

УДК 004.925.8

**ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В АСПЕКТІ КОНЦЕПЦІЇ  
ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ВИРОБУ**Незенко А.Й., к.т.н.,  
Козлов С.О.*Державне підприємство «АНТОНОВ» (м. Київ, Україна)*

*У представленій роботі проаналізовано особливості відтворення проектних геометричних параметрів літака на стадії виробництва. Висвітлено проблемні питання виробництва агрегатів та остаточного складання літаків, пов'язані з впливом різноманітних об'єктивних та суб'єктивних факторів на зміну геометричних параметрів виробу. Такими факторами можуть бути коливання температури навколишнього середовища, внутрішні напруження матеріалу, накопичення похибок, неточності в проектних розрахунках, тощо. Визначено напрямки комплексного вирішення проблем змін геометричних параметрів шляхом створення послідовності геометричних моделей фактичних геометричних параметрів з використанням концепції цифрового двійника виробу. Показано, що послідовність геометричних моделей зовнішніх обводів літака є невід'ємною складовою цифрового двійника і основою для побудови моделей інших технічних дисциплін. Для створення послідовності геометричних моделей цифрового двійника запропоновано застосовувати методологію структурно-параметричного геометричного моделювання з використанням підходів процесного геометричного моделювання. Показано, що підходи до формування геометричних моделей фактичних геометричних параметрів виробу на стадії виробництва відрізняються від підходів, що застосовуються для геометричного моделювання на стадіях дослідження і розроблення. Розглянуто ряд основних проблем, які постають перед конструкторськими та технологічними підрозділами при створенні моделей фактичних геометричних параметрів агрегатів літака на кожному з етапів його виробництва. Окреслено загальні напрямки подальших досліджень методів геометричного моделювання для вирішення проблем зміни геометричних параметрів при виробництві літальних апаратів.*

*Подані матеріали слугують основою для розробки відповідних геометричних моделей та комп'ютерних програмних засобів автоматизованого проектування.*

*Ключові слова: цифровий двійник, літальний апарат, виробництво, життєвий цикл виробу (ЖЦВ), проектні геометричні*

параметри ( $ГП_{проект}$ ), фактичні геометричні параметри ( $ГП_{факт}$ ).

**Постановка проблеми.** Забезпечення відповідності  $ГП_{факт}$  літальних апаратів  $ГП_{проект}$  потребує врахування великої кількості різноманітних факторів, які впливають на якість кінцевого продукту. Так, наприклад, коливання температури навколишнього середовища, внутрішні напруження матеріалу, накопичення похибок, неточності в проектних розрахунках авіаційної техніки можуть суттєво вплинути на  $ГП_{факт}$  виробу і, як наслідок, змінити експлуатаційні характеристики літака. Вплив зазначених факторів на конструкцію складного виробу досліджено недостатньо, тому надзвичайно актуальними є дослідження змін  $ГП_{факт}$  і розробка методів та підходів геометричного моделювання  $ГП_{факт}$  з урахуванням цих факторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Актуальні питання геометричного формоутворення зовнішніх обрисів літака у сучасних інформаційних технологіях представлено у [1,2]. Проблеми змін геометричних параметрів упродовж ЖЦВ досить докладно висвітлені у [4]. Проблеми реалізації концепції цифрового двійника висвітлені у [3]. Методи інтегрованого проектування та комп'ютерного моделювання літальних апаратів подано у [5,6]. Зазначені роботи встановлюють напрямки розвитку комп'ютерного автоматизованого графічного проектування та сприяють підвищенню конкурентоздатності продукції. Вирішення завдань геометричного моделювання в аспекті створення цифрового двійника виробу в процесі його виробництва дозволяють значно розширити можливості застосування геометричних моделей для підвищення якості продукції.

**Формулювання цілей статті.** Головне завдання даної публікації полягає в узагальненій постановці задачі інтегрованого структурно-параметричного геометричного моделювання теоретичних поверхонь літака в аспекті концепції цифрового двійника виробу.

**Основна частина.** Для комплексного вирішення проблем зміни  $ГП_{факт}$  виробу на стадії виробництва запропоновано використати концепцію цифрового двійника. Під цифровим двійником будемо розуміти комп'ютерний образ конкретного фізичного виробу, який включає в себе всі його фактичні геометричні параметри, а також усі відхилення, неточності та особливості (рис. 1).

Цифровий двійник допомагає оптимізувати виробництво, більш ефективно виявляти фізичні проблеми і недоліки та прогнозувати їх вплив на кінцевий результат.

Розглянемо на прикладі літака узагальнену схему формування цифрового двійника. На рис. 2 показано узагальнену послідовність створення моделей зовнішніх обводів виробу впродовж його життєвого циклу.

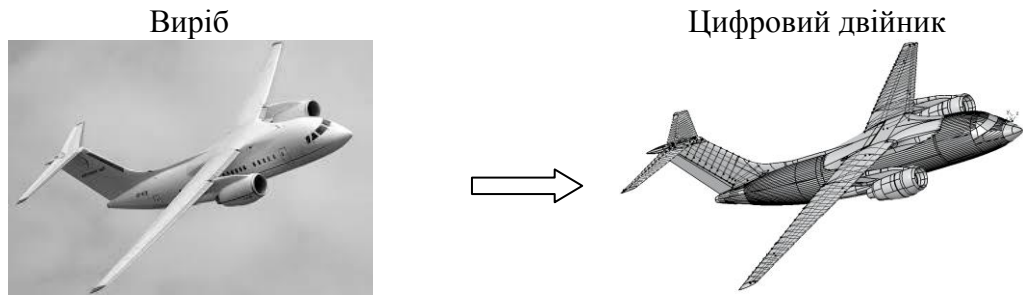


Рис. 1. Цифровий двійник виробу

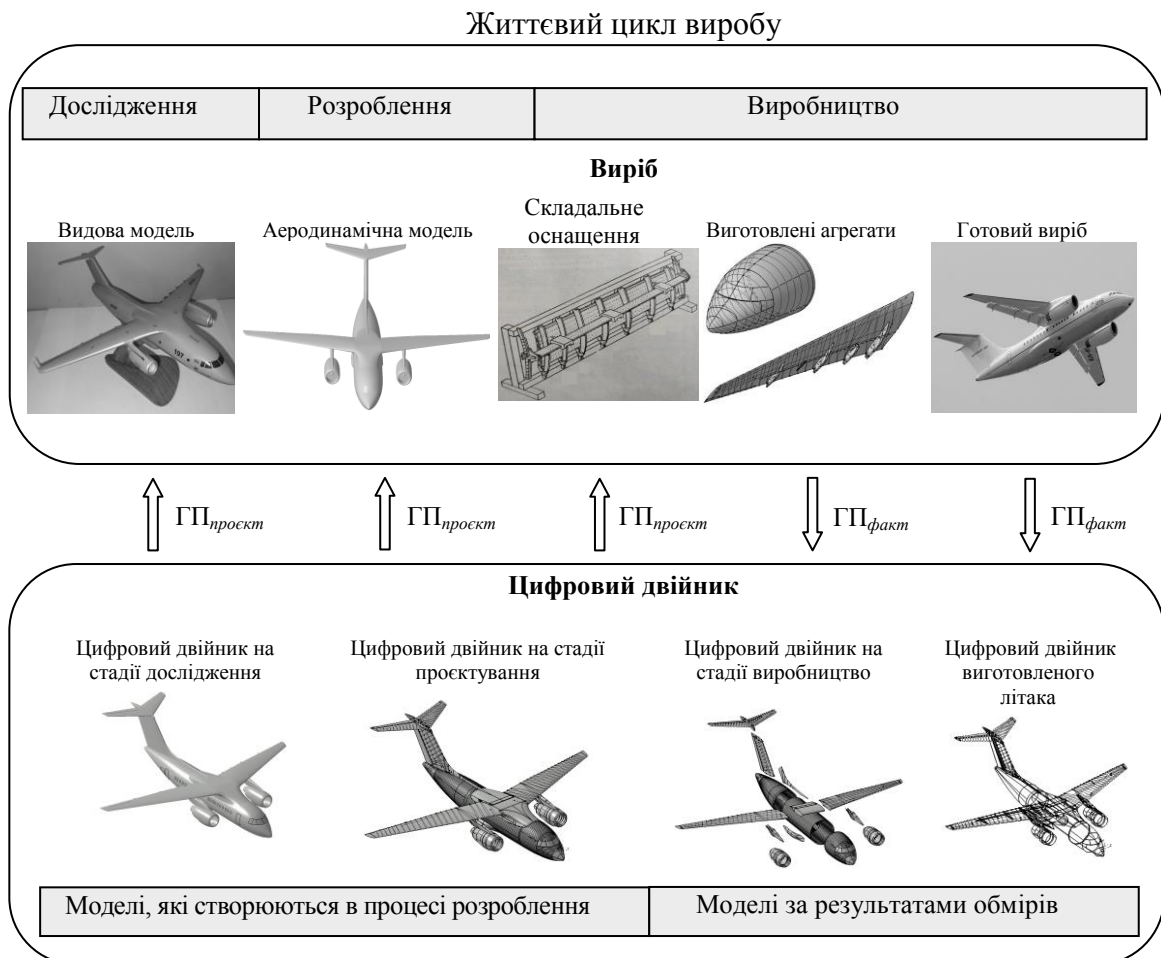


Рис. 2. Узагальнена послідовність створення цифрового двійника виробу на стадіях дослідження, розроблення та виробництва

На стадії дослідження створюються електронні моделі варіантів літака за результатами попередніх досліджень. На основі цих моделей виготовляються видові моделі виробу для презентацій та дослідження ринку. На стадії розроблення створюються електронні моделі, які використовуються для виготовлення аеродинамічних моделей, робочого проєктування та розробки складального оснащення. На

вказаних стадіях  $ГП_{факт}$  співпадають з  $ГП_{проект}$  [4].

$$ГП_{факт} = ГП_{проект} \cdot$$

Починаючи зі стадії виробництва  $ГП_{факт}$  відрізняються від проектних під впливом вище описаних факторів.

$$ГП_{факт} = ГП_{проект} \pm \Delta,$$

де  $\Delta$  - відхилення ГП.

Для визначення та дослідження фактичної геометрії виробу на стадії виробництва, на відміну від стадій дослідження та розроблення, електронну модель  $ГП_{факт}$  пропонується формувати за результатами обмірів виготовлених агрегатів літака, враховуючи усі відмінності фактичних параметрів від проектних (рис. 2). У зв'язку з цим підходи до формування геометричних моделей виробу на стадії виробництва суттєво відрізняються від підходів, які застосовуються при моделюванні на стадіях дослідження та розроблення. Це зумовлено тим, що на стадіях дослідження та розроблення теоретичні та геометричні бази мають однозначно визначені параметри на основі яких будується геометрична модель. При моделюванні на стадії виробництва теоретичні бази фактичного виробу необхідно визначати за результатами обмірів конструктивних елементів, що потребує розробки методів та алгоритмів їх визначення в межах певних допусків та накопичених похибок. Також на кожному з етапів виробництва літак має різну форму свого визначення: комплект складального оснащення, ізольовані агрегати, або повністю зібраний літак. У зв'язку з цим при створенні геометричної моделі фактичних параметрів на кожному з перерахованих етапів ми маємо абсолютно відмінні геометричні бази та параметри конструктивних елементів виробу. В такому разі геометричні моделі, сформовані на кожній з наведених стадій складно зіставити для визначення динаміки змін  $ГП_{факт}$  виробу в процесі виготовлення. Для вирішення цієї задачі запропоновано для кожного з етапів виробництва, за результатами проведених обмірів визначити єдиний набір аналогічних параметрів, та на їх основі створити типові геометричні моделі виробу. Дані моделі використовуємо як для проведення порівняльного аналізу, так і для відстеження динаміки змін ГП виробу в процесі виготовлення. Вирішення даної задачі потребує розробки нових алгоритмів розрахунку та аналізу фактичних геометричних параметрів літака.

**Висновки.** У публікації подано узагальнену постановку задачі інтегрованого моделювання фактичних обводів літальних апаратів на стадії виробництва в аспекті реалізації концепції цифрового двійника

виробу. Окреслено напрямки досліджень та розробки відповідного програмного забезпечення.

### *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 В.А., Гуменний А.М., Николаенко В.Н., Петров А.Н. Метод интегрированного проектирования и компьютерного моделирования крыла пассажирского самолёта с помощью интегрированных систем CAD/CAM/CAE/PLM. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». 2005. Вып. 27. С. 8-30.

## **ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В АСПЕКТЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ИЗДЕЛИЯ**

Незенко А.Й., Козлов С.А.

*В представленной работе проанализированы особенности воспроизведения проектных геометрических параметров самолета на стадии производства.*

*Освещены проблемные вопросы производства агрегатов и окончательной сборки самолетов, связанные с влиянием различных объективных и субъективных факторов на изменение*

*геометрических параметров изделия. Такими факторами могут быть колебания температуры окружающей среды, внутренние напряжения материала, накопление ошибок и неточностей в проектных расчетах и тому подобное.*

*Определены направления комплексного решения проблем изменений геометрических параметров путем создания последовательности геометрических моделей фактических геометрических параметров с использованием концепции цифрового двойника изделия. Показано, что последовательность геометрических моделей внешних обводов самолета является неотъемлемой составляющей его цифрового двойника и основой для построения моделей разных технических направлений. Для создания последовательности геометрических моделей цифрового двойника самолета предложено применять методологию структурно-параметрического моделирования с использованием подходов процессного геометрического моделирования.*

*Показано, что подходы к формированию геометрических моделей фактических геометрических параметров изделия на стадии производства отличаются от подходов, применяемых для геометрического моделирования на стадиях исследования и разработки. Рассмотрен ряд основных проблем, стоящих перед конструкторскими и технологическими подразделениями при создании моделей фактических геометрических параметров агрегатов самолета на каждом из этапов его производства. Определены общие направления дальнейших исследований методов геометрического моделирования для решения проблем изменения геометрических параметров при производстве летательных аппаратов.*

*Представленные материалы служат основой для разработки соответствующих геометрических моделей и программных средств автоматизированного проектирования.*

*Ключевые слова: цифровой двойник, летательный аппарат, производство, жизненный цикл изделия (ЖЦИ), проектные геометрические параметры ( $ГП_{\text{проект}}$ ), фактические геометрические параметры ( $ГП_{\text{факт}}$ ).*

## GEOMETRIC MODELING IN THE ASPECT OF PRODUCT DIGITAL TWIN CONCEPT

Nezenko A., Kozlov S.

*Features of reproducing aircraft design geometric parameters during the production stage analyzed in the presented study.*

*Problematic issues highlighted on unit production and aircraft final assembly due to the influence of various objective and subjective factors on variations of geometric parameters of a product. Such factors can be fluctuations in the ambient temperature, internal stresses of the material, the accumulation of errors, and inaccuracies in design calculations, et cetera.*

*Lines determined for comprehensive solutions of problems on geometric parameters variations by creating a sequence of geometric models with actual geometric parameters using the concept of a digital twin. It was demonstrated that the geometric model sequence of aircraft outer contours is an integral component of its digital twin and the basis for the designing of models of different technical paths. It was proposed to apply the methodology of structural-parametric modeling using approaches of process-based geometric modeling to create the sequence of geometric models of an aircraft digital twin.*

*It was demonstrated that approaches to the creation of geometric models of a product actual geometric parameters at the production stage are different from methods used for geometric modeling at the steps of research and development. A number of the main issues were considered that facing the design and technological departments when creating models of actual geometric parameters of aircraft units at each stage of its production. The general directions were determined for further research of geometric modeling methods to solve the problems of changing geometric parameters during the manufacturing of aircraft.*

*The materials presented serve as the basis for the development of appropriate geometric models and software tools for computer-aided design.*

*Key words: digital twin, aircraft, production, product life cycle (PLC), design geometric parameters ( $GP_{design}$ ), factual geometric parameters ( $GP_{fact}$ ).*