

doi: 10.32620/oikit.2021.94.09

УДК 621.3.001.5;

А. В. Погудін, М. С. Бондарєв, О. К. Погудіна

Порівняльний аналіз та створення безпілотних літальних апаратів для формування макета ройової взаємодії

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»

Предметом вивчення є процес створення безпілотного літального апарата коптерного типу, який здатен виконувати автономний політ та використовуватись у приміщеннях для відпрацювання алгоритмів ройової взаємодії. **Метою** є зменшення витрат на формування та експлуатацію макета ройового інтелекту безпілотних літальних апаратів (БПЛА), з забезпеченням сумісності з існуючими апаратними системами позиціонування та програмними платформами моделювання. **Завдання:** провести аналіз існуючих прототипів безпілотних літальних апаратів коптерного типу, що використовуються для моделювання та відпрацювання режимів автономного польоту у приміщеннях; провести огляд систем позиціонування та обміну інформацією між учасниками ройової формації та проаналізувати апаратні системи, що необхідні для реалізації цих систем; розробити архітектуру апаратних підсистем для безпілотного літального апарата, що спроможний виконувати завдання на рівні розглянутих прототипів; спроектувати корпус для обґрунтованої апаратної платформи, перевірити його експлуатаційні параметри, реалізувати його збір та тестування; встановити програмне забезпечення, що дозволяє перевірити роботоспроможність розглянутої платформи безпілотного літального апарата. Використовуваними **методами** є: системний аналіз, що використано для порівняння моделей безпілотних літальних апаратів у рамках поставлених завдань, методи аналізу і синтезу схем для реалізації апаратної платформи, метод графічного моделювання для проєктування корпусу безпілотного літального апарата, методи системного програмування для формування програми польоту. Отримані такі **результати**. Обґрунтовано вибір апаратної платформи безпілотного літального апарата; розроблено та реалізовано корпус для коптера, виконано збір двох платформ безпілотних літальних апаратів та їх тестування під час виконання автономного польоту у приміщенні. **Висновки.** В ході дослідження було виявлено, що існують та широко використовуються платформи для відпрацювання сумісного польоту у приміщеннях. Ці платформи є відкритими та закритими. Зроблено аналіз відкритих апаратних платформ та синтез архітектури власного безпілотного літального апарата. Спроектований та реалізований безпілотний літальний апарат здатен виконувати автономний політ, має усі необхідні складові для виконання програми сумісного польоту. У рамках макета ройової взаємодії надалі необхідним є налаштування системи позиціонування.

Ключові слова: рій безпілотних літальних апаратів, система позиціонування, апаратна архітектура, програмна архітектура, графічна модель.

Вступ

Для відпрацювання основних алгоритмів роботи БПЛА у ройовій взаємодії необхідно побудувати макет. При цьому необхідно використовувати міні БПЛА, що можуть здійснювати польоти у приміщеннях. Порівнюємо такі моделі БПЛА: TelloEDU, Crazyflie та Robomaster TT.

Tello EDU – друга версія програмованого БПЛА, вийшла одразу за популярним Tello [1]. На відміну від першої версії, програмування EDU можливо на одній з трьох доступних мов як Scratch, Swift та Python (для першої версії доступною є лише Scratch). В арсеналі коптера наявний оновлений SDK 2.0 з командами та інтерфейсом даних, що дозволяє користувачеві без особливих зусиль написати код для організації польоту групи Tello EDU, а також застосовувати деякі функції штучного інтелекту. Можливий одночасний

синхронний політ для групи БПЛА та виконання ними акробатичних фігур пілотажу. Основною перевагою цього БПЛА є те, що методичні, програмні та апаратні засоби дозволяють швидко ознайомитись з технологією та впровадити груповий політ. Однак обмеженням є те, що похибка позиціонування досить велика, архітектура замкнена, тож можливості обмежуються функціями програмного інтерфейсу.

Robomaster TT є продовженням лінійки TelloEDU, навчальних БПЛА фірми DJI та має більшу вартість. Містить також вбудований модуль із відкритим кодом ESP32, що створює середовища програмування з відкритим кодом Arduino та Micro Python, а також підтримує графічне програмування та методи програмування в автономному режимі.

Іншим БПЛА для моделювання макета рою є БПЛА від компанії Bitcraze «crazyflie 2.1» [2]. Його програмний код має відкритий доступ, і хоч клієнтський API написаний на Python, в той же час на Github є багато інших реалізацій з використанням популярних мов програмування як C#, C/C++, JS або Java. Також великим плюсом є те, що цей БПЛА важить всього 27 грам та має розмір 9 см², тому рій таких коптерів можна тестувати в приміщенні, чим зараз і займається компанія Bitcraze.

Головним недоліком цих БПЛА є ціна. Вартість одного БПЛА становить приблизно 200\$. У таблиці 1 наведено порівняння розглянутих моделей. Технології позиціонування значно впливають на якість групового польоту. У експериментах з Tello EDU моделі достатньо часто стикалися між собою, якщо підлога над якою здійснюється політ була однотонною. Robomaster TT оснащений додатково датчиками ToF (Time-of-flight), які дозволяють виявити перешкоди (максимальна відстань виміру може досягати 1,2 м). Система захоплення руху або Valve Lighthouse для моделі Bitcraze «crazyflie 2.1» потребує додаткового оснащення лабораторії, відповідно витрат на її організацію.

Тому метою даної роботи є дослідження можливості створення міні БПЛА для формування власного макета рою БПЛА, що використовується у приміщеннях.

1. Модель позиціонування та обміну інформацією між БПЛА у групі та рою

Робота у групі або рою БПЛА пов'язана з високою ймовірністю зближення БПЛА та перетину їх запланованих маршрутів. Тож, під час розробки алгоритмів роботи окремих учасників рою необхідним є врахування моделі позиціонування та обміну інформацією між БПЛА у групі або рою.

Є три способи обміну інформацією в рою: прямий зв'язок, зв'язок через середовище і сенсорний [3]. В одному рою може використовуватись більш ніж один тип взаємодії, наприклад, кожен БПЛА може сприймати навколишнє середовище та зв'язуватись із сусідами. Balch розглядав вплив трьох видів комунікацій в рою [3]. Він поставив три завдання і порівняв продуктивність під час моделювання. Деякі дослідники також обговорювали можливість рою взаємодіяти без комунікації. Однак, зв'язок і сенсорнування може дійсно підвищити ефективність рою у більшості випадків.

Для БПЛА Tello EDU та Robomaster TT використовується система візуального позиціонування, що складається з двох ультразвукових та одного оптичного сенсора. Можливості впливати програмно на систему позиціонування у користувачів непередбачено. Така модель позиціонування дає можливість БПЛА

зависати на місці та підходить для польоту в приміщеннях, але дає похибку та є дуже залежною від покриття, над яким літають БПЛА, та освітлення.

Для БПЛА Bitcraze «crazyflie 2.1» використовується система захоплення руху як імітація технології GPS в приміщенні [4]. Однак, ці системи позиціонування є досить дорогими, що ускладнює їх використання в малобюджетних лабораторіях. Систему Valve Lighthouse (LH) було вперше представлено для позиціонування у віртуальній реальності, але вона також знайшла своє застосування в робототехніці [5–8]. Система Valve Lighthouse є дещо дешевшою, ніж системи захоплення руху, її легше транспортувати, і вона дозволяє повністю розподіляти операції, оскільки БПЛА можуть обчислювати своє положення без центрального сервера. Таблиця 1 є наочним порівнянням цих БПЛА.

Таблиця 1 – БПЛА для організації групового польоту у приміщеннях

Назва моделі	Технологія позиціонування	Мережева комунікація (WiFi)	Зовнішній вигляд	Вартість, грн.
Tello EDU	Візуальне позиціонування	2.4 ГГц та 5.8 ГГц		5570,00
Robomaster TT	Візуальне позиціонування	5.8 ГГц		9000,00
Bitcraze «crazyflie 2.1»	Залежно від комплектації: система захоплення руху або система Valve Lighthouse	2.4 ГГц		4580,25
XAI-105	Залежно від комплектації, на теперішній момент візуальне позиціонування	2.4 ГГц		3500,00

2. Розробка апаратної архітектури міні БПЛА для формування макета рою

Компоненти БПЛА можна розділити на дві групи: основні, без яких експлуатація приладу неможлива або небезпечна, і додаткові, наявність яких залежить від потреб власника.

До основних компонентів належать: рама, політний контролер, апаратура радіокерування, антени, двигуни, повітряні гвинти, регулятори обертів, батарея та зарядний пристрій, джерело бортового живлення, індикатор заряду батареї.

Комплектуючі, які необхідні для реалізації міні БПЛА, мають бути доступні і бюджетні, що дасть змогу створити БПЛА без великих матеріальних затрат порівняно з вже існуючими аналогами.

Одним з головним компонентів для створення БПЛА є контролер польоту (КП). Маючи таблицю параметрів для багатьох контролерів [9] для порівняння були обрані контролери, найбільш відповідні потрібним характеристикам, а саме: ціна(до 50\$), мікроконтролери F4 або F7, розміри (30mm x 30mm), максимальна напруга (6S), гіроскопи(MPU6000), наявність Betaflight OSD, влаштований регулятор обертів і напруги та протокол передачі сигналів (PPM або IBUS). Для порівняння були обрані: Omnibus F4 Pro V3, CL racing F7 V2 DAUL, Holybro Kakute F7 AIO.

Контролер CL racing F7 V2 Daul – це наступник популярних моделей CL Racing F4 і F4S. У нього схожий дизайн, зручне розташування елементів і зручний розмір контактних майданчиків. Це один з найбільш дорогих польотних контролерів, але при цьому у нього відмінний набір функцій: SmartAudio, ESC Telemetry, управління камерою, пам'ять для blackbox.

Holybro Kakute F7 AIO підійде досвідченим пілотам, яким потрібна висока швидкість роботи гіроскопів і частота 32к. Обмеження КП – потрібно переконатися, що гіроскопи ні до чого не торкаються, щоб не передавалися вібрації. Тобто не можна розмістити зверху інші комплектуючі типу приймача або відеопередавачі. Тому цей контролер не підходить, так як в БПЛА над контролером буде розташовуватися ще регулятор обертів та приймач.

Omnibus F4 Pro V3 забезпечує потужну обчислювальну потужність і швидкість обчислень. Пряме інтегрування і сумісність з актуальним програмним забезпеченням. Налаштування просте і зручне.

У результаті порівнянь максимально відповідним до вимог був обраний політний контролер Omnibus F4 Pro V3. Він має задовільну ціну, швидку частоту процесора, сумісність з регулятором «4-в-1».

Проаналізуємо апаратуру радіоуправління або пристрій, який приймає сигнал з передавача, обробляє сигнал і передає його в ПК (приймач). FlySky це бюджетний бренд апаратури управління. Як приймачі, так і передавачі FlySky коштують порівняно недорого, проте за якістю не дуже поступаються дорогим Frsky. Приймач має кілька каналів (roll, pitch і так далі), кожен канал може відповідати кожній кнопці на пульту або налаштовуватися на певні. Незмінними каналами завжди залишаються перші чотири канали, які прив'язані до стіків управління.

Кожен приймач необхідно зв'язувати з передавачем (пультом). Розглянемо приймач з протоколом AFHDS-2A. 2,4G 10CH міні Flysky AFHDS 2A – один з найдешевших приймачів фірми Flysky, але його характеристики повністю задовольняють вимогам. Він працює як на протоколі SBUS, так і на PPM.

Проаналізуємо ESC регулятори обертів. Регулятор обертів «EM15A 25A «4 в 1» ESC BLHELI_S 20*20 мм DSHOT600» – самостійний пристрій на основі мікроконтролера. Він слугує для того, щоб автоматично визначати величину напруги силової батареї, мати захист від перевантаження струмом, мати захист від запуску у разі механічно заблокованого двигуна, автоматично налаштовуватися під конкретний двигун; мати захист від помилок синхронізації. Порівнюючи з аналогами, має низьку ціну, постійний струм в 25A, що вистачить на живлення всіх двигунів, задовільну прошивку BLHeli_S та малу вагу (9 грам).

Сумарний піковий струм, споживаний моторами навіть середнього мультикоптера, може досягати 70 А. Але при цьому батарея повинна бути якомога легше і мати ємність, достатню для польоту як мінімум на 10 хвилин. Цим суперечливим вимогам краще всього відповідають літєво-полімерні акумулятори (7.4 В, 1000мАч).

Для можливості управління БПЛА з телефону або ПК, необхідно його оснастити модулем Wi-Fi та Bluetooth. Для цього буде використано мікроконтролер фірми Espressif – ESP32 . Підключається ESP32 до комп'ютера через USB.

Критеріями для вибору двигуна є таке: розмір рами; сумарна вага БПЛА; акумулятор, який використовується; кількість обертів. За даними критеріями, обрано двигун Мікро 1104 НМ 1-2S 4300KV: кількість обертів – 4300KV, низька ціна, споживна напруга 1-2S.

3 Розробка корпусу БПЛА

Для проектування корпусу БПЛА використовується програмний комплекс САПР SolidWorks. За основу була взята найбільш розповсюджена та затребувана форма БПЛА міні розміру з чотирма гвинтами. Вона забезпечує більший контроль над БПЛА та легкість керування. Після вибору необхідної апаратури маємо необхідні розміри плат та інших деталей для збирання БПЛА.

У результаті загального збирання корпусу маємо такий вигляд збоку та ізометричний вигляд, як на рисунку 1.

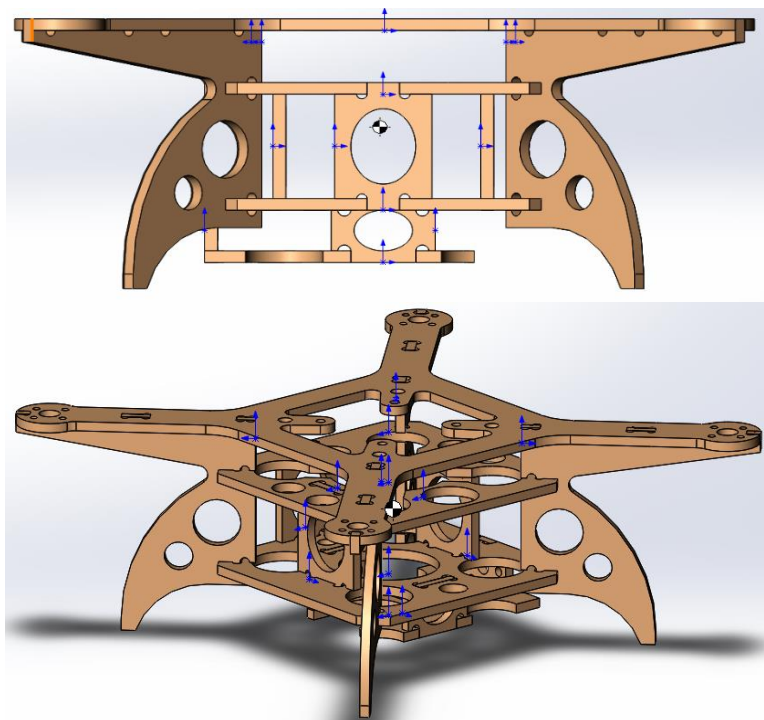


Рисунок 1 – Модель корпусу БПЛА

Для того щоб мати змогу фрезерування певних деталей на верстаті з ЧПУ, сформовано розкрий усіх деталей (у форматі DXF), де вони розміщені у компактному вигляді (рис. 2).

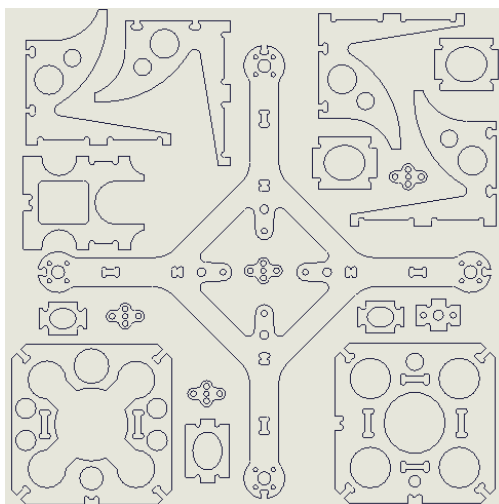


Рисунок 2 – Креслення для розкрою деталей

Далі використано програму DXF to G-code converter. В цьому програмному забезпеченні необхідно обрати порядок вирізання деталей для прискорення процесу виготовлення, швидкість вирізання по осях, глибину прорізання, розмір фрези та внутрішні відступи. Це все задається в параметрах програми і зберігається в форматі NGC. Після вирізання та збирання деталей, апаратура встановлюється на корпус.

Після збирання корпусу та встановлення апаратури виконано прошивання та програмування двох міні БПЛА. Тестові польоти продемонстрували коректність поведінки БПЛА на відповідні керувальні команди. Для продовження робіт стосовно створення макета ройової взаємодії необхідно сформувати систему позиціонування та впровадити алгоритми взаємодії БПЛА, що розглянуто у роботі [10].

Висновки

Запропоновано ретельний аналіз аналогів БПЛА, що використовуються для сумісного польоту у приміщеннях, які необхідні для формування макета ройової поведінки. Усі розглянуті моделі є можливими для формування макета, але для формування більшої формації було запропоновано створити власний БПЛА коптерного типу.

Наведено обґрунтування складу архітектури, спроектовано та реалізовано модель корпусу БПЛА. Подані найбільш популярні підходи до позиціонування БПЛА у приміщеннях.

Список літератури

1. Tello SDK 2.0 User Guide. (2018). Available at: <https://dl-cdn.ryzerobotics.com/downloads/Tello/Tello%20SDK%202.0%20User%20Guide.pdf> Accessed 06 Oct 2021
2. Bitcraze «crazyflie 2.1». Available at: <https://www.bitcraze.io/products/crazyflie-2-1/>
3. Balch, T., & Arkin, R. C. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE transactions on robotics and automation*, 14(6), 926-939.

4. J. A. Preiss, W. Honig, G. S. Sukhatme, and N. Ayanian, "Crazyswarm: A large nano-quadcopter swarm", in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017, pp. 3299–3304.
5. M. Hoppe, M. Burger, A. Schmidt, and T. Kosch, "DronOS: A flexible open-source prototyping framework for interactive drone routines", in International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM), ACM, 2019, 15:1–15:7.
6. M. Greiff, A. Robertsson, and K. Berntorp, "Performance bounds in positioning with the vive lighthouse system", in IEEE International Conference on Information Fusion (FUSION), 2019, pp. 1–8.
7. K. Sletten, "Automated testing of industrial robots using HTC vive for motion tracking", M.S. thesis, University of Stavanger, Norway, 2017
8. Taffanel, A., Rousselot, B., Danielsson, J., McGuire, K., Richardsson, K., Eliasson, M., & Hönig, W. (2021). Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research. arXiv preprint arXiv:2104.11523.
9. Flight Controllers for Racing Drones & Mini Quad. Available at: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1VuBpQVZflz5zVNUG43qKTq4Mkwt-cTssWvb1CGqskQk/edit#gid=0>
10. Pohudina, O., Kritskiy, D., Koba, S., & Pohudin, A. (2020). Assessing Unmanned Traffic Bandwidth. In Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (pp. 447-458). Springer, Cham.

References

1. Tello SDK 2.0 User Guide. (2018). Available at: <https://dl-cdn.rzerobotics.com/downloads/Tello/Tello%20SDK%202.0%20User%20Guide.pdf> Accessed 06 Oct 2021
2. Bitcraze «crazyflie 2.1». Available at: <https://www.bitcraze.io/products/crazyflie-2-1/>
3. Balch, T., & Arkin, R. C. (1998). Behavior-based formation control for multirobot teams. IEEE transactions on robotics and automation, 14(6), 926-939.
4. J. A. Preiss, W. Honig, G. S. Sukhatme, and N. Ayanian, "Crazyswarm: A large nano-quadcopter swarm", in IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017, pp. 3299–3304.
5. M. Hoppe, M. Burger, A. Schmidt, and T. Kosch, "DronOS: A flexible open-source prototyping framework for interactive drone routines", in International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia (MUM), ACM, 2019, 15:1–15:7.
6. M. Greiff, A. Robertsson, and K. Berntorp, "Performance bounds in positioning with the vive lighthouse system", in IEEE International Conference on Information Fusion (FUSION), 2019, pp. 1–8.
7. K. Sletten, "Automated testing of industrial robots using HTC vive for motion tracking", M.S. thesis, University of Stavanger, Norway, 2017
8. Taffanel, A., Rousselot, B., Danielsson, J., McGuire, K., Richardsson, K., Eliasson, M., & Hönig, W. (2021). Lighthouse Positioning System: Dataset, Accuracy, and Precision for UAV Research. arXiv preprint arXiv:2104.11523.
9. Flight Controllers for Racing Drones & Mini Quad. Available at: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1VuBpQVZflz5zVNUG43qKTq4Mkwt-cTssWvb1CGqskQk/edit#gid=0>
10. Pohudina, O., Kritskiy, D., Koba, S., & Pohudin, A. (2020). Assessing Unmanned Traffic Bandwidth. In Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (pp. 447-458). Springer, Cham.

Надійшла до редакції 16.12.2021, розглянута на редколегії 16.12.2021.

Comparative analysis and creation of unmanned aerial vehicles to form a model of swarm interaction

The subject of study is the process of creating an unmanned aerial vehicle of the helicopter type, which is able to perform autonomous flight and be used in the premises to test the algorithms of swarm interaction. The aim is to reduce the cost of forming and operating the UAV swarm intelligence model, ensuring compatibility with existing hardware positioning systems and simulation software platforms. Tasks: to analyze the existing prototypes of unmanned aerial vehicles of the helicopter type, used for modeling and testing of autonomous flight modes indoors; to review the systems of positioning and exchange of information between the participants of the swarm formation and to analyze the hardware systems necessary for the implementation of these systems; to develop the architecture of hardware subsystems for unmanned aerial vehicles capable of performing tasks at the level of the considered prototypes; design a case for a sound hardware platform, check its operational parameters, implement its collection and testing; install software that allows you to check the operability of the considered platform of the unmanned aerial vehicle. The methods used are: systems analysis used to compare models of unmanned aerial vehicles within the tasks, methods of analysis and synthesis of schemes for the implementation of the hardware platform, the method of graphic modeling for the design of the unmanned aerial vehicle, methods of system programming for flight program. The following results were obtained. The choice of the hardware platform of the unmanned aerial vehicle is substantiated; the hull for the helicopter was developed and implemented, two platforms of unmanned aerial vehicles were collected and tested during autonomous flight indoors. Conclusions. The study found that there are existing and widely used platforms for compatible indoor flight. These platforms are open and closed. The analysis of open hardware platforms and synthesis of architecture of own unmanned aerial vehicle is made. The designed and implemented unmanned aerial vehicle is capable of autonomous flight, has all the necessary components to perform a compatible flight program. As part of the layout of swarm interaction, it is necessary to further adjust the positioning system.

Keywords: swarm of unmanned aerial vehicles, positioning system, hardware architecture, software architecture, graphic model.

Відомості про авторів

Погудін Андрій Володимирович, PhD, ст. викладач кафедри космічної техніки та нетрадиційних джерел енергії Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» ORCID 0000-0002-8673-2119

Бондарєв Михайло Сергійович, студент кафедри інформаційні технології проектування Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» ORCID 0000-0001-7823-899X

Погудіна Ольга Костянтинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційні технології проектування Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» ORCID 0000-0001-5689-2552

About the Authors

Pogudin Andrey Vladimirovich, PhD, Art. Lecturer, department of space engineering and non-traditional energy sources, National aerospace university named after. M. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute" ORCID 0000-0002-8673-2119

Bondariev Mykhailo, student of the Department of Information Technology Design of the National Aerospace University named after. M. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute" ORCID 0000-0001-7823-899X

Pohudina Olha Kostyantynivna, Assistant at the Department of Information Technology of Design at National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute ORCID 0000-0001-5689-2552