

ВИЗНАЧЕННЯ БАЗОВОЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЙОГО ФАКТИЧНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

У даній публікації розглянуто питання визначення базової системи координат літального апарату, як одну з важливих задач, яка постає при дослідженні його фактичних геометричних параметрів за допомогою сучасних вимірювальних засобів у процесі виробництва та експлуатації. Важливість зазначеного питання обумовлена тим, що від правильності вибору алгоритму визначення базової системи координат виробу залежить точність та коректність розрахунків його фактичних геометричних параметрів. У статті висвітлено основні критерії, які необхідно враховувати при визначенні базової системи координат літального апарату та запропоновано методи практичної реалізації алгоритмів її побудови на прикладі кількох типів літальних апаратів. Дослідження змін фактичних геометричних параметрів літака є важливою складовою забезпечення належної якості літального апарату при його виробництві і підтримці льотної придатності в експлуатації. Такі дослідження вимагають коректності та високої точності визначення фактичних геометричних параметрів, так як від цього залежить достовірність комплексної оцінки фактичного стану виробу і, відповідно ефективність прийнятих рішень стосовно якості складальних робіт та можливості подальшої експлуатації. При проектуванні літака система координат визначається на початковому етапі створення теоретичної моделі виробу і є базою для визначення його геометричного та конструктивного вигляду. При дослідженні геометричних параметрів готового виробу необхідно вирішувати зворотню задачу – визначати систему координат виробу за його геометричними особливостями і конструктивними елементами.

Широке використання нестандартних схем планеру літальних апаратів потребує індивідуального підходу до розроблення методів побудови базових систем координат кожного окремого типу виробу. Саме тому дане питання потребує додаткових досліджень та розробки нових методів та підходів.

Ключові слова: літальний апарат; контроль геометричних параметрів; базова система координат, реперна точка, цифровий двійник, нівелювання.

Постановка проблеми. Коректність та точність визначення фактичних геометричних параметрів виробу безпосередньо залежать від правильності визначення та побудови базової системи координат, відносно якої визначаються усі інші геометричні параметри. Дана проблема особливо актуальна для літальних апаратів з нестандартними рішеннями компоновальної схеми планеру.

При проектуванні літака система координат визначається на початковому етапі створення теоретичної моделі виробу і є базою для визначення його геометричного та конструктивного вигляду. При дослідженні геометричних параметрів готового виробу необхідно вирішувати зворотну задачу – визначити систему координат виробу за його геометричними особливостями і конструктивними елементами.

Основною задачею при визначенні системи координат готового виробу є досягнення максимальної відповідності параметрів цієї системи координат теоретичним значенням параметрів системи координат, що визначені у теоретичному кресленнику, або моделі:

$$СК_{ГВ} = СК_{ТЕОР}, \quad (1)$$

де $СК_{ГВ}$ – система координат готового виробу, $СК_{ТЕОР}$ – система координат за теоретичними даними.

Широке використання нестандартних схем планеру літальних апаратів потребує індивідуального підходу до розроблення методів побудови базових систем координат кожного окремого типу виробу. Саме тому дане питання потребує додаткових досліджень та розробки нових методів та підходів.

Аналіз останніх досліджень. Визначення фактичних геометричних параметрів об'єктів виробництва з метою контролю якості виготовлюваної продукції здійснюється у різних галузях промисловості із залученням сучасних високотехнологічних вимірювальних засобів та застосуванням різноманітних методів та підходів, таких як фотограмметрія [1-2], нівелювання [3], 3д сканування [4-6], тощо. Особливості застосування та важливість розробки нових методів визначення геометричних параметрів промислових виробів наведено у публікаціях [7-8]. Важливість контролю геометричних параметрів літака протягом його життєвого циклу висвітлено у [9]. У роботах [10-11] наведено загальні методи визначення фактичних значень геометричних параметрів крила літака.

Традиційним методом визначення геометричних параметрів готового виробу є нівелювання. Процедура нівелювання базується на визначенні перевищень реперних точок, попередньо закладених у конструкцію виробу, відносно базової площини нівелювання. Зазвичай нівелювальні роботи, особливо у сферах будівництва чи геодезії, виконуються з використанням оптичного нівеліра. Даний метод широко використовується і в авіаційній промисловості. З розвитком інформаційних технологій та удосконаленням вимірювальних засобів при нівелюванні літальних апаратів почалось широке використання координатно-вимірювальних машин (КВМ), що значно підвищило якість виконання обмірів та дозволило оптимізувати процес нівелювання виключивши ряд підготовчих процедур та ряд факторів, які негативно впливали на точність даних, отриманих при обмірах. Детально процедуру нівелювання літального апарату за допомогою КВМ, в тому числі один з методів побудови базової системи координат, та основні переваги даного методу для літака

класичної схеми описано у [12]. Дана методика є достатньо ефективною для середніх та великих літаків. Але з розвитком безпілотної авіації, яка зазвичай має значно менші габарити, ефективність використання даної методики побудови базової системи координат значно знижується і є необхідність її доопрацювання.

Окрім напрямку дослідження геометричних параметрів готового виробу з метою контролю та дослідження якості виробництва побудова системи координат виробу є важливою складовою при створенні цифрового двійника виробу. Цифровий двійник є віртуальною копією фізичного об'єкта, який наслідує усі його властивості і характеристики. Детальний опис концепції цифрового двійника описано у праці Майкла Гривза [13]. За останні роки концепція цифрового двійника застосовується у багатьох напрямках виробничих підприємств світу [14-16]. Сучасні інженери та вчені, досліджуючи можливість впровадження концепції цифрового двійника в тій чи іншій сфері діяльності, доводять перспективність та ефективність її застосування у таких напрямках, як дослідження надійності виробу, дослідження економічної ефективності, дослідження різноманітних режимів експлуатації виробу, інтегрованого у сучасні складні системи, та його взаємодії з іншими виробами, що детально описану у працях [17-25]. Усі перераховані дослідження цифрового двійника виробу проводяться у віртуальному середовищі, що може дозволити прискорити процес доопрацювання виробу, процес його сертифікації, розрахувати економічні показники використання виробу, тощо.

Основна частина. Визначниками системи координат є три взаємно перпендикулярні площини, точкою перетину яких є точка початку координат, а лінії перетину зазначених площин є відповідними осями системи координат:

$$СК(ХОУ, ХОZ, YOZ) \quad (2)$$

Зазвичай для літака площинами, які визначають його систему координат є площина симетрії літака (ПСЛ), будівельна площина літака (БПЛ) та фронтальна площина літака (ФПЛ). Таким чином для системи координат літака вираз (2) можна записати у наступному вигляді:

$$СК_{л}(ПСЛ, БПЛ, ФПЛ) \quad (3)$$

де ПСЛ – площина симетрії літака, БПЛ – будівельна площина літака, ФПЛ – фронтальна площина літака.

або

$$СК_{л}(OX_{л}, OY_{л}, OZ_{л}) \quad (4)$$

де $OX_{л}$ – вісь X системи координат літака, $OY_{л}$ – вісь Y системи координат літака, $OZ_{л}$ – вісь Z системи координат літака.

Визначати параметри площин ПСЛ, БПЛ, ФПЛ (3), або осей (4) необхідно базуючись за фактичні конструктивні елементи. В якості таких конструктивних елементів використовується набір реперних точок (РТ), які закладаються в конструкцію літака при його проектуванні.

Класифікуємо реперні точки за типами – базові РТ, призначені для визначення системи координат виробу, та РТ для визначення фактичних геометричних параметрів:

$$РТ_{Л}=(РТ_{Лi})_1^n=(РТ_{Лi})_1^2=(РТ_{Б}, РТ_{ГП}), \quad (5)$$

де $РТ_{Б}$ – базові реперні точки, $РТ_{ГП}$ – реперні точки для визначення геометричних параметрів готового виробу.

У даній роботі розглянемо лише базові реперні точки, які використовуються для побудови системи координат виробу:

$$РТ_{Б} = (РТ_{Bi})_1^n = (РТ_1, РТ_2, \dots, РТ_n), \quad (6)$$

де $РТ_1, РТ_2, \dots, РТ_n$ – базові реперні точки, n – кількість базових реперних точок.

Кількість базових реперних точок залежить від типу літака та особливостей компоувальної схеми планера.

Розглянемо метод побудови системи координат літака класичної схеми планера. Для вирішення даної задачі необхідно визначити початок системи координат та напрямки осей X , Y та Z . Для літаків класичної схеми планера базові реперні точки розташовуються на зовнішній поверхні фюзеляжу і повинні лежати у єдиній горизонтальній площині, зазвичай БПЛ, як показано на рис. 1. Вихідними даними для визначення системи координат виробу є координати базових реперних, отриманих за результатами його обміру за допомогою КВМ у довільній системі координат.

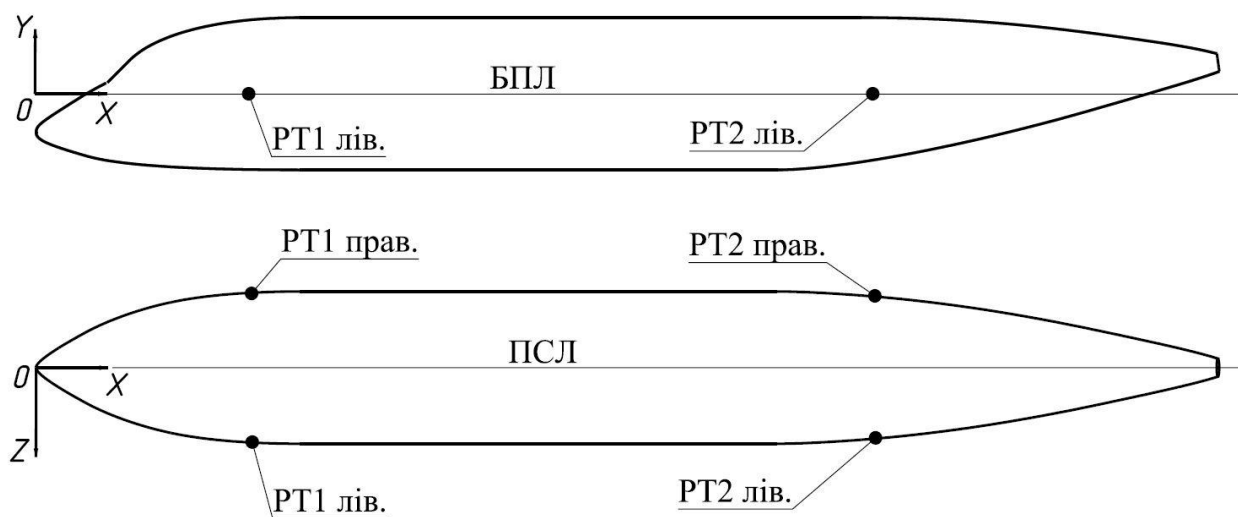


Рис. 1. Розташування базових реперних точок для визначення системи координат великих та середніх літаків

Принцип побудови системи координат для середніх та великих літаків класичної схеми планера показана на рис.2.

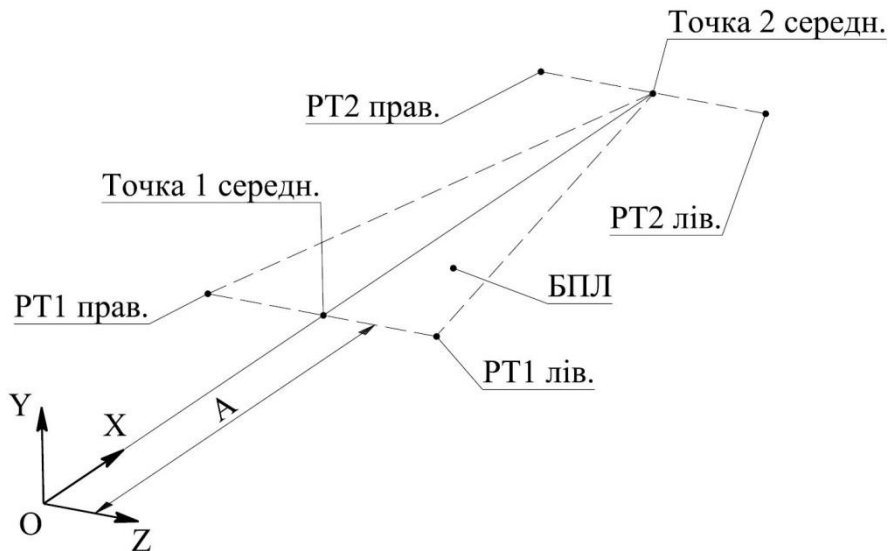


Рис. 2. Побудова системи координат для великих та середніх літаків

На рис. 2 показано, що спочатку визначається вісь X , яка проходить через точки $1_{\text{середн.}}$ та $2_{\text{середн.}}$, що лежать на серединах відрізків $РТ1_{\text{лів.}}$, $РТ1_{\text{прав.}}$ та $РТ2_{\text{лів.}}$, $РТ2_{\text{прав.}}$ відповідно. Наступним кроком визначається точка O початку системи координат, яка лежить на визначеній осі X на відстані A від точки $1_{\text{середн.}}$. Розмір A визначено при проектуванні і використовується його теоретичне значення. Вісь Y спрямовано вгору перпендикулярно до площини БПЛ, яка проходить через $РТ1_{\text{лів.}}$, $РТ1_{\text{прав.}}$ та точку $2_{\text{середн.}}$. Вісь Z доповнює прямокутну систему координат і спрямована в сторону лівого борту виробу.

При розташуванні базових реперних точок слід враховувати, що точність визначення системи координат літака також залежить від відстані між зазначеними базовими точками – чим далі розташовані точки одна від одної, тим менше буде вплив похибок при внесенні реперних точок у конструкцію літального апарату та при вимірювання їх координат під час дослідження геометричних параметрів виробу. Загалом описаний метод є ефективним для середніх та великих літаків, так як відстань між точками по лівому та правому бортам дозволяє достатньо точно встановити літак за креном. При використанні описаного вище методу для невеликих літаків, або БПЛА, за рахунок малих відстаней між базовими точками, похибки їх внесення у конструкцію та під час обмірів можуть значно вплинути на точність визначення системи координат, що в свою чергу суттєво впливає на загальну оцінку фактичних геометричних параметрів виробу. Тому для літальних апаратів невеликих розмірів при визначенні положення літака за креном базові реперні точки рекомендовано розташовувати на поверхнях крила.

Розглянемо запропонований удосконалений метод побудови системи координат літального апарату класичної схеми планеру, який є ефективним для невеликих виробів. На рис. 3 показано схему розташування базових реперних точок.

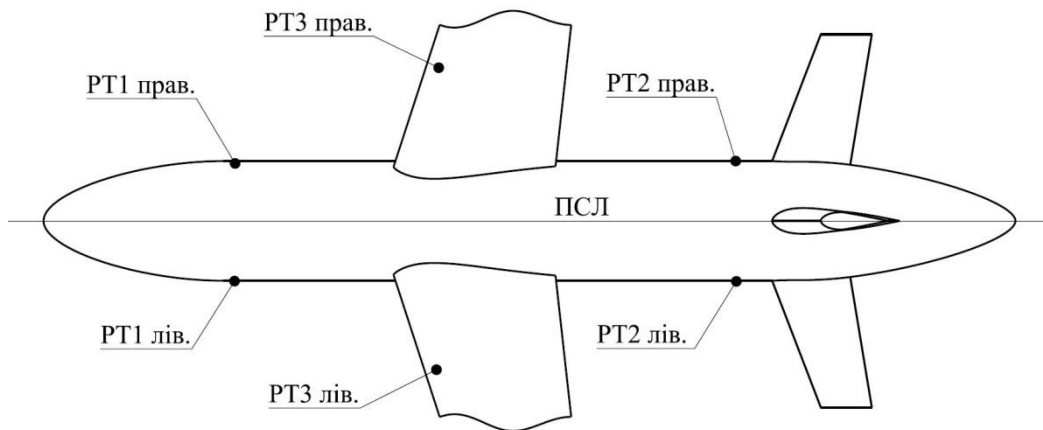


Рис. 3. Розташування базових реперних точок для визначення системи координат літальних апаратів невеликих розмірів

У даному випадку використовується не 4 а 6 базових реперних точок, 4 з яких розташовані на фюзеляжі виробу, аналогічно попередньому методу, і дві точки розташовані на лівій та правій консолях крила. Принцип побудови системи координат літального апарату показана на рис. 4.

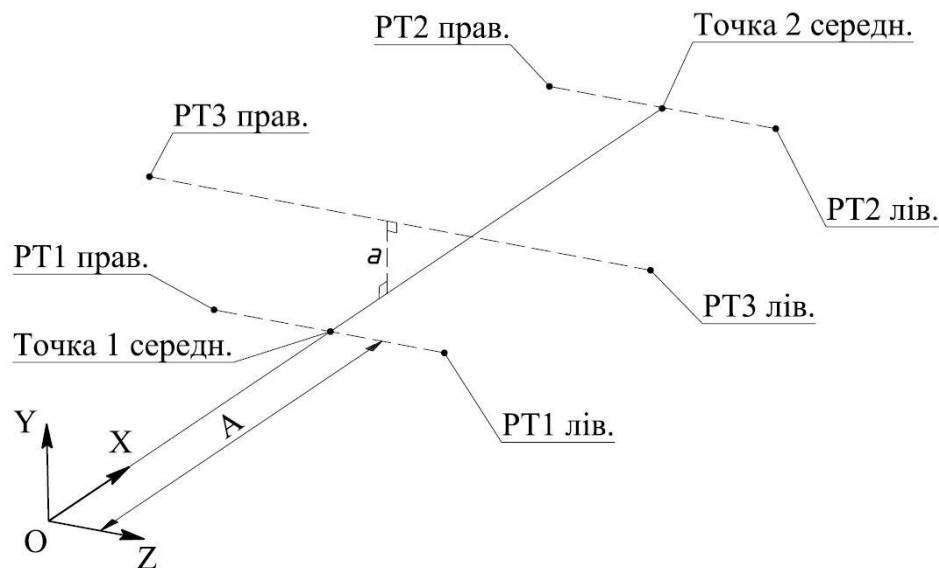


Рис. 4. Побудова системи координат для літальних апаратів невеликих розмірів
 З рис. 4 видно, що вісь X та початок системи координат визначаються аналогічно попередньому методу. Відмінність полягає у визначенні осі Y. Вісь Y спрямована вгору вздовж відрізка a , який визначається найкоротшою відстанню між віссю X та відрізком, який з'єднує $RT3_{лів.}$ та $RT3_{прав.}$. БПЛ проходить через вісь X і перпендикулярна відрітку a . Вісь Z доповнює прямокутну систему координат і спрямована в сторону лівого борту виробу.

Як вже зазначалося, перші два методи побудови системи координат ефективні для визначення систем координат літальних апаратів класичної схеми планеру, коли є можливість однозначно розташувати базові реперні точки на поверхні фюзеляжу у горизонтальній площині. Але у випадку

визначення систем координат літальних апаратів з нестандартною компоувальною схемою планера, технологія виготовлення якого може не передбачати застосування стапельного оснащення, а лише форми для виклеювання обшивок, часто неможливо розташувати базові реперні точки таким чином, щоб вони утворювали єдину горизонтальну площину. Як приклад розглянемо літальний апарат зі схемою планера типу літаючого крила. Для побудови системи координат такого літального апарату запропоновано метод, при якому використовуються лише 3 базові реперні точки, одна з яких розташована в носовій частині літального апарату в площині його симетрії, а дві інші точки розташовані на крилі, симетрично відносно площини симетрії виробу, як показано на рис. 5.

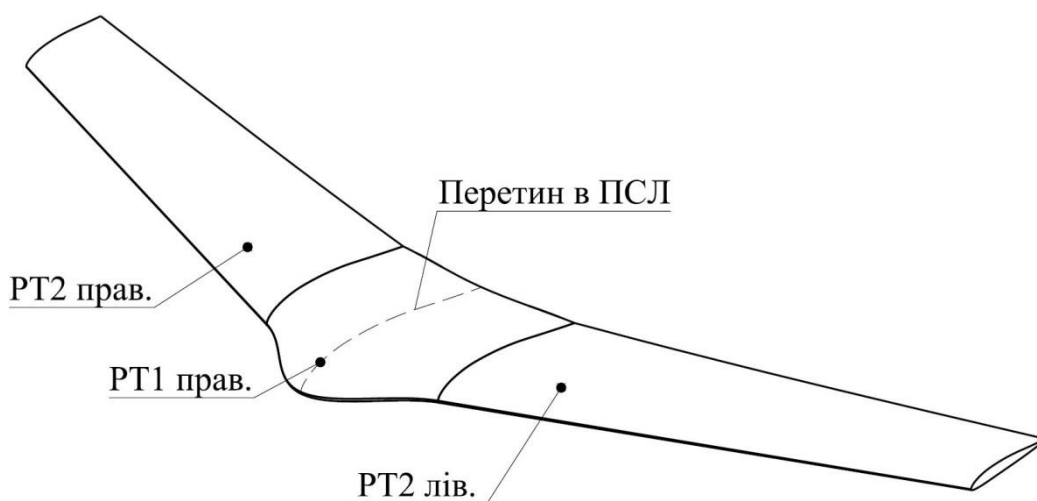


Рис. 5. Розташування базових реперних точок для визначення системи координат літального апарату за схемою літаюче крило

На рис. 6 показано побудову системи координат для літального апарату за схемою літаюче крило.

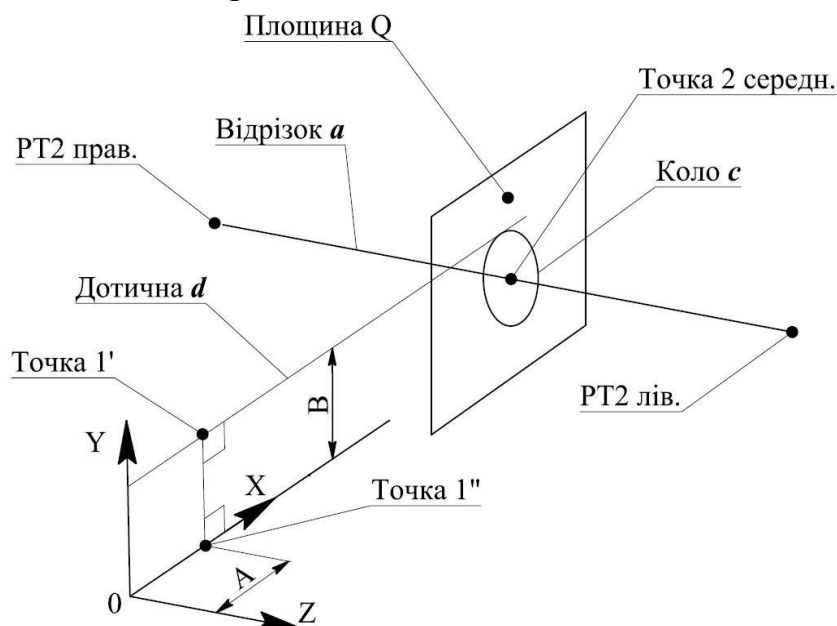


Рис. 6. Схема побудови системи координат для літального апарату за схемою літаюче крило

Запропонований алгоритм побудови системи координат літального апарату за схемою літаюче крило наступний:

- 1) визначити площину Q , яка проходить через точку $2_{\text{середн.}}$ перпендикулярно до відрізка a , який з'єднує $PT2_{\text{лів.}}$ та $PT2_{\text{прав.}}$;
- 2) побудувати точку $1'$, яка є проекцією $PT1$ на площину Q ;
- 3) побудувати коло c в площині Q з центром у точці $2_{\text{середн.}}$ і радіусом, який дорівнює різниці теоретичних значень координат Y $PT1$ та $PT2_{\text{лів.}}$ (або $PT2_{\text{прав.}}$) у системі координат виробу;
- 4) побудувати дотичну d до кола c з точки $1'$. Дана лінія задає напрямок осі X системи координат виробу;
- 5) побудувати лінію в площині Q , яка паралельна дотичній d і розташована паралельно до неї на відстані B . Відстань B є теоретичним значенням координати Y $PT1$. Отримана лінія є віссю X системи координат;
- 6) побудувати точку $1''$, яка є проекцією точки $1'$ на вісь X ;
- 7) побудувати точку O на осі X на відстані A від точки $1''$. Отримана точка є початком системи координат;
- 8) побудувати вісь Y , яка виходить з точки O , спрямована вгору, є перпендикулярною до осі X і лежить у площині Q ;
- 9) побудувати вісь Z , яка доповнює прямокутну систему координат і спрямована в сторону лівого борту виробу.

Висновки. Розглянуті у даній публікації методи визначення базової системи координат літального апарату є загальною концепцією, яку можна застосувати до будь якого з об'єктів виробництва, але слід враховувати, що кожен з високотехнологічних виробів має свої геометричні та конструктивні особливості і тому потребує розробки нових методів та індивідуальних підходів до задач з відтворення його базової системи координат.

Література

1. Білоус В.В., Боднар С.П. Фотограмметрія. Навчальний посібник. Київ : Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2021 р. – 137 с
2. Кочеригін Л.Ю. Фотограмметрія: навч. посіб. для студ. аграрних закладів вищої освіти галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». Біла Церква: БНАУ, 2019. 496 с
3. Є. Лаврішко, О. Ванчура, Моторизоване високоточне геометричне нівелювання, Геодезія, картографія і аерофотознімання. Національний університет «Львівська політехніка». Вип. 74, 2011.
4. M. Jarzabek-Rychard, H.-G. Maas, Modeling of 3D geometry uncertainty in Scan-to-BIM automatic indoor reconstruction / *Automation in Construction*. Volume 154, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105002>

5. *Leibo Song, Quan Jiang, Zhen Zhong, Feng Dai, Gang Wang, Xingkai Wang, Guansheng Han, Dan Zhang*, Technical path of model reconstruction and shear wear analysis for natural joint based on 3D scanning technology / *Measurement*. Volume 188, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110584>
6. *Xiao Chen, Guoxiang Liu, Zhuang Chen, Yuan Li, Chao Luo, Baolin Luo, Xianzhou Zhang*, Automatic detection system with 3D scanning and robot technology for detecting surface dimension of the track slabs / *Automation in Construction*. Volume 142. 2022.
7. *Ludovít Kovanič, Martin Štroner, Peter Blistan, Rudolf Urban, Rudolf Boček*. Combined ground-based and UAS SfM-MVS approach for determination of geometric parameters of the large-scale industrial facility Case study / *Measurement*. Volume 216. July 2023. 112994.
8. *Efstathiou K., Basiakoulis A., Efstathiou M., Anastasiou M., Seiradakis J.H.* Determination of the gears geometrical parameters necessary for the construction of an operational model of the Antikythera Mechanism / *Mechanism and Machine Theory*. Volume 52, June 2012, Pages 219-231.
9. *Ванін В.В., Незенко А.Й., Козлов С.О.* Підхід до формування геометричних моделей цифрового двійника на стадії виробництва / *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ імені Богдана Хмельницького, 2021. Вип.22. С. 3-11.
10. *Козлов С.О.*, Спосіб визначення фактичних кутів встановлення перерізів крила літака на етапах виробництва / *Збірник доповідей IX-ї всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених»*. Київ: 2020.
11. *Ванін В.В., Незенко А.Й., Козлов С.О.* Метод побудови фактичних поверхонь крила літака в процесі його виготовлення та експлуатації. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ імені Богдана Хмельницького, 2023. Вип.25, С. 158-168.
12. *Незенко А.Й., Вірченко Г.А., Пасічник Д.Д.* Особливості нівелювання літаків за допомогою лазерної координатно-вимірювальної машини / *Інформаційні системи, механіка та керування: науково-технічний збірник*. Київ: 2014. Вип.10. С. 152-159.
13. *Grieves, M.* Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, 2014.
14. *Rosen, R., Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.* About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 2015. No. 48-3, pp. 567-572.
15. *Aivaliotis, P., Georgoulis, K., & Chryssolouris, G.* The use of digital twin for predictive maintenance in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(11), pp. 1067–1080.
16. *Naoki Kikuchi, Tomohiro Fukuda, Nobuyoshi Yabuki.* Future landscape

visualization using a city digital twin: integration of augmented reality and drones with implementation of 3D model-based occlusion handling / *Journal of Computational Design and Engineering*, 2022. No. 9(2), pp. 837-856.

17. *Tim Kreuzer, Panagiotis Papapetrou, Jelena Zdravkovic*, Artificial intelligence in digital twins—A systematic literature review, *Data & Knowledge Engineering*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102304>

18. *Akram Hakiri, Aniruddha Gokhale, Sadok Ben Yahia, Nedra Mellouli*, A comprehensive survey on digital twin for future networks and emerging Internet of Things industry / *Computer Networks*. Volume 244, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110350>

19. *Taofeeq D. Moshood, James OB. Rotimi, Wajiha Shahzad, J.A. Bamgbade*, Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry / *Technology in Society*. Volume 77, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102519>

20. *Jasper Smeets, Kemal Öztürk, Robert Liebich*, Digital twin for motorcycle riding profile prediction, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Volume 161, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104569>

21. *Xiaoning Zhang, Yishuo Jiang, Xiqiang Wu, Zhuojun Nan, Yaqiang Jiang, Jihao Shi, Yuxin Zhang, Xinyan Huang, George G.Q. Huang*, AIoT-enabled digital twin system for smart tunnel fire safety management / *Developments in the Built Environment*. Volume 18, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100381>

22. *Zizheng Liu, Yingguang Chu, Guoyuan Li, Hans Peter Hildre, Houxiang Zhang*, Shipboard crane digital twin: An empirical study on R/V Gunnerus, *Ocean Engineering*. Volume 302, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117675>

23. *Hoonmin Park, Minchul Shin, Gyubok Choi, Yuseop Sim, Jiho Lee, Huitaek Yun, Martin Byung-Guk Jun, Gyuman Kim, Younghun Jeong, Hak Yi*, Integration of an exoskeleton robotic system into a digital twin for industrial manufacturing applications / *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Volume 89. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102746>

24. *Tae Wook Kang, Yunjeong Mo*, A comprehensive digital twin framework for building environment monitoring with emphasis on real-time data connectivity and predictability / *Developments in the Built Environment*. Volume 17, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100309>

25. *Hengrui Li, Xichun Shi, Binta Wu, Diego Raimondi Corradi, Zengxi Pan, Huijun Li*, Wire arc additive manufacturing: A review on digital twinning and visualization process / *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 116. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.001>

Referenses

1. *Bilous, V.V., Bodnar, S.P.* Photogrammetry: A Training Manual. Kyiv : Taras Shevchenko National University of Kyiv. 2021. 137 pp. {in Ukrainian}
2. *Kocheryhin L.Iu.* Photogrammetry: A textbook for students of agricultural institutions of higher education in the field of knowledge 19 "Architecture and Construction" specialty 193 "Geodesy and Land Management". Bila Tserkva: BNAU, 2019. 496 pp. {in Ukrainian}
3. *Ye. Lavrishko, O. Vanchura,* Motorized High-Precision Geodetic Leveling, Geodesy, Cartography and Aerial Photography. Lviv Polytechnic National University. Vol. 74, 2011. {in Ukrainian}
4. *M. Jarzabek-Rychard, H.-G. Maas,* Modeling of 3D geometry uncertainty in Scan-to-BIM automatic indoor reconstruction / *Automation in Construction*. Volume 154. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105002>
5. *Leibo Song, Quan Jiang, Zhen Zhong, Feng Dai, Gang Wang, Xingkai Wang, Guansheng Han, Dan Zhang,* Technical path of model reconstruction and shear wear analysis for natural joint based on 3D scanning technology / *Measurement*. Volume 188. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110584>
6. *Xiao Chen, Guoxiang Liu, Zhuang Chen, Yuan Li, Chao Luo, Baolin Luo, Xianzhou Zhang,* Automatic detection system with 3D scanning and robot technology for detecting surface dimension of the track slabs / *Automation in Construction*. Volume 142. 2022.
7. *Ludovít Kovanič, Martin Štroner, Peter Blistan, Rudolf Urban, Rudolf Boček.* Combined ground-based and UAS SfM-MVS approach for determination of geometric parameters of the large-scale industrial facility Case study / *Measurement*. Volume 216. July 2023. 112994.
8. *Efstathiou K., Basiakoulis A., Efstathiou M., Anastasiou M., Seiradakis J.H.* Determination of the gears geometrical parameters necessary for the construction of an operational model of the Antikythera Mechanism / *Mechanism and Machine Theory*, Volume 52, June 2012, Pages 219-231.
9. *Vanin, V.V., Nezenko, A.I., Kozlov, S.O.* An approach to the formation of geometric models of a digital twin at the production stage / *Modern problems of modeling*, 2021, No. 22, pp. 3-11. {in Ukrainian}
10. *Kozlov, S.O.* Method for determining actual installation angles of aircraft wing sections at the production stages / *Conference proceedings of IX All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Kyiv, 2020. pp. 11-15. {in Ukrainian}
11. *Vanin, V.V., Nezenko, A.I., Kozlov, S.O.* Method of building the actual wing surfaces of the aircraft during its manufacture and operation / *Modern problems of modeling*. 2023. No. 25, pp. 158-168. {in Ukrainian}
12. *Nezenko A.I., Virchenko H.A., Pasichnyk D.D.* Peculiarities of aircraft rigging check using a laser coordinate-measuring machine / *Information*

- systems, mechanics and control: scientific and technical anthology*. Kyiv, 2014, No. 10, pp. 152-159. {in Ukrainian}
13. *Grieves, M.* Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication, 2014.
 14. *Rosen, R., Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.* About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing / *IFAC-PapersOnLine*, 2015. No. 48-3. pp. 567-572.
 15. *Aivaliotis, P., Georgoulas, K., & Chryssolouris, G.* The use of digital twin for predictive maintenance in manufacturing / *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019. 32(11). pp. 1067–1080.
 16. *Naoki Kikuchi, Tomohiro Fukuda, Nobuyoshi Yabuki.* Future landscape visualization using a city digital twin: integration of augmented reality and drones with implementation of 3D model-based occlusion handling / *Journal of Computational Design and Engineering*, 2022, No. 9(2), pp. 837-856.
 17. *Tim Kreuzer, Panagiotis Papapetrou, Jelena Zdravkovic,* Artificial intelligence in digital twins—A systematic literature review / *Data & Knowledge Engineering*. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.datak.2024.102304>
 18. *Akram Hakiri, Aniruddha Gokhale, Sadok Ben Yahia, Nedra Mellouli,* A comprehensive survey on digital twin for future networks and emerging Internet of Things industry / *Computer Networks*. Volume 244. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110350>
 19. *Taofeeq D. Moshood, James OB. Rotimi, Wajiha Shahzad, J.A. Bamgbade,* Infrastructure digital twin technology: A new paradigm for future construction industry / *Technology in Society*. Volume 77, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102519>
 20. *Jasper Smeets, Kemal Öztürk, Robert Liebich,* Digital twin for motorcycle riding profile prediction, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 161, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104569>
 21. *Xiaoning Zhang, Yishuo Jiang, Xiqiang Wu, Zhuojun Nan, Yaqiang Jiang, Jihao Shi, Yuxin Zhang, Xinyan Huang, George G.Q. Huang,* AIoT-enabled digital twin system for smart tunnel fire safety management / *Developments in the Built Environment*. Volume 18. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100381>
 22. *Zizheng Liu, Yingguang Chu, Guoyuan Li, Hans Peter Hildre, Houxiang Zhang,* Shipboard crane digital twin: An empirical study on R/V Gunnerus / *Ocean Engineering*. Volume 302. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117675>
 23. *Hoonmin Park, Minchul Shin, Gyubok Choi, Yuseop Sim, Jiho Lee, Huitaek Yun, Martin Byung-Guk Jun, Gyuman Kim, Younghun Jeong, Hak Yi,* Integration of an exoskeleton robotic system into a digital twin for industrial manufacturing applications / *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 89, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102746>

24. *Tae Wook Kang, Yunjeong Mo*, A comprehensive digital twin framework for building environment monitoring with emphasis on real-time data connectivity and predictability / *Developments in the Built Environment*. Volume 17. 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100309>

25. *Hengrui Li, Xichun Shi, Bintao Wu, Diego Raimondi Corradi, Zengxi Pan, Huijun Li*, Wire arc additive manufacturing: A review on digital twinning and visualization process / *Journal of Manufacturing Processes*. Volume 116. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.001>

Doctor of Philosophy, **Andriy Nezenko**,
nezenkoandrej@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2403-477X

Sergiy Kozlov,
sergk198207@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2071-0993
ANTONOV Company

THE DETERMINATION OF THE BASELINE COORDINATE SYSTEM OF AN AIRCRAFT DURING THE INVESTIGATION OF ITS ACTUAL GEOMETRIC PARAMETERS

This publication addresses the issue of establishing the baseline coordinate system of an aircraft as one of the important tasks encountered during the investigation of its actual geometric parameters using modern measurement tools in the process of production and operation. The significance of this matter is underscored by the fact that the accuracy and correctness of calculations of its actual geometric parameters depend on the correctness of selecting the algorithm for determining the baseline coordinate system of the product. The article highlights the main criteria that need to be taken into account when determining the baseline coordinate system of an aircraft and proposes methods for the practical implementation of algorithms for its setting using examples of several types of aircraft. Research on changes in the actual geometric parameters of an aircraft is an important component of ensuring proper aircraft quality during its production and maintenance of airworthiness in operation. Such researches require correctness and high precision in determining the actual geometric parameters since the credibility of the comprehensive assessment of the actual condition of the product and, accordingly, the effectiveness of decisions regarding the quality of assembly work and the possibility of further operation depend on it. In the design of an aircraft, the coordinate system is defined at the initial stage of creating the theoretical model of the product and serves as the basis for determining its geometric and constructive appearance. When investigating the geometric parameters of a finished product, it is necessary to solve the inverse problem –

to determine the coordinate system of the product based on its geometric features and structural elements.

The widespread use of non-standard aircraft glider schemes requires an individual approach to developing methods for plotting baseline coordinate systems for each specific type of product. Therefore, this issue necessitates further research and the development of new methods and approaches.

Keywords: aircraft; control of geometric parameters; baseline coordinate system; reference point; digital twin; rigging check.