Дата видачі завдання 08.11.2022 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд літератури з розробки БПС. Класифікація БПС, напрямки їх використання. Обґрунтування вибору аеродинамічної схеми.	до 22.12.2022 р.	
2.	Методика розрахунку динамічно подібних моделей БПС.	до 15.02.2023 р.	
3.	Розробка розрахункової моделі БПС схеми «літаюче крило».	до 01.03.2023 р.	
4.	Розрахунок аеродинамічних характеристик подібних БПС. Аналіз та порівняння отриманих результатів.	до 10.06.2023 р.	
5.	Розробка технологічного процесу виготовлення планеру БПС.	до 20.08.2023 р.	
6.	Експериментальна модель БПС.	до 05.12.2023 р.	
7.	Стартап-проект	до 05.12.2023 р.	
8.	Оформлення пояснювальної записки, ілюстративного та графічного матеріалу. Попередній захист	до 26.12.2023 р.	
9.	Доопрацювання матеріалів дисертації. Перевірка на плагіат	до 10.01.2024 р.	

Студент

Ольга АСТАХОВА

Науковий керівник

Віталій СУХОВ

Реферат

Магістерська дисертація: "Вибір параметрів планеру безпілотного повітряного судна із врахуванням масштабування", 97 сторінок, 63 рисунка, 33 таблиці, 38 посилань.

Актуальність: Відомо, що вибір аеродинамічної схеми літального апарату істотно впливає на його аеродинамічні, вагові, міцносні характеристики, на ефективність застосування, помітність при польоті та вартість виготовлення. Водночас, актуальним лишається визначення впливу тактико-технічних потреб на геометричні параметри безпілотного повітряного судна в межах одного виду аеродинамічної компоновки. Основною ідеєю роботи є використання можливостей динамічно подібних моделей при проектних роботах зі створення нового покоління безпілотних повітряних суден (БПС). Завдяки дослідженню запропонованої теми дисертації можна досягти більшої універсальності застосування в межах одного класу БПЛА та зменшити час проектування.

Мета роботи: визначення аеродинамічних характеристик безпілотного повітряного судна з урахуванням впливу масштабування.

Об'єкт дослідження: Безпілотне повітряне судно схеми «літаюче крило».

Предмет дослідження: Аеродинамічні характеристики БПС схеми «літаюче крило» при його геометричному масштабуванні.

Методи дослідження: Розрахункове визначення за допомогою методу обчислювальної гідрогазодинаміки; визначення аеродинамічних характеристик безпілотного повітряного судна схеми «літаюче крило» в діапазоні польотних кутів атаки, що відповідають безвідривному обтіканню

поверхні планера; проектування та виготовлення експериментальної моделі безпілотного повітряного судна для проведення льотних випробувань.

Наукова новизна одержаних результатів: Досліджено вплив масштабування на аеродинамічні характеристики трьох геометрично подібних моделей. Виявлені під час дослідження закономірності дозволяють сформулювати ефективний аеродинамічний образ майбутніх БПС та оптимізувати процес проектування.

Практичне значення одержаних результатів: Запропонований підхід сприяє зменшенню часу, необхідного для розробки та дослідження нових БПС, завдяки ефективному підбору геометричних параметрів відповідно до необхідних тактико-технічних характеристик.

Апробація результатів дисертації: IV науково-практична конференція студентів та молодих вчених "Авіа-ракетобудування: Перспективи та напрямки розвитку", XV міжнародна конференція студентів та молодих вчених "Intelligence. Integration. Reliability".

Ключові слова: безпілотне повітряне судно, літаюче крило, масштабування, геометрично подібні моделі, аеродинамічні характеристики, композиційні матеріали, вакуумне формування.

Abstract

Master's thesis: "Selection of the glider's parameters of the UAV in view of scaling", 97 pages, 63 figures, 33 tables, 38 references.

Relevance:It is known that the choice of the aerodynamic scheme of an aircraft significantly affects its aerodynamic, weight, strength characteristics, application efficiency, visibility during the flight and manufacturing cost. At the same time, it remains relevant to determine the impact of tactical and technical needs on the geometric parameters of an unmanned aircraft within the limits of one type of aerodynamic layout. The main idea of the work is to use the capabilities of dynamically similar models during the design work on the creation of a new generation of unmanned aerial vehicles (UAVs). Due the proposed topic of the thesis, it is possible to achieve greater versatility of application within one class of UAVs and to reduce the design time.

Purpose of the study:To determine the aerodynamic characteristics of an unmanned aircraft taking into account the influence of scaling.

The object of study:UAV of the "flying wing" aerodynamic scheme.

Subject of research: Aerodynamic characteristics of the "flying wing" unmanned aerial vehicle in view of geometric scaling.

Methods of research:Calculation determination using the method of computational fluid dynamics; determining the aerodynamic characteristics of an unmanned aircraft of the "flying wing" scheme in the range of flight angles of attack corresponding to continuous flow around the surface of the airframe; design and manufacture of an experimental model of an unmanned aircraft for flight tests.

The results and their novelty:The effect of scaling on the aerodynamic characteristics of three geometrically similar models was investigated. The patterns

revealed during the research allow to form an effective aerodynamic image of future UAVs and optimize the design process.

Recommendations for the use of work: The proposed approach helps to reduce the time required for the development and research of the new air defense systems, due to the effective selection of geometric parameters in accordance with the necessary tactical and technical characteristics.

Approbation of the results of the dissertation: IV Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists "Aerospace engineering: "Prospects and Areas of Development", XV International Conference of Students and Young Scientists "Intelligence. Integration. Reliability".

Keywords: unmanned aerial vehicle, flying wing, scaling, geometric similar models, aerodynamic characteristics, composite materials, vacuum forming.

Зміст

Перелік умовних позначень	10
Вступ. Актуальність теми та її практичне значення	11
РОЗДІЛ 1 Сучасні тенденції у виробництві БПС	13
1.1 Класифікація безпілотних повітряних суден.....	16
1.2 Обґрунтування вибору аеродинамічної схеми. Огляд моделей аналогів. Вибір прототипу	20
1.3 Огляд літератури з розробки БПС	24
Висновки по розділу.....	27
РОЗДІЛ 2 Методика розрахунку динамічно подібних моделей БПС...28	
Висновки по розділу.....	33
РОЗДІЛ 3 Розробка розрахункової моделі БПС схеми «літаюче крило»	35
Висновки по розділу.....	40
РОЗДІЛ 4 Розрахунок аеродинамічних характеристик подібних БПС	41
4.1 Розрахунок геометрично подібних БПС на швидкості 70 км/год	42
4.2 Розрахунок геометрично подібних БПС на швидкості 100 км/год ...	45
4.3 Розрахунок геометрично подібних БПС на швидкості 120 км/год ...	52
4.4 Аналіз та порівняння отриманих результатів	55
Висновки по розділу.....	56

АЛ-2102мп.16.00.00.00 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата
		Розроб. Астахова О. О.		
		Перевір. Сухов В. В.		
		Т. контр.		
		Н. контр. Поваров С.А.		
		Затв. Лук'янов П. В.		
Вибір параметрів планеру безпілотного повітряного судна із врахуванням масштабування				
		Літ.	Аркуш	Аркущів
			7	97
КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АРБер. АЛ-21мп				

РОЗДІЛ 5 Розробка технологічного процесу виготовлення планеру	
БПС	57
5.1 Виготовлення елементів БПС.....	58
5.1.1 Попередня підготовка матриці	58
5.1.2 Розкрий армуючого матеріалу та матеріалів вакуумного формування.....	59
5.1.3 Підготовка зв'язуючої суміші та викладка нижнього шару пакету	60
5.1.4 Вакуумування та полімеризація	62
5.1.5 Формування верхнього шару пакету	65
5.2 Збірка елементів планеру.....	67
Висновки по розділу.....	70
РОЗДІЛ 6 Експериментальна модель БПС.....	71
Висновки по розділу.....	76
РОЗДІЛ 7 Стартап-проект.....	77
7.1 Опис ідеї проекту.....	77
7.2 Технологічний аудит проекту	79
7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	79
7.4 Розробка ринкової стратегії проекту	87
7.5 Розробка маркетингової програми стартап-проекту.....	89
Висновки по розділу.....	92
ВИСНОВКИ	93
Список використаних джерел.....	96

Перелік умовних позначень

БАК – безпілотний авіаційний комплекс

БПС – безпілотне повітряне судно

ПКМ – полімерні композиційні матеріали

КМ – композиційні матеріали

ЛА – літальний апарат

ТТХ – тактико-технічні характеристики

САПР – система автоматизованого проектування

CALS - Continuous Acquisition and Life cycle Support

CFD – Computational Fluid Dynamics

Вступ. Актуальність теми та її практичне значення

Сучасні безпілотні системи є одним з найперспективніших напрямків розвитку техніки: створюються конструкції з композиційних матеріалів, впроваджуються адитивні технології, розробляються безпілотні повітряні судна (БПС) з великою дальністю та тривалістю польоту, нові системи керування тощо. Однак для розробки нового покоління БПС необхідне вдосконалення якості інформаційних та експериментальних досліджень аеродинамічних характеристик.

Динамічно подібні моделі грають важливу роль при проектуванні нових БПС і є за своїми геометричними конфігураціями та масово-жорсткісними характеристиками подібними моделями до натурних літальних апаратів. У зв'язку з тим, що БПС за своєю конструкцією та умовами експлуатації подібні літакам, доцільно здійснювати експериментальні та розрахункові дослідження за алгоритмом визначення аеродинамічних характеристик подібних натурних літаків. В роботі обрано базову модель БПС та збільшено її геометричні розміри методом масштабування для розрахункових та експериментальних досліджень.

Актуальність роботи: Дослідження зміни аеродинамічних характеристик БПС при масштабуванні його геометричних параметрів дозволяє досягнути більшої універсальності застосування в межах одного класу та зменшує час проектування при конкретній постановці тактико-технічних характеристик.

Мета роботи: визначення впливу геометричного масштабування на зміну аеродинамічних характеристики подібних БПС.

Задачі дослідження:

1. Розробити просторову модель БПС аеродинамічної схеми «літаюче крило» для подальшого масштабування в два та в три рази.

2. За допомогою методу обчислювальної гідрогазодинаміки визначити коефіцієнти підйомної сили та лобового опору трьох геометрично подібних моделей.

3. На основі здійснених розрахунків розробити технологічний процес і виготовити експериментальну модель БПС для подальшого проведення льотних випробувань.

4. Виконати маркетинговий аналіз стартап-проекту.

Об'єкт дослідження: БПС схеми «літаюче крило».

Предмет дослідження: Аеродинамічні характеристики подібних БПС схеми «літаюче крило».

Наукова новизна: Досліджено вплив масштабування на аеродинамічні характеристики трьох геометрично подібних моделей.

Практичне значення отриманих результатів: Розглянутий підхід дозволяє оптимізувати час на розробку і дослідження нових БПС при підборі геометричних параметрів згідно з необхідними тактико-технічними параметрами.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ У ВИРОБНИЦТВІ БПС

Сьогодні БПСвідіграють все більш визначну роль як в цивільній, так і у військовій галузях. Різноманітні за схемою, призначенням та габаритно-ваговим параметрами, вони знаходять широке застосування в картографії, геодезії, сільському господарстві, пошуково-рятувальних операціях, на полі бою, моніторингу навколишнього середовища, аерофото- та відеозйомці тощо. Це обумовлено рядом переваг [1]:

- **Універсальність.** Бортове обладнання БПС може включати в себе датчики різного типу, призначення та розміру в залежності від тактико-технічних потреб. Різноманіття сучасних засобів збору, обробки та передачі інформації, навігаційного обладнання та систем автоматичного управління польотом дозволяють оснащувати БПС для виконання завдань від тактичного до стратегічного рівнів.
- **Ефективність та безпека.** Окрім широкого спектру застосування, БПС дозволяють виконувати завдання в небезпечних або важкодоступних зонах та уникнути обмежень, що обумовлені перевантаженнями чи впливом шкідливих факторів на людину, завдяки тому, що керування БПС здійснюється дистанційно або автономно. Так, наприклад, при виконанні пошуково-рятувальних робіт, використання БПС дозволяє працювати з безпечної відстані, охоплювати більший спектр, визначати потенційні загрози з більшою точністю, а завдяки встановленню тепловізійних камер, пошук постраждалих може здійснюватися в темряві [2].
- **Економічність.** Вартість виготовлення, експлуатації та ремонту є незрівнянно нижчими у порівнянні з пілотованими системами. Більш того, підготовка операторів БПС є більш економічним процесом в порівняльному аспекті з підготовкою пілотів.

- **Мобільність.** Малогабаритні БПС не потребують злітно-посадкових смуг або аеродромів. Більш того, сучасні безпілотні авіаційні комплекси (БАК) забезпечують можливість динамічного розгортання, забезпечуючи адаптивність до зміни умов навколишнього середовища [3]. В якості прикладу можна привести БАК А1-СМ «Фурія» (рис. 1.1), час розгортання з транспортного положення якого становить близько 15 хвилин [4].



Рисунок 1.1 БАК А1-СМ «Фурія»

Із розвитком сучасних технологій збільшується дальність дії БПС, тривалість польоту та їх автономні можливості, що сприяє стрімкому розширенню можливостей їх застосування в різних сферах діяльності. Так, наприклад, завдяки застосуванню камер високої роздільної здатності та оптичних датчиків LiDAR, можна отримати деталізовані топографічні карти місцевості, створювати тривимірні моделі та профілі висот [1]. В той же час, в галузі сільського господарства БПС облаштовуються мультиспектральними камерами, що фіксують кількість поглинутого і відбитого рослинами світла, дозволяючи контролювати стан сільськогосподарських культур (DJI Mavic 3 Multispectral (рис.1.2), Quantum Systems Trinity F90+ (рис. 1.3), DJI Phantom 4 RTK).



Рисунок 1.2 Mavic 3 Multispectral



Рисунок 1.3 Trinity F90+

Сьогодні застосування БПС також значно розширює спектр виконуваних завдань військової галузі, включаючи ті, що раніше здійснювались тільки армійською та тактичною авіацією. Військові конфлікти доводять, що БПС є незамінними як для повітряної розвідки, спостереження та корегування артилерії, підсилення засобів зв'язку, так і для враження цілей противника [5]. Можна стверджувати, що усі індустріально розвинені країни модернізують існуючі та розробляють нові моделі тактичних БПС.

В якості прикладу можна навести БАС «Hermes 900» ізраїльської компанії Elbit Systems (рис. 1.4), призначений для спостереження, патрулювання та повітряної розвідки, що здатен нести корисне навантаження 350 кг і знаходитись в повітрі до 36 годин [6]. Іншим прикладом є розвідувальний безпілотник американської компанії AeroVironment Inc. – RQ-11B Raven (рис. 1.5). Призначенням малого БПС швидкого розгортання є здійснення повітряної розвідки на малих висотах вдень та вночі. До складу корисного навантаження зазвичай входить інфрачервона камера для нічного бачення та кольорова камера



CCD [7].

Рисунок 1.4 Hermes 900

Рисунок 1.5 RQ-11B Raven

Тенденції в розробці та виробництві БПС характеризуються значним та динамічним шляхом розвитку із врахуванням потреб ринку та залученням передових технологій.

Наразі серед перспективних напрямків розвитку безпілотної авіації варто виділити розробки тактики рою. Рій являє собою групу як однотипних, так і різнотипних БПС, які з використанням відповідних алгоритмів та датчиків для координації, скеровані на виконання простих завдань, в сукупності здійснюючи складну місію. Рої БПС дозволяють ефективно долати оборону противника, вражати цілі або здійснювати радіоелектронну боротьбу в широкому діапазоні частот. Однією з таких розробок є програма «Гремліни» з БПС X-61 Gremlin, що можуть виконувати розвідувальні або ударні місії як самостійно, так і у взаємодії з винищувачами п'ятого покоління [8].

Також важливими для розвитку технологій виготовлення БПС є досягнення в галузі матеріалознавства. Використання легких матеріалів є однією з ключових тенденцій у виробництві безпілотників, адже сприяє зменшенню загальної ваги БПС, разом з цим збільшуючи час польоту та вагу корисного навантаження. Композиційні матеріали з вуглецевого волокна та скловолокна, характерною властивістю яких є мала питома вага, висока міцність та низька радіопомітність, знаходять широке застосування при виготовленні конструкційних елементів БПС та каркасів дронів.

1.1 Класифікація безпілотних повітряних суден

Стрімкий розвиток БПС, множинність типів та напрямків застосування зумовлюють різноманіття класифікаційних ознак, а разом з цим відсутність загальноприйнятої узагальненої класифікації. Сучасні БПС розрізняють за аеродинамічною схемою, способом старту та посадки, тривалістю польоту, габаритно-ваговими параметрами, рівнем застосування, тривалістю польоту, типом системи керування тощо.

Відповідно до класифікації міжнародної організації НАТО (North Atlantic Treaty Organisation, NATO) БПС можна поділити на три класи відповідно до рівня застосування, висоти застосування та радіусу дії. Описана класифікація приведена в таблиці 1.1 [9].

Таблиця 1.1

Класифікація БПС Міжнародної асоціації по безпілотним системам

Клас	Категорія	Рівень застосування	Висота застосування, м	Радіус дії, км
Клас I ⚡ (150 кг)	Мікро ⚡ (66 Дж)	Підрозділ	До 60	До 5
	Міні ⚡ (15 кг)	Підрозділ	До 900	До 25
	Малі ⚡ (15 кг)	Формування	До 1500	До 50
Клас II (150-600 кг)	Тактичні	Тактичний	До 5500	До 200
Клас III ⚡ (600 кг)	MALE	Оперативний	До 14 000	Необмежений
	HALE	Стратегічний	До 20 000	Необмежений
	Ударні	Стратегічний	До 20 000	Необмежений

В той же час, в Україні відповідно наказу Міністерства оборони України від 08 грудня 2016 року №661 в редакції від 12 лютого 2020 року БАК класифікують заознаками, зведеними у таблиці 1.2 [10]:

Таблиця 1.2

Класифікація БАК в Україні

За класами				
I клас «Легкі» (до 150 кг), до яких мікро, міні та малі БПС		II клас «Середні» (від 150 до 600 кг)		III клас «Важкі» (більше 600 кг), серед яких розрізняють оперативні та стратегічні БПС
За призначенням				
Бойові призначенні для здійснення бойових місій, таких як повітряна розвідка та цілевказання, радіоелектронна боротьба та ураження цілей			Спеціальні призначенні для спостереження, моніторингу, ретрансляції сигналу тощо	
За типом				
Літакового типу		Вертолітного типу		Мультироторні
За місцем базуванням				
Наземне		Річкове або морське		Повітряне
За способом зльоту				
По-літаковому	По-вертолітному	Із застосуванням катапульти або пускової установки	З руки	Комбінований
За способом посадки				
По-літаковому		По-вертолітному		Із застосуванням парашуту або гальмівного

		пристрою
За типом системи керування		
Автономні БПС, що виконують політ за попередньо заданою програмою	Пілотовані - з ручним пілотуванням; - що пілотуються оператором; - що пілотуються за точками; - з комбінованою системою керування.	

Разом з цим, до інших ознак, за якими класифікують БПС слід віднести наступні [11], [12]:

- За типом крила: фіксовані і плаваючі;
- За типом двигуна: електричні, поршневі, роторно-поршневі та турбореактивні або турбогвинтові;
- За типом паливної системи: монозаправні та полізаправні;
- За тривалістю польоту: малої (менше 6 годин), середньої (від 6 до 12 годин) та великої (більше 12 годин) тривалості;
- За практичною стелею: маловисотні (до 1 км), середньовисотні (від 1 до 4 км), висоті (від 4 до 12 км), стратосферні (від 12 км);
- За дальності дії: ближнього (до 40 км), малого (до 70 км), середнього (до 300 км), дальнього (до 1500 км) та великої дальності (від 1500 км) радіусу дії;
- За часом одержання даних: у реальному часі, під час сесій зв'язку, після посадки.

Окрім цього, військові БПС розподіляють за такими організаційними ознаками [13]:

- За масштабом застосування: стратегічні (до 700 км), оперативні (до 300 км) і тактичні (до 80 км);
- За кількістю застосувань: одноразові та багаторазові;
- За способом керування: керування пілотом, автоматичне управління та комбінована система.

- За належністю: Сухопутні війська, Військово-Морські сили (ВМС), Військово-Повітряні сили (ВПС), Міністерство внутрішніх справ (МВС) та Прикордонні війська;
- За призначенням: для здійснення розвідувальних, ударних та забезпечувальних місій.

Розглянувши існуючі класифікаційні ознаки БПС, можна зазначити, що з огляду на динаміку розвитку безпілотної авіації та зростаючого різноманіття шляхів застосування, наразі відсутня єдина вичерпна класифікація БПС, яка б охоплювала комплексний підхід із врахуванням сучасних вимог і технічних характеристик.

1.2 Обґрунтування вибору аеродинамічної схеми. Огляд моделей аналогів.

Вибір прототипу

Для розвідки, координації вогню артилерії або здійснення високоточних атак необхідно мати БПС відповідного класу з належними габаритно-ваговими та тактико-технічними характеристиками (ТТХ) [14]. Серед БПС оперативного та тактичного рівнів часто можна побачити, що вони розроблені саме за схемою «літаюче крило». БПС цієї схеми не мають вертикального оперення. Застосування такої аеродинамічної схеми обумовлено рядом переваг, а саме:

- значно менша помітність засобами радіолокації;
- можливість більш рівномірного розподілення ваги по площі БПС [15];
- забезпечення необхідної жорсткості крила при відносно меншій масі;
- високий коефіцієнт аеродинамічного підйому, адже за такої схеми додатковий опір відносно підйомної сили, що створюється крилом, є меншим [16].

Разом з цим, для «літаючого крило» є характерними ряд особливостей, що ускладнюють застосування цієї схеми. До таких слід віднести:

- проблеми із забезпеченням стійкості, викликані відсутністю вертикального оперення;

- менша маневреність та гірша керованість у порівнянні з іншими схемами, що викликано складною формою стабілізуючої та керуючої поверхонь.

Слід зазначити, що спроби усунути зазначені недоліки «літаючого крило» можуть спричинити зниження високого коефіцієнту аеродинамічної якості та вплинути на низьке значення лобового опору, що властиві цій схемі [16].

Одним з прикладів успішного застосування схеми «літаюче крило» є ізраїльська компанія Aeronautics Defense Systems, яка є розробником та виробником ряду визначних БПС, в тому числі й малих БПС «Orbiter 2» (рис. 1.6). Вони призначені для забезпечення внутрішньої безпеки країни та використання під час бойових дій, зокрема для розвідки в ближньому тилу противника, а також у морі, здійснюючи посадку на борт військово-морських суден. БПС «Orbiter 2» є практично непомітним, адже має надзвичайно малі оптичну, теплову, акустичну та радіолокаційну помітність. Конструкція Orbiter 2 являє собою «літаюче крило» виготовлене з композиційних матеріалів, що пояснює хороші аеродинамічні характеристики, можливість підіймати корисне навантаження масою 1,5 кг, а також можливість витримувати великі навантаження при посадці [17].

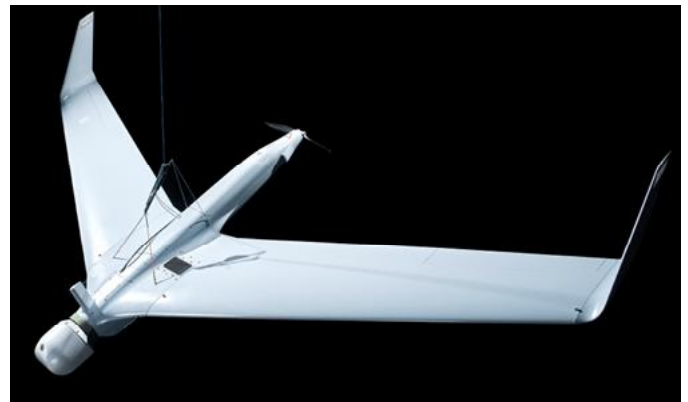


Рисунок 1.6 Orbiter 2 MUAS

Іншим поширеним у використанні БПС схеми «літаюче крило» є Skywalker X8. Розбірний корпус БПС, що виготовлений з ударостійкого піноматеріалу, передбачає встановлення First Person View (FPV) систем та системи автопілоту (рис. 1.7, 1.8). Разом з цим, завдяки вдалій аеродинамічній компоновці крила, при польоті на крейсерській швидкості 70 км/год БПС не потребує значної потужності

двигуна, що дозволяє зекономити заряд акумулятора і збільшити дальність польоту [18].



Рисунок 1.7 БПС схеми «літаюче крило»
«Skywalker X8»



Рисунок 1.8 Бортове
обладнання БПС

В Україні визначними прикладами БПС схеми «літаюче крило» оперативного й оперативно-тактичного рівнів, тобто тих, які можуть корегувати артилерію та здійснювати глибоку розвідку, є АСУ-1 Валькірія та А1-СМ «Фурія», що стоять на озброєні Збройних Сил України, Національної Гвардії України та Служби безпеки України. Безпілотний авіаційний комплекс військового та цивільного призначення з повністю автономним БПС - АСУ-1 Валькірія (рис. 1.9) дозволяє здійснювати високоякісне відеоспостереження і аерофотозйомку, а також трансляцію відео в реальному часі вдень та вночі завдяки денній камері із десятикратним зумом та тепловізійній камері, встановлених на двоосьовому підвісі. Спрощений дизайн БПС обумовлює економію часу розгортання і передпольотної підготовки, які можна здійснити за



п'ять хвилин [19].

Рисунок 1.9 АСУ-1 Валькірія

БАК А1-СМ “Фурія” був створений київським науково-виробничим підприємством (НВП) «Атлон Авіа» для проведення ефективної, якісної тактичної повітряної розвідки та корегування вогню артилерії в будь-який час доби. Для цього в своїй базовій комплектації БПС обладнаний денним та нічним оптичними модулями, а також фотоапаратом. Склад всього комплексу забезпечує швидке відновлення в польових умовах та високу бойову готовність, адже час розгортання з транспортного положення становить близько 15 хвилин [4]. Слід також зазначити, що корпус “Фурії” виготовлено з таких композиційних матеріалів, як склотканина, вуглетканина та кевлар (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 А1-СМ “Фурія”

Нижче представлена порівняльна таблиця основних льотно-технічних характеристик описаних в цьому підрозділі БПС (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Основні льотно-технічні характеристики БПС схеми «літаюче крило»

Параметри	А1-СМ «Фурія»	Skywalker X8	АСУ-1 Валькірія	Orbiter 2 MUAS
Розмах крила, м	2.05	2.12	1.60	3.00
Довжина, м	0.9	0.79	1.0	1.00

Маса корисного навантаження, кг	1.5	1.5...2	1.5	1.5
---------------------------------	-----	---------	-----	-----

Продовження табл. 1.3

Максимальна злітна маса, кг	5.5	3	3.5	10.3
Максимальна швидкість, км/год	130	75	108	130
Крейсерська швидкість, км/год	65	60	60	50-120
Максимальний час польоту, хв	180	25	120	240
Практична стеія, м	2500	2000	2000	5500

Для обраного типу БПС для подальшого визначення впливу геометричного масштабування на аеродинамічні характеристики БПС, на основі підбору та аналізу статистичних даних по існуючим моделям аналогічного типу в якості прототипу було обрано Skywalker X8.

1.3 Огляд літератури з розробки БПС

В ході пошуку науково-технічної інформації за темою магістерської дисертації, були розглянуті інформаційні джерела, присвячені проектуванню та дослідженню аеродинамічних характеристик схеми «літаюче крило», а також виготовленню елементів ЛА із композиційних матеріалів, які будуть використанні на етапі розробки технологічного процесу виробництва розглянутого в магістерській дисертації БПС.

В своїй дисертації Михай в якості об'єкта дослідження фокусується на БПС аеродинамічної схеми «літаюче крило» Hirrus румунської компанії «AFT Design» (рис. 1.11). В роботі описаний процес масштабування БПС Hirrus в два та в чотири рази більших за вихідну модель та досліджуються динамічні характеристик кожної з моделей. Підсумовуючи свою дисертації, автор зазначає, що описаний

ним метод дозволяє зменшити час проектування при розробці модифікацій існуючого БПС Hirus з більшою злітною вагою [20].



Рисунок 1.11 БПС Hirus

В роботі Багдасаряна [21] представлені аналіз, проектування та розробка БПС з удосконаленою системою керування схеми «змішане крило», яке являє собою різновид аеродинамічної схеми «літаюче крило». При цьому, особливістю розглянутого БПС є відсутність рульових поверхонь. Автор наводить результати аналітичного розрахунку геометричних параметрів БПС, вибору аеродинамічного профілю, підбір матеріалів та підтверджує міцність такої конструкції результатами перевірки в програмному забезпеченні «XFLR5». Після чого в програмному забезпеченні «ANSYS» проводиться структурний аналіз критичних частин БПС для визначення деформацій та виконується проектування всієї конструкції, використовуючи програмне забезпечення «CATIA». Окрім цього, в роботі описуються розрахунки потужності, тяги та ККД, відповідно до яких визначається та описується силова установка й основні компоненти для забезпечення безпечного керованого польоту і моделюється динаміка польоту БПС. В ході роботи автор доводить ефективність розробленого БПС аеродинамічної схеми «змішане крило».

Ще однією роботою, що описує проектуванням та виготовлення БПС схеми «змішане крило» є звіт з розробки БПС міжнародної групи студентів [22]. В ньому представлено методи ітераційного проектування БПС з моделюванням плавної посадки, а також докладний опис процесу його виготовлення. В процесі

проектування були виконані розгорнуті попередні розрахунки, ряд експериментальних досліджень та числові аналізи з використанням таких програмних забезпечень, як: «XFLR5», «AVL», «MotoCalc», «Star CCM+» та «ANSYS».

Грайт в своїй статті 2018 року [23] порівнює результати чисельного моделювання польоту Skywalker X8 в програмному забезпеченні «XFLR5» та його експериментальне дослідження в аеродинамічній трубі. Так, була визначена відповідність результатів чисельного моделювання та експериментальної продувки, особливо в визначенні підйомної сили. Разом з цим, були визначені розбіжності в отриманих результатах розрахунку лобового опору. Автор зазначає, що чисельне моделювання відображає менші показники коефіцієнта лобового опору у порівнянні з аеродинамічною трубою.

В статті Гродзького [24] описано види композиційних матеріалів, їх механічні властивості та структуру. Окрім цього, в роботі представлено процес проектування БПС, результати чисельного аналізу елементів з двох композиційних структур, таких як сендвіч та ламінати, а також розробку технологічного процесу виготовлення БПС з композиційних матеріалів. Автор зазначає, що виготовлення легких композиційних структур на основі скловолокна або карбону за допомогою технології вакуумного формування мінімізує утворення пустот та складок і дозволяє отримати високий вміст волокон, що, в свою чергу, забезпечує більшу міцність виробу.

Монографія Карпова [25] представляє опис основних результатів наукових досліджень, що присвячені розробці ефективних металокомпозитних та композитні з'єднань деталей, що працюють в умовах термомеханічного навантаження. Також в книзі приведені результати теоретичних та експериментальних досліджень напружено-деформованого стану та несучої здатності композитних з'єднань. На основі цього сформовані рекомендації по проектуванню, розрахунку на міцність та виготовленню таких виробів.

Висновки по розділу

В розділі розглянуто ключові напрямки застосування БПС і визначено позитивні наслідки їх використання, серед яких універсальність сучасних систем, ефективність виконання завдань в небезпечних зонах без ризику для життя людини, економічність у порівнянні з пілотованими системами та мобільність провідних БАК. Також в розділі наведено класифікацію БПС міжнародної організації НАТО та класифікацію БАК затверджену Міністерством оборони України. При розгляді основних класифікаційних ознак БПС, було визначено, щоповна та комплексна класифікація БПС, яка б враховувала сучасні вимоги і технічні характеристики, наразі відсутня.

Разом з цим, проаналізовано головні переваги та недоліки застосування аеродинамічної схеми «літаюче крило» та описані тактико-технічні характеристики чотирьох БПС цієї схеми (Skywalker X8, A1-СМ «Фурія», АСУ-1 «Валькірія», Orbiter 2 MUAS). Skywalker X8 в результаті аналізу характеристик моделей аналогів, було обрано в якості прототипу для визначення зміни аеродинамічних характеристик при геометричному масштабуванні, що буде розглянуто в наступних розділах.

Також в розділі наведено стислий огляд основних джерел за темою магістерської дисертації. Оскільки об'єктом дослідження є «літаюче крило», переважна кількість наведених джерел присвячена проектуванню та дослідженню аеродинамічних характеристик саме цієї схеми. Окрім цього, в переліку наведено інформаційні джерела, що присвячені виготовленню БПС та елементів ЛА із композиційних матеріалів.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ДИНАМІЧНО ПОДІБНИХ МОДЕЛЕЙ БПС

Не дивлячись на стрімкий розвиток існуючих розрахункових методів, найбільш повні та точні дані про аеропружність (дивергенція крила, флатер, бафтинг, автоколювання органів керування) та динаміку польоту літального апарату дозволяє отримати застосування динамічно подібних моделей в ході експериментальних досліджень. Хоча проектування та виготовлення масштабованих динамічно подібних моделей вважається складним та трудомістким процесом, адже вимагає подібності як геометричних параметрів, так і розподілу масово-інерційних та жорсткісних характеристик [26], цей метод забезпечує відтворення складного просторового руху літака при особливих режимах польоту, не потребуючи високого рівня витрат та не представляючи ризику для екіпажу, у порівнянні з натурним літальним апаратом.

Масштабування літальних апаратів, що довели свою ефективність під час льотних випробувань та експлуатації, є ефективним способом оптимізації проектування нових БПС відповідно до заданих ТТХ. Застосування цього методу для створення декількох модифікацій однієї моделі літального апарату в різних масштабах зі збереженням аеродинамічних властивостей дозволяє зменшити витрати на їх розробку та дослідження.

При масштабування літальних апаратів враховують геометричну, кінематичну та динамічну подібність. В той час як кінематична подібність являє собою масштабування переміщень та швидкостей, а динамічна – сил, геометрична подібність фокусується на масштабуванні лінійних розмірів моделі. Слід зазначити, що геометрична та кінематична подібність є обов'язковими умовами динамічної подібності моделі [27].

Динамічна подібність моделей може бути досягнута шляхом співставлення критеріїв подібності при двох або більше обставинах, наприклад, двох

експериментів або моделі в зменшеному масштабі та повному. За умови досягнення однакових критеріїв подібності, можна отримати коректне масштабування фізики досліджуваних процесів [28]. Згідно зі звітом НАСА (National Aeronautics and Space Administration, NASA) про динамічну подібність для загальних умов випробувань, для забезпечення динамічної подібності моделей застосовуються чотири ключові безрозмірні параметри: число Рейнольдса, число Маха, число Фруда та число Струхала [29].

З огляду на те, що виконати всі вимоги до подібності моделей неможливо, більшість льотних випробувань мають на меті виконання одного або декількох критеріїв подібності. Окрім геометричної подібності і зміни кута атаки, мають бути виконані критерії Фруда та Рейнольдса.

При розгляді кінематичного масштабування, тобто збереження кінематичних властивостей за рахунок масштабування швидкостей, застосовують число Фруда. З метою забезпечення подібності інерційного та гравітаційного впливу на геометрично подібні моделі, число Фруда має бути однаковим для моделі в масштабі та натурної моделі. Таким чином, при розгляді ЛА, подібні моделі при однакових кутах атаки та маневрах матимуть аналогічну поведінку.

Число Фруда розраховують за формулою [26]:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot l}}$$

де V – швидкість;

g – прискорення вільного падіння;

l – характерна довжина.

На етапі кінематичного масштабування має місце наступне співвідношення:

$$Fr_m = Fr_n$$

де Fr_m – число Фруда моделі в масштабі;

Fr_n – число Фруда натурної моделі.

З цього випливає, що швидкість моделі в масштабі еквівалентна швидкості натурної моделі, поділеної на квадратний корінь співвідношення характерних довжин:

$$V_M = \frac{V_H}{\sqrt{\frac{l_M}{l_H}}}$$

При забезпеченні динамічної подібності важливою є відповідність числа Рейнольдса, яке являє собою співвідношення сил інерції до сил тертя пограничного шару рідини і визначається за формулою:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}$$

де V – середня швидкість;

d – характерний розмір (довжина хорди крила);

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Співвідношення чисел Рейнольдса, в якій швидкість визначена зі співвідношення числа Фруда, записується так[27]:

$$\frac{Re_M}{Re_H} = \frac{V_M \cdot d_M}{\nu_M} \cdot \frac{\nu_H}{\nu_M} = \left(\frac{l_M}{l_H}\right)^{3/2} \cdot \frac{\nu_H}{\nu_M}$$

масштабованої моделі: критерія Ньютона, критерія Коші, числа Маха та критерія Струхаля.

Критерій подібності Ньютона передбачає рівність співвідношення однойменних сил, що діють в подібних точках [26]:

$$Ne = \frac{m_H}{\rho \cdot l_H^2} = \frac{m_M}{\rho \cdot l_M^2},$$

де m – маса конструкції ЛА;

ρ – густина потоку;

l^2 – характерна довжина.

Для повної маси ЛА або зосередженого вантажу формула приймає вигляд:

$$Ne = \frac{G}{\rho \cdot l^2}.$$

З метою забезпечення подібності пружних деформацій конструкції натурної та масштабованої моделей під дією аеродинамічних сил, застосовують критерій Коші:

$$Ca = \frac{f}{\rho \cdot l \cdot V^2},$$

де f – характерна жорсткість конструкції.

З огляду на те, що в авіаційних конструкціях зазвичай застосовуються тонкостінні конструкції, а отже їх жорсткісні параметри пропорційні до товщини конструктивних елементів, формула приймає вигляд:

$$Ca = \frac{E \cdot t}{\rho \cdot l \cdot V^2},$$

де E – модуль пружності конструкційного матеріалу моделі;

t – товщина конструктивних елементів.

Для врахування впливу стисливості середовища необхідно є відповідність критерія Маха:

$$M = \frac{V_H}{a_H} = \frac{V_M}{a_M},$$

де a – швидкість звуку.

Для обраного в цій роботі типу БПС, польоти якого здійснюються на дозвукових швидкостях, параметром числа Маха зазвичай нехтують.

Кінематична подібність при коливальних процесах в нестационарному потоці забезпечується рівністю критерія Струхалія:

$$St = \frac{l_H \cdot \omega_H}{V_H} = \frac{l_M \cdot \omega_M}{V_M},$$

де ω – частота коливань.

Слід зазначити, що описані критерії пов'язані між собою таким співвідношенням:

$$St = \sqrt{\frac{Ca}{Ne}}.$$

Отже, за умови виконання подібності за критерієм Ньютона та Коші, також виконуватиметься й подібність за критерієм Струхалія.

Разом з цим, при експериментальному дослідженні бафтингу та флатеру на динамічно подібних моделях, окрім критеріїв подібності, є важливим забезпечення міцності. Сучасні динамічно подібні моделі виготовляють з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) та термопластиків. У зв'язку з тим, що виготовити подібні моделі з відповідними міцнісними характеристиками без обтяження масштабованої моделі не завжди є можливим, дослідження проводять в декілька етапів з метою узгодження вимог подібності з натурним літальним апаратом та вимог до параметрів міцності конструкції.

На ранніх етапах проектування визначаються зовнішні обриси моделі, по яким розраховують аеродинамічні характеристики моделей розрахунковим та експериментальним шляхом. На цьому етапі дослідження міцнісні параметри натурної моделі не перенесені на масштабовану модель, а, отже, така модель ще не є динамічно подібною. Після визначення міцнісних, жорсткісних та масових

характеристик, а також із врахуванням результатів проведених досліджень «жорстких» моделей, проектується та виготовляється динамічно та пружньо подібна модель, за якою визначають аеропружні характеристики літального апарату [31].

В цій роботі буде розглянуто геометричне масштабування БПС схеми «літаюче крило», при якому зберігається розташування компонентів та співвідношення їх розмірів аналогічно базовій моделі. Буде використано базову модель, динамічно подібну натурному БПС, а також розроблено подібну модель масових та жорсткісних характеристик. В якості натурної моделі в розділі 1 було обрано БПС «Skywalker X8», а в якості базової моделі – експериментальну модель, яка буде отримана в процесі виконання роботи.

Під час проведення аеродинамічних розрахунків буде визначено коефіцієнти підйомної сили та лобового опору для трьох геометрично подібних моделей, сформованих в масштабі 1:1, 2:1 та 3:1. Основні геометричні параметри геометрично подібних розрахункових моделей зведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Основні характеристики геометрично подібних БПС

Параметри	Масштаб		
	1:1	2:1	3:1
Розмах крила, м	2.131	4.262	6.393
Довжина фюзеляжу, м	0.803	1.606	2.408
Площа проекції,	0.801	3.207	7.218

Висновки по розділу

В розділі розглянуто метод масштабування літальних апаратів, який включає в себе динамічний, кінематичний та геометричний напрямки. Описано основні критерії подібності, а саме критерії Фруда, Рейнольдса, Ньютона, Коші, Маха та Струхаля. Також в розділі проаналізовано важливість забезпечення

відповідної міцності динамічно подібної моделі та розглянуто особливості їх виготовлення з ПКМ.

З огляду на поставлену в роботі мету, запропоновано виконати геометричне масштабування в дві ітерації, використовуючи базову модель, динамічно подібну натурному БПС, а також виготовити подібну модель масових та жорсткісних характеристик.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА РОЗРАХУНКОВОЇ МОДЕЛІ БПС СХЕМИ

«ЛІТАЮЧЕ КРИЛО»

З метою проведення аеродинамічних розрахунків із застосуванням методу обчислювальної гідрогазодинаміки для розробки просторової моделі було вибрано систему автоматизованого проектування (САПР) SOLIDWORKS компанії Dassault Systemes.

За роки існування САПР SOLIDWORKS здобула високу популярність в сфері проектування, 2D і 3D моделювання. Вона використовується в галузі машинобудування, аерокосмічної сфери, електротехніки тощо.

Здійснюючи підтримку життєвого циклу виробу відповідно концепції CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support), в основі якої лежить використання єдиного інтегрованого інформаційного середовища тавзаємного обміну даними з іншими Windows-застосунками, SOLIDWORKS є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства. До переліку рішень, які доступні користувачам цього САПР відносяться [32]:

- SOLIDWORKS 3D CAD – рішення для тривимірного проектування виробів;
- SOLIDWORKS CAM – рішення, з використанням якого можна моделювати траєкторії руху виробу, що проектується;
- SOLIDWORKS PDM – додаток, призначений для організації управління процесом розробки виробу;
- SOLIDWORKS Visualize – рішення для створення графічної візуалізації та анімації розроблюваного проекту;
- SOLIDWORKS Composer – продукт, застосування якого дозволяє розробляти таку технічну документацію, як креслення, технічні ілюстрації, анімації тощо;
- SOLIDWORKS Electrical – пакет для створення електричних схем;

- SOLIDWORKS Simulation – рішення, використання якого дозволяє здійснювати аналіз напруження, втрати стійкості, частотний та термічний аналіз, завдяки методу скінчених елементів;
- SOLIDWORKS Flow Simulation – обчислювальний інструмент, в основі якого лежить метод обчислювальної гідрогазодинаміки, що моделює набігаючий потік;
- SOLIDWORKS Plastics – додаток, в якому можна змоделювати процес лиття під тиском.

В таблиці 3.1 зведено основні геометричні параметри за якими було побудовано базову просторову модель БПС «схеми літаюче крило».

Таблиця 3.1

Основні геометричні характеристики розрахункової моделі БПС

Параметр	Значення
<i>Крило</i>	
Профіль крила	МН-46
Розмах крила, м	2.1
m^2 Площа крила,	0.8
Видовження крила	5.5
Звуження крила	2.3
Кут стрілоподібності по передній крайці	118°
Середня геометрична хорда, м	0.38
<i>Елевони</i>	
Відносна хорда, м	0.045
m^2 Площа елевона,	0.0225

Фюзеляж	
Довжина фюзеляжу, м	0.8
Площа міделю, м ²	0.067
Видовження фюзеляжу	2.73

На рис. 3.1 зображено креслення загального вигляду базової моделі БПС, відповідно до вказаних геометричних характеристик.

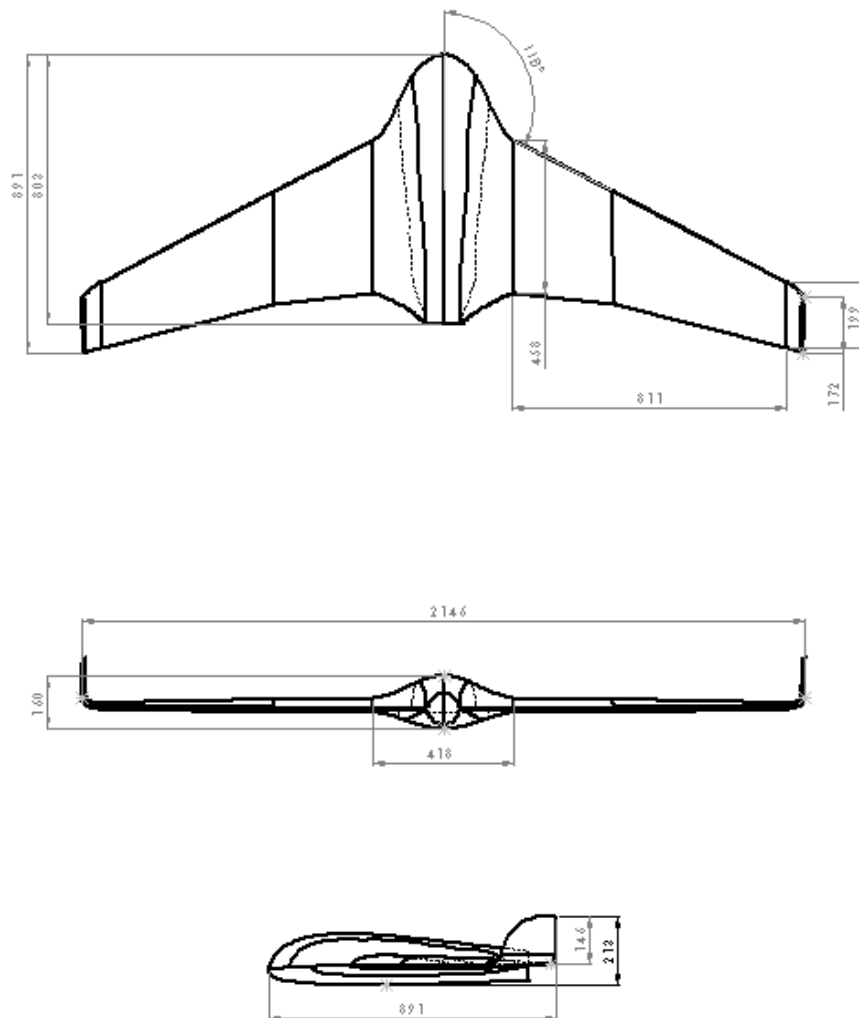


Рисунок 3.1 Креслення загального вигляду базової моделі БПС схеми «літаюче крило»

Створення розрахункової просторової моделі здійснювалось поетапно - згідно з обраним технологічним членуванням БПС. Таким чином, було побудовано фюзеляж (рис. 3.2), консоль крила (рис. 3.3) та вінглет (рис. 3.4).

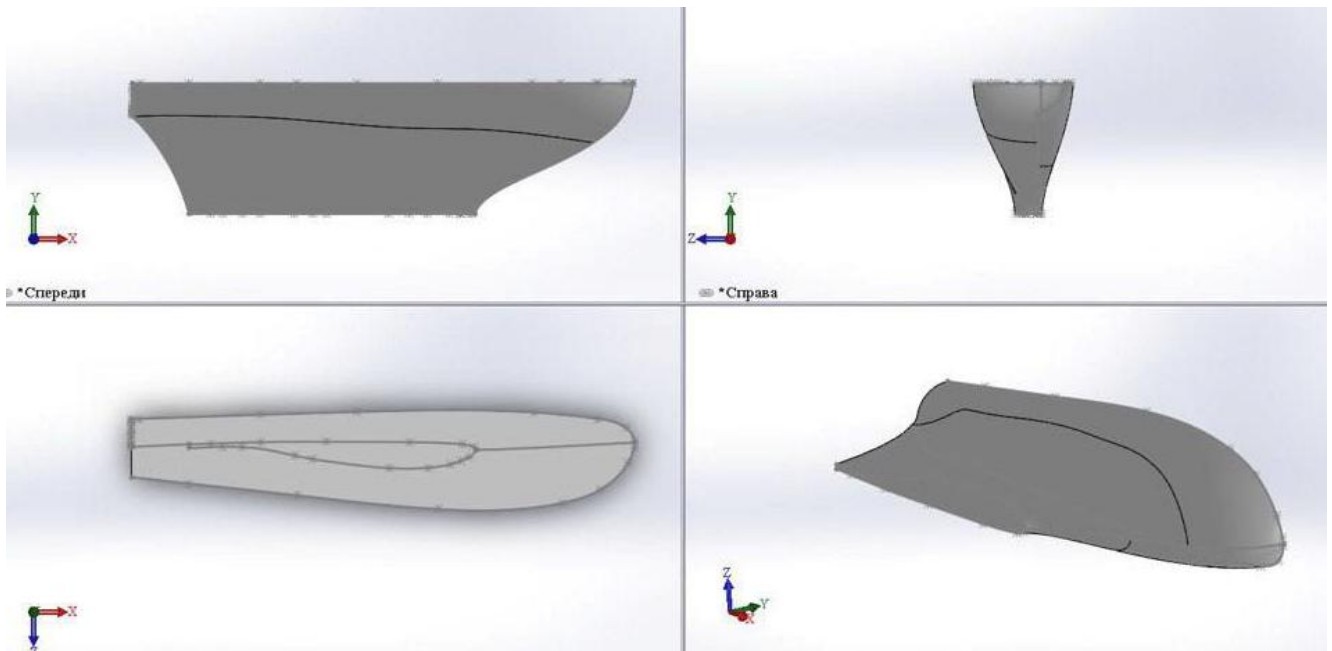


Рисунок 3.2 Просторова модель фюзеляжу

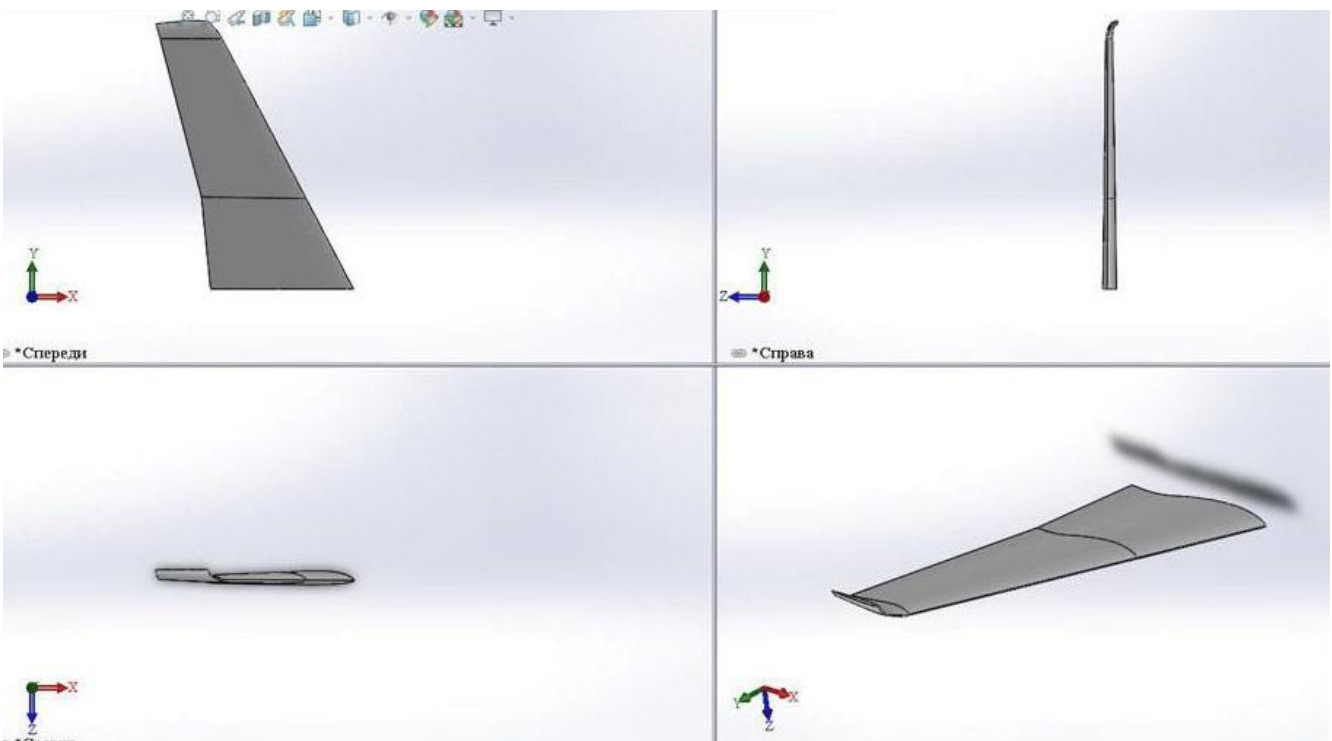


Рисунок 3.3 Просторова модель консолі крила

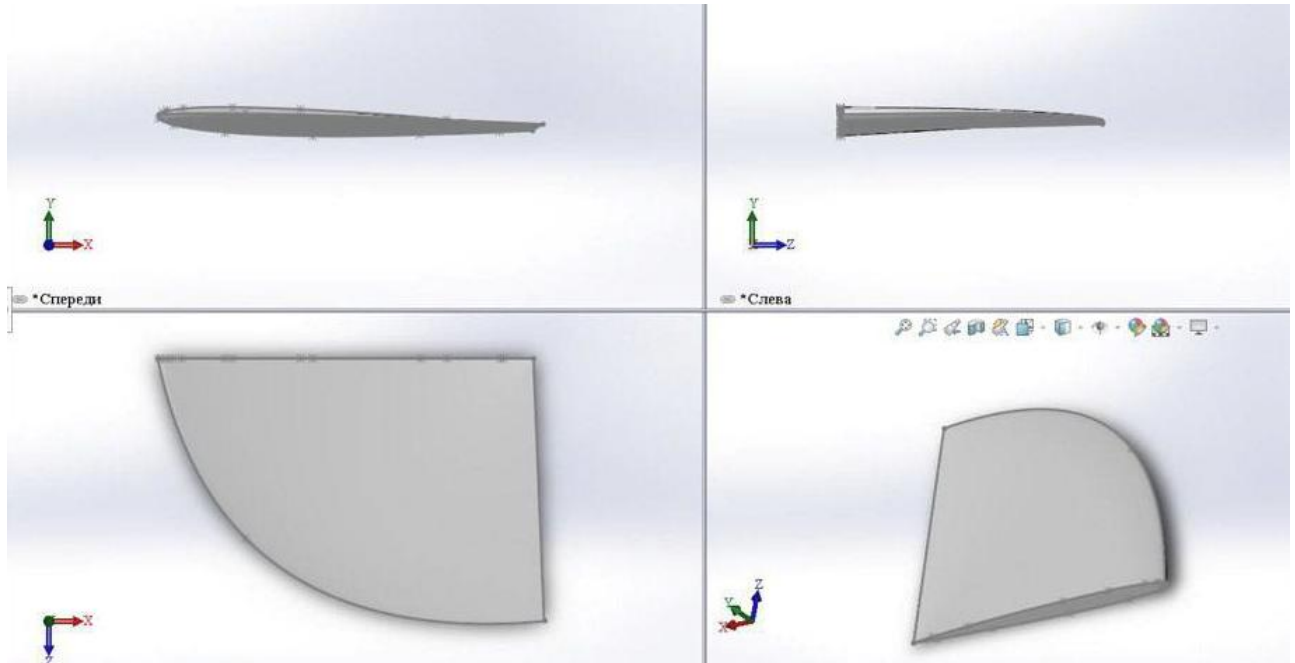


Рисунок 3.4 Просторова модель вінглету

Після цього було виконано збірку, результат якої показано на рис. 3.5.

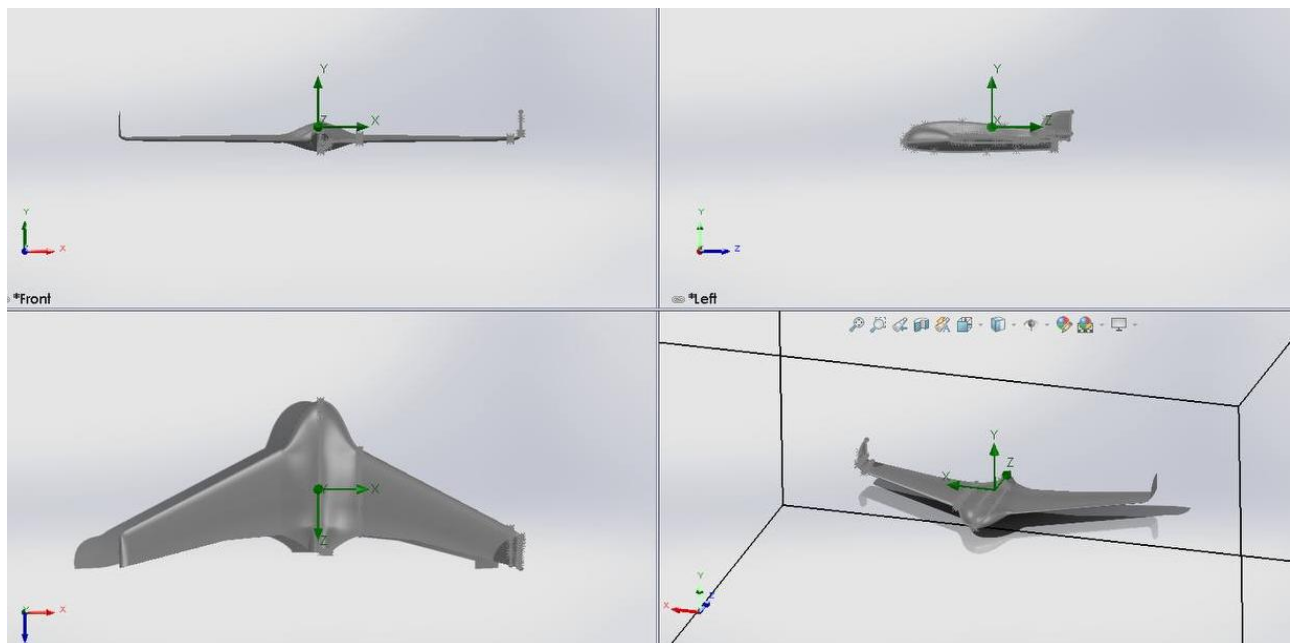


Рисунок 3.5 Просторова модель БПС

З використанням інструментів САПР SOLIDWORKS розроблена базова модель була збільшена в масштабі 2:1 та 3:1. Результат масштабування наведено на рис. 3.6.

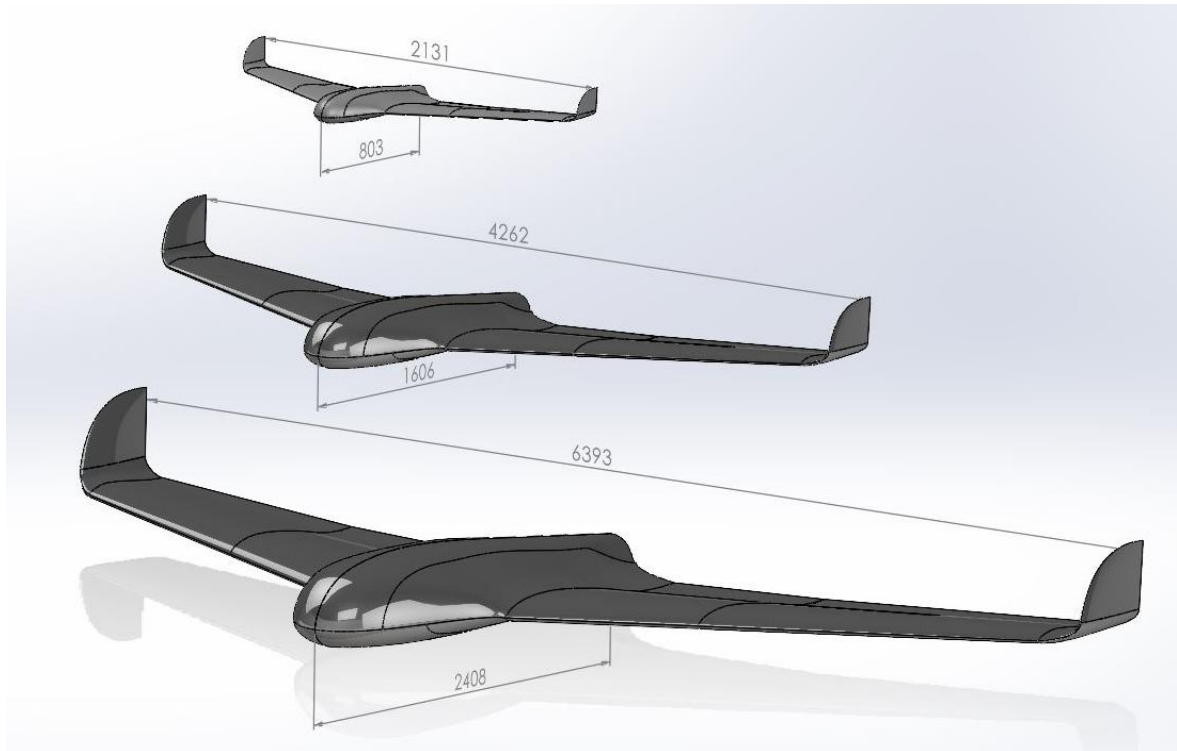


Рисунок 3.6 Просторові моделі подібних БПС

Висновки по розділу

В розділі наведені основні геометричні параметри базової моделі БПС та представлено послідовність створення розрахункової просторової моделі в САПР SOLIDWORKS. Побудована базова модель в масштабі 1:1 була збільшена в масштабі 2:1 та 3:1 з метою здійснення подальших аеродинамічних розрахунків методом скінчених елементів в рішенні SOLIDWORKS Flow Simulation та програмному забезпеченні Ansys.

РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДІБНИХ БПС

Визначення аеродинамічних характеристик подібних БПС при різних кутах атаки здійснювалось за допомогою методу скінчених елементів із використанням програмного рішення Flow Simulation на базі САПР SOLIDWORKS та в програмному забезпеченні ANSYS, призначеного для інженерного аналізу та чисельного моделювання із використанням методу скінчених елементів.

Метод обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD – Computational Fluid Dynamics), реалізований в цих програмних забезпеченнях, моделює набігаючий потік навколо БПС шляхом розв’язку основних рівнянь Нав’є-Стокса.

Для розрахунку просторові моделі БПС були імпортовані в середовище ANSYS, після чого було створено скінчено-елементу модель розрахункової сітки навколо об’єкта розрахунку. Параметри сітки були задані із врахуванням особливостей просторої моделі та таким чином, аби отримати точний результат при прийнятній тривалості розрахунку.

Далі було задано параметри розрахункової області (рис. 4.1).

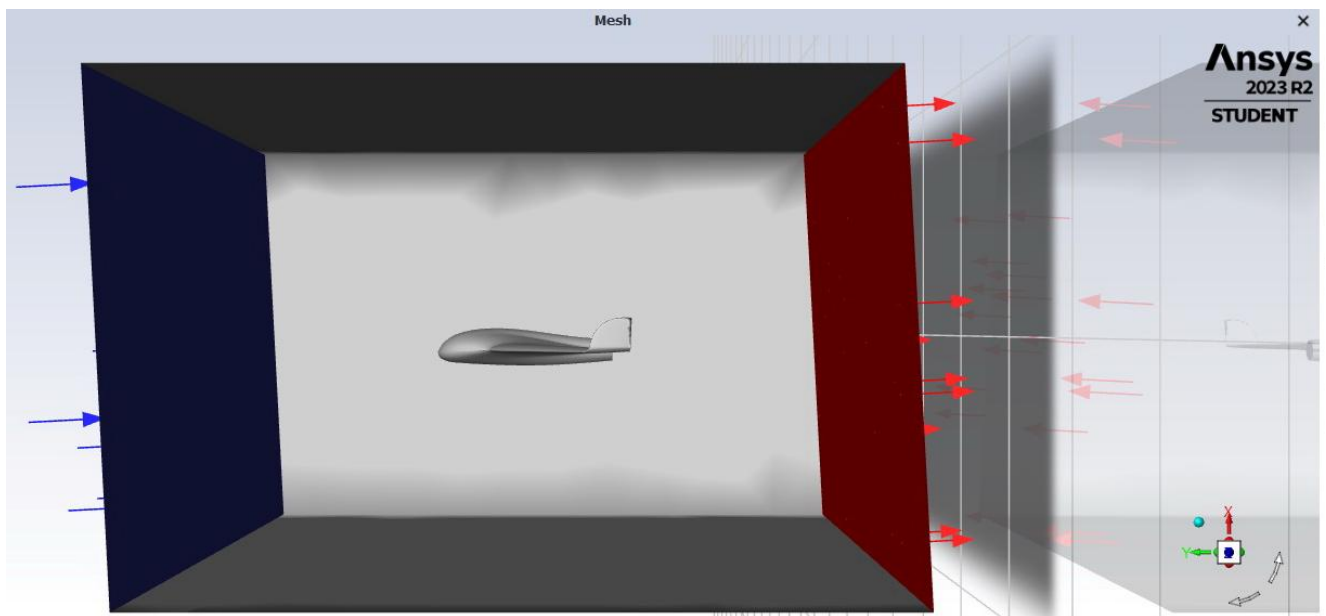


Рисунок 4.1 Розрахункова область

Визначення коефіцієнтів підйомної сили та лобового опору подібних БПС в ANSYS здійснювалось для таких умов розрахунку:

Кути атаки: -5° , 0° , 5° , 10° , 15° ;

Швидкість налітаючого потоку: 70 км/год, 100 км/год, 120 км/год;

Висота польоту: 0.2 км.

4.1 Розрахунок геометрично подібних БПС на швидкості 70 км/год

Результати розрахунку коефіцієнтів підйомної сили (C_y), лобового опору (C_x) та аеродинамічної якості (К) для трьох геометрично подібних моделей при швидкості налітаючого потоку 70 км/год зведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Результат розрахунку аеродинамічних характеристик подібних БПС на швидкості 70 км/год

Кут атаки, α	C_y	C_x	К
Масштаб 1:1			
-5	-0.1872	0.0105	-17.8958
0	0.0148	0.0043	3.4569
5	0.2135	0.0088	24.4011
10	0.4180	0.0249	16.8189
15	0.5615	0.0718	7.8251
Масштаб 2:1			
-5	-0.1847	0.0102	-18.1791
0	0.0152	0.0035	4.3400
5	0.2184	0.0091	23.9233
10	0.4123	0.0242	17.0157
15	0.5783	0.0548	10.5633

Масштаб 3:1			
-5	-0.1844	0.0101	-18.2164
0	0.0128	0.0039	3.2526
5	0.2133	0.0083	25.6691
10	0.4166	0.0246	16.9431
15	0.5211	0.0683	7.6303

На основі проведених розрахунків визначено залежність підйомної сили від кута атаки для трьох геометрично подібних моделей (рис. 4.2) та залежність аеродинамічної якості від кута атаки (рис. 4.3). Також на основі отриманих даних побудовано поляру I роду (рис. 4.4).

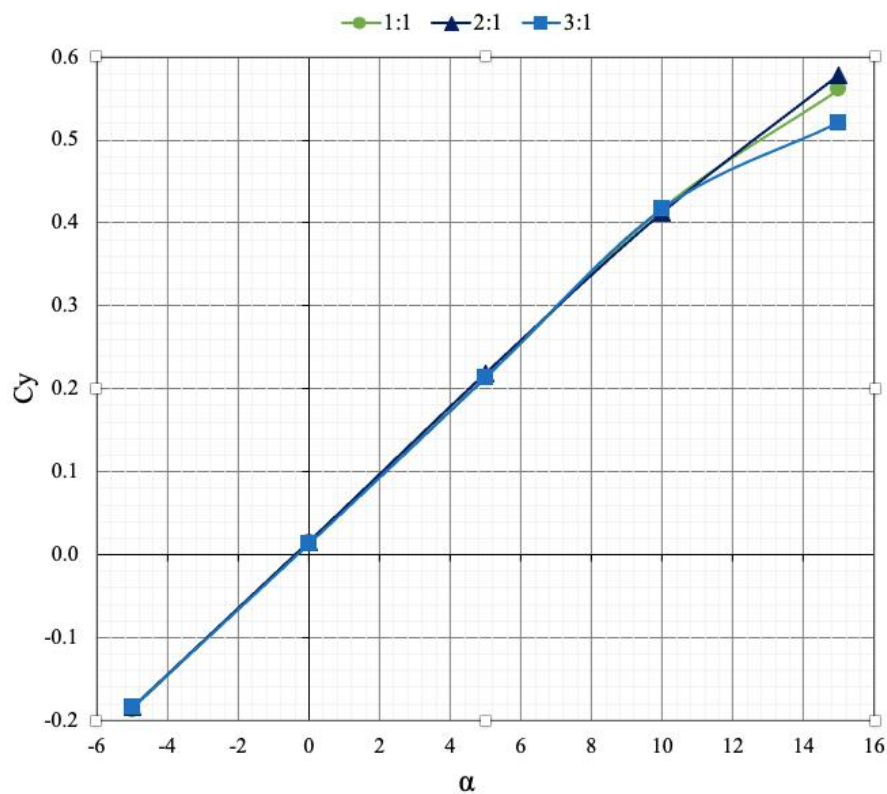


Рисунок 4.2 Графік залежності коефіцієнта підйомної сили (C_y) від кута атаки (α) при швидкості 70 км/год

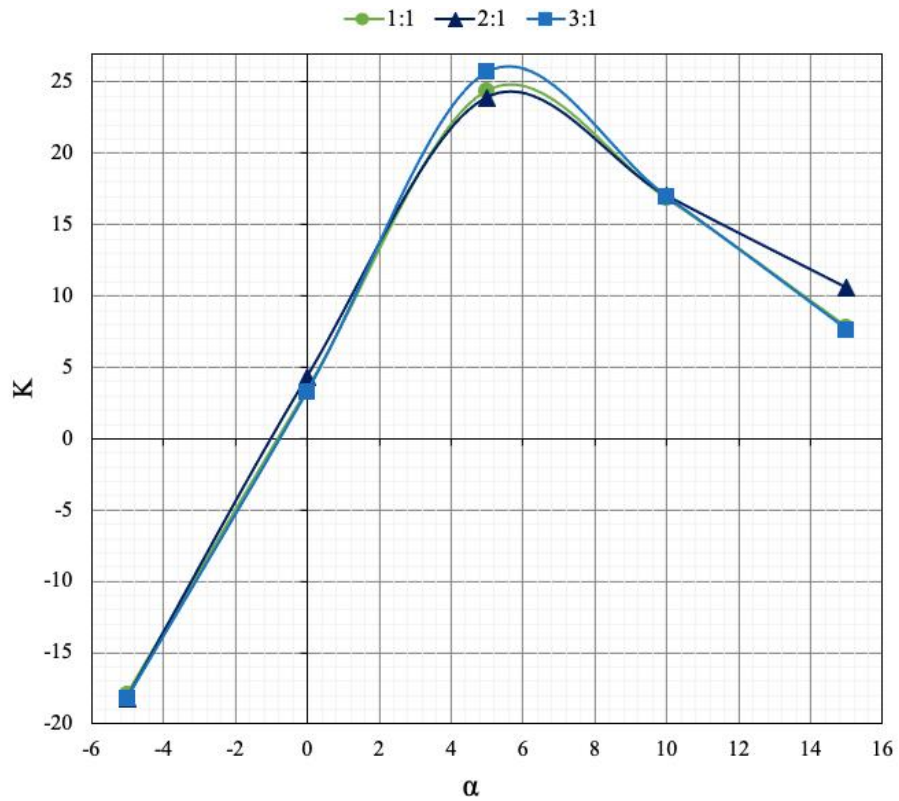


Рисунок 4.3 Графік залежності аеродинамічної якості (K) від кута атаки (α) при

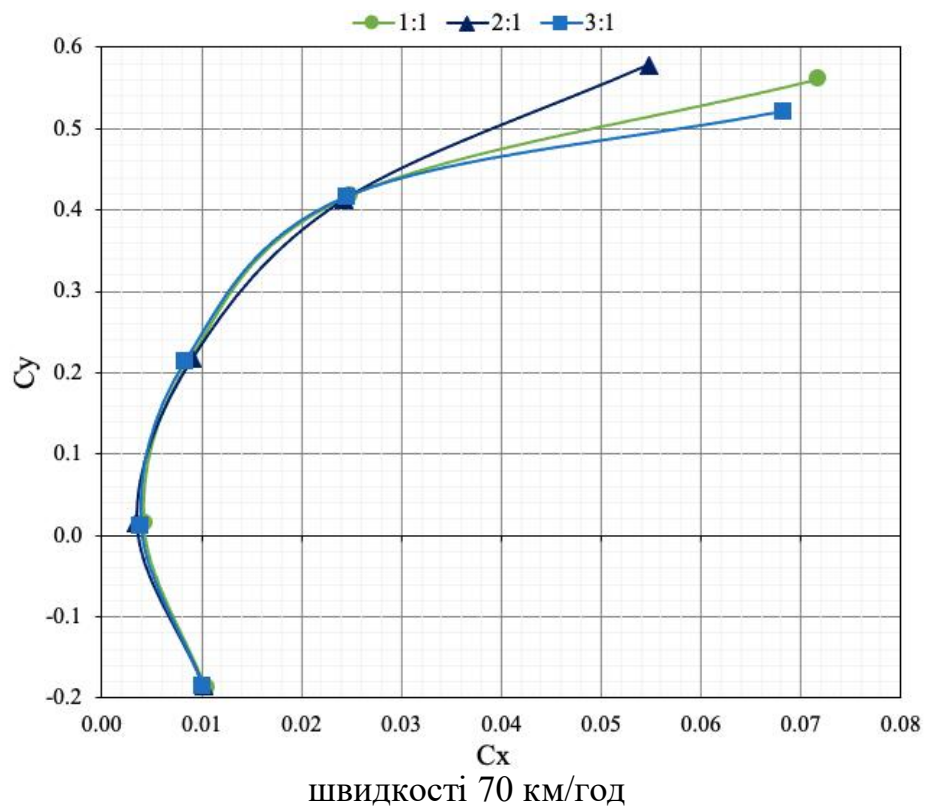


Рисунок 4.4 Полярні діаграми I роду при швидкості 70 км/год

4.2 Розрахунок геометрично подібних БПС на швидкості 100 км/год

В таблиці 4.2 зведені результати розрахунку коефіцієнтів підйомної сили (C_y), лобового опору (C_x) та аеродинамічної якості (K) при швидкості набігаючого потоку 100 км/год, які були отримані з використанням програмного забезпечення Ansys.

Таблиця 4.2

Результат розрахунку аеродинамічних характеристик подібних БПС на швидкості 100 км/год в ANSYS

Кут атаки, α	C_y	C_x	K
Масштаб 1:1			
-5	-0.3762	0.0210	-17.9121
0	0.0297	0.0084	3.5250
5	0.4357	0.0176	24.8292
10	0.8402	0.0500	16.8122
15	1.1166	0.1808	6.1767
Масштаб 2:1			
-5	-0.3797	0.0208	-18.2289
0	0.0309	0.0070	4.4118
5	0.4304	0.0170	25.3842
10	0.8401	0.0490	17.1425
15	1.1965	0.1661	7.2022
Масштаб 3:1			
-5	-0.3748	0.0206	-18.2226
0	0.0259	0.0071	3.6416
5	0.4446	0.0175	25.4473

<i>Продовження табл. 4.2</i>			
10	0.8481	0.0493	17.2071
15	1.0982	0.1830	6.0027

На рис. 4.5 показано залежність підйомної сили від кута атаки при швидкості набігаючого потоку 100 км/год та на рис. 4.6 відповідну залежність аеродинамічної якості від кута атаки. Отримана для зазначеної швидкості полярю I роду зображена на рис. 4.7.

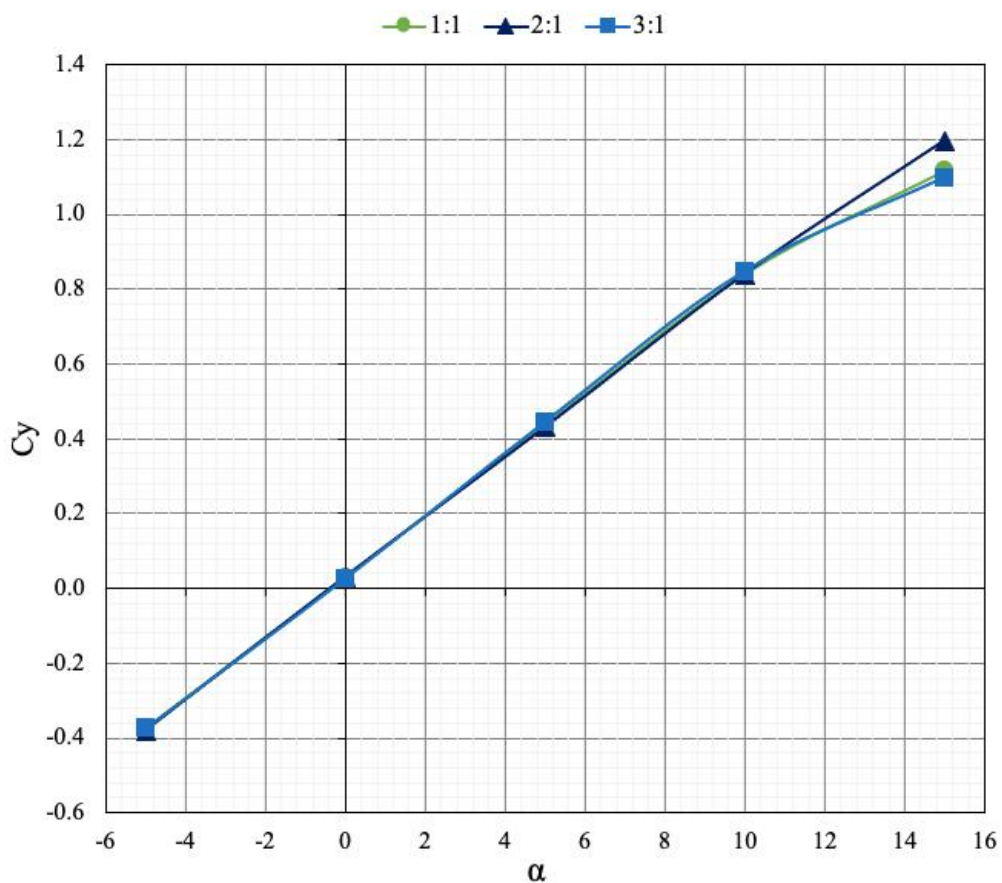


Рисунок 4.5 Графік залежності коефіцієнта підйомної сили (C_y) від кута атаки (α) при швидкості 100 км/год в ANSYS

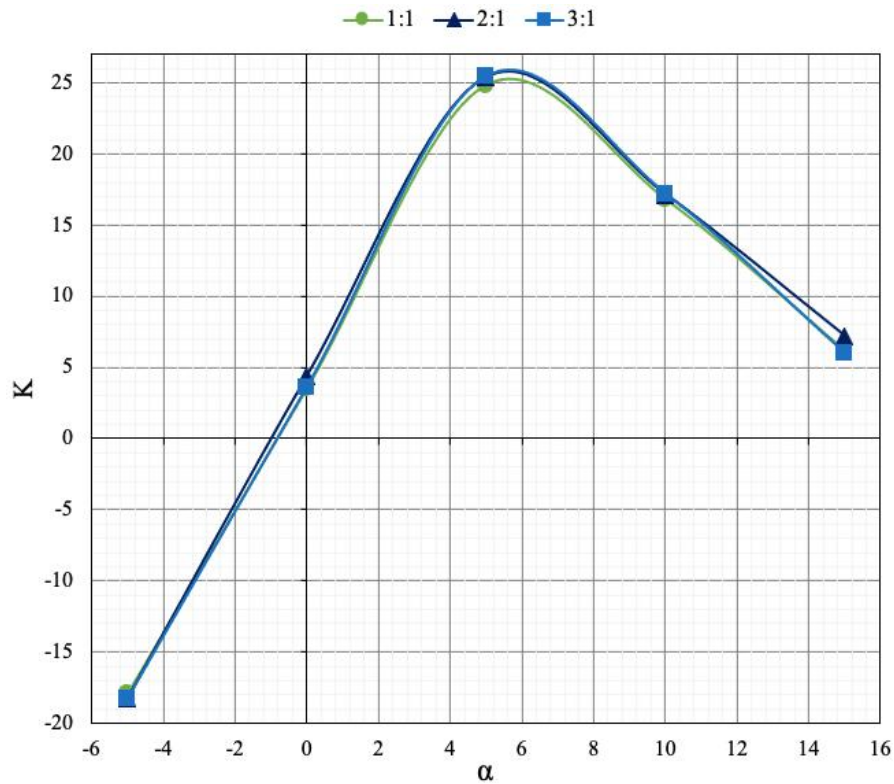


Рисунок 4.6 Графік залежності аеродинамічної якості (K) від кута атаки (α) при швидкості 100 км/год в ANSYS

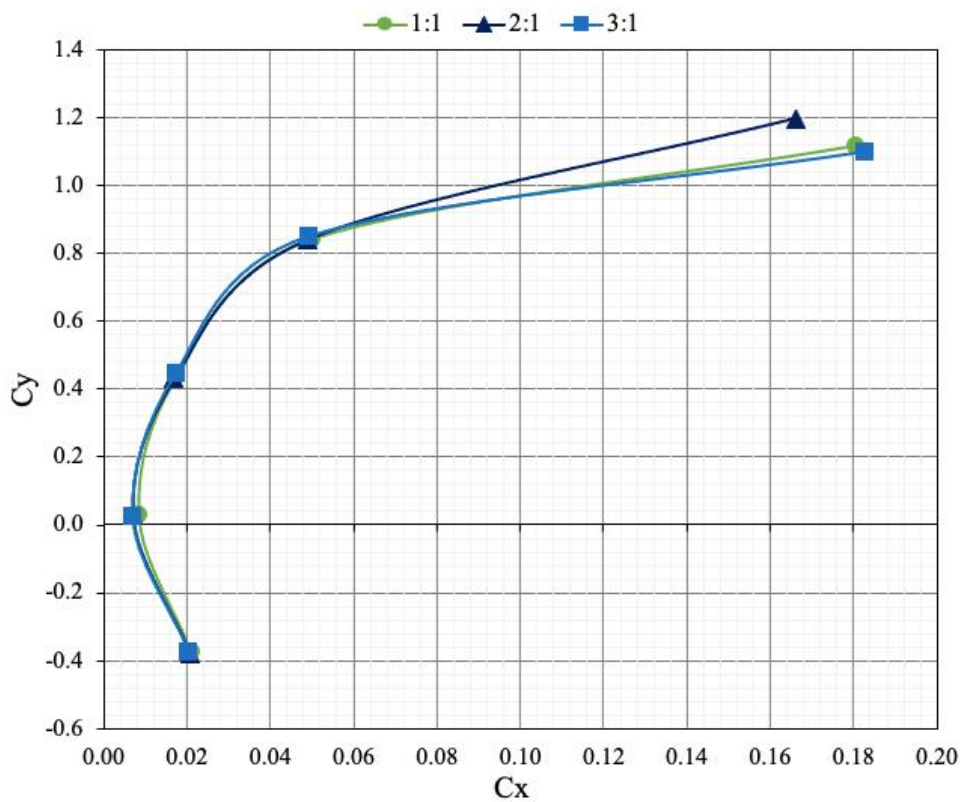
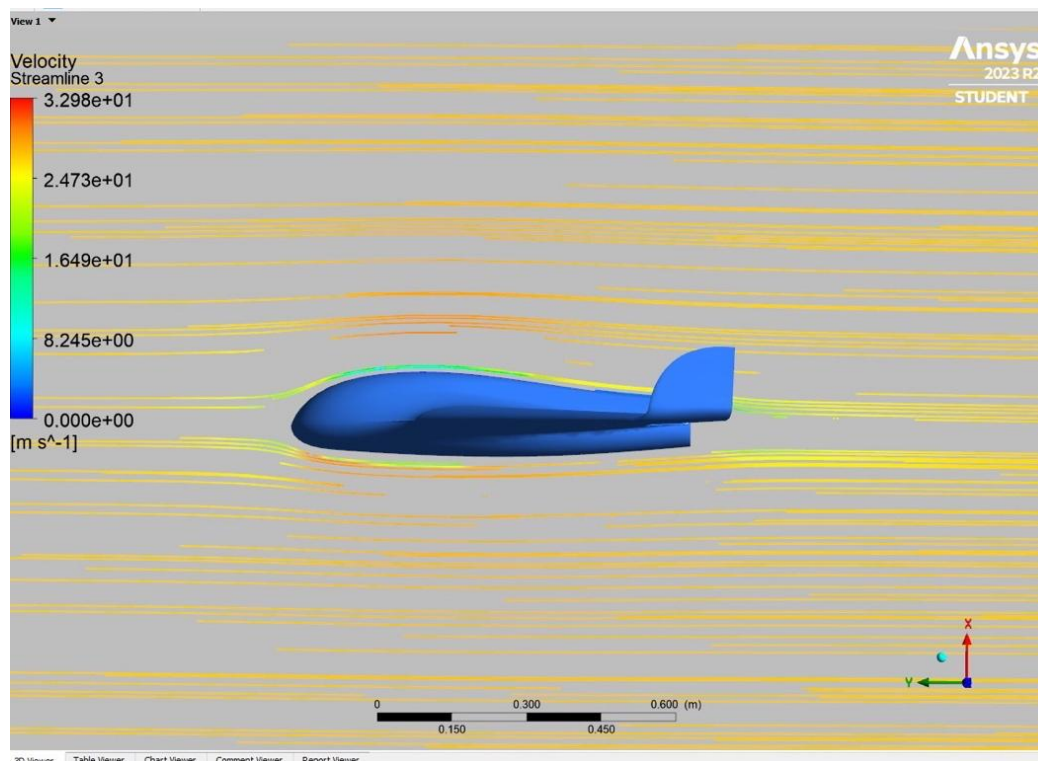


Рисунок 4.7 Поляр І роду при швидкості 100 км/год в ANSYS



На рис. 4.8 показано лінії потоку для базової моделі БПС.

Рисунок 4.8 Лінії обтікання набігаючого потоку

З метою порівняння результатів розрахунку, аеродинамічні характеристики трьох геометрично подібних моделей були розраховані за допомогою програмного рішення Flow Simulation реалізованого в SOLIDWORKS для швидкості набігаючого потоку 100 км/год. Оскільки розрахунок в цьому середовищі є більш спрощеним, а отже здійснюється швидше, при порівнянні з Ansys, були враховані додаткові кути атаки. Результати розрахунку приведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Результат розрахунку аеродинамічних характеристик подібних БПС на швидкості 100 км/год в SOLIDWORKS

Кут атаки, α	C_y	C_x	K
Масштаб 1:1			
-5	-0.2383	0.0592	-4.0262

0	0.0247	0.0162	1.5254
---	--------	--------	--------

Продовження табл. 4.3

5	0.3542	0.0513	6.9037
6	0.4170	0.0604	6.9091
7	0.4738	0.0726	6.5229
8	0.5103	0.0905	5.6364
10	0.6036	0.1207	5.00
12	0.7100	0.1539	4.6118
15	0.7955	0.2152	3.6970

Масштаб 2:1

-5	-0.2601	0.0608	-4.2799
0	0.0357	0.0160	2.2281
5	0.3586	0.0505	7.0937
6	0.4230	0.0571	7.4040
7	0.4823	0.0722	6.6838
8	0.5207	0.0919	5.6631
10	0.6262	0.1224	5.1143
12	0.7291	0.1562	4.6687
15	0.8301	0.2180	3.8070

Масштаб 3:1

-5	-0.2705	0.0616	-4.3887
0	0.0444	0.0161	2.7627
5	0.3646	0.0510	7.1553

6	0.4297	0.0568	7.5700
---	--------	--------	--------

Продовження табл. 4.3

7	0.4932	0.0724	6.8120
8	0.5348	0.0920	5.8125
10	0.6365	0.1235	5.1540
12	0.7426	0.1572	4.7256
15	0.8362	0.2184	3.8280

Отримані за допомогою САПР SOLIDWORKS графіки залежності підйомної сили від кута атаки та аеродинамічної якості від кута атаки, а також поляра І роду показані на рис. 4.9-4.11.

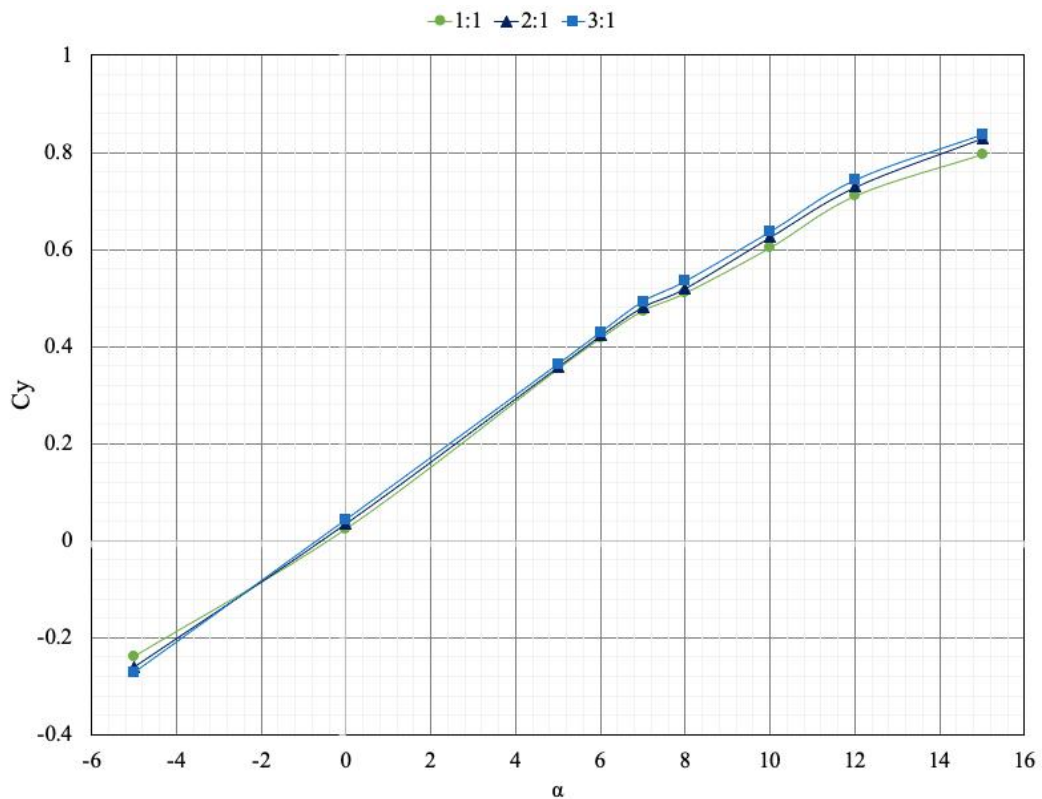


Рисунок 4.9 Графік залежності коефіцієнта підйомної сили (C_y) від кута атаки (α) при швидкості 100 км/год в SOLIDWORKS

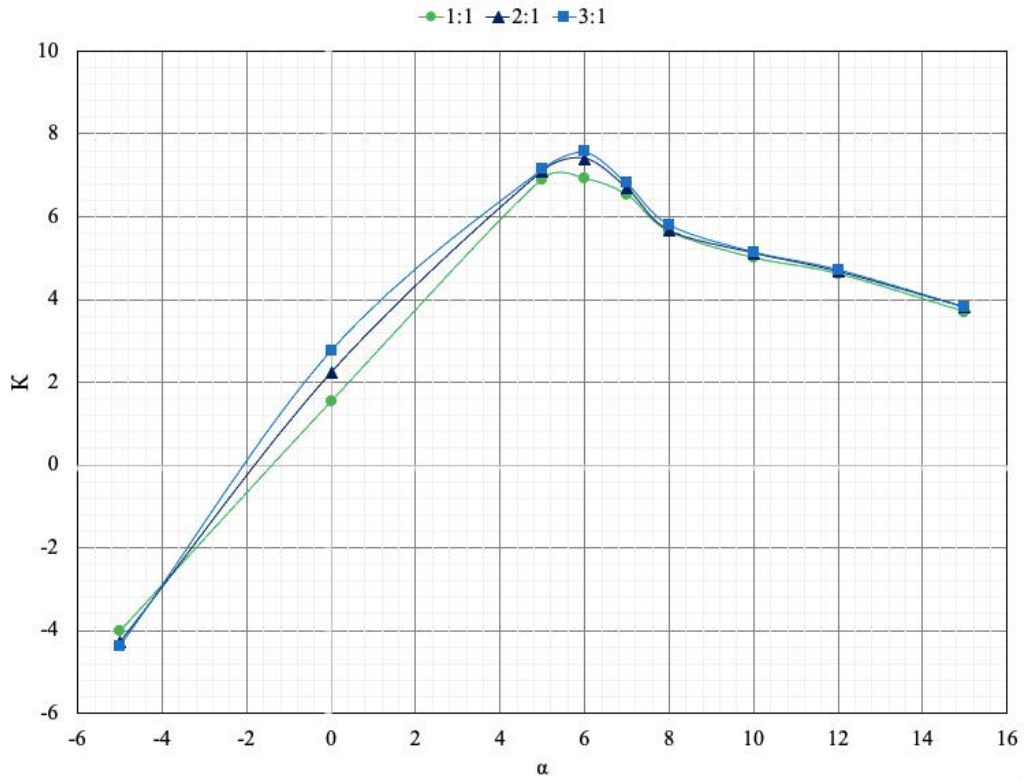


Рисунок 4.10 Графік залежності аеродинамічної якості (K) від кута атаки (α) при швидкості 100 км/год в SOLIDWORKS

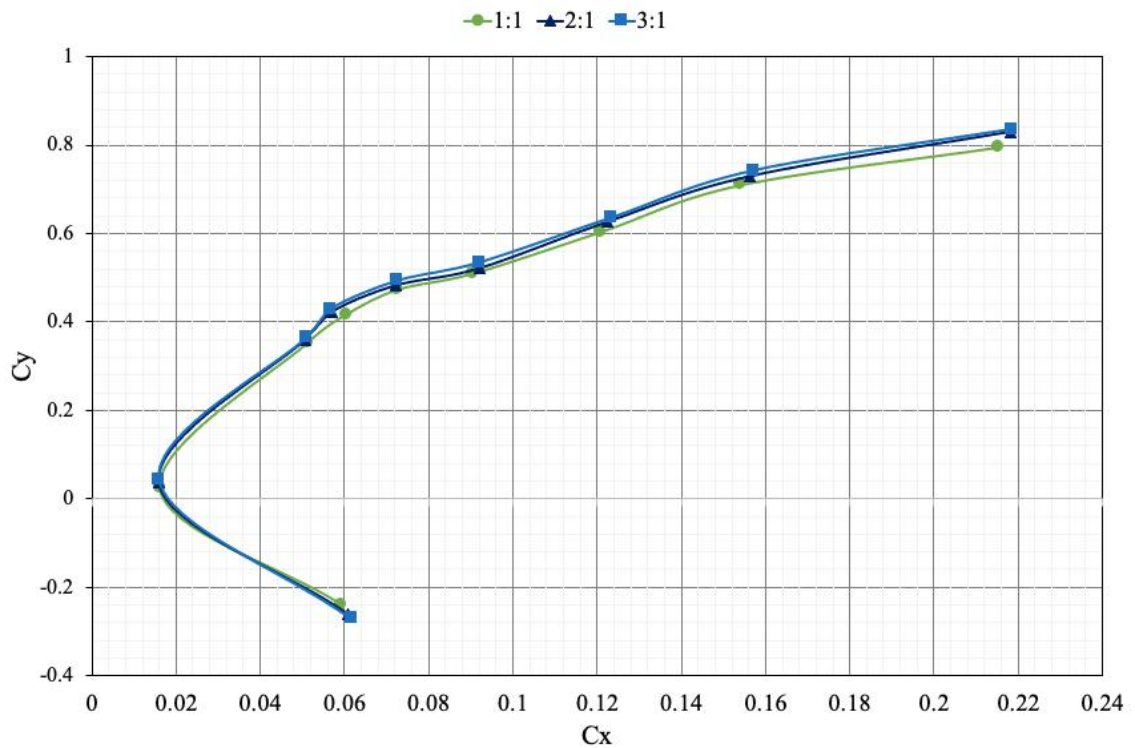


Рисунок 4.11 Полярна I роду при швидкості 100 км/год в SOLIDWORKS

4.3 Розрахунок геометрично подібних БПС на швидкості 120 км/год

Для швидкості налігаючого потоку 120 км/год результат розрахунку аеродинамічних характеристик трьох геометрично подібних БПС в Ansysзведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Результат розрахунку аеродинамічних характеристик подібних БПС на швидкості 120 км/год

Кут атаки, α	C_y	C_x	K
Масштаб 1:1			
-5	-0.5423	0.0300	-18.0533
0	0.0429	0.0120	3.5720
5	0.6494	0.0265	24.5160
10	1.2169	0.0721	16.8800
15	1.7167	0.1736	9.8884
Масштаб 2:1			
-5	-0.5437	0.0299	-18.1829
0	0.0467	0.0114	4.1109
5	0.6215	0.0244	25.4930
10	1.2197	0.0720	16.9479
15	1.5409	0.1719	8.9627
Масштаб 3:1			
-5	-0.5430	0.0300	-18.1054
0	0.0375	0.0102	3.6618
5	0.6457	0.0260	24.8648

Продовження табл. 4.4

10	1.2266	0.0715	17.1574
15	1.7114	0.1663	10.2892

Графіки залежності підйомної сили від кута атаки та аеродинамічної якості від кута атаки при розглядуваній швидкості набігаючого потоку показані на рис. 4.12-4.13. На рис. 4.14 наведена отримана поляра І роду.

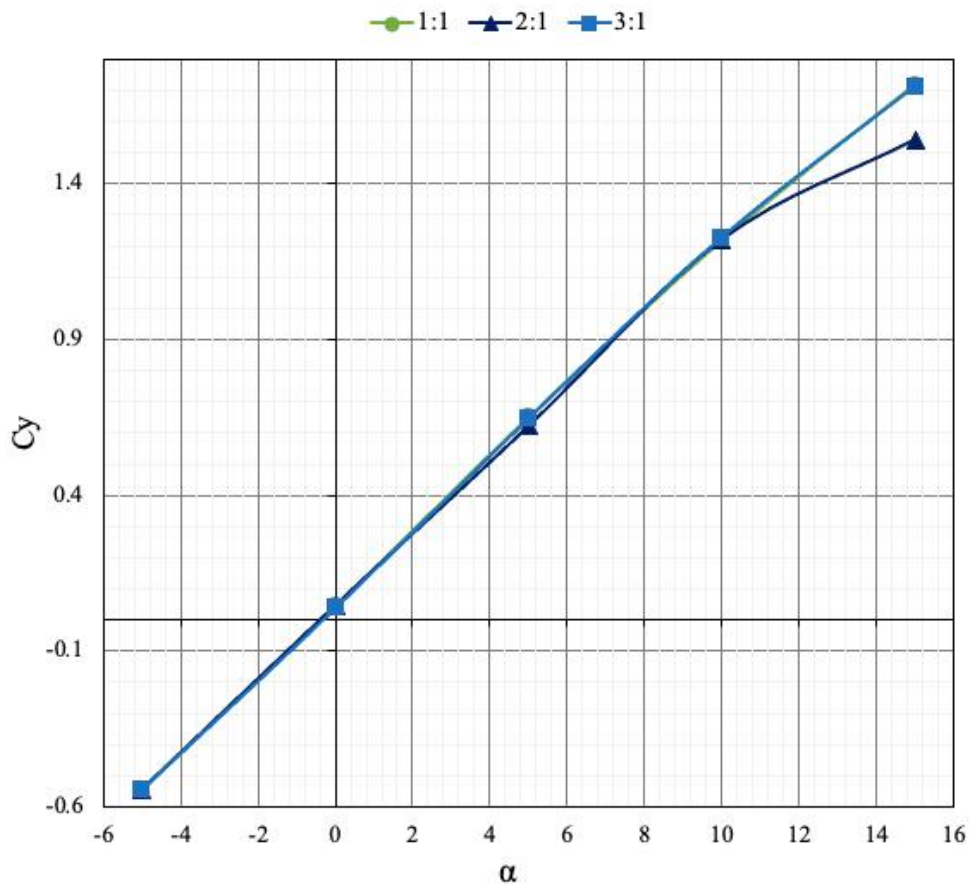


Рисунок 4.12 Графік залежності коефіцієнта підйомної сили (C_y) від кута атаки (α) при швидкості 120 км/год

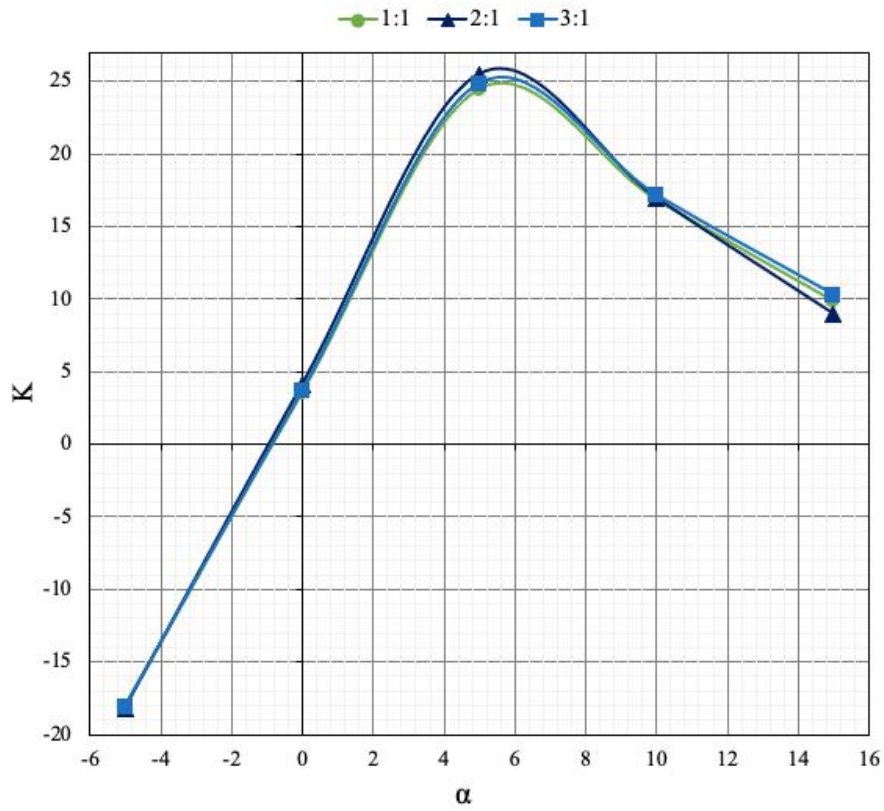
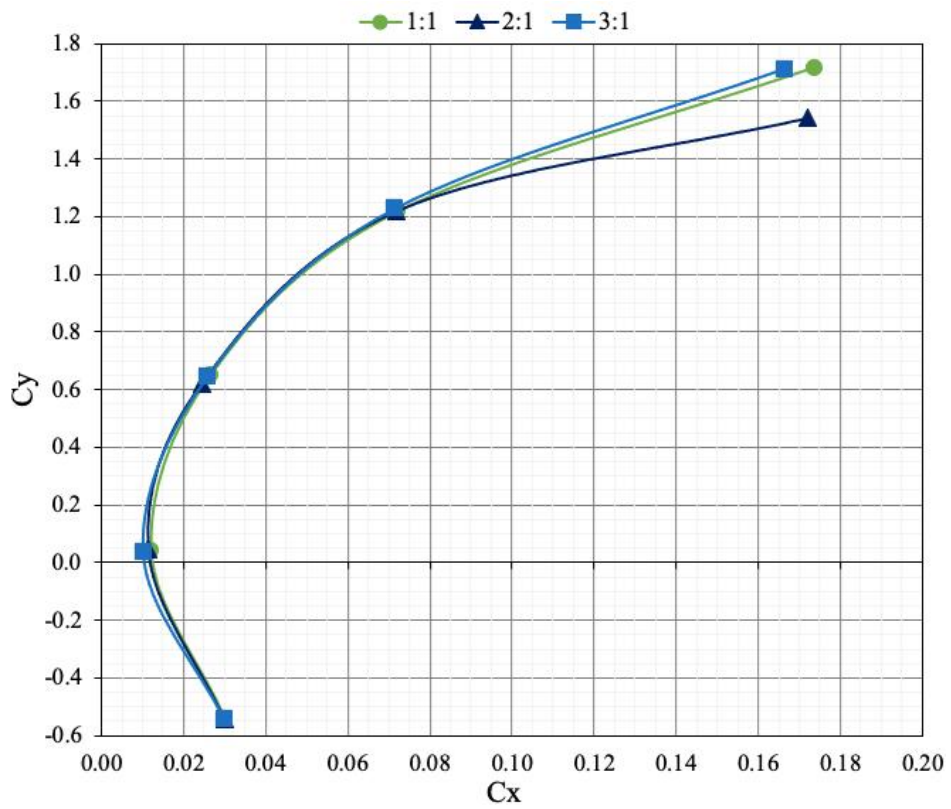


Рисунок 4.13 Графік залежності аеродинамічної якості (K) від кута атаки (α) при

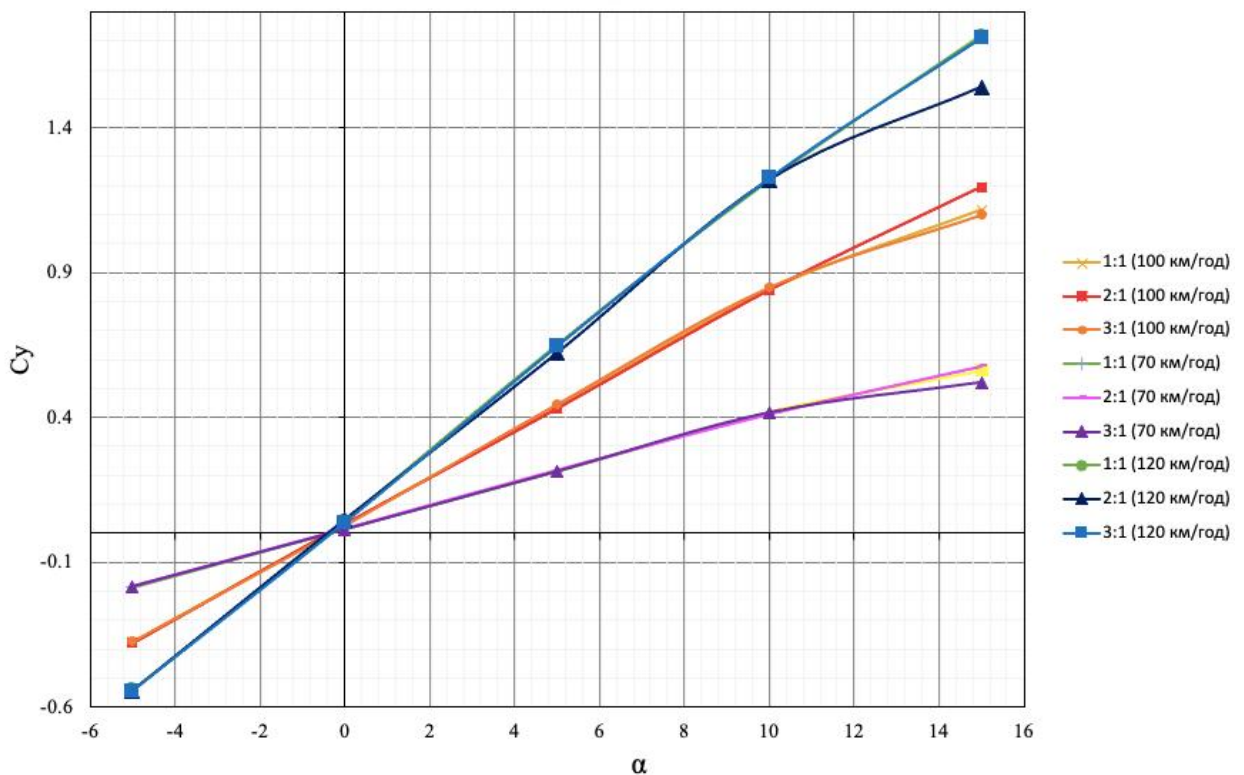


швидкості 120 км/год

Рисунок 4.14 Поляра І роду при швидкості 120 км/год

4.4 Аналіз та порівняння отриманих результатів

В результаті аналізу характеру впливу зміни масштабу на аеродинамічні характеристики, встановлено, що в діапазоні зміни кута атаки від -5° до 15° коефіцієнти підйомної сили практично не змінюються. На рис. 4.15 зведено залежність коефіцієнту підйомної сили (C_y) від кута атаки (α) для геометрично



подібних моделей в трьох масштабах при трьох швидкостях набігаючого потоку.

Рисунок 4.15 Залежність коефіцієнту підйомної сили (C_y) від кута атаки (α)

Також в ході аналізу отриманих поляр І роду було виявлено, що характер зміни аеродинамічних характеристик при збільшенні лінійних розмірів є пропорційним (рис. 4.16). Разом з цим, після побудови графіку залежності показника аеродинамічної якості (K) від кута атаки (α) виявлено, що при

збільшенні масштабу подібних моделей відбувається незначне збільшення оптимального кута атаки.

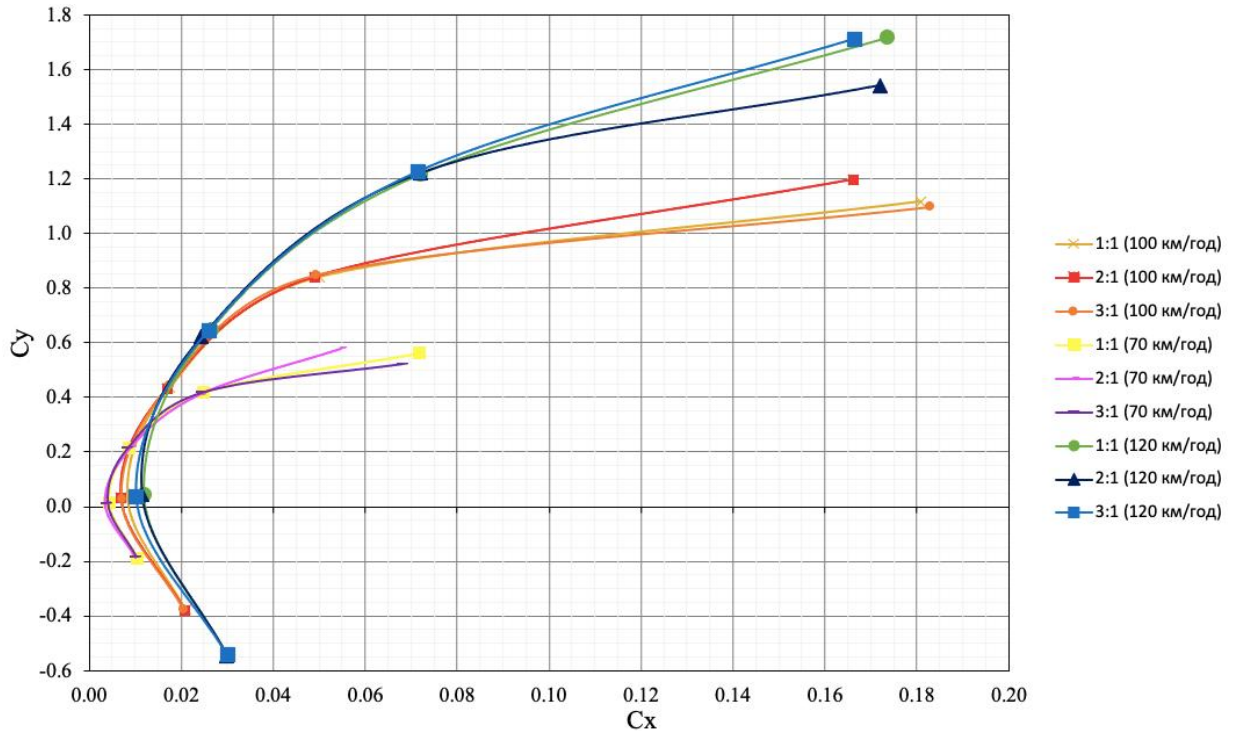


Рисунок 4.16 Поляри I роду при

Висновки по розділу

В розділі приведені результати розрахунку аеродинамічних характеристик трьох геометрично подібних моделей в трьох масштабах для трьох швидкостей набігаючого потоку, а саме для 70 км/год, 100 км/год та 120 км/год. Розрахунок коефіцієнтів підйомної сили (C_y), коефіцієнтів лобового опору (C_x) та аеродинамічної якості дозволив визначити залежність зазначених параметрів від кута атаки та побудувати поляри I роду. Виявлено вплив збільшення лінійних розмірів в дві ітерації на аеродинамічні характеристики.

Отримані результати розрахунку можуть мати практичне застосування при підборі геометричних параметрів БПС згідно з необхідними тактико-технічними параметрами, адже розглянутий підхід масштабування дозволяє оптимізувати час на розробку і дослідження нових БПС.

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЛАНЕРУ БПС

Впровадження провідних розробок при проектуванні БПС забезпечує їх надійність, ефективність, універсальність та значно менший ризик для життя людини у порівнянні з системами, що пілотуються. Разом з цим, аеродинамічні, вагові та міцнісні характеристики, а також ефективність застосування, помітність при польоті та вартість виготовлення істотно залежать від аеродинамічної схеми БПС та його габаритно-вагових параметрів.

Для вирішення різноманітних виробничих задач, таких як виготовлення малих нетипових деталей або ж виготовлення великогабаритних виробів часто застосовується вакуумне формування. Сутність такого виду формування полягає в тому, що на оснастку викладають армуючий та зв'язуючий матеріали, накривають еластичною діафрагмою і за допомогою вакуумного насосу створюють тиск [33]. Завдяки дії тиску, шари композиційного матеріалу ущільнюються, витісняючи залишки зв'язуючого матеріалу та повітря.

Популярність вакуумного формування обґрунтовується такими перевагами:

- висока якість ламінату завдяки ущільненню тиском та відсутності порожнеч;
- видалення надлишкової кількості зв'язуючого матеріалу під час вакуумування;
- можливість виготовлення тонкостінних виробів.

Також слід зазначити, що виготовлення виробів методом вакуумного формування дозволяє отримати точність контуру в межах 0.5 мм.

Разом з цим, при виборі такого способу формування слід враховувати такі недоліки:

- більша вартість виготовлення виробу у порівнянні з ручним формуванням;
- багатоетапність і тривалість процесу;

- необхідність подальшої механічної обробки виробу.

Розглядаючи виготовлення БПС схеми «літаюче крило», конструкційні особливості яких вимагають використання аеродинамічних профілів із подвійною кривизною з точкою перегину [34], можна виділити складність технологічного процесу їх виготовлення при використанні алюмінію. В той же час, застосування композиційних матеріалів дозволяє отримати складну аеродинамічну форму, при цьому з мінімальною кількістю стиків.

З огляду на зазначені переваги для виготовлення експериментальної моделі БПС схеми «літаюче крило» було обрано спосіб вакуумного формування.

5.1 Виготовлення елементів БПС

Для виготовлення елементів планеру БПС було використано матриці відповідної форми та конфігурації згідно з виконаним попередньо технологічним членуванням планеру БПС, а саме:

- суцільна матриця нижньої частини центроплану, лівої та правої консолей крила;
- матриця верхньої частини правої консолі крила;
- матриця верхньої частини лівої консолі крила;
- матриця верхньої частини фюзеляжу;
- матриці вінглетів.

В наступних підрозділах буде розглянуто послідовність формування верхньої частини лівої консолі крила, згідно з якою було виготовлено всі елементи планеру.

5.1.1 Попередня підготовка матриці

Перед початком формування виробу робоча поверхні матриці була відшліфована з використанням водостійкого шліфувального паперу, змоченого водою. Зернистість при цьому збільшувалась від P500 до P1500 з метою досягнення високоякісної поверхні виробу. Після цього поверхню матриці було знежирено з використанням етилацетату.

За добу до формування на поверхню оснастки було нанесено антиадгезійну розділову суміш для форм зі склопластику. Така суміш створює довготривалий шар на поверхні матриці і забезпечує легке зняття готового виробу після полімеризації зв'язуючого матеріалу. Круговими рухами було нанесено рівномірний тонкий шар антиадгезійної суміші. Після повного висихання нанесеного шару, його було розполіровано за допомогою чистої абсорбуючої тканини.

Загалом на поверхню матриці було нанесено сім шарів антиадгезійної суміші з інтервалом 15 хвилин між кожним шаром.

5.1.2 Розкрий армуючого матеріалу та матеріалів вакуумного формування

Відповідно до геометричних параметрів обраного БПС і з врахуванням необхідного припуску було зроблено розкрий армуючого матеріалу, а саме конструкційної склотканини (рис. 5.1). Після цього, з більшим припуском було підготовлено розкрий розділової перфорованої плівки та дренажного шару, а з меншим припуском – конструкційного пінопласту для сендвіч-конструкцій (рис. 5.2).

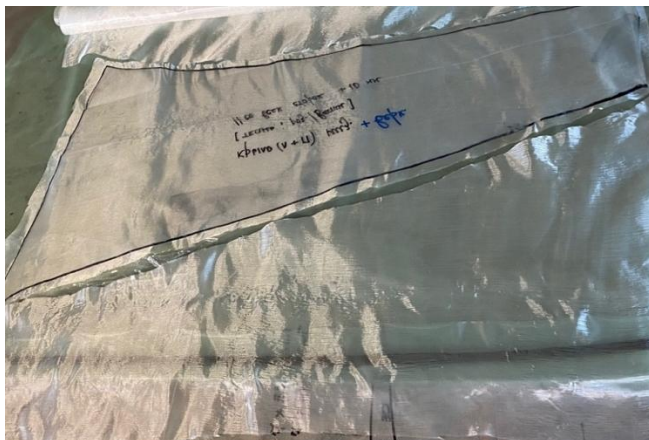


Рисунок 5.1 Розкрий конструкційної склотканини верхньої частини лівої консолі крила

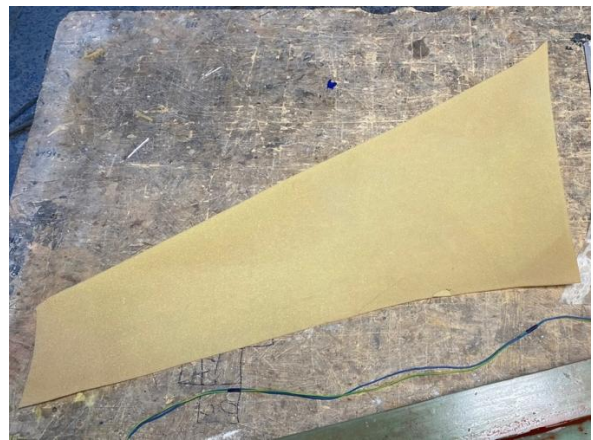


Рисунок 5.2 Розкрий конструкційного пінопласту

Далі згідно з розмірами оснастки було підготовлено вакуумний пакет шляхом нанесення герметизуючої бутилової стрічки по контуру вакуумної плівки та в місці розташування вакуумного штуцера.

5.1.3 Підготовка зв'язуючої суміші та викладка нижнього шару пакету

Для формування виробу застосувалась епоксидна смола, перевагами якої є мала усадка, висока міцність, стійкість до зношування та висока адгезія. Безпосередньо перед формуванням було ретельно змішано необхідну кількість смоляної частини (компонент А) та затверджувача (компонент Б) у співвідношенні 100:40. Орієнтовний час затверджування застосовуваної смоли становить близько п'яти годин.

Після підготовки зв'язуючого матеріалу на поверхню матриці було викладено один шар конструкційної склотканини. Після заповнення правильності викладки та розгладжування складок, склотканину було просочено смолою за допомогою пензля та гумового шпателью. Поступовими рухами шпателью від центру до країв виробу було прибрано надлишкову кількість зв'язуючого матеріалу та розгладжено складки (рис. 5.3-5.4).



Рисунок 5.3 Викладка першого шару конструкційної склотканини



Рисунок 5.4 Просочення склотканини смолою

Далі на окремій поверхні епоксидною сумішшю за допомогою пензля було просочено попередньо підготовлений лист конструкційного пінопласту (рис. 5.5). Нанесення зв'язуючого матеріалу здійснювалось на одну сторону листа, а саме того, що прилягає до викладеної в формі склотканини.



Рисунок 5.5 Просочення пінопласту епоксидною смолою

Після вкладення пінопласту в оснастку і контролю правильності його викладення (рис. 5.6), його було закріплено за допомогою паперового скотчу (рис. 5.7).

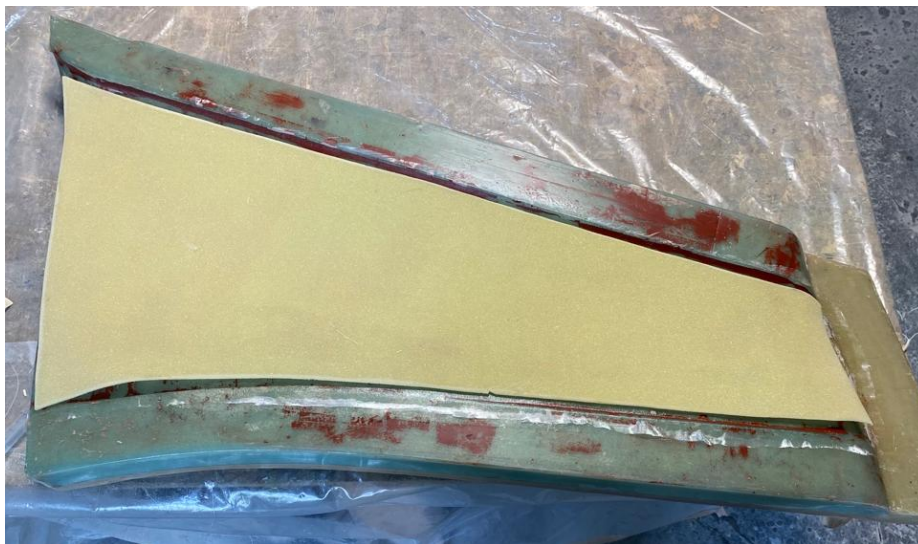


Рисунок 5.6 Викладка конструкційного пінопласту

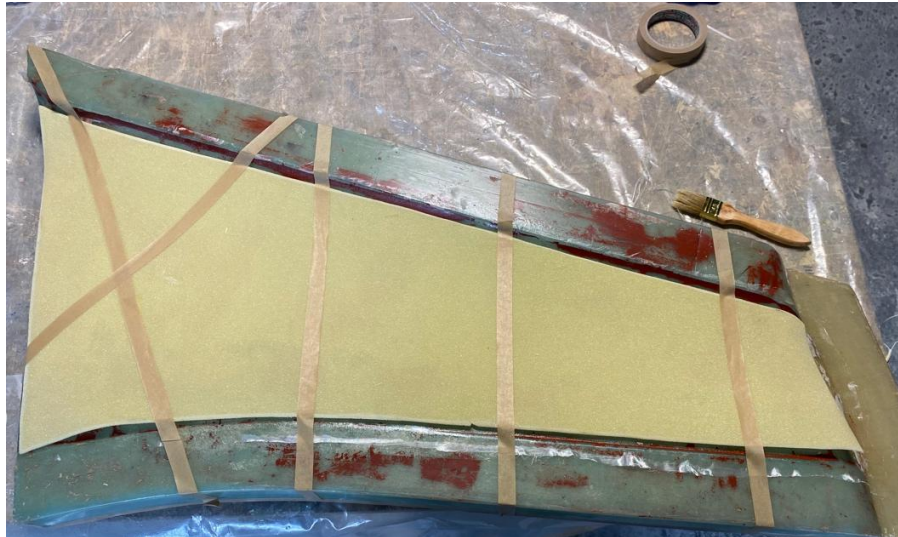


Рисунок 5.7 Фіксація пінопласту в матриці

Фіксацію листа пінопласту в матриці за допомогою паперового скотчу зроблено задля того, аби при вакуумуванні він не змінив своє розташування в оснастці.

5.1.4 Вакуумування та полімеризація

На викладений пакет зі склотканини та пінопласту рівномірно викладено розділову перфоровану плівку (рис. 5.8). Така плівка використовується для відведення надлишків зв'язуючого матеріалу, при цьому створюючи розділовий шар для відділення виробу від дренажного шару після полімеризації зв'язуючого матеріалу.



Рисунок 5.8 Викладення розділової перфорованої плівки

Далі було викладено дренажний шар, метою використання якого є поглинання надлишкової кількості зв'язуючого матеріалу через отвори розділової перфорованої плівки, а також створення додаткового навантаження на виріб в



процесі вакуумування (рис. 5.9).

Рисунок 5.9 Викладення дренажного шару

Після викладення всіх шарів, матрицю було вкрито у попередньо підготовлений вакуумний пакет із герметизуючою бутиловою стрічкою по краях (рис. 5.10).



Рисунок 5.10 Розміщення оснастки у вакуумному пакеті

Перед герметизацією пакету, на верхній поверхні робиться невеликий отвір і встановлюється вакуумний штуцер, який за допомогою вакуумної трубки буде під'єднано до вакуумного насосу.

Після цього здійснюється вакуумування. Для описаного виробу було задано вакуумування в межах -1 атм. Вакуумування виробу відбувається протягом доби з періодичним контролем герметичності пакету. Для кращої полімеризації зв'язуючого матеріалу протягом перших п'яти годин після герметизації матриця поміщається в піч (рис. 5.11-5.12).



Рисунок 5.11 Вакуумний штуцер **Рисунок 5.12** Вакуумування виробу

Результат витримки описаного пакету під тиском вакууму показано на рис.



5.13.

Рисунок 5.13 Виріб після дії вакууму

5.1.5 Формування верхнього шару пакету

Далі шліфувальним папером із зернистістю Р500 було оброблено краї консолі для створення адгезії з верхнім шаром конструкційної склотканини під час наступної полімеризації.

Після розведення епоксидної смоли по краях верхньої частини лівої консолі було приформовано попередньо вирізані стрічки конструкційної склотканини за допомогою пензля для просочення та гумового шпателью для видалення залишків епоксидної смоли (рис. 5.14-5.15).

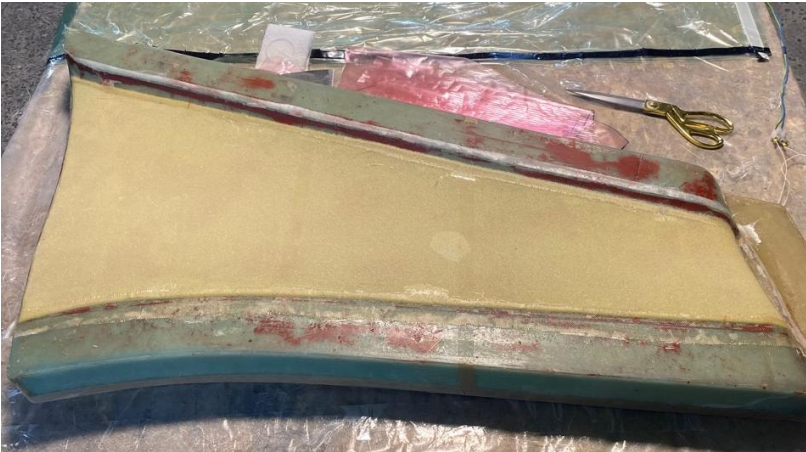


Рисунок 5.14 Викладення склотканини по краях верхньої консолі крила



Рисунок 5.15 Просочення склотканини

Наступним кроком було змащення пінопласту зв'язуючим матеріалом за допомогою пензля (рис. 5.16).

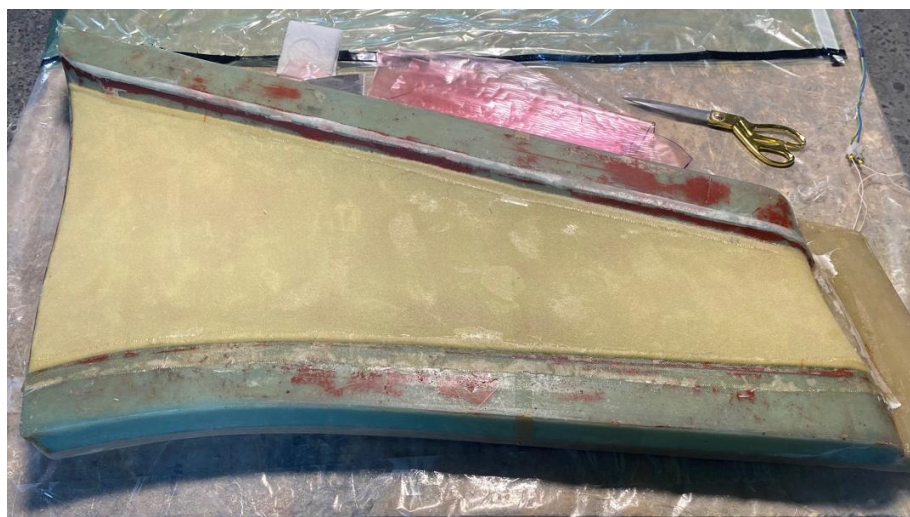


Рисунок 5.16 Просочення пінопласту зв'язуючим матеріалом

Після цього на змащений епоксидною смолою пінопласт було рівномірно викладено підготовлений на етапі розкрою шар конструкційної склотканини і просочено з використанням пензлю та шпателью (рис. 5.17).



Рисунок 5.17 Викладка верхнього шару склотканини

Після викладення склоканини і усунення надлишків зв'язуючого матеріалу, на поверхню було викладену розділову перфоровану плівку та дренажний шар, після чого оснастку покладено в вакуумний пакет та герметизовано під тиском близько 1 атм протягом однієї доби.

Результат вакуумного формування верхньої частини лівої консолі крила після зняття з матриці показано на рис. 5.18.



Рисунок 5.18 Результат вакуумного формування верхньої частини лівої консолі крила БПС

Описаний в цьому підрозділі алгоритм формування виробу застосувався також для таких елементів планеру БПС, як верхня частина правої консолі крила, верхня частина центроплану, вінглети та нижня частина центроплану.

5.2 Збірка елементів планеру

Після здійснення механічної обробки всіх елементів планеру, його збірка здійснювалась із використанням епоксидного клею та оснасток у наступній послідовності:

- склеювання нижньої частини планеру з верхньою частиною центроплану;



- виготовлення переборок центроплану (рис. 5.19);

Рисунок 5.19 Переборки центроплану

- формування лонжеронів крила за допомогою конструкційного пінопласту та



їх заповнення (рис. 5.20);

Рисунок 5.20 Розміщення стінок з конструкційного пінопласту

- склеювання нижньої частини планеру з верхньою частиною правої консолі крила;
- склеювання нижньої частини планеру з верхньою частиною лівої консолі крила (рис. 5.21);



Рисунок 5.21 Склеювання нижньої частини планеру з верхньою частиною лівої консолі крила

- усунення стиків в зонах склеювання за допомогою епоксидної шпаклівки (рис. 5.22);



Рисунок 5.22 Шпаклювання стиків в зонах склеювання

- встановлення переборки під двигун в хвостовій частині центроплану (рис. 5.23);



Рисунок 5.23 Хвостова переборка для встановлення двигуна

Результат роботи, яка полягала в виготовленні та збірці планеру БПС схеми «літаюче крило» з композиційних матеріалів показано на рис. 5.24.



Рисунок 5.24 Виготовлений під час проходження переддипломної практики планер БПС схеми «літаюче крило»

Із використанням відповідного обладнання визначено, що точність контуру знаходиться в межах 0.5 мм. Вага виготовленого планеру без обладнання становить 1600 г.

Висновки по розділу

В розділі розглянуто основні переваги та недоліки вакуумного формування. З огляду на наведені переваги, зазначено, що такий спосіб формування дозволяє одержати високоміцний планер складної геометричної форми експериментальної моделі БПС схеми «літаюче крило» для проведення подальших випробувань.

Описано процес виробництва елементів планеру БПС схеми «літаюче крило» з композиційних матеріалів на прикладі верхньої частини лівої консолі крила, а також представлено послідовність та результат складання виготовлених елементів. Завдяки застосуванню способу вакуумного формування у виробі досягнуто точність контуру, що знаходиться в межах 0.5 мм.

РОЗДІЛ 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МОДЕЛЬ БПС

Розробка експериментальної моделі БПС як правило вимагає підбору обладнання відповідно до мети та завдань дослідження. Дослідні моделі БПС можуть бути обладнані різноманітними датчиками, радіолокаційними станціями, системами безпеки та камерами, але основними компонентами бортового обладнання зазвичай є [35]:

- автопілот;
- устаткування телеметрії;
- приймач сигналу пульта керування;
- навігаційне обладнання, інерційні системи;
- двигун;
- регулятор ходу двигуна;
- модуль живлення;
- акумулятор;
- сервоприводи;
- датчик повітряної швидкості;
- компас.

До основних компонентів, що входять до складу наземної станції, відносять комп'ютер із встановленим програмним забезпеченням для управління БПС (Mission Planner, INAV), пульт керування, антени та приймачі сигналу.

При виборі компонентів бортового обладнання для здійснення експериментальних досліджень базової моделі БПС схеми «літаюче крило», були враховані такі вимоги:

- Злітна вага – до 4 кг;
- Швидкість польоту – 70 км/год;

- Тривалість польоту –до 20 хв;
- Виконання польоту у ручному режимі;
- Виконання польоту по точках;
- Повернення у початкову точку в разі помилки або втрати сигналу.

Зважаючи на зазначені вимоги для проведення експериментальних досліджень БПС, було сформовано схему бортового обладнання (рис. 6.1).

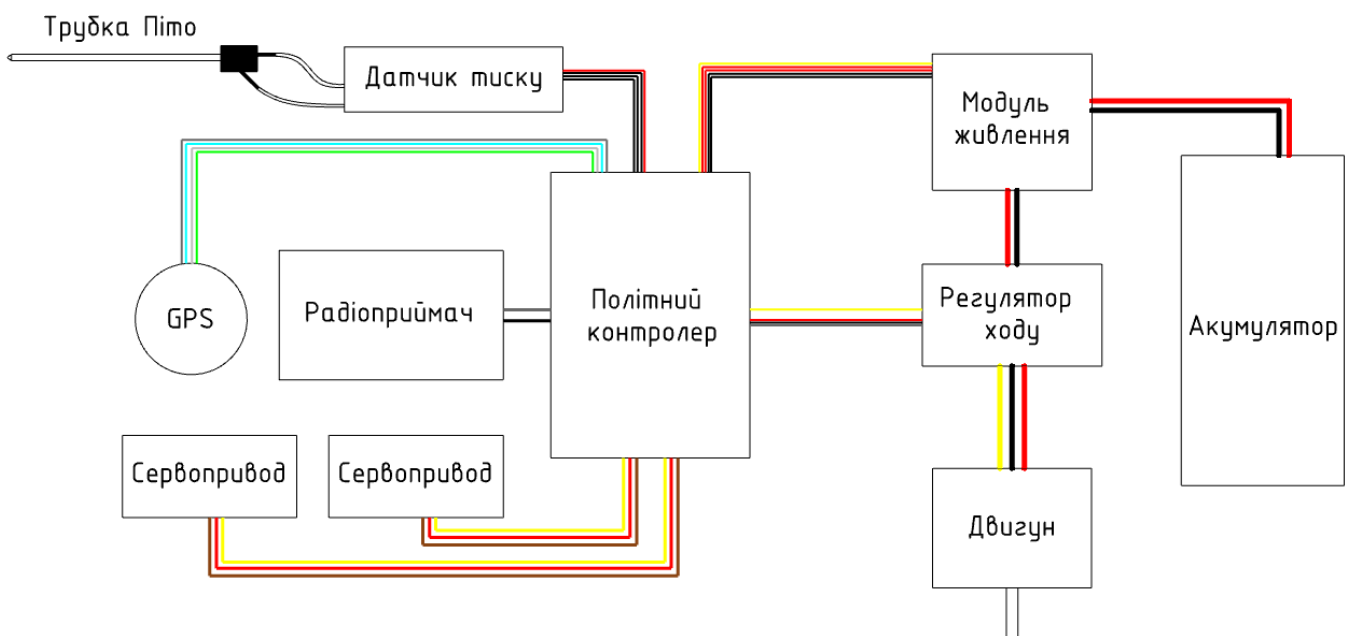
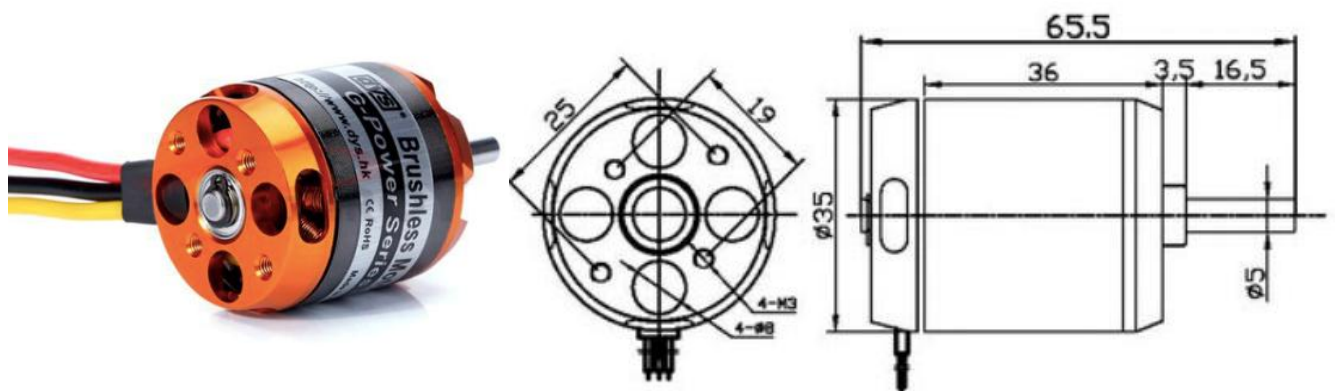


Рисунок 6.1 Схема бортового обладнання експериментальної моделі БПС

Обрана схема за своїми функціональними можливостями повною мірою відповідає вимогам проведення льотних випробувань.

Із врахуванням масово-геометричних параметрів БПС та задач льотних випробувань, для силової установки було обрано безколекторний



електродвигун DYS D3548/4 (рис. 6.2), основні характеристики якого зведено в табл. 6.1 [36].

Рисунок 6.2 Безколекторний двигун DYS D3548/4

Таблиця 6.1

Основні характеристики DYS D3548/4

Параметр	Значення
Максимальна тяга, г	2150
Максимальна потужність, Вт	910
Максимальне навантаження по струму, А	70
Співвідношення обертів двигуна до Вольт (KV)	1100
Розмір, мм	35x48
Вага, г	156

З метою оптимізації характеристик польоту, зручності транспортування та запуску, обрано гвинт зі складними лопатями. Геометричні параметри обраних лопатей (рис. 6.3) приведені в табл. 6.2 [37].



Рисунок 6.3 Лопаті Aeronaut CAM Carbon 12x6.5

Таблиця 6.2

Характеристиклопатей Aeronaut CAM Carbon 12x6.5

Параметр	Значення
Діаметр, мм	317.5
Крок, мм	165.1
Матеріал	Нейлон та карбон

Кріплення гвинта	Хаб
Напрямок оберт	CCW

Для керування обертами обраного двигуна обрано електронний регулятор ходу HobbyWing Flyfun-80A (рис. 6.4), конфігурації якого зведені в табл. 6.3



[38].

Рисунок 6.4 Регулятор ходу HobbyWing Flyfun-80A

Таблиця 6.3

Характеристики регулятора ходу HobbyWing Flyfun-80A

Параметр	Значення
Тип	Безколекторний
Номінальний струм, А	80
Піковий струм, А	100
Охолодження	пасивне
Розмір, мм	69.8x34.6x19.2
Вага, г	92

Після підбору всіх елементів бортового обладнання, було виконано їх встановлення в корпус планеру, балансування БПС та налаштування (рис. 6.5).

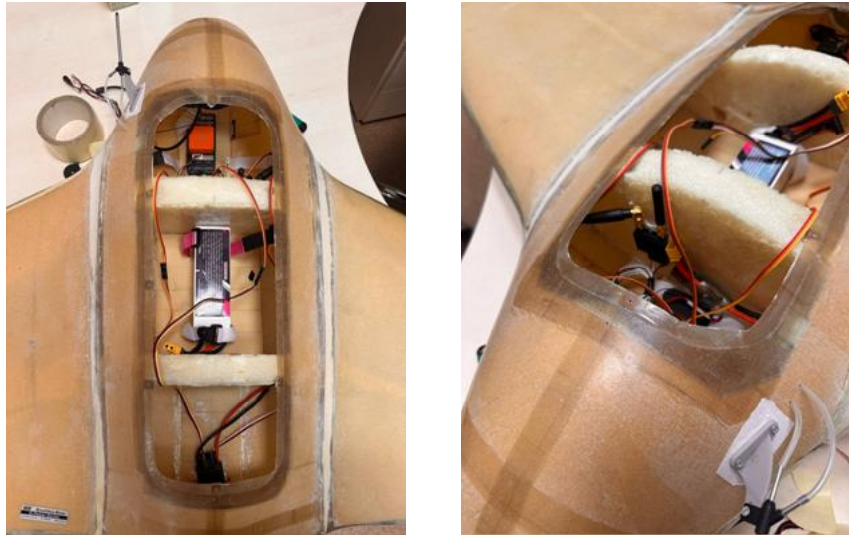


Рисунок 6.5 Бортове обладнання експериментальної моделі БПС

Правильність підбору та установки компонентів силової установки була підтверджена апробацією двигуна закріпленого БПС (рис. 6.6).

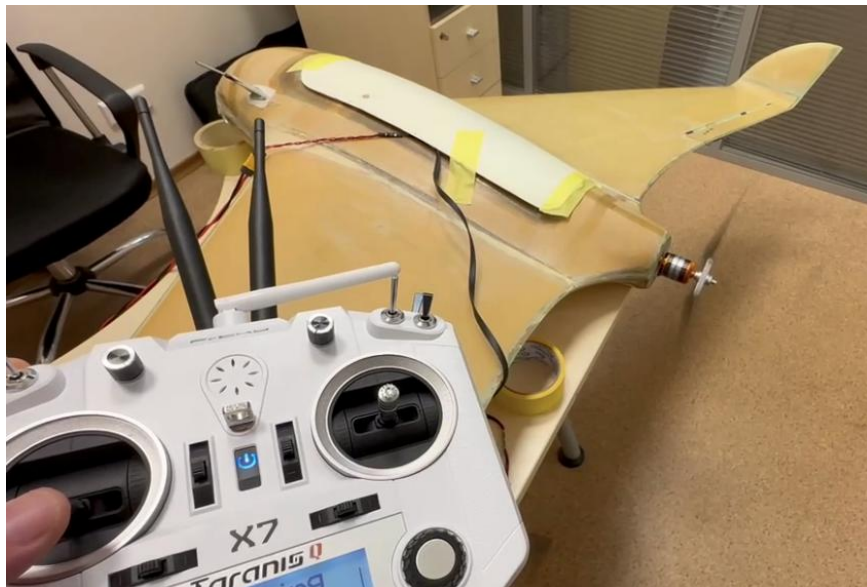


Рисунок 6.6 Перевірка роботи бортового обладнання

Оскільки обраний в якості прототипу Skywalker X8 передбачає запуск як з катапульти, так і з руки, для проведення експериментальних досліджень було обрано спосіб зльоту з руки. Перевагою такого способу є мобільність та швидкість процесу, а також можливість запуску з невідповідної ділянки. Натомість при виборі цього способу запуску важливим є врахування таких

недоліків, як неточність умов зльоту та ризик травмування оператора, особливо у випадках великої злітної маси або неправильного збалансованого БПС.

Таким чином, базова модель БПС є повністю укомплектованою та готовою до проведення подальших льотних випробувань.

Висновки по розділу

В розділі представлено схему бортового обладнання експериментальної моделі БПС схеми «літаюче крило», сформованої для виконання польоту у ручному режимі та по заданих точках. В ході оснащення БПС встановлено та налаштовано обрану електроніку, здійснено балансування моделі.

З метою передпольотної перевірки правильності підбору, підключення налаштування обладнання, БПС було закріплено та здійснено запуск двигуна. В результаті цього визначено готовність БПС до проведення подальших льотних випробувань.

РОЗДІЛ 7 СТАРТАП-ПРОЕКТ

7.1 Опис ідеї проекту

Сучасні БПС вже довели свою ефективність та незамінність в багатьох галузях і сьогодні є одним з найперспективніших напрямків розвитку техніки. Різноманітність типів та сфер застосування є складовою стрімкого прогресу в розвитку безпілотної авіації. Для виконання завдань необхідно мати БПС відповідного класу з належними габаритно-ваговими характеристиками. Саме тому ідея стартап-проекту полягає в розробці БПС схеми «літаюче крило» з можливістю модифікації його геометричних параметрів задля досягнення визначених замовником тактико-технічних характеристик. В табл. 7.1 визначено основну ідею проекту.

Таблиця 7.1

Ідея стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка БПС схеми «літаюче крило» з можливістю модифікації геометричних параметрів відповідно до визначених замовником ТТХ	1. Цивільне використання (використання в картографії, геодезії, агросекторі, а також при аерофото- та відеозйомці)	Досягнення більшої універсальності БПС не тільки в межах одного класу, а й в межах однієї моделі, що при використанні не потребує додаткового кваліфікації пілота.
	2. Військова галузь (для здійснення розвідки, координації вогню артилерії, здійснення високоточних атак тощо)	Задоволення потреби замовника у потрібних тактико-технічних характеристиках, як, наприклад, маса корисного навантаження, за рахунок геометричних параметрів БПС.

Після визначення основної ідеї стартап-проекту, були визначені основні техніко-економічні переваги проекту, основні конкурентні концепції та в ході порівняння з'ясовані основні слабкі, нейтральні та сильні властивості запропонованого стартап-проекту. Результат аналізу зведено в табл. 7.2.

Таблиця 7.2

Сильні, слабкі та нейтральні характеристики ідеї проекту

Техніко-економічні властивості ідеї	Запропонована ідея	Концепції конкурентів		W (слабкі)	N (нейтральні)	S (сильні)
		«Атлон Авія»	«Авіаційні системи України»			
Варіативність типорозмірів	Є	Немає	Немає			+
Можливість вибору аеродинамічної схеми	Немає	Є	Немає	+		
Розбірна конструкція БПС	Ні	Так	Ні		+	
Варіативність застосування	Так	Так	Ні			+

Проведений аналіз сильних, слабких та нейтральних властивостей стартап-проекту зі створення лінійки БПС схеми «літаюче крило» різних типорозмірів шляхом порівняння з науково-виробничим підприємством «Атлон Авія», яка є виробником АІ-СМ «Фурія» та компанією «Авіаційні системи України», що розробила АСУ-1 «Валькірія» доводить, що запропонована ідея є конкурентоспроможною.

7.2 Технологічний аудит проекту

З метою визначення спроможності проекту до технологічної реалізації, є необхідним проведення технологічного аудиту, в межах якого зводяться необхідні для реалізації технології та оцінюється їх доступність (табл. 7.3).

Таблиця 7.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Технології реалізації ідеї	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Виготовлення БПС з КМ	Наявна та апробована	Доступна
2	Виготовлення БПС з алюмінію	Потребує розробки технологічного процесу	Недоступна
3	Виготовлення БПС з пінопласту	Потребує розробки технологічного процесу	Доступна

Обрана технологія реалізації ідеї проекту: з огляду на проведений аналіз, доцільним є виготовлення БПС з композиційних матеріалів, оскільки саме для цієї технології реалізації розроблено технологічний процес виготовлення планеру та визначено фізичні властивості матеріал.

7.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

З метою успішного впровадження стартап-проекту в ринкове середовище, обов'язковим є аналіз ринку, потреб цільової аудиторії та конкурентної ситуації. Для цього проводиться оцінка попиту (табл. 7.4).

Таблиця 7.4

Характеристика потенційного ринкового середовища стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Понад 100

Продовження табл. 7.4

2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	-
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Складний порядок допуску БПС до експлуатації. Складна схема отримання дозвільної експортної документації для товарів військового та подвійного призначення (обладнання БПС, матеріали).
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідність отримання відповідних дозволів для БПС злітною вагою більше 20 кг
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	-

За попередньою оцінкою на основі доступних для аналізу даних визначено, що входження в ринкове середовище є перспективним для запропонованого стартап-проекту.

Далі визначаються характеристика потенційної цільової аудиторії та вимоги для концепції стартап-проекту (табл. 7.5).

Таблиця 7.5

Характеристика потенційної цільової аудиторії стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова група	Орієнтованість потенційних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
Адаптивність БПС під задані потреби	Оборонні організації	Орієнтація на ЛТХ БПС, час розгортання з	Можливість ремонту в польових умовах. БПС має бути

		транспортного положення, радіопомітність, ціна.	швидким та мобільним.
	Сільськогосподарські підприємства	Орієнтація на масу корисного навантаження, тривалість польоту, співвідношення ціни та якості.	БПС має бути добре керованим, надійним та енергоефективним. Гарантійне обслуговування.
Можливість БПС забезпечувати високоякісну зйомку	Картографічні та геодезичні установи. Аварійно-рятувальні служби.	Орієнтація на технічні можливості існуючих БПС, що використовуються для аерофото- та відеозйомки, зручність експлуатації, ціна.	Можливість зависання, висока якість зображення, передача відеозв'язку в режимі реального часу з можливістю запису. Гарантійне обслуговування.

Наступним етапом є аналіз факторів, які перешкоджають успішному виходу концепції на ринок (табл. 7.6) та які цьому сприяють (табл. 7.7).

Таблиця 7.6

Фактори загроз

№ п/п	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Витік технічних особливостей БПС, що вирізняють його від конкурентних аналогів.	Впровадження заходів протидії витоку інформації.
2	Брак необхідної кількості кваліфікованих робітників.	Розробка програми навчання некваліфікованого персоналу.
3	Неплатоспроможність інвестора-	Організація PR-кампанії задля збільшення попиту, а отже,

	замовника/інфляція/зміна валютних курсів	рентабельності проекту. Пошук клієнтів на міжнародному ринку.
4	Перевищення бюджету/подовження запланованих термінів реалізації проекту	Оптимізація витрат, завчасний аналіз причинно-наслідкових зв'язків різних факторів з можливими проблемами та наслідками задля можливого виявлення та уникнення проблем в ході реалізації проекту.
5	Надання постачальниками неякісних матеріалів	Інспекція застосовуваних при виробництві матеріалів. Наявність декількох постачальників.

Таблиця 7.7

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Можлива реакція компанії
1	Зростаючий попит на БПС	Підвищення функціональності БПС, розширення можливих типорозмірів.
2	Забезпечення якості виконання БПС	Проведення інспекції якості застосовуваних при виробництві матеріалів та дотримання робітниками технології виготовлення БПС. Контроль якості комплектуючих деталей та вузлів БПС. Використання високоякісних матеріалів.
3	Розширення цільової аудиторії	Адаптація концепції під потреби іноземних користувачів. Залучення нових технологій.

Продовження табл.7.7

4	Ефективна PR-кампанія	Участь у виставкових заходах відповідного спрямування. Залучення кваліфікованих маркетологів.
---	-----------------------	--

Після визначення факторів можливостей та загроз стартап-проекту, виконується аналіз особливостей конкурентного середовища (табл. 7.8).

Таблиця 7.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	Прояв характеристики	Вплив на діяльність
1. Тип конкуренції – вільна конкуренція.	Можливість конкурентів-виробників вільно брати участь в економічній діяльності за цим напрямком	Впровадження нових технологій, вдосконалення якості БПС з метою покращення конкурентоспроможності.
2. Рівень конкурентної боротьби – міжнародний.	Наявність як українських виробників БПС, так і імпортерів.	Поширення концепції на міжнародному ринковому середовищі.
3. Галузева ознака – внутрішньогалузева.	Конкуренція між виробниками однієї галузі економіки.	Вдосконалення конструкції та систем БПС.
4. За видом товарів – товарно-видова конкуренція.	Концепція товару задовольняє потребу споживача.	Покращення функціональності та універсальності застосування БПС.
5. Характер конкурентних переваг – нецінова.	Користувач орієнтується більше на на ЛТХ БПС, в той час як ціна не є визначальною при виборі.	Інноваційне вдосконалення з метою забезпечення конкурентної переваги.

Продовження табл. 7.8

6. Інтенсивність – немарочна.	Роль торгівельної марки не є визначною.	Впровадження маркетингових стратегій.
-------------------------------	---	---------------------------------------

В табл. 7.9 зведений результат аналізу конкуренції в галузі розробки БПС схеми «літаюче крило» за М. Портером.

Таблиця 7.9

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові	Прямі конкуренти	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товар-замінник
	Виробники БПС схеми «літаюче крило»	Виробники БПС інших схем	Постачальники матеріалів, комплектуючих, обладнання, електроніки	Клієнти	Мульти-роторні БПС
Висновки	Високий рівень конкуренції	Можливість виходу на ринкове середовище	Якість товарів, що постачається впливає на якість та надійність БПС	Формування запиту та ціни	Відсутні обмеження через товари-замінники

Далі визначаються фактори конкурентоспроможності та аналізується їх значущість (табл. 7.10).

Таблиця 7.10

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1	Інноваційне вдосконалення.	Покращення конструкції, вдосконалення систем, впровадження сучасних технологій допоможе забезпечити конкурентну перевагу, залучаючи нових споживачів.
2	Спрощення конструкції.	Зменшення часу розгортання з транспортного положення.

Продовження табл. 7.10

3	Взаємозамінність елементів планера.	Спрощення ремонту в польових умовах та прискорення ремонту в виробничих умовах.
4	Адаптивність геометричних параметрів БПС під задані вимоги.	Досягнення більшої універсальності в межах певної моделі відповідно до необхідних ТТХ.
5	Патентування концепції	Унеможливлення використання конкурентами конструкції та технології виготовлення БПС.

Відповідно до визначених в табл. 19 факторів конкурентоспроможності, здійснюється порівняльна оцінка сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 7.11)

Таблиця 7.11

Порівняльна оцінка сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Рейтинг конкурентних товарів при порівнянні з концепцією проекту							
		Бали 1-20							
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Інноваційне вдосконалення.	17			+				
2	Спрощення конструкції.	12			+				
3	Взаємозамінність елементів планера.	15				+			
4	Адаптивність геометричних параметрів БПС під задані вимоги.	20		+					
5	Патентування концепції	20		+					

З метою запобігання основним загрозам та подолання ключових слабкостей проекту проведено SWOT-аналіз проекту з розробки лінійки БПС схеми «літаюче

крило» (табл. 7.12), на основі якого визначено ряд конструктивних рішень (табл. 7.13).

Таблиця 7.12

SWOT-аналіз: Аналіз діючих факторів

S	O
<ul style="list-style-type: none"> - адаптивність БПС під потреби замовника; - значно менша помітність засобами радіолокації у порівнянні з іншими аеродинамічними схемами; - можливість БПС забезпечувати високоякісну зйомку. 	<ul style="list-style-type: none"> - висока універсальність застосування в межах одного класу; - зростаючий попит на БПС як у військовому секторі, так і в різних галузях цивільного життя.
W	T
<ul style="list-style-type: none"> - вартість БПС до початку серійного виробництва; - менша маневреність та гірша керованість у порівнянні з іншими аеродинамічними схемами. 	<ul style="list-style-type: none"> - висока конкуренція; - вразливість сучасних БПС до засобів РЕБ; - загрози у випадку збиття БПС над населеними пунктами.

Таблиця 7.13

SWOT-аналіз: Пошук конструктивних рішень

	O	T
S	<ul style="list-style-type: none"> - оптимізація технологічних процесів; - мінімізація кількості стикових вузлів БПС для зменшення часу розгортання комплексу з транспортного положення; - вдосконалення масово-габаритних характеристик для оптимального розміщення більшої кількості цільового навантаження. 	<ul style="list-style-type: none"> - встановлення системи, за якої при втраті сигналу від пульта оператора, вмикатиметься режим повернення БПС в заданий район за допомогою супутникової навігації; - встановлення парашутної системи і амортизаційної подушки для демпфування удару при приземленні.

W	<ul style="list-style-type: none"> - організація PR-кампанії проекту задля досягнення попиту, при якому стане рентабельним серійне виробництво; - вдосконалення рульових поверхонь для покращення керованості. 	
----------	--	--

7.4 Розробка ринкової стратегії проекту

Для коректної розробки ринкової стратегії стартап-проекту, має бути обрано цільову групу потенційних користувачів в ході аналізу за параметрами рівня зацікавленості, попиту, інтенсивності конкуренції та простоті входу в сегмент (табл. 7.14).

Таблиця 7.14

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п / п	Опис профілю цільової групи	Рівень зацікавленості	Орієнтовний попит цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу в сегмент
1	Оборонні організації	Висока	Високий	Висока	Помірна
2	Сільськогосподарські підприємства	Середня	Низький	Середня	Висока
3	Картографічні та геодезичні установи.	Низька	Низький	Середня	Висока
4	Аварійно-рятувальні служби.	Середня	Високий	Середня	Висока

Обрані цільові групи: з огляду на фактори потенційної зацікавленості та попиту на запропоновану ідею стартап-проекту, в якості цільової групи обрано першу та четверту.

Після визначення цільових груп, доцільним є визначення базових стратегії розвитку для роботи у визначених сегментах (табл. 7.15-7.17).

Таблиця 7.15

Базова стратегія розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкуренто-спроможні позиції обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Розробка БПС схеми «літаюче крило» з можливістю здійснення вертикального зльоту та посадки.	Стратегія диференційованого маркетингу	Функціональність, об'єднання переваг БПС з фіксованим крилом та мультироторних, універсальність.	Стратегія розширення ринку

Таблиця 7.16

Базова стратегія конкурентної поведінки

Новаторськість проекту	Необхідність шукати нових споживачів	Необхідність копіювати основні характеристик и товару конкурента	Стратегія конкурентної поведінки
Розробка БПС схеми «літаюче крило» не є першопрохідною в цій	Для запропонованої	БПС матиме особливі	Стратегія диференціації

Продовження табл. 7.16

галузі, натомість такою є концепція підбору конфігурацій подібних моделей БПС відповідно до поставлених ЛТХ.	ідеї буде здійснюватися пошук та залучення більшої кількості споживачів.	конструктивні ознаки задля залучення більшої кількості споживачів.	
--	--	--	--

Таблиця 7.17

Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції проекту	Асоціації, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
Надійність, мобільність, можливість ремонту в польових умовах, низька вартість.	Стратегія розширення ринку	Адаптивність до вимог замовника, задовільна керованість, якість.	Адаптивність Функціональність Надійність

Визначення стратегії розвитку, конкурентної поведінки та позиціонування допомагає визначити напрямки діяльності стартап-проекту із конструктивною системою рішень.

7.5 Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Для визначення маркетингової програми стартап-проекту спочатку необхідно визначити його головні переваги перед конкурентами та вигоду, що отримує споживач (табл. 7.18).

Головні переваги концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Відповідність ЛТХ БПС запитам цільової групи.	Адаптивність до потреб замовника.	Розширення спектру можливостей в межах однієї моделі БПС.
2	Оптимальне співвідношення ціни до якості БПС.	Зменшення витрат на розробку та дослідження БПС, а отже, зниження вартості товару.	Конкурентна ціна на БПС.

В ході аналізу ціни товарів-аналогів та товарів-замінників, визначається попередні верхня та нижня цінові межі (табл. 7.19). Значний діапазон ціни пояснюється варіативністю обладнання, що встановлюється на БПС.

Межі встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
Від 600 000 грн. до 2 000 000 грн.	Від 800 000 грн. до 2 500 000 грн.	Середній рівень доходів та вище середнього	750 000 грн. – 2 240 000 грн.

Після визначення цінових меж запропонованого в рамках стартап-проекту продукту, формується система збуту із врахуванням поведінкових особливостей цільової групи, зобов'язань постачальнику та глибини каналу збуту. Аналіз

перелічених факторів та вибір оптимальної системи збуту БПС схеми «літаюче крило» зведено в табл. 7.20.

Таблиця 7.20

Формування системи збуту

Специфіка поведінки цільових груп	Функції збуту, які має виконувати постачальник	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Вибір постачальника здійснюється з огляду на технічні властивості та специфікації товару.	Налагодження БПС, пакування і транспортування товару замовнику, прийнятні терміни виготовлення БПС.	Канал прямого збуту.	Від постачальника до замовника з огляду на те, що виріб виготовляється із врахуванням потреб користувача.

Формування концепції маркетингових комунікацій є останнім етапом розробки маркетингової програми стартап-проекту (табл. 7.21).

Таблиця 7.21

Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових груп	Канали комунікацій цільових груп	Основні показники позиціонування	Завдання рекламного повідомлення
У клієнта сформована потреба в певному товарі і визначення вимоги.	Участь у спеціалізованих виставках, реклама, сайт компанії, торгові майданчики.	Адаптивність Надійність Якість Універсальність	Переконати споживача в можливості задовольнити потреби, сформувати прихильність до компанії.

Висновки по розділу

В розділі приведено маркетинговий аналіз стартап-проекту, ідея якого полягає в розробці БПС схеми «літаюче крило» з можливістю модифікації його геометричних параметрів задля досягнення визначених користувачем тактико-технічних характеристик. Проведено технологічний аудит ідеї, проаналізовано ринкові можливості запуску стартап-проекту, розроблено ринкову стратегію та маркетингову програму.

В ході проведення маркетингового дослідження визначено сильні, слабкі та нейтральні характеристики стартап-проекту у порівнянні з конкурентними концепціями, які вказують на конкурентоспроможність запропонованої ідеї. На підставі попередньої оцінки з'ясовано, що з огляду на вимоги цільових груп, вступ до ринкового середовища є перспективним. Окрім цього, запропоновано альтернативний напрямок розвитку проекту, а саме розробка БПС схеми «літаюче крило» з можливістю здійснення вертикального зльоту та посадки.

Отже, підсумовуючі проведений маркетинговий аналіз, можна зазначити, що подальша реалізація запропонованої ідеї стартап-проекту є доцільною.

ВИСНОВКИ

Ключова ідея дисертації полягає у використанні можливостей динамічно подібних моделей при проектуванні безпілотних систем нового покоління. Для формування ефективного аеродинамічного образу майбутніх БПС із використанням масштабування, важливим є правильне створення моделі, яка за своєю конструкцією відповідає натурній моделі планера БПС. В роботі обрано базову модель БПС та збільшено її геометричні розміри методом масштабування для розрахункових та експериментальних досліджень. Після проведення експериментальних досліджень, отримані результати перенесено на натурну конструкцію планера.

В першому розділі висвітлено ключові напрямки застосування сучасних БПС та їх основні класифікаційні ознаки, проаналізовано головні переваги та недоліки застосування аеродинамічної схеми «літаюче крило». В ході аналізу моделей аналогів вибрано прототип для проведення досліджень - Skywalker X8. Розділ також включає огляд основних джерел за темою магістерської дисертації.

В другому розділі розглянуто метод динамічного масштабування літальних апаратів, складовими якого є кінематичне та геометричне масштабування. Описані основні критерії подібності та проаналізовано важливість забезпечення відповідної міцності динамічно подібної моделі. Запропоновано виконати геометричне масштабування в дві ітерації, використовуючи базову модель, динамічно подібну натурному БПС, а також виготовити модель подібну за масовими та жорсткісними характеристиками.

В третьому розділі викладено послідовність створення розрахункової просторової моделі із використанням САПР. Побудована базова модель в масштабі 1:1 була збільшена в масштабі 2:1 та 3:1

В четвертому розділі представлені результати розрахунку аеродинамічних характеристик геометрично подібних моделей в трьох масштабах для трьох

швидкостей налігаючого потоку. Визначено залежність коефіцієнтів підйомної сили та лобового опору від кута атаки та побудовано поляри першого роду. Виявлено вплив збільшення лінійних розмірів в дві ітерації на аеродинамічні характеристики. При оцінці зміни аеродинамічних характеристик виявлено пропорційний характер їх змін.

В п'ятому розділі визначені основні переваги та недоліки вакуумного формування. Описано процес виготовлення елементів планеру БПС схеми «літаюче крило» з композиційних матеріалів на прикладі верхньої частини лівої консолі крила. Викладено послідовність та результат складання виготовлених елементів. Завдяки застосуванню способу вакуумного формування у виробі досягнуто точність контуру, що знаходиться в межах 0.5 мм.

В шостому розділі наведено схему бортового обладнання експериментальної моделі БПС схеми «літаюче крило» та результат встановлення обраної електроніки. В результаті цього підтверджено готовність БПС до проведення подальших льотних випробувань.

В сьомому розділі здійснено маркетингове дослідження стартап-проекту, ідея якого полягає в розробці БПС схеми «літаюче крило» з можливістю модифікації його геометричних параметрів задля досягнення визначених користувачем тактико-технічних характеристик. Проведено технологічний аудит ідеї, проаналізовано ринкові можливості запуску стартап-проекту, розроблено ринкову стратегію та маркетингову програму. Визначено перспективність подальшої реалізації запропонованої ідеї стартап-проекту.

Таким чином, в роботі досліджено вплив масштабування на аеродинамічні характеристики трьох геометрично подібних моделей. Отримані закономірності дозволяють сформулювати ефективний аеродинамічний образ майбутніх БПС. Завдяки цьому оптимізується процес проектування та дослідження нових БПС відповідно до необхідних тактико-технічних характеристик.

Основним завданням подальших досліджень є визначення динамічних та кінематичних критеріїв подібності базової моделі.

Список використаних джерел

1. Islam R. S. Drones on the Rise: Exploring the Current and Future Potential of UAVs / Riazul S. M. Islam. // IEEE Conference. – 2023. – С. 6.
2. Матухно В. В. Ефективність використання безпілотних літальних апаратів для пошуку потерпілих / В. В. Матухно. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Problemsofemergencysituations». – 2022. – С. 2.
3. Грищенко О. С. Використання безпілотних літаючих апаратів для організації зв'язку в мережі 5G : 172 / Грищенко Олександра Сергіївна – Київ, 2020. – 96 с.
4. A1-СМ Фурія [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://athlonavia.com/uk-furia/>
5. Мальков О. Аналіз застосування безпілотної авіації та армійської авіації під час бойової операції / О. Мальков, Ю. Єльчанинов, О. Лобас. // Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”. – 2021. – №4. – С. 149–157.
6. Hermes™ 900 – Multi-role, Medium Altitude Long Endurance [Електронний ресурс] // Elbit Systems Ltd. – Режим доступу до ресурсу:
<https://elbitsystems.com/uas-hermes-900-multi-role-medium-altitude-long-endurance-male/>.
7. RAVEN® BRQ-11 [Електронний ресурс] // AeroVironment – Режим доступу до ресурсу: <https://www.avinc.com/uas/raven>.
8. Можливі шляхи розвитку перспективних українських БПЛА-систем, враховуючи сучасні світові тенденції / С.Слободяник, С. Петренко, А. Цибізов, Ю. Бондаренко. // Journal of Scientific Papers “Social Development and Security”. – 2023. – №3. – С. 135–145.

9. Szabolcsi R. Beyond Training Minimums – A New Concept of the UAV Operator Training Program. International conference KNOWLEDGE-BASED ORGANIZATION. 2016. Vol. 22, no. 3. P. 560–566. URL: <https://doi.org/10.1515/kbo-2016-0096>.
10. Про затвердження Правил виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України : Наказ М-ва оборони України від 08.12.2016 р. № 661 : станом на 11 лют. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text>
11. Класифікація, функції та завдання безпілотної авіації в сфері цивільного захисту України / С. Мосов та ін. Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека. 2021. № 2(12). С. 54–68. URL: [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).54-68](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).54-68)
12. Книш Б., Кулик Я., Барабан М. Класифікація безпілотних літальних апаратів та їх використання для доставки товарів. Вісник Хмельницького національного університету. 2018. № 3. С. 246–252.
13. Класифікація безпілотних літальних апаратів / О. Тимочко та ін. Системи озброєння і військова техніка. 2009. № 1(9). С. 61–66.
14. БПЛА у Збройних Силах України та їх використання в Операції об'єднаних сил [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://defpol.org.ua/index.php/2011-07-25-15-56-49/1020-bpla-u-zbroinykh-sylakh-ukrainy-ta-ikh-vykorystannia-v-operatsii-ob-iednanykh-syl>.
15. Конюхов И. К. Анализ применения аэродинамической схемы "летающее крыло" на беспилотных летательных аппаратах класса "воздух-поверхность" / И. К. Конюхов. // Труды МАИ. – 2018. – №99.
16. On aerodynamics specifics of a small-sized aircraft of normal configuration / I. Voronich та ін. Trudy MAI. 2019. № 109. С. 8. URL: <https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-8>
17. Orbiter 1(2) [Електронний ресурс] // Уголок неба – Режим доступу до ресурсу: <http://www.airwar.ru/enc/bpla/orbiter.html>.

18. Skywalker X8. TECHNICAL DATA [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://skywalkermodel.com/en/76.html>.
19. Валькірія. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.avia.systems/uk>
20. Mihai A. Design and build of aircraft models at a favorable scale in order to check the similitude requirements that leads to aircraft design coefficients. : дис. докт. / Mihai Anton Ștefan – Bucharest, 2019. – 40 с.
21. Baghdasaryan A. Design of an Unmanned Aerial Vehicle with a Mass-Actuated Control System / Baghdasaryan Armen – Terrassa, 2019. – 165 с.
22. Final Design Report / [S. Ashcraft, I. J. Benitez Cruz, N. Caniza та ін.]. – 2014. – С. 54.
23. Aerodynamic modeling of the Skywalker X8 Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle / Gryte Kristoffer, 2018. – 11 с.
24. Grodzki W., Łukaszewicz A. Design and manufacture of umanned aerial vehicles (UAV) wing structure using composite materials. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2015. Vol. 46, no. 3. P. 269–278. URL: <https://doi.org/10.1002/mawe.201500351>
25. Карпов Я. С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов / Я. С. Карпов. – Харьков: ХАИ, 2006. – 359 с.
26. Azarov Y. A., Chernovolov R. A. Development of recommendations on structural material selection in aeroelastic phenomena modelling aircraft dynamically similar models in wind tunnels. «Aviation materials and technologies». 2018. № 2. С. 75–87. URL: <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-2-75-87>
27. FNU HEM LATA. Scaling Laws for Fixed-Wing Single-Engine Electric Propulsion Systems : Thesis. Melbourne, Florida, 2021. 46 с.
28. Dynamic similarity. INTRODUCTION TO AEROSPACE FLIGHT VEHICLES. URL: <https://eaglepubs.erau.edu/introductiontoaerospaceflightvehicles/chapter/dynamic-similarity/>.

29. Wolowicz C. H., Bowman Jr J. S., Gilbert W. P. Similitude requirements and scaling relationships as applied to model testing. National Aeronautics and Space Administration - Scientific and Technical Information Branch, 1979. 65 с.
30. Mihai A. Design and build of aircraft models at a favorable scale in order to check the similitude requirements that leads to aircraft design coefficients. : дис. докт. / Mihai Anton Ştefan – Bucharest, 2019. – 40 с.
31. Азаров Ю., Гарифуллин М., Черноволов Р. Оценка нагруженности динамически подобных моделей при исследовании бафтинга. *Труды МАИ*. 2018. № 103.
32. SOLIDWORKS Flow Simulation. SOLIDWORKS. [Электронный ресурс] - Режим доступа до ресурсу: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>
33. Доценко О. К., Стельмах Н. В. Методи виготовлення деталей із композитного матеріалу. XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ». 2019. С. 113–116.
34. https://www.researchgate.net/publication/339760302_Pros_and_Cons_Analyses_of_a_Flying-wing_and_a_Canard_Conceptions_for_a_Special_Purpose_UAV_in_High_Altitude
35. Теорія і практика застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) : навч. посіб. UA Dynamics, 2022. 127 с.
36. D3548 | DongYang. DongYang. URL: <http://www.dys.hk/product/D3548.html>
37. Лопаті складані карбонові для літака aeronaut CAM carbon 12x6,5 (723446). Radioland.com.ua. URL: <https://radioland.com.ua/ua/products/a723446-lopasti-skladnye-karbonovye-aeronaut-cam-carbon-12x6-5-723446>
38. Бесколлекторный регулятор хода HOBBYWINGFLYFUN 80A для авиамodelей. RC Buyer. URL: <https://rc->

buyer.com.ua/index.php?route=product/product&path=62&product_id=9052