

УДК 004.925.8

## ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА НА СТАДІЇ ВИРОБНИЦТВА

Ванін В.В., д.т.н.,

[vaninvladimirv@gmail.com](mailto:vaninvladimirv@gmail.com), ORCID: 0000-0001-7008-7269

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Незенко А.Й., к.т.н.,

[nezenkoandrej@gmail.com](mailto:nezenkoandrej@gmail.com), ORCID: 0000-0002-2403-477X

*Державне підприємство «АНТОНОВ» (м. Київ, Україна)*

Козлов С.О., аспірант \*

[kozlov.sergey@ukr.net](mailto:kozlov.sergey@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2071-0993

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

*У статті висвітлено проблему забезпечення відповідності фактичних геометричних характеристик агрегатів на стадії виготовлення характеристикам, закладеним на стадії розроблення. Для комплексного вирішення зазначеної проблеми запропоновано спосіб реалізації концепції цифрового двійника з використанням підходів процесного геометричного моделювання. Реалізація концепції цифрового двійника технічного виробу сьогодні є одним з найбільш ефективних та перспективних шляхів дослідження фактичних характеристик складних технічних об'єктів, в тому числі і геометричних. Зважаючи на те, що льотні характеристики літального апарату безпосередньо залежать від його геометричних параметрів (ГП), геометрична складова є надзвичайно важливою при створенні цифрового двійника виробу. Зазначимо, що різними науковцями і технічними спеціалістами концепція цифрового двійника інтерпретується по-різному. В даний час не існує загальноприйнятої методології створення цифрового двійника, а способи та підходи до його формування знаходяться у сфері досліджень. В роботі запропоновано підхід до формування геометричної складової цифрового двійника для дослідження ГП літака на стадії виробництва шляхом застосування підходів процесного геометричного моделювання. Для цього досліджено життєвий цикл (ЖЦ) літака на стадії виробництва, проаналізовано аспекти формування ГП на кожному з етапів виробництва та показано основні фактори, які можуть призводити до відхилень ГП агрегатів та літака в цілому. Запропоновано послідовність етапів дослідження ГП на ключових стадіях ЖЦ, сукупність геометричних моделей та процес їх створення. Процес створення*

---

\* Науковий керівник – д.т.н., професор Ванін В.В.

послідовності геометричних моделей забезпечує реалізацію концепції у сучасних процесорієнтованих технологіях підтримки повного життєвого циклу виробу (PLM-технології).

*Ключові слова:* літак, виробництво, геометричні параметри, цифровий двійник, процесне геометричне моделювання.

**Постановка проблеми.** На стадіях дослідження та розроблення визначаються функціональні ГП літака, які безпосередньо впливають на його льотні характеристики в різних режимах польоту. В ідеальному випадку, ці ГП повинні залишатися незмінними упродовж всього ЖЦ виробу, починаючи зі стадії розроблення:

$$ГП_{Лекспл} = ГП_{Лвир} = ГП_{Лрозр}, \quad (1)$$

де  $ГП_{Лекспл}$ ,  $ГП_{Лвир}$ ,  $ГП_{Лрозр}$  – геометричні параметри, відповідно на стадіях експлуатації, виробництва та розроблення.

Фактично ж ГП, закладені на стадії розроблення, зазнають змін, і вираз (1) необхідно записати у наступному вигляді:

$$ГП_{Лвир} = ГП_{Лрозр} \pm \Delta_{вир}, \quad (2)$$

$$ГП_{Лекспл} = ГП_{Лвир} \pm \Delta_{експл}, \quad (3)$$

де  $\Delta_{експл}$  – відхилення ГП на стадії експлуатації,  $\Delta_{вир}$  – відхилення ГП на стадії виробництва.

Ці зміни можуть бути як передбачуваними у процесі проектування, так і непередбачуваними. Тоді вирази (2) та (3) запишемо:

$$ГП_{Лвир} = ГП_{Лрозр} \pm \Delta_{вир.передб} \pm \Delta_{вир.непередб}, \quad (4)$$

$$ГП_{Лекспл} = ГП_{Лвир} \pm \Delta_{експл.передб} \pm \Delta_{експл.непередб}. \quad (5)$$

Вплив передбачуваних відхилень ГП враховується при проектуванні на стадіях дослідження та розроблення. Непередбачувані зміни фактичних ГП літака, як правило, виникають на стадіях виготовлення та експлуатації і, зазвичай, негативно впливають на його льотні характеристики та конкурентні якості. Тому важливою науковою задачею є виявлення непередбачуваних змін ГП, дослідження причин, що їх спричиняють, з метою їх усунення або переведення у категорію передбачуваних на ранніх стадіях проектування. Перспективним є реалізація концепції цифрового двійника із використанням підходів процесного геометричного моделювання. Такий підхід дозволить відслідковувати, досліджувати і вчасно коригувати зміни ГП на усіх етапах виготовлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Створення цифрового двійника літака - це складний та багатоетапний процес, який охоплює багато напрямків. До таких напрямків належать: дослідження технології виробництва літака, дослідження змін ГП літака впродовж його ЖЦВ, дослідження в сфері геометричного моделювання агрегатів літака та інші.

У роботах [1,5,6] розглянуто питання інтеграції процесів створення літака при проектуванні у сучасних інформаційних технологіях. Особливості моделювання агрегатів літака на стадіях розроблення досить докладно висвітлено у [2,4]. У роботі [4] розкривається підхід процесного геометричного моделювання та питання змін ГП у продовж ЖЦВ. Проблеми створення цифрового двійника виробу подано у [3,7].

Але у зазначених публікаціях недостатньо розкрито проблему забезпечення відповідності ГП літака на стадії виробництва проектним параметрам в умовах стрімкого підвищення вимог до якості продукції.

**Формулювання цілей статті.** Підвищити якість виготовлення авіаційної техніки шляхом створення упорядкованих множин геометричних моделей, як ключової складової цифрового двійника виробу, для дослідження змін ГП на стадії виготовлення.

**Основна частина.** Під цифровим двійником будемо розуміти комп'ютерний образ кожного екземпляру виробу, який містить у собі усі його фактичні параметри, включно з геометричними, а також усі неточності, відхилення та інші особливості. У літакобудуванні геометрична складова є ключовим елементом цифрового двійника, тому розглянемо стадію виробництва в аспекті відтворення фактичних ГП, застосувавши підходи процесного геометричного моделювання. Для цього подамо життєвий цикл виробу у вигляді кортежу його стадій:

$$ЖЦВ = (ЖЦВ_i)_1^{N_{СТЖЦВ}} = (ЖЦВ_{досл}, ЖЦВ_{розр}, ЖЦВ_{вир}, ЖЦВ_{експл}), \quad (6)$$

де  $ЖЦВ$  – життєвий цикл виробу,  $N_{СТЖЦВ}$  – кількість стадій ЖЦВ,  $ЖЦВ_{досл}$  – стадія дослідження,  $ЖЦВ_{розр}$  – стадія розроблення,  $ЖЦВ_{вир}$  – стадія виробництва,  $ЖЦВ_{експл}$  – стадія експлуатації.

Далі класифікуємо геометричні параметри, моделі та процеси у відповідності до стадій ЖЦ, подавши їх у вигляді відповідних кортежів:

$$ГП_L = (ГП_{L_i})_1^{N_{СТЖЦВ}} = (ГП_{L_{досл}}, ГП_{L_{розр}}, ГП_{L_{вир}}, ГП_{L_{експл}}), \quad (7)$$

$$M_G = (M_{G_i})_1^{N_{СТЖЦВ}} = (M_{G_{досл}}, M_{G_{розр}}, M_{G_{вир}}, M_{G_{експл}}), \quad (8)$$

$$PP_G = (PP_{G_i})_1^{N_{СТЖЦВ}} = (PP_{G_{досл}}, PP_{G_{розр}}, PP_{G_{вир}}, PP_{G_{експл}}), \quad (9)$$

де  $ГП_L$ ,  $M_G$ ,  $PP_G$  – кортежі, відповідно, геометричних параметрів літака, геометричних моделей, процесів створення геометричних моделей;  $(ГП_{L_{досл}}, ГП_{L_{розр}}, ГП_{L_{вир}}, ГП_{L_{експл}})$ ,  $(M_{G_{досл}}, M_{G_{розр}}, M_{G_{вир}}, M_{G_{експл}})$ ,  $(PP_{G_{досл}}, PP_{G_{розр}}, PP_{G_{вир}}, PP_{G_{експл}})$  – кортежі, відповідно, геометричних параметрів, геометричних моделей, процесів створення геометричних моделей, відповідно, на стадіях дослідження, розробки, виготовлення та експлуатації.

Далі, відповідно до визначеної глибини деталізації дослідження ГП, розкриємо складові зазначених вище кортежів. Так як об'єктом дослідження є стадія виробництва, з формул (6), (7), (8), (9) розкриємо кортежі стадії виробництва, на яких визначаються досліджувані

геометричні параметри і запишемо у вигляді відповідних кортежів:

$$ЖЦВ_{вир} = (ЖЦВ_{вир}i)_1^{N_{ET_{вир}}} = (ЖЦВ_{ПВ}, ЖЦВ_{ВС}, ЖЦВ_{АС}, ЖЦВ_{ЗС}), \quad (10)$$

$$ГП_{Л_{вир}} = (ГП_{Л_{вир}}i)_1^{N_{ET_{вир}}} = (ГП_{Л_{ПВ}}, ГП_{Л_{ВС}}, ГП_{Л_{АС}}, ГП_{Л_{ЗС}}), \quad (11)$$

$$M_{Г_{вир}} = (M_{Г_{вир}}i)_1^{N_{ET_{вир}}} = (M_{Г}, M_{Г_{ВС}}, M_{Г_{АС}}, M_{Г_{ЗС}}), \quad (12)$$

$$ПР_{Г_{вир}} = (ПР_{Г_{вир}}i)_1^{N_{ET_{вир}}} = (ПР_{Г_{ПВ}}, ПР_{Г_{ВС}}, ПР_{Г_{АС}}, ПР_{Г_{ЗС}}), \quad (13)$$

де  $ЖЦВ_{вир}$ ,  $ГП_{Л_{вир}}$ ,  $M_{Г_{вир}}$ ,  $ПР_{Г_{вир}}$  – відповідно, життєвий цикл, геометричні параметри, геометричні моделі та процес створення геометричних моделей на стадії виробництва;  $N_{ET_{вир}}$  – кількість етапів виробництва;  $(ЖЦВ_{ПВ}, ЖЦВ_{ВС}, ЖЦВ_{АС}, ЖЦВ_{ЗС})$ ,  $(ГП_{Л_{ПВ}}, ГП_{Л_{ВС}}, ГП_{Л_{АС}}, ГП_{Л_{ЗС}})$ ,  $(M_{Г_{ПВ}}, M_{Г_{ВС}}, M_{Г_{АС}}, M_{Г_{ЗС}})$ ,  $(ПР_{Г_{ПВ}}, ПР_{Г_{ВС}}, ПР_{Г_{АС}}, ПР_{Г_{ЗС}})$ , – кортежі, відповідно, життєвого циклу, геометричних параметрів, геометричних моделей та процесів створення геометричних моделей на відповідних етапах виробництва, а саме підготовки виробництва, вузлового складання, агрегатного складання, загального складання.

Сукупність моделей, визначених у кортежах (8) та (12) утворюють геометричну складову цифрового двійника виробу на стадії виробництва і моделюють відповідні ГП, множини яких визначені у кортежах (7) та (11). У кортежах (9) та (13) визначено процеси створення геометричних моделей цифрового двійника та дослідження ГП на відповідних стадіях і етапах ЖЦВ, що визначені у кортежах (6) та (10). При необхідності, аналогічно відбувається подальше розкриття кортежів  $ЖЦВ$ ,  $ГП$ ,  $M_{Г}$ , та  $ПР_{Г}$  до досягнення необхідного рівня деталізації дослідження ГП виробу.

Кожен компонент кортежів (7), (8), (9), а також (11), (12), (13) містить множини відповідно ГП, моделей та процесів. Для прикладу запишемо множини геометричних параметрів кортежу (7), класифікувавши їх за агрегатним принципом:

$$ГП_{Л_{досл}} = \{ГП_{кр_{досл}}, ГП_{ф_{досл}}, ГП_{во_{досл}}, ГП_{го_{досл}}\}, \quad (14)$$

$$ГП_{Л_{розр}} = \{ГП_{кр_{розр}}, ГП_{ф_{розр}}, ГП_{во_{розр}}, ГП_{го_{розр}}\}, \quad (15)$$

$$ГП_{Л_{вир}} = \{ГП_{кр_{вир}}, ГП_{ф_{вир}}, ГП_{во_{вир}}, ГП_{го_{вир}}\}, \quad (16)$$

$$ГП_{Л_{експл}} = \{ГП_{кр_{експл}}, ГП_{ф_{експл}}, ГП_{во_{експл}}, ГП_{го_{експл}}\}, \quad (17)$$

де  $ГП_{кр}$  – ГП крила,  $ГП_{ф}$  – ГП фюзеляжу,  $ГП_{во}$  – ГП вертикального оперення,  $ГП_{го}$  – ГП горизонтального оперення.

Аналогічно можна записати множини моделей кортежу (8) та процесів кортежу (9).

Для дослідження змін функціональних ГП, номенклатура яких є сталою упродовж ЖЦ, запропоновано розглядати зміну їх значень як результат перетворення множин визначених ГП на кожному етапі ЖЦ, тоді для кортежу (7):

$$\varphi_{розр}: ГП_{Л_{досл}} \rightarrow ГП_{Л_{розр}}, \quad (18)$$

$$\varphi_{вир}: ГП_{Л_{розр}} \rightarrow ГП_{Л_{вир}}, \quad (19)$$

$$\varphi_{експл}: ГП_{Лвир} \rightarrow ГП_{Лекспл}, \quad (20)$$

де  $\varphi_{розр}$ ,  $\varphi_{вир}$ ,  $\varphi_{експл}$  – перетворення значень ГП, відповідно на стадіях розробки, виробництва та експлуатації.

Для кортежу (11), який деталізує стадію виробництва (кортеж (7)) запишемо:

$$\varphi_{ПВ}: ГП_{Лрозр} \rightarrow ГП_{ЛПВ}, \quad (21)$$

$$\varphi_{ВС}: ГП_{ЛПВ} \rightarrow ГП_{ЛВС}, \quad (22)$$

$$\varphi_{АС}: ГП_{ЛВС} \rightarrow ГП_{ЛАС}, \quad (23)$$

$$\varphi_{ЗС}: ГП_{ЛАС} \rightarrow ГП_{ЛЗС}, \quad (24)$$

де  $\varphi_{ПВ}$ ,  $\varphi_{ВС}$ ,  $\varphi_{АС}$ ,  $\varphi_{ЗС}$  – перетворення значень ГП, відповідно на етапах підготовки виробництва, вузлового складання, агрегатного складання, загального складання.

Визначення та дослідження цих перетворень є однією з цілей створення цифрового двійника виробу. Описані вище кортежі демонструють, що формування моделей цифрового двійника та процесів їх створення здійснюється на кожному етапі виробництва літака. Геометрична складова цифрового двійника літака являє собою упорядковану сукупність геометричних моделей окремих агрегатів, що відтворюють його фактичні ГП упродовж усього ЖЦВ.

На кожному з етапів виробництва запропоновано створити наступні типи моделей цифрового двійника:

- за даними замірів складального оснащення;
- за даними замірів готового виробу.

Моделі, побудовані за даними замірів складального оснащення демонструють прогнозовані зміни ГП агрегату, який буде виготовлено за допомогою даного оснащення. Моделі, побудовані за даними замірів готових агрегатів демонструють фактичні зміни ГП цих агрегатів з урахуванням всіх факторів, які вплинули на формування їх геометрії при виготовленні, в тому числі: ГП оснащення, дотримання технології складання, залишкові напруження в деталях та вузлах, тощо. Співставлення цих моделей та аналіз відхилень дозволяють дослідити перетворення показані в (19) - (25).

Запропонована схема створення моделей агрегатів та літака на стадії виробництва показана на рис. 1

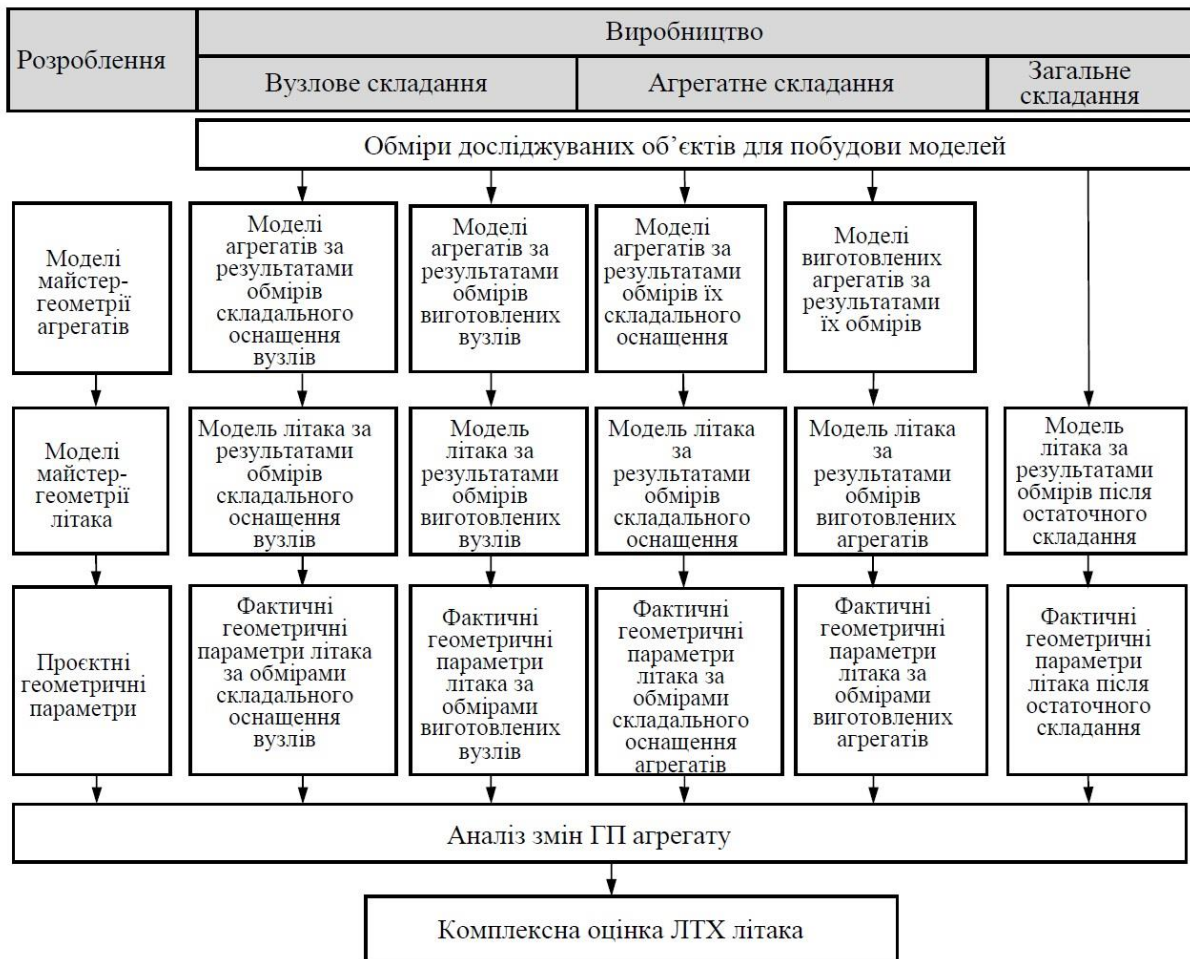


Рис.1. Схема створення моделей агрегатів та літака

**Висновки.** Створення цифрового двійника на етапах стадії виробництва дає можливість відслідковувати зміну ГП літака в процесі його виготовлення. Створення на кожному з етапів виробництва двох типів моделей (за даними замірів складального оснащення та за даними замірів готового виробу) дозволяє визначити відмінність між проектними параметрами, параметрами, які забезпечує складальне оснащення і параметрами, які фактично має виріб після складання. Запропонований спосіб реалізації створення цифрового двійника на стадії виробництва розширює можливості геометричного моделювання для підвищення якості авіаційної продукції.

### Література

1. Ванін В.В., Вірченко Г.А. Інтеграція процесів проектування та виробництва об'єктів машинобудування засобами геометричного моделювання. *Наукові нотатки. Інженерна механіка*. Луцьк: ЛДТУ, 2008. Вип. 22. Ч. 2. С. 54-61.
2. Ванін В.В., Вірченко Г.А., Збруцький О.В. Комп'ютерні структурно-параметричні геометричні моделі як засоби конструкторсько-технологічної оптимізації літака. *Механіка гіроскопічних систем*. Київ:

- НТУУ “КПІ”, 2014. Вип.27. С.111-119.
3. [https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/19186/A-Concrete-Example-of-a-Digital-Twin.aspx?e\\_src=relart](https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/19186/A-Concrete-Example-of-a-Digital-Twin.aspx?e_src=relart)  
Phillip Keane posted on June 30, 2019
  4. Незенко А.Й. Геометричне моделювання в процесах життєвого циклу виробу : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.01.01. Київ: КНУБА, 2019. 24 с.
  5. Гребеников А.Г., Гуменний А.М., Василевский Е.Т., Журавель С.В. Метод интегрированного проектирования и параметрического моделирования крыла пассажирского самолета. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2015. Вып. 70. С. 5-15.
  6. Гребеников А.Г., Двейрин А.З., Геремес Ю.Н., Гуменний А.М. Метод интегрированного проектирования и компьютерного моделирования фюзеляжа гражданского самолета с помощью интегрированных систем CAD/CAM/CAE/PLM. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. трудов*. Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т “ХАИ”, 2006. Вып. 30. с. 10-30.
  7. Незенко А.Й., Козлов С.О. Геометричне моделювання в аспекті концепції цифрового двійника виробу. *Сучасні проблеми моделювання*. Мелітополь: МДПУ імені Богдана Хмельницького, 2020. Вып.19. С. 117-123.

## **ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НА СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА**

Ванин В.В., Незенко А.И., Козлов С.О.

*В статье освещена проблема обеспечения соответствия фактических геометрических характеристик агрегатов на стадии изготовления характеристикам, заложенным на стадии разработки. Для комплексного определения указанной проблемы предложено применять концепцию цифрового двойника с использованием подходов процессного геометрического моделирования. Применение концепции цифрового двойника технического изделия сегодня является одним из наиболее эффективных и перспективных путей исследования фактических характеристик сложных технических объектов, в том числе и геометрических. Так как летные характеристики летательного аппарата напрямую зависят от его геометрических параметров (ГП), геометрическая составляющая чрезвычайно важна при создании цифрового двойника изделия. Отметим, что разным научными и техническими специалистами концепция цифрового двойника интерпретируется по-разному. На данный момент не существует*

общепринятой методологии создания цифрового двойника, а способы и подходы к его формированию находятся в сфере исследований. В работе предложен подход к формированию геометрической составляющей цифрового двойника для исследования ГП самолета на стадии производства путем применения подходов процессного геометрического моделирования. Для этого исследованы жизненный цикл самолета на стадии производства, проанализированы аспекты формирования ГП на каждом из этапов производства и показаны основные факторы, которые могут приводить к отклонениям ГП агрегатов и самолета в целом. Предложены последовательность этапов исследования ГП на ключевых этапах жизненного цикла, совокупность геометрических моделей и процесс их создания. Процесс создания последовательности геометрических моделей обеспечивает реализацию концепции в современных технологиях поддержки полного жизненного цикла изделия, ориентированных на процессный подход (PLM-технологии).

Ключевые слова: самолет, производство, геометрические параметры, цифровой двойник, процессное геометрическое моделирование.

## **THE APPROACH TO GEOMETRIC MODELS FORMATION OF A DIGITAL TWIN AT THE PRODUCTION STAGE**

Volodymyr Vanin, Andrii Nezenko, Sergiy Kozlov

*The article highlights the problem of ensuring the compliance of actual geometric characteristics of aircraft units at the manufacturing stage with the characteristics provided at the design stage. For comprehensive definition of this problem, it is proposed to apply the concept of a digital twin with the usage of approaches of process geometric modeling. The application of the concept of a digital twin for technical product is nowadays one of the most effective and perspective ways to study the actual characteristics of complex technical objects, including geometric ones. Despite the fact that aircraft flight characteristics directly depend on its geometric parameters (GP), the geometric component is extremely important when creating a digital twin of the product. Note that different scientific and technical specialists interpret the concept of a digital twin in different ways. At the moment, there is no generally accepted methodology for creating a digital twin, and methods and approaches of its development are the subject of research. The article proposes an approach to forming the geometric component of a digital twin for research of the aircraft geometric parameters at the production stage by the appliance of process geometric modeling approaches. For this purpose, the life cycle of an aircraft is investigated at the production stage, aspects of the geometric parameters formation are analyzed at each stage of production, as well as the main factors*



are shown that can lead to deviations of geometric parameters of aircraft units and the aircraft in whole. The GP investigation stages sequence is proposed at the key milestones of the life cycle, along with the set of geometric models and their creation process. The developing process of the geometric models' sequence ensures the implementation of the concept into modern technologies of supporting the entire product life cycle, oriented on the process approach (PLM technologies).

*Key words:* aircraft, production, geometric parameters, digital twin, process geometric modeling.

### **Referenses**

1. Vanin V.V., Virchenko G.A. (2008). Integration of design and production processes of mechanical engineering objects by means of geometric modeling. *Naukovi notatki. Inzhenerna mekhanika*, 22, 54-61 [in Ukrainian].
2. Vanin V.V., Virchenko G.A., Zbrutskyi O.V. (2014) Computer structurally parametric geometric models as means of engineering and design optimization of an aircraft. *Mekhanika hiroskopichnykh system*, 27, 111-119 [in Ukrainian].
3. [https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/19186/A-Concrete-Example-of-a-Digital-Twin.aspx?e\\_src=relart](https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/19186/A-Concrete-Example-of-a-Digital-Twin.aspx?e_src=relart) Phillip Keane posted on June 30, 2019.
4. Nezenko A.Y. (2019) Geometrical modeling in the product life cycle processes. *Avtoreferat dysertatsii kandydata tekhnichnykh nauk*, 1-24 [in Ukrainian].
5. Grebenikov A.G., Gumennyi A.M., Vasilevskiy Y.T., Zhuravel S.V. (2015). Method of integrated design and parametric modeling of the passenger aircraft wing. *Otkrytye informatsionnyye i kompyuternyye tekhnologii*, 70, 5-15. [in Russian].
6. Grebenikov A.G., Dveirin A.Z., Heremes Y.N. (2006). Method of integrated design and computer modeling of a civil aircraft fuselage by means of CAD/CAM/CAE/PLM integrated systems. *Otkrytye informatsionnyye i kompyuternyye tekhnologii*, 30, 10-30 [in Russian].
7. Nezenko A.Y., Kozlov S.O. (2020). Geometric modeling in the aspect of the concept of product digital twin. *Suchasni problemy modeliuвання*, 19, 117-123 [in Ukrainian].