

Ю. А. ВОРОБІЙОВ¹, Є. П. ГАВРИЛОВ², К. В. МАЙОРОВА¹, О. А. БОГАЧ¹

¹ Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

² АТ «АНТОНОВ», Київ, Україна

ФОРМУВАННЯ ПОВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ВИЗНАЧЕННЯ ВИРОБУ У СИСТЕМІ ТЕХНІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА БПЛА ЛІТАКОВОГО ТИПУ

Предметом дослідження є процес формування повного електронного визначення виробу (ПЕВВ) у системі технічної підготовки виробництва безпілотних літальних апаратів (БПЛА) літакового типу в умовах цифрового дрібносерійного авіаційного виробництва. Актуальність роботи обумовлена високою інтенсивністю модернізації конструкції, скороченням життєвого циклу виробу (ЖЦВ), необхідністю швидкого переналагодження виробництва та інтеграції цифрових виробничих процесів. У таких умовах класичні підходи до використання електронної моделі виробу (ЕМВ) як окремої конструкторської моделі стають недостатніми для забезпечення інтеграції конструкторської, технологічної та організаційної підготовки виробництва. Це обумовлює необхідність формування ПЕВВ як інтегрованого цифрового виробничого середовища. Метою роботи є формування концептуальної структури ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу та визначення принципів інтеграції конструкторських, технологічних, організаційних і виробничих даних у єдиному координатно-узгодженому цифровому контурі. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: проведено аналіз сучасного стану цифровізації технічної підготовки виробництва БПЛА; визначено відмінності між поняттями електронної моделі виробу та повного електронного визначення виробу; сформовано структуру ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва; формалізовано склад основних інформаційних компонентів ПЕВВ; досліджено роль цифрового координатного ув'язування у структурі ПЕВВ; визначено особливості інтеграції ПЕВВ у цифровий виробничий контур. Результати дослідження свідчать, що ПЕВВ являє собою інтегроване цифрове інформаційне середовище, яке об'єднує конструкторські, технологічні, організаційні, виробничі та контрольні дані у єдиному координатно-узгодженому цифровому контурі. Запропоновано концептуальну структуру ПЕВВ для БПЛА літакового типу та формалізовано взаємозв'язки між ЕМВ, технологічною підготовкою виробництва (ТПВ), організаційною підготовкою виробництва (ОПВ), засобами технологічного оснащення (ЗТО), цифровим координатним ув'язуванням та виробничими даними. Показано, що однією з ключових тенденцій сучасного виробництва БПЛА є перенесення функцій забезпечення точності з фізичної структури ЗТО у цифровий виробничий контур на основі цифрового координатного ув'язування, віртуальне складання (virtual assembly), лазерних систем вимірювання (laser metrology) та цифрового контролю геометрії складання. Висновки підтверджують, що ПЕВВ повинно розглядатися не як окрема цифрова модель виробу, а як інтегроване цифрове виробниче середовище, яке забезпечує єдність конструкторської, технологічної, організаційної та виробничої інформації у системі технічної підготовки виробництва БПЛА. Показано, що використання ПЕВВ створює основу для переходу до адаптивних цифрово-керованих виробничих систем та реалізації безплазових методів складання у сучасному авіабудуванні. Наукова новизна роботи полягає у створенні концептуальної структури ПЕВВ для БПЛА літакового типу у системі технічної підготовки виробництва, яка на відміну від класичних CAD/PDM-підходів забезпечує інтеграцію конструкторських, технологічних, організаційних, контрольних та виробничих даних у єдиному координатно-узгодженому цифровому середовищі. Набула подальшого розвитку концепція цифрового координатного ув'язування у безплазовому виробництві БПЛА за рахунок інтеграції віртуального складання, цифрового контролю геометрії та цифрових виробничих даних у структуру ПЕВВ. Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованих рішень при створенні цифрових систем технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу, впровадженні безплазових методів складання, розробленні реконфігурованих виробничих систем, формуванні цифрових виробничих середовищ та інтеграції CAD/CAM/CAE/PLM-систем в авіабудуванні.

Ключові слова: повне електронне визначення виробу, електронна модель виробу, технічна підготовка виробництва, БПЛА, цифрове координатне ув'язування, безплазове виробництво, цифрова нитка, віртуальне складання, технологічне оснащення, цифрове виробниче середовище.



Вступ

1.1. Мотивація

Сучасний етап розвитку авіабудування характеризується інтенсивним впровадженням цифрових технологій у процеси проектування, виробництва та супроводу життєвого циклу літальних апаратів (ЛА). Особливо актуальними ці процеси стають для виробництва БПЛА літакового типу, яке характеризується високою швидкістю модернізації конструкції, скороченими циклами розроблення виробу, дрібносерійним характером виробництва та необхідністю швидкого перенастроювання виробничих систем [1, 2].

На відміну від класичного літакобудування, де виробничі процеси орієнтовані на довготривале серійне виготовлення стабільних конфігурацій виробів, сучасне виробництво БПЛА функціонує в умовах постійної зміни конструктивних рішень, високої варіативності виробів і необхідності інтеграції цифрових виробничих процесів у єдиний інформаційний контур [3, 4].

У таких умовах традиційні підходи до технічної підготовки виробництва, ґрунтовані на використанні ЕМВ лише як окремої конструкторської моделі, стають недостатніми для забезпечення інтеграції конструкторської, технологічної та організаційної підготовки виробництва. Існуючі CAD/PDM-системи забезпечують переважно геометричне та конструкторське визначення виробу, однак не формують єдиного цифрового середовища, яке б інтегрувало виробничі, технологічні, контрольні та організаційні дані в структурі технічної підготовки виробництва [5, 6].

Однією з ключових тенденцій сучасного авіабудування є формування цифрового виробничого середовища на основі цифрової нитки (digital thread), цифрового двійника (digital twin), модельно-орієнтованого визначення виробу (model-based definition) та інтеграції CAD/CAM/CAE/PLM-систем [7, 8]. Разом із тим у більшості існуючих досліджень основна увага приділяється цифровим двійникам, системам управління ЖЦВ або окремим аспектам цифрового виробництва, тоді як проблема формування ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА залишається недостатньо формалізованою [9, 10].

Для виробництва БПЛА літакового типу особливого значення набуває забезпечення інтеграції конструкторських даних, технологічних процесів (ТП), ЗТО, цифрового координатного ув'язування, виробничих маршрутів, систем контролю геометрії складання, організаційних виробничих рішень і цифрових виробничих даних.

У таких умовах ЕМВ повинна трансформуватись із окремої цифрової конструкторської моделі в ПЕВВ, яке об'єднує конструкторську, технологічну, організаційну та виробничу інформацію в єдиному координатно-узгодженому цифровому контурі [11, 12].

Важливим фактором є також розвиток безплатових методів складання та цифрового координатного ув'язування в авіабудуванні. У сучасному виробництві БПЛА дедалі більша частина функцій забезпечення точності переноситься з фізичної структури технологічного оснащення в цифрове виробниче середовище на основі лазерних систем вимірювання, віртуального складання, цифрового позиціонування та цифрового контролю геометрії складання [3, 7, 13].

При цьому використання реконфігурованих виробничих систем, модульного технологічного оснащення та адаптивних виробничих осередків вимагає створення інтегрованої цифрової інформаційної структури, яка забезпечує узгоджене функціонування всіх компонентів технічної підготовки виробництва [14, 15].

Таким чином, актуальною науково-практичною задачею є формування концептуальної структури ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу, яка забезпечує інтеграцію конструкторських, технологічних, організаційних, виробничих і контрольних даних у єдиному цифровому виробничому середовищі.

1.2. Сучасний стан досліджень

Сучасні дослідження цифрової трансформації авіаційного виробництва зосереджені переважно на розвитку цифрових двійників і цифрової нитки, модельно-орієнтованого визначення виробу, PLM-систем і реконфігурованих виробничих середовищ. У роботі [1] показано, що цифрові двійники у виробництві та системах технічного обслуговування й ремонту (Maintenance, Repair and Overhaul – MRO) авіаційної техніки можуть використовуватися для підтримки виробничих процесів, контролю стану виробничих систем і забезпечення інформаційної зв'язаності між фізичним об'єктом і його цифровим представленням.

Розвиток цифрових двійників розглядається також у роботі [2], де узагальнено сучасні промислові приклади їх використання та показано, що цифровий двійник поступово переходить від окремої моделі об'єкта до інструмента інтеграції даних у виробничому середовищі. Для задач технічної підготовки виробництва БПЛА це важливо, однак сам по собі цифровий двійник не вирішує проблему ПЕВВ, оскільки не завжди охоплює технологічні

маршрути, оснащення, контрольні операції та організаційні виробничі дані.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням модель-орієнтованого визначення виробу та модель-орієнтованого виробничого середовища. У роботі [12] показано, що ЕМВ може поступово замінювати традиційну креслярську документацію упродовж ЖЦВ. У роботі [13] розглянуто цифрову нитку як засіб підтримки модель-орієнтованого виробництва та контролю (model-based manufacturing and inspection), тобто переходу від цифрового конструкторського визначення до виробничих і контрольних процесів.

Разом з тим, аналіз цих підходів показує, що поняття ЕМВ і ПЕВВ часто не розмежовуються достатньо чітко. ЕМВ переважно розглядається як геометричне та конструкторське визначення виробу, тоді як ПЕВВ повинно охоплювати не лише конструкцію, а й технологічні процеси (ТП), маршрути складання, схеми базування, ЗТО, контрольні операції та виробничі дані.

Важливими для формування ПЕВВ є дослідження цифрової нитки у виробничих системах. У роботі [5] цифрова нитка розглядається як механізм інтеграції даних між етапами проектування, виробництва та контролю. Такий підхід є близьким до задачі формування ПЕВВ, однак у більшості досліджень цифрова нитка розглядається як загальна інформаційна інфраструктура, а не як спеціалізована структура технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу.

Для виробництва БПЛА особливого значення набувають реконфігуровані виробничі системи та модульне технологічне оснащення. У роботі [6] визначено принципи побудови реконфігурованих виробничих систем (reconfigurable manufacturing systems), які забезпечують адаптацію виробництва до зміни номенклатури виробів. У роботі [3] розглянуто модульне проектування та компонування оснащення для складання авіаційних конструкцій, що безпосередньо пов'язано з проблемою швидкого переналадження виробництва та повторного використання складальних засобів.

Питання інтелектуальної підтримки проектування оснащення для складання авіаційних виробів розглянуто у роботі [4]. Автори показують перспективність використання систем підтримки прийняття рішень на основі штучного інтелекту (AI-based decision-making systems) для вибору та проектування складального оснащення (Скл.Осн.). Для формування ПЕВВ це важливо тому, що структура технологічного оснащення повинна бути не ізольованим результатом ТПВ, а частиною єдиного цифрового виробничого визначення виробу.

Окремий блок досліджень стосується

безплазового складання та безстапельного складання (jigless assembly). У роботі [18] обґрунтовано методологію проектування оснащення для забезпечення безстапельного складання, що є принципово важливим для переходу від жорстких стапельних систем до цифрово-керованого координатного складання. Для БПЛА літакового типу цей підхід має особливе значення, оскільки дає змогу зменшити залежність точності складання від фізичної структури оснащення та перенести частину функцій забезпечення точності у цифровий виробничий контур.

Дослідження [7, 8] показують, що розвиток композитних матеріалів та адитивних технологій змінює вимоги до структури виробничих процесів, технологічного оснащення і контролю геометрії виробу. Для БПЛА це особливо важливо, оскільки конструкції такого типу часто мають модульну будову, високу частку композитних елементів і потребують швидкої адаптації ТП до нових конфігурацій.

Попри значну кількість робіт з цифрових двійників, PLM, MBD, цифровий нитки, реконфігурованих виробничих систем і авіаційного оснащення, проблема формування ПЕВВ саме у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу залишається недостатньо формалізованою. У наявних дослідженнях переважно розглядаються окремі цифрові технології або окремі виробничі підсистеми, тоді як відсутня цілісна структура, яка поєднує ЕМВ, ТПВ, ОПВ, ЗТО, цифрове координатне ув'язування, контроль геометрії та виробничі дані в єдиному ПЕВВ.

Таким чином, сучасний стан досліджень свідчить про наявність науково-практичного розриву між розвитком окремих цифрових технологій авіавиробництва та потребою у формуванні інтегрованої структури ПЕВВ виробу для БПЛА літакового типу. Саме цей розрив визначає необхідність розроблення концептуальної та формалізованої моделі ПЕВВ як основи цифрової технічної підготовки виробництва БПЛА.

1.3. Мета, завдання та підхід до дослідження

Сучасне виробництво БПЛА літакового типу характеризується високою динамікою зміни конструкції виробу, необхідністю швидкого переналадження виробництва, широким використанням цифрових виробничих технологій та інтеграцією різнорідних інформаційних систем у єдине цифрове виробниче середовище [1, 2]. У таких умовах традиційні підходи до використання ЕМВ як окремої конструкторської моделі не забезпечують необхідного рівня інтеграції між конструкторською,

технологічною та організаційною підготовкою виробництва [5, 7].

Аналіз сучасного стану досліджень показав, що більшість існуючих робіт присвячені окремим аспектам цифровізації авіавиробництва: цифровому двійнику, цифровій нитці, PLM, модельно-орієнтованому визначенню виробу, реконфігурованим виробничим системам і цифровому виробничому середовищу [2, 8, 9]. Разом із тим недостатньо формалізованими залишаються:

- структура ПЕВВ;
- інтеграція ЕМВ, ТПВ та ОПВ;
- роль цифрового координатного ув'язування у структурі ПЕВВ;
- взаємозв'язок між цифровими виробничими даними та системою технічної підготовки виробництва БПЛА.

У зв'язку з цим метою роботи є формування концептуальної структури ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу та визначення принципів інтеграції конструкторських, технологічних, організаційних, виробничих і контрольних даних у єдиному координатно-узгодженому цифровому середовищі.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі задачі:

- провести аналіз сучасних підходів до цифровізації технічної підготовки виробництва БПЛА;
- визначити відмінності між ЕМВ і ПЕВВ;
- сформулювати структуру ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва;
- формалізувати склад основних інформаційних компонентів ПЕВВ;
- дослідити роль цифрового координатного ув'язування у структурі ПЕВВ;
- визначити принципи інтеграції ПЕВВ у цифровий виробничий контур;
- сформулювати концептуальну модель взаємодії компонентів ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА.

У роботі використано методи:

- системного аналізу складних виробничих систем;
- структурно-функціонального моделювання;
- цифрового інформаційного моделювання виробничих процесів;
- декомпозиції інформаційних структур технічної підготовки виробництва;
- концептуального моделювання цифрових виробничих середовищ;
- аналізу цифрових виробничих потоків у CAD/CAM/CAE/PLM-системах.

Підхід до дослідження базується на розгляді ПЕВВ не як окремої цифрової моделі виробу, а як

інтегрованого цифрового інформаційного середовища, що об'єднує ЕМВ, ТПВ, ОПВ, ЗТО, цифрове координатне ув'язування, виробничі маршрути, контроль геометрії складання, цифрові виробничі дані й інформаційні зв'язки між етапами ЖЦВ.

На відміну від традиційних CAD/PDM-підходів, запропонований підхід орієнтований на формування єдиного координатно-узгодженого цифрового виробничого середовища, яке забезпечує інтеграцію конструкторських, технологічних, організаційних і виробничих процесів у структурі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу.

Особливу увагу в роботі приділено інтеграції цифрового координатного ув'язування, безплавових методів складання, цифрової нитки та віртуального складання у структуру ПЕВВ як основи цифрового адаптивного виробничого середовища сучасного авіабудування [7, 12, 18].

Стаття структурована таким чином: у розділі 1 наведено мотивацію дослідження, аналіз сучасного стану проблеми та сформульовано мету й завдання роботи; у розділі 2 подано матеріали та методи дослідження; у розділі 3 розглянуто формування ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу; у розділі 4 обговорено отримані результати; у висновках наведено основні результати дослідження та напрями подальших досліджень.

2. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є система технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу в умовах цифрового дрібносерійного авіаційного виробництва.

Предметом дослідження є процес формування повного електронного визначення виробу як інтегрованого цифрового інформаційного середовища, що забезпечує взаємодію конструкторської, технологічної, організаційної та виробничої підготовки виробництва БПЛА.

Методологічною основою дослідження є системний підхід до розгляду технічної підготовки виробництва як інтегрованої багаторівневої цифрової виробничої системи. При цьому ПЕВВ розглядається не як окрема електронна модель виробу, а як єдине координатно-узгоджене цифрове середовище, що об'єднує конструкторські, технологічні, організаційні, виробничі та контрольні дані.

У роботі використано:

- методи системного аналізу складних виробничих систем;
- структурно-функціональний аналіз цифрових

виробничих середовищ;

- методи декомпозиції інформаційних структур;
- концептуальне моделювання цифрових виробничих контурів;
- аналіз інформаційних потоків CAD/CAM/CAE/PLM-систем;
- методи цифрового інформаційного моделювання виробничих процесів.

Дослідження структури ПЕВВ виконувалось на основі аналізу взаємозв'язків між етапами конструкторської, технологічної та організаційної підготовки виробництва, а також між цифровими виробничими даними та системами координатного ув'язування [5], [7]. Особлива увага приділялась інтеграції електронної моделі виробу з технологічними маршрутами, засобами технологічного оснащення, системами контролю геометрії складання та виробничими даними в межах єдиного цифрового виробничого контуру.

Для формалізації структури ПЕВВ використано представлення його у вигляді множини взаємопов'язаних інформаційних компонентів:

$$PEVV = \{EMV, TPV, OPV, ZTO, C_q, C_m, D_p\}, (1)$$

де EMV – електронна модель виробу;

TPV – технологічна підготовка виробництва;

OPV – організаційна підготовка виробництва;

ZTO – засоби технологічного оснащення;

C_q – система контролю якості та геометрії складання;

C_m – цифрове координатне ув'язування;

D_p – виробничі дані цифрового виробничого середовища.

Запропонована структура дозволяє розглядати ПЕВВ як інтегровану інформаційну систему, у якій окремі цифрові компоненти формують єдиний інформаційний простір технічної підготовки виробництва БПЛА.

Для дослідження процесів цифрового координатного ув'язування враховувалися принципи безплатової технічної підготовки виробництва, основані на використанні цифрових координатних систем базування, віртуального складання, лазерних систем вимірювання та цифрового контролю геометрії складання [3, 18]. При цьому аналізувалися особливості реконфігурованих виробничих систем, модульного технологічного оснащення та адаптивних виробничих осередків, характерних для сучасного виробництва БПЛА [14, 15].

Під час дослідження інформаційних зв'язків між компонентами ПЕВВ враховувалися принципи цифрової нитки та інтеграції CAD/CAM/CAE/PLM-систем в єдине цифрове виробниче середовище [1, 8].

Це дозволило розглядати ПЕВВ як основу формування адаптивного цифрового виробничого контуру в системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу.

3. Формування повного електронного визначення виробу в системі технічної підготовки виробництва БПЛА

3.1. Структура електронної моделі виробу

ЕМВ є базовою інформаційною складовою цифрової технічної підготовки виробництва та формує початкову структуру даних для створення ПЕВВ. У сучасному авіабудуванні ЕМВ використовується як цифрове представлення конструкції виробу, яке забезпечує формування геометричної, конструктивної та атрибутивної інформації про об'єкт виробництва [11, 12].

Для БПЛА літакового типу роль ЕМВ суттєво зростає через високу інтенсивність модифікації конструкції, необхідність швидкої реконфігурації виробництва, скорочення циклу підготовки виробництва, інтеграцію цифрових виробничих процесів і використання безплатових методів складання [1, 3].

На відміну від традиційного підходу, при якому ЕМВ використовується переважно як цифровий аналог креслярської документації, в сучасному виробництві БПЛА ЕМВ виступає центральним інформаційним ядром цифрового виробничого середовища [5, 7].

У структурі технічної підготовки виробництва ЕМВ забезпечує геометричне визначення виробу, формування структури виробу, параметризацію елементів конструкції, визначення базових координатних систем, інтеграцію конструкторських обмежень, передачу цифрових даних у системи ТПВ та ОПВ і підтримку цифрового координатного ув'язування.

Структурно ЕМВ для БПЛА літакового типу включає геометричну модель виробу, структуру агрегатів і складальних одиниць (Скл.Од.), параметричні моделі елементів конструкції, цифрові моделі поверхонь, атрибутивні та довідкові дані, системи координат і базування, вимоги до точності, цифрові зв'язки між складовими частинами (СЧ) виробу, атрибутивні та службові дані виробничого середовища.

Концептуально структура ЕМВ може бути представлена у вигляді сукупності взаємопов'язаних інформаційних компонентів:

$$EMV = \{G, S, P, C, A, T, M\}, (2)$$

де G – геометрична модель виробу;
 S – структура Скл.Од., зокрема агрегатів;
 P – параметричні моделі елементів конструкції;
 C – координатні системи та базування;
 A – атрибутивні та довідкові дані;
 T – вимоги до точності та геометричних параметрів;
 M – атрибутивні та службові дані цифрового виробничого середовища.

У сучасному виробництві БПЛА ЕМВ повинна забезпечувати не лише геометричне представлення виробу, а й підтримку цифрових інформаційних зв'язків між етапами проєктування, виробництва, контролю та модернізації виробу [8, 9]. У зв'язку з цим ЕМВ поступово трансформується з ізольованої CAD-моделі в базовий компонент інтегрованого цифрового виробничого середовища.

Однією з ключових особливостей ЕМВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА є інтеграція цифрових координатних систем базування. На відміну від класичного плазово-шаблонного підходу, в безплазовому виробництві координатні системи, закладені в ЕМВ, використовуються безпосередньо для цифрового координатного ув'язування, формування схем складання, цифрового базування, програмування CNC-обладнання, віртуального складання та контролю геометрії складання [3, 18].

Таким чином, ЕМВ стає основою цифрової координатної узгодженості між конструкторською, технологічною та виробничою інформацією.

Важливою складовою ЕМВ є також підтримка цифрової інтеграції з CAD/CAM/CAE/PLM-системами. У структурі технічної підготовки виробництва це забезпечує передачу конструкторських даних у системи ТПВ, формування цифрових технологічних маршрутів, інтеграцію з цифровими системами контролю, підтримку цифрової нитки та узгодження виробничих і контрольних даних у єдиному цифровому контурі [5, 7].

Разом із тим проведений аналіз показує, що ЕМВ сама по собі не забезпечує повної інтеграції усіх компонентів технічної підготовки виробництва. Значна частина виробничої, технологічної, організаційної та контрольної інформації формується вже на наступних етапах технічної підготовки виробництва. Це обумовлює необхідність переходу від окремої ЕМВ до ПЕВВ як інтегрованого цифрового виробничого середовища.

3.2. Трансформація електронної моделі в повне електронне визначення виробу

У сучасному цифровому авіабудуванні ЕМВ

поступово перестає бути лише цифровим геометричним представленням конструкції та трансформується в комплексне цифрове інформаційне середовище, яке забезпечує інтеграцію усіх етапів технічної підготовки виробництва [1, 5]. Для БПЛА літакового типу така трансформація має особливе значення через високу інтенсивність модифікації конструкції, необхідність швидкого перенастроювання виробничих процесів та інтеграцію реконфігурованих виробничих систем [3, 14].

У класичному підході ЕМВ використовується переважно як цифрове конструкторське визначення виробу, яке забезпечує геометричне представлення конструкції, структуру агрегатів та інших Скл.Од., параметричне моделювання, формування конструкторської документації, передачу даних у CAD/CAM/CAE-системи [11, 12].

Разом із тим у структурі сучасного виробництва БПЛА такого рівня цифрового визначення виробу недостатньо для забезпечення інтеграції ТП, виробничих маршрутів, схем складання, цифрового координатного ув'язування, ЗТО, систем контролю геометрії, організаційних виробничих рішень і цифрових виробничих даних.

У зв'язку з цим виникає необхідність переходу від ЕМВ до ПЕВВ як інтегрованої цифрової виробничої структури, яка охоплює всі компоненти технічної підготовки виробництва.

Концептуально процес формування ПЕВВ можна розглядати як послідовне розширення функціональності ЕМВ шляхом інтеграції технологічної, організаційної та виробничої інформації в єдиному координатно-узгодженому цифровому середовищі.

На відміну від ЕМВ, яка переважно описує конструкцію виробу, ПЕВВ формує інтегроване цифрове виробниче середовище, що забезпечує взаємодію між КПВ, ТПВ, ОПВ, ЗТО, системами цифрового координатного ув'язування, цифровими системами контролю, виробничими інформаційними потоками та даними супроводу ЖЦВ [7, 8].

Основні концептуальні відмінності між ЕМВ та ПЕВВ наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика	ЕМВ	ПЕВВ
Геометрія	+	+
ТПВ	–	+
ОПВ	–	+
ЗТО	частково	+
Координатне ув'язування	частково	+
MES/PLM інтеграція	обмежено	+

У структурі ПЕВВ ЕМВ виступає базовим інформаційним ядром, навколо якого формуються

цифрові технологічні маршрути, схеми базування та складання, цифрові моделі оснащення, координатні виробничі системи, програми CNC-обробки, цифрові контрольні процедури, цифрові виробничі обмеження та системи управління виробничими процесами.

На рис. 1 наведено порівняння ЕМВ і ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу. Показано, що, на відміну від ЕМВ, яка переважно забезпечує геометричне та конструкторське визначення виробу, ПЕВВ інтегрує конструкторські, технологічні, організаційні, виробничі та контрольні дані в межах єдиного цифрового виробничого середовища. Також показано роль цифрового координатного ув'язування, інтеграції CAD/CAM/CAE/PLM/MES-систем і підтримки цифрового виробничого контуру в структурі ПЕВВ.

Формалізовано структуру ПЕВВ у вигляді сукупності взаємопов'язаних цифрових компонентів:

$$PEVV = EMV \cup TPV \cup OPV \cup ZTO \cup C_q \cup C_m \cup D_p, (3)$$

де EMV – електронна модель виробу;

TPV – технологічна підготовка виробництва;

OPV – організаційна підготовка виробництва;

ZTO – засоби технологічного оснащення;

C_q – система контролю якості та геометрії

складання;

C_m – цифрове координатне ув'язування;

D_p – виробничі дані цифрового виробничого

середовища.

Запропонований підхід дозволяє розглядати ПЕВВ як інтегровану координатно-узгоджену цифрову систему, в якій окремі інформаційні компоненти взаємодіють у межах єдиного цифрового виробничого контуру.

Однією з ключових особливостей трансформації ЕМВ у ПЕВВ є інтеграція цифрового координатного ув'язування в структуру технічної підготовки виробництва. У класичному літакобудуванні забезпечення точності значною мірою базувалось на використанні жорстких стапелів, складальних пристроїв (СП), шаблонів і фізичних базових елементів. Для сучасного виробництва БПЛА дедалі більшого значення набуває перенесення функцій забезпечення точності з фізичної структури оснащення в цифровий виробничий контур [3, 18].

У таких системах частина функцій забезпечення точності реалізується за допомогою цифрового координатного базування, віртуального складання, лазерних систем вимірювання, цифрового позиціонування, цифрового контролю геометрії складання та цифрових виробничих даних.

У результаті змінюється сама логіка технічної підготовки виробництва. Якщо в традиційних виробничих системах основним носієм точності виступало фізичне оснащення, то в цифровому виробництві БПЛА функції забезпечення точності дедалі більше інтегруються безпосередньо в структуру ПЕВВ.

Для БПЛА літакового типу це створює можливості:

- скорочення циклу підготовки виробництва;
- швидкої реконфігурації виробничих процесів;
- зменшення обсягу жорсткого спеціалізованого оснащення;
- інтеграції реконфігурованих виробничих систем;
- підтримки адаптивного цифрового виробничого середовища [15, 16].

Таким чином, трансформація ЕМВ у ПЕВВ є переходом від локальної цифрової моделі виробу до інтегрованого цифрового виробничого середовища, яке забезпечує інформаційну, координатну та технологічну узгодженість усіх компонентів технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу.

На рис. 2 наведено концептуальну схему ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу.

Показано інтеграцію ЕМВ, ТПВ і ОПВ, цифрового координатного ув'язування, ЗТО та цифрового виробничого контуру в межах єдиного координатно-узгодженого цифрового середовища. Схема також відображає взаємозв'язки між CAD/CAM/CAE/PLM/MES-системами, виробничими процесами та системами цифрового контролю геометрії складання.

3.3. Цифрове координатне ув'язування в структурі повного електронного визначення виробу

Однією з ключових складових ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу є цифрове координатне ув'язування, яке забезпечує координатну узгодженість конструкторських, технологічних, виробничих і контрольних даних у межах єдиного цифрового виробничого середовища [1, 7].

У класичному літакобудуванні забезпечення геометричної точності складання базувалося переважно на використанні плазово-шаблонних методів, жорстких стапелів, кондукторів і фізичних базових елементів. При такому підході значна частина функцій забезпечення точності реалізовувалась безпосередньо конструкцією технологічного оснащення [18].





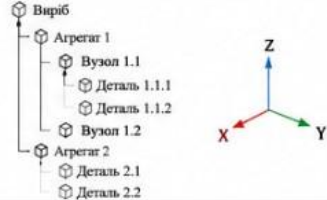


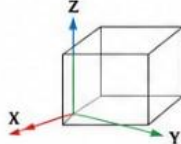


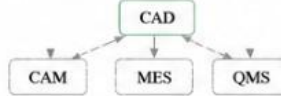





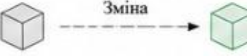




Критерій порівняння	Електронна модель виробу (ЕМВ)	Повне електронне визначення виробу (ПЕВВ)
 Призначення	<p>Відображає геометрію та конструкцію виробу. Використовується переважно на етапах проектування.</p> 	<p>Забезпечує повне цифрове визначення виробу протягом усього життєвого циклу. Інтегрує конструкторські, технологічні, організаційні, контрольні та виробничі дані.</p> 
 Склад інформації	<ul style="list-style-type: none"> • 3D геометрична модель • Ієрархічна структура виробу • Системи координат • Геометричні зв'язки та допуски 	<ul style="list-style-type: none"> • Усе, що входить до ЕМВ • Технологічні маршрути та операції • Координатне базування та схеми складання • Цифрові моделі оснащення та інструменту • Програми ЧПК та керуючі дані • Методи та результати контролю • Атрибутивні та службові дані • Дані для виробництва, експлуатації та супроводу 
 Координатне ув'язування	<p>Наявні системи координат моделі. Не забезпечує інтеграцію з технологічними базами, оснащенням і контролем.</p> 	<p>Єдине цифрове координатне ув'язування конструкторських, технологічних, вимірювальних та складальних баз у єдиному цифровому просторі.</p> 
 Взаємозв'язок з іншими системами	<p>Переважно ізольована в CAD/PDM-системах. Обмежена інтеграція з CAM, MES, QMS.</p> 	<p>Інтегрована з CAD/CAM/CAE/PLM/MES/QMS. Цифрова нитка (digital thread) забезпечує цілісність даних у всьому життєвому циклі.</p> 
 Підтримка виробництва	<p>Не містить достатньої інформації для повного виготовлення та контролю виробу. Потребує додаткової інтерпретації та створення локальних даних.</p> 	<p>Містить повний набір даних для планування, виготовлення, складання та контролю. Підтримує безплатове складання та цифровий контроль геометрії.</p> 
 Адаптивність	<p>Зміни конструкції потребують повторного створення похідних даних у різних системах.</p> 	<p>Зміни у конструкції автоматично поширюються цифровою ниткою на всі пов'язані дані та процеси.</p> 
 Результат	<p>Підтримує проектування виробу. Не забезпечує повну технологічну та виробничу готовність.</p> 	<p>Забезпечує технологічну, виробничу та контрольну готовність виробу. Підвищує точність, швидкість та якість виробництва.</p> 

Рис. 1. Порівняння ЕМВ та ПЕВВ

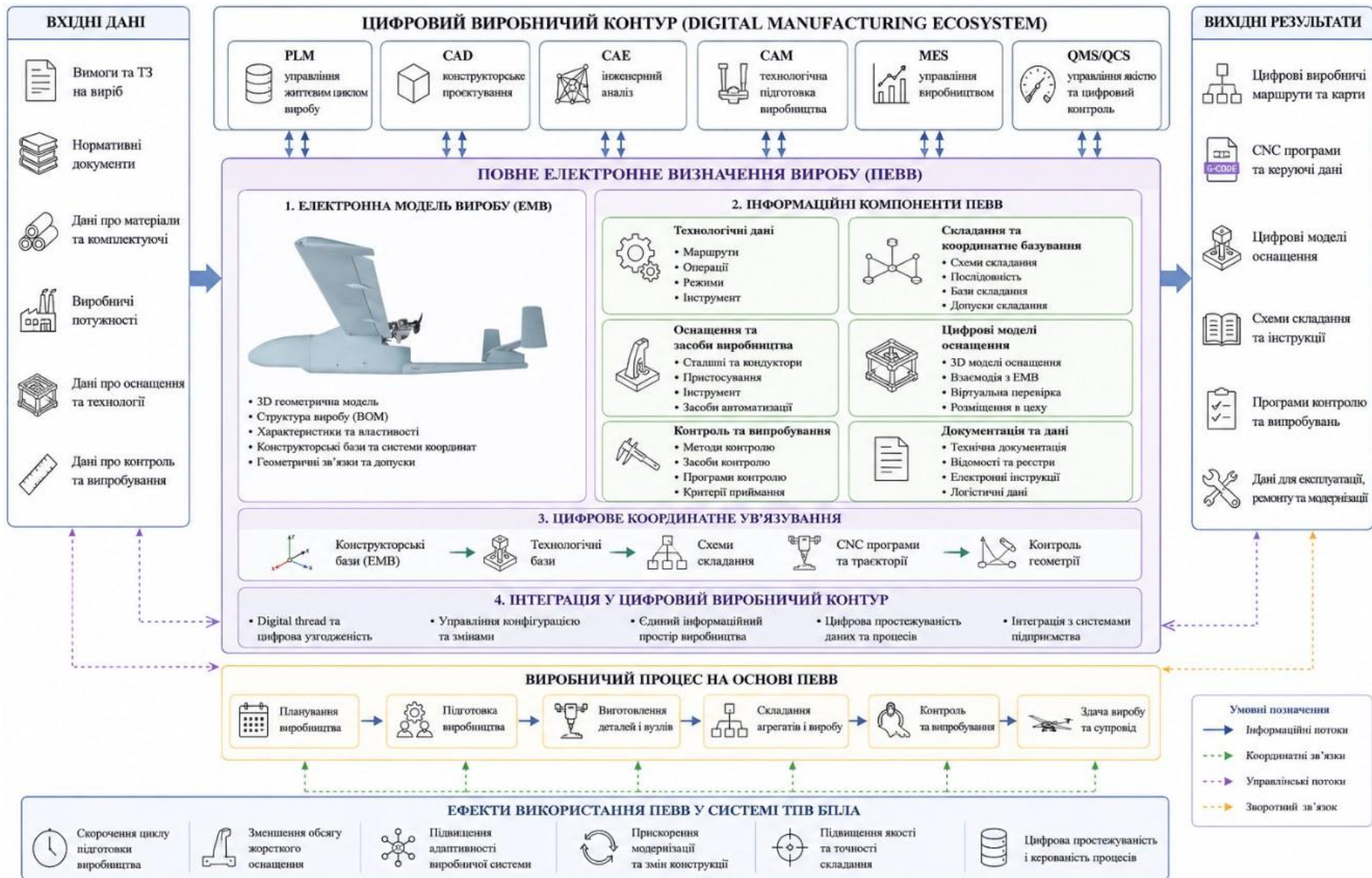


Рис. 2. Концептуальна схема ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу

Для сучасного виробництва БПЛА літакового типу подібний підхід стає малоефективним через:

- високу інтенсивність зміни конструкції;
- дрібносерійний характер виробництва;
- необхідність швидкого переналадження виробничих процесів;
- широке використання реконфігурованих виробничих систем;
- інтеграцію цифрових виробничих технологій [3, 14].

У зв'язку з цим у сучасному цифровому авіавиробництві дедалі більшого поширення набувають безплатові методи технічної підготовки виробництва, засновані на використанні цифрових координатних систем базування та цифрового координатного ув'язування.

У структурі ПЕВВ цифрове координатне ув'язування забезпечує:

- координатну інтеграцію між ЕМВ і ТПВ;
- узгодження систем базування;
- передачу координатних даних у CNC-системи;
- інтеграцію цифрових моделей оснащення;
- підтримку віртуального складання;
- цифровий контроль геометрії складання;
- узгодження координатних систем між етапами виробництва та контролю.

Концептуально цифрове координатне ув'язування в структурі ПЕВВ можна представити як систему інтеграції координатних зв'язків між компонентами цифрового виробничого середовища:

$$C_m = \{V_c, V_t, G_a, CNC, V_a, M_c\}, \quad (4)$$

де V_c – конструкторські координатні бази;

V_t – технологічні бази;

G_a – геометричне ув'язування агрегатів;

CNC – координатні дані для CNC-систем;

V_a – віртуальне складання;

M_c – цифровий контроль геометрії складання.

На відміну від традиційного плазово-шаблонного підходу, цифрове координатне ув'язування дозволяє забезпечити інтеграцію координатних даних без використання фізичних шаблонів і плазів. При цьому основним носієм геометричної інформації стає цифрова координатна структура ПЕВВ.

Для БПЛА літакового типу це створює можливість скорочення циклу технічної підготовки виробництва, зменшення обсягу жорсткого спеціалізованого оснащення, підвищення адаптивності виробничої системи, прискорення модернізації виробу та швидкого переналадження виробничих процесів.

Важливою особливістю цифрового

координатного ув'язування є інтеграція цифрових координатних систем між етапами проектування, виробництва та контролю. У структурі ПЕВВ координатні системи, сформовані в ЕМВ, безпосередньо використовуються при формуванні схем складання, проектуванні оснащення, програмуванні CNC-обладнання, при цифровому позиціонуванні елементів конструкції та при лазерному контролі геометрії складання [5, 21].

У таких системах відбувається поступове перенесення функцій забезпечення точності з фізичної структури стапельного оснащення в цифровий виробничий контур. Якщо в традиційному літакобудуванні точність визначалась переважно жорсткістю та геометричною стабільністю оснащення, то у цифровому виробництві БПЛА вона дедалі більше забезпечується цифровим координатним базуванням, цифровими виробничими моделями, лазерними системами вимірювання, цифровим контролем геометрії та координатною інтеграцією виробничих даних [1, 3, 18].

При цьому цифрове координатне ув'язування стає не окремою технологічною процедурою, а інтегрованою складовою ПЕВВ, яка забезпечує координатну узгодженість усіх компонентів цифрового виробничого середовища.

Важливою складовою цифрового координатного ув'язування є підтримка віртуального складання та цифрового моделювання технологічних процесів складання (ТПС). Це дозволяє виконувати цифрову перевірку схем складання, аналізувати взаємне положення агрегатів, оцінювати доступність зон складання, моделювати процеси базування та контролювати потенційні геометричні конфлікти ще на етапі технічної підготовки виробництва [7, 8].

Для сучасного виробництва БПЛА це особливо важливо через високу варіативність конструкцій та необхідність швидкого впровадження змін у структуру виробу.

Таким чином, цифрове координатне ув'язування у структурі ПЕВВ формує основу координатно-узгодженого цифрового виробничого середовища, яке забезпечує інтеграцію конструкторських, технологічних, виробничих та контрольних процесів у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу.

3.4. Інтеграція повного електронного визначення виробу у цифровий виробничий контур

Однією з ключових умов ефективного функціонування ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу є його інтеграція у єдиний цифровий виробничий

контур, який забезпечує узгоджену взаємодію між етапами проєктування, виробництва, контролю та супроводу ЖЦВ [1, 5].

У сучасному цифровому авіавиробництві ПЕВВ перестає бути локальною інформаційною моделлю окремого виробу та трансформується у центральний елемент цифрового виробничого середовища, що забезпечує інтеграцію CAD/CAM/CAE/PLM-систем, взаємодію між КПВ, ТПВ та ОПВ, підтримку цифрової нитки, інтеграцію цифрових виробничих даних, цифровий контроль виробничих процесів і координатну узгодженість між етапами ЖЦВ [2, 7].

У структурі цифрового виробничого контуру ПЕВВ виконує функції інтеграційного цифрового ядра, яке забезпечує інформаційний обмін між системами проєктування, технологічними системами, виробничим обладнанням, цифровими системами контролю, системами управління виробництвом, цифровими логістичними системами та системами супроводу експлуатації виробу.

Для БПЛА літакового типу така інтеграція має особливе значення через високу інтенсивність модернізації виробу, необхідність швидкої адаптації виробничих процесів, використання реконфігурованих виробничих систем, короткі цикли технічної підготовки виробництва й інтеграцію цифрових виробничих технологій [3, 14].

Концептуально інтеграцію ПЕВВ у цифровий виробничий контур можна представити як систему інформаційних взаємозв'язків між цифровими компонентами виробничого середовища:

$$D_c = \{CAD, CAM, CAE, PLM, MES, CNC, QCS\}, \quad (5)$$

де CAD – системи автоматизованого проєктування;

CAM – системи автоматизованої технологічної підготовки;

CAE – системи інженерного аналізу;

PLM – системи управління ЖЦВ;

MES – системи управління виробничими процесами;

CNC – цифрові виробничі системи та обладнання;

QCS – цифрові системи контролю якості та геометрії складання.

У такому середовищі ПЕВВ забезпечує не лише зберігання цифрових даних про виріб, а й формування єдиного інформаційного простору, у межах якого реалізуються:

- цифрові виробничі маршрути;
- цифрове координатне ув'язування;
- управління конфігурацією виробу;
- цифрове управління змінами;
- віртуальне складання;

– цифровий контроль геометрії;

– підтримка цифрових виробничих потоків.

Однією з ключових особливостей інтеграції ПЕВВ у цифровий виробничий контур є забезпечення наскрізної цифрової узгодженості між етапами ЖЦВ. У традиційних виробничих системах інформаційний обмін між етапами проєктування, виробництва та контролю часто супроводжується втратою частини даних, дублюванням інформації та необхідністю повторного формування виробничих моделей.

У цифровому виробничому контурі ПЕВВ усі виробничі та конструкторські дані формуються у межах єдиного координатно-узгодженого цифрового середовища. Це дозволяє мінімізувати дублювання інформації, скоротити цикл підготовки виробництва, забезпечити цифрову простежуваність виробничих процесів, прискорити внесення змін у конструкцію виробу та підвищити адаптивність виробничої системи [8, 13].

Для сучасного виробництва БПЛА важливого значення набуває інтеграція ПЕВВ з реконфігурованими виробничими системами та адаптивними виробничими осередками. У таких системах виробничі маршрути, схеми складання та конфігурація оснащення можуть змінюватися залежно від модифікації виробу та структури виробничого завдання [15, 16].

У результаті ПЕВВ стає основою формування адаптивного цифрового виробничого середовища, у якому цифрові виробничі дані забезпечують динамічну реконфігурацію виробничих процесів та інтеграцію виробничих ресурсів у межах єдиного цифрового контуру.

Важливою складовою цифрового виробничого контуру є також інтеграція систем цифрового контролю геометрії складання та лазерних систем вимірювання. Це забезпечує цифрову перевірку геометрії агрегатів, контроль координатного базування, аналіз відхилень складання, підтримку цифрового супроводу виробничих процесів й інтеграцію результатів контролю у структуру ПЕВВ [1, 21].

Таким чином, інтеграція ПЕВВ у цифровий виробничий контур забезпечує формування єдиного координатно-узгодженого цифрового виробничого середовища, у якому конструкторські, технологічні, організаційні та виробничі процеси функціонують як інтегрована цифрова система технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу.

4. Обговорення результатів

У результаті проведеного дослідження сформовано концептуальну структуру ПЕВВ у

системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу. На відміну від традиційних підходів, у яких ЕМВ розглядається переважно як цифрове геометричне представлення конструкції, запропонований підхід орієнтований на формування інтегрованого координатно-узгодженого цифрового виробничого середовища.

Запропонована структура ПЕВВ забезпечує інтеграцію конструкторських даних, технологічних маршрутів, організаційних виробничих рішень, ЗТО, цифрового координатного ув'язування, систем контролю геометрії, цифрових виробничих потоків, виробничих та експлуатаційних даних.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що ключовою відмінністю ПЕВВ від класичної ЕМВ є інтеграція виробничих та координатних зв'язків між усіма етапами технічної підготовки виробництва. При цьому ЕМВ виступає базовим інформаційним ядром, навколо якого формується цифровий виробничий контур.

Для сучасного виробництва БПЛА літакового типу це має особливе значення через високу інтенсивність модернізації конструкції, скорочення циклу підготовки виробництва, необхідність швидкого переналагодження виробничих систем, широке використання реконфігурованих виробничих осередків та інтеграцію цифрових виробничих технологій [1, 3].

У роботі показано, що однією з ключових складових ПЕВВ є цифрове координатне ув'язування, яке забезпечує координатну узгодженість між ЕМВ, технологічними маршрутами, схемами складання, цифровими моделями оснащення, CNC-системами та цифровими системами контролю геометрії.

У сучасному виробництві БПЛА функції забезпечення точності дедалі більше реалізуються засобами цифрового координатного ув'язування. Якщо у класичному літакобудуванні точність визначалась переважно жорсткістю стапелів, шаблонів та фізичних базових елементів, то у цифровому виробничому середовищі БПЛА забезпечення точності все більше переноситься у цифровий виробничий контур.

Запропонований підхід узгоджується із сучасними тенденціями розвитку цифрового авіавиробництва, пов'язаними із впровадженням цифрової нитки, цифрових двійників, модельно-орієнтованого визначення виробу та реконфігурованих виробничих систем [1, 5, 8]. Разом із тим на відміну від більшості існуючих досліджень, у яких основна увага приділяється цифровому супроводу окремих етапів ЖЦВ, у даній роботі ПЕВВ розглядається саме як інтегрована структура технічної підготовки виробництва БПЛА літакового

типу.

Важливою особливістю запропонованого підходу є інтеграція цифрового координатного ув'язування безпосередньо у структуру ПЕВВ. Це дозволяє розглядати координатне ув'язування не як окрему технологічну процедуру, а як складову єдиного цифрового виробничого середовища, у межах якого забезпечується узгодженість конструкторських, технологічних, виробничих та контрольних даних.

Разом із тим практична реалізація ПЕВВ потребує високого рівня цифрової зрілості виробництва та інтеграції CAD/CAM/CAE/PLM/MES-систем у межах єдиного інформаційного середовища. Одним із практичних обмежень є необхідність забезпечення стабільної координатної узгодженості між різнорідними цифровими системами, форматами даних та виробничими платформами.

Додатковою проблемою є залежність ефективності ПЕВВ від рівня цифровізації виробничого обладнання, точності лазерних систем вимірювання, стабільності цифрових координатних систем базування та узгодженості цифрових моделей між етапами технічної підготовки виробництва. У випадку недостатньої інтеграції цифрових виробничих систем можливе виникнення інформаційних розривів між КПВ, ТПВ та ОПВ.

Для дрібносерійного виробництва БПЛА окремою проблемою є також необхідність забезпечення швидкої реконфігурації виробничого середовища при постійній зміні конфігурації виробу. Це висуває підвищені вимоги до адаптивності ПЕВВ, цифрових виробничих маршрутів та систем управління виробничими даними.

Встановлено, що ефективність використання ПЕВВ може оцінюватися за такими показниками:

- скорочення тривалості технічної підготовки виробництва;
- зменшення кількості ітерацій узгодження конструкторських і технологічних рішень;
- скорочення обсягу жорсткого спеціалізованого оснащення;
- підвищення адаптивності виробничої системи;
- скорочення часу внесення змін у конструкцію виробу;
- підвищення рівня цифрової координатної узгодженості між етапами виробництва та контролю.

Отримані результати підтверджують, що ПЕВВ доцільно розглядати як основу формування адаптивного цифрового виробничого середовища у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу. При цьому подальший розвиток досліджень доцільно спрямувати на формалізацію критеріїв ефективності ПЕВВ, розроблення методів

оцінювання цифрової координатної узгодженості, інтеграцію цифрових виробничих даних з системами управління ЖЦВ та створення цифрових адаптивних виробничих систем для безплатового авіавиробництва. Запропонований підхід має концептуальний характер і потребує подальшої кількісної верифікації на прикладах реальних виробничих систем БПЛА.

5. Висновки

1. У роботі розглянуто проблему формування ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу в умовах цифрового дрібносерійного авіаційного виробництва.

2. Проведений аналіз сучасного стану досліджень показав, що існуючі підходи до цифровізації авіавиробництва переважно орієнтовані на використання цифрового двійника, цифрової нитки, PLM та модельно-орієнтованого визначення виробу, однак недостатньо формалізують структуру ПЕВВ як інтегрованого цифрового виробничого середовища у системі технічної підготовки виробництва БПЛА.

3. У результаті дослідження:

- визначено відмінності між ЕМВ та ПЕВВ;
- сформовано концептуальну структуру ПЕВВ у системі технічної підготовки виробництва БПЛА;
- формалізовано склад основних інформаційних компонентів ПЕВВ;
- визначено роль цифрового координатного ув'язування у структурі ПЕВВ;
- досліджено інтеграцію ПЕВВ у цифровий виробничий контур.

4. Показано, що на відміну від класичної ЕМВ, ПЕВВ являє собою інтегроване координатно-узгоджене цифрове виробниче середовище, яке об'єднує конструкторські, технологічні, організаційні, виробничі та контрольні дані у межах єдиного цифрового контуру технічної підготовки виробництва.

5. Встановлено, що однією з ключових тенденцій сучасного виробництва БПЛА є поступове перенесення функцій забезпечення точності з фізичної структури технологічного оснащення у цифровий виробничий контур на основі цифрового координатного ув'язування, віртуального складання, лазерних систем вимірювання та цифрового контролю геометрії складання.

6. Запропонований підхід дозволяє розглядати ПЕВВ не як окрему цифрову модель виробу, а як інтегровану цифрову систему управління виробничими даними, яка забезпечує:

- координатну узгодженість виробничих процесів;

- інтеграцію CAD/CAM/CAE/PLM-систем;
- підтримку реконфігурованих виробничих систем;
- цифрову простежуваність виробничих процесів;
- адаптивність цифрового виробничого середовища.

7. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої структури ПЕВВ при створенні цифрових систем технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу, впровадженні безплатових методів складання, інтеграції цифрового координатного ув'язування та формуванні адаптивних цифрових виробничих систем сучасного авіабудування.

Таким чином, формування ПЕВВ створює основу для переходу від локальної цифровізації окремих виробничих процесів до побудови єдиного координатно-узгодженого цифрового виробничого середовища у системі технічної підготовки виробництва БПЛА літакового типу.

Внесок авторів: концептуалізація дослідження, формулювання мети та завдань, розроблення концепції ПЕВВ, формування структури цифрового координатного ув'язування, аналіз результатів дослідження та формулювання висновків – **Ю. А. Воробйов**; аналіз сучасного стану досліджень, участь у формуванні структури цифрового виробничого контуру та систематизації інформаційних компонентів ПЕВВ – **К. В. Майорова**; участь у розробленні концептуальної моделі інтеграції ПЕВВ у систему технічної підготовки виробництва – **О. А. Богач**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо матеріалів цієї публікації, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що використовували технології штучного інтелекту для пошуку сучасних джерел інформації.

Усі автори прочитали та погодилися з

опублікованою версією рукопису.

Література

1. Digital twins in aircraft production and MRO: challenges and opportunities / K. Moenck, J.-E. Rath, J. Koch et al. // *CEAS Aeronautical Journal*. – 2024. – Vol. 15, iss. 5-6. – P. 1051-1073. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-024-00740-y>.
2. Modern trends and industrial use cases of digital twin technology / Z. Machacek, R. Hercik, A. Vaclavik et al. // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2025. – Vol. 36. – P. 1287–1312. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02709-y>.
3. Modular design and layout planning of tooling structures for aircraft assembly / Z. Shi, C. Li, J. Hu et al. // *Machines*. – 2025. – Vol. 13, iss. 3. – 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13030185>.
4. AI based decision-making system for tooling design of aircraft product assembly with developed knowledge retrieval algorithm / M. H. Miah, A. Al Rashid, H. Lee et al. // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15. – 24 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32936-5>.
5. Human factors and emerging needs in aerospace manufacturing planning and scheduling / S. Morandini, F. Fraboni, M. Hall et al. // *Cognition, Technology & Work*. – 2025. – Vol. 27. – P. 331–349. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10111-024-00785-3>.
6. Kabashkin, I. Digital twin framework for aircraft lifecycle management based on data-driven models / I. Kabashkin // *Mathematics*. – 2024. – Vol. 12, iss. 19. – 36 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12192979>.
7. Eskue, N. Digital Thread Roadmap for Manufacturing and Health Monitoring the Life Cycle of Composite Aerospace Components / N. Eskue // *Aerospace*. – 2023. – Vol. 10, iss. 146. – P. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace10020146>.
8. Enabling technologies and tools for digital twin / Q. Qi, F. Tao, T. Hu et al. // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 58. – P. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.
9. Digital twin in industry: state-of-the-art / F. Tao, H. Zhang, A. Liu, A. Y. C. Nee // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2019. – Vol. 15, iss. 4. – P. 2405–2415. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
10. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification / W. Kritzingner, M. Karner, G. Traar et al. // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, iss. 11. – P. 1016-1022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.
11. Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry / V. Quintana, L. Rivest, R. Pellerin et al. // *Computers in Industry*. – 2010. – Vol. 61, iss. 5. – P. 497–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.01.005>.
12. Testing the digital thread in support of model-based manufacturing and inspection / T. Hedberg, J. Lubell, L. Fischer et al. // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2016. – Vol. 16, iss. 2. – 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4032697>.
13. ElMaraghy H. A. Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms / H. A. ElMaraghy // *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*. – 2005. – Vol. 17. – P. 261–276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>.
14. Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art / Z. M. Bi, S. Y. T. Lang, W. Shen, L. Wang // *International Journal of Production Research*. – 2008. – Vol. 46, iss. 4. – P. 967–992. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540600905646>.
15. Koren, Y. Reconfigurable manufacturing systems: principles, design, and future trends / Y. Koren, X. Gu, W. Guo // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 13. – P. 121–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>.
16. Singla, K. Digital Manufacturing in Industry 5.0 / Y. K. Singla, A. Kumar, M. R. Maughan // *Springer Cham*. – 2026. – 1208 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-91500-0>.
17. Collaboration mechanisms to increase productivity in the context of Industrie 4.0 / G. Schuh, T. Potente, C. Wesch-Potente et al. // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 19. – P. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.016>.
18. Design for tooling to enable jigless assembly – an integrated methodology for jigless assembly / S. Naing, G. Burley, R. Odi et al. // *Aerospace Manufacturing Technology Conference & Exposition, Ft Worth, Texas, United States, May 16. – 2000. – 15 p. DOI: https://doi.org/10.4271/2000-01-1765*.
19. Laukotka, F. N. Supporting digital twins for the retrofit in aviation by a model-driven data handling / F. N. Laukotka, D. Krause // *Systems*. – 2023. – Vol. 11, iss. 3. – 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11030142>.
20. Laukotka, F. N. Virtual representations of physical assets – a literature study about digital twins from the perspective of application in aviation retrofit / F. N. Laukotka, D. Krause // *Procedia CIRP*. – 2023. – Vol. 119. – P. 926–931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.136>.
21. Smart material delivery unit for the production supplying logistics of aircraft / D. Schoepflin, J. Koch, M. Gomse, T. Schüppstuhl // *Procedia Manufacturing*. – 2021. – Vol. 55. – P. 455–462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.062>.
22. Koch, J. Development and integration of a workpiece-based calibration method for an optical assistance system / J. Koch, C. Büchse, T. Schüppstuhl //

Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, iss. 13. – 29 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137369>.

23. Castro, A. *Trends of human-robot collaboration in industry contexts: handover, learning, and metrics* / A. Castro, F. Silva, V. Santos // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21, iss. 12. – 28 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21124113>.

24. Romero, D. *Towards the resilient Operator 5.0: the future of work in smart resilient manufacturing systems* / D. Romero, J. Stahre // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 104. – P. 1089–1094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.183>.

25. *Towards an intelligent digital cabin twin to support an aircraft's retrofit and base maintenance* / K. Moenck, F. Laukotka, C. Deneke et al. // *AeroTech® Digital Summit, Live Online, Pennsylvania, United States, March 22, 2022*; and *AeroTech, Pasadena, California, United States, March 15, 2022*. – 2022. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/2022-01-0046>.

References

1. Moenck, K., Rath, J.-E., Koch, J., Wendt, A., Kalscheuer, F., Schüppstuhl, T., Schoepflin, D. Digital twins in aircraft production and MRO: challenges and opportunities. *CEAS Aeronautical Journal*, 2024, vol. 15, iss. 5–6, pp. 1051–1073. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13272-024-00740-y>.

2. Machacek, Z., Hercik, R., Vaclavik, A., Zemanek, J., Hameed, I. A., Koziorek, J. Modern trends and industrial use cases of digital twin technology. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2025, vol. 36, pp. 1287–1312. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-025-02709-y>.

3. Shi, Z., Li, C., Hu, J., Su, X., Wang, H., Tian, W. Modular design and layout planning of tooling structures for aircraft assembly. *Machines*, 2025, vol. 13, iss. 3. 23 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13030185>

4. Miah, M. H., Al Rashid, A., Lee, H., Park, C., Kim, D., Kim, S. AI-based decision-making system for tooling design of aircraft product assembly with developed knowledge retrieval algorithm. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15. 24 p. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32936-5>.

5. Morandini, S., Fraboni, F., Hall, M., Buzzo, G., Fussi, F., Fantì, M. P. Human factors and emerging needs in aerospace manufacturing planning and scheduling. *Cognition, Technology & Work*, 2025, vol. 27, pp. 331–349. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10111-024-00785-3>.

6. Kabashkin, I. Digital twin framework for aircraft lifecycle management based on data-driven models. *Mathematics*, 2024, vol. 12, iss. 19. 36 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12192979>.

7. Eskue, N. Digital Thread Roadmap for Manufacturing and Health Monitoring the Life Cycle of

Composite Aerospace Components. *Aerospace*, 2023, vol. 10, iss. 146, pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace10020146>

8. Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L., Nee, A. Y. C. Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, pp. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.

9. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C. Digital twin in industry: state-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, iss. 4, pp. 2405–2415. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.

10. Kritzing, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sih, W. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, iss. 11, pp. 1016–1022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>.

11. Quintana, V., Rivest, L., Pellerin, R., Venne, F., Kheddouci, F. Will model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry. *Computers in Industry*, 2010, vol. 61, iss. 5, pp. 497–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.01.005>.

12. Hedberg, T., Lubell, J., Fischer, L., Maggiano, L., Barnard Feeney, A. Testing the digital thread in support of model-based manufacturing and inspection. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2016, vol. 16, iss. 2. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4032697>.

13. ElMaraghy, H. A. Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2005, vol. 17, pp. 261–276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>.

14. Bi, Z. M., Lang, S. Y. T., Shen, W., Wang, L. Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art. *International Journal of Production Research*, 2008, vol. 46, iss. 4, pp. 967–992. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207540600905646>.

15. Koren, Y., Gu, X., Guo, W. Reconfigurable manufacturing systems: principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, vol. 13, pp. 121–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>.

16. Singla, K., Kumar, A., Maughan, M. R. Digital Manufacturing in Industry 5.0. *Springer Cham*, 2026. 1208 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-91500-0>

17. Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A. R., Prote, J.-P. Collaboration mechanisms to increase productivity in the context of Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 19, pp. 51–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.016>.

18. Naing, S., Burley, G., Odi, R., Williamson, A., Corbett, J. Design for tooling to enable jigless assembly – an integrated methodology for jigless assembly.

Aerospace Manufacturing Technology Conference & Exposition, Ft Worth, Texas, United States, May 16, 2000. 15 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-1765>.

19. Laukotka, F. N., Krause, D. Supporting digital twins for the retrofit in aviation by a model-driven data handling. *Systems*, 2023, vol. 11, iss. 3. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11030142>.

20. Laukotka, F. N., Krause, D. Virtual representations of physical assets – a literature study about digital twins from the perspective of application in aviation retrofit. *Procedia CIRP*, 2023, vol. 119, pp. 926–931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.136>.

21. Schoepflin, D., Koch, J., Gomse, M., Schüppstuhl, T. Smart material delivery unit for the production supplying logistics of aircraft. *Procedia Manufacturing*, 2021, vol. 55, pp. 455–462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.062>.

22. Koch, J., Büchse, C., Schüppstuhl, T. Development and integration of a workpiece-based calibration method for an optical assistance system.

Applied Sciences, 2023, vol. 13, iss. 13. 29 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137369>.

23. Castro, A., Silva, F., Santos, V. Trends of human-robot collaboration in industry contexts: handover, learning, and metrics. *Sensors*, 2021, vol. 21, iss. 12. 28 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21124113>.

24. Romero, D., Stahre, J. Towards the resilient Operator 5.0: the future of work in smart resilient manufacturing systems. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 104, pp. 1089–1094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.183>.

25. Moenck, K., Laukotka, F., Deneke, C., Schüppstuhl, T., Krause, D., Nagel, T. Towards an intelligent digital cabin twin to support an aircraft's retrofit and base maintenance. *AeroTech® Digital Summit, Live Online, Pennsylvania, United States, March 22, 2022; and AeroTech, Pasadena, California, United States, March 15, 2022.* – 2022. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/2022-01-0046>.

Надійшла до редакції 05.05.2026, отримано у доопрацьованому вигляді 29.05.2026

Дата ухвалення 15.06.2026, дата публікації 17.06.2026

FORMATION OF A COMPLETE ELECTRONIC PRODUCT DEFINITION IN THE SYSTEM OF TECHNICAL PREPARATION OF PRODUCTION FOR FIXED-WING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Iurii Vorobiov, Ievgen Gavrylov, Kateryna Maiorova, Oleksiy Bogach

The subject of research is the process of developing a complete electronic product definition (CEPD) within the technical preparation system for the production of fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) under conditions of digital small-batch aerospace manufacturing. The relevance of the work is determined by the high intensity of design modernization, the reduction of the product life cycle, the need for rapid production reconfiguration, and the integration of digital manufacturing processes. Under such conditions, classical approaches to using the electronic product model (EPM) as a separate design model become insufficient for ensuring the integration of design, technological, and organizational preparation for production. This determines the need to form the CEPD as an integrated digital manufacturing environment. The purpose of the work is to develop a conceptual framework for the CEPD within the system of technical preparation for the production of fixed-wing UAVs and to determine the principles for integrating design, technological, organizational, and manufacturing data into a unified, coordinate-consistent digital contour. To achieve this goal, the following tasks were solved: the current state of digitalization of technical preparation of UAV production was analyzed; the differences between the concepts of electronic product model and complete electronic product definition were determined; the structure of the CEPD within the system of technical preparation of production was formed; the composition of the main information components of the CEPD was formalized; the role of digital coordinate alignment within the CEPD structure was investigated; and the features of CEPD integration into the digital manufacturing contour were determined. The research results demonstrate that the CEPD represents an integrated digital information environment that combines design, technological, organizational, manufacturing, and inspection data within a unified coordinate-consistent digital contour. A conceptual CEPD structure for fixed-wing UAVs was proposed, and relationships among the electronic product model, technological preparation for production, organizational preparation for production, technological tooling, digital coordinate alignment, and manufacturing data were formalized. It was shown that one of the key trends in modern UAV manufacturing is the transfer of accuracy assurance functions from the physical structure of technological tooling into the digital manufacturing contour based on digital coordinate alignment, virtual assembly, laser measurement systems, and digital geometry inspection. The conclusions confirm that the CEPD should be considered not as a separate digital product model, but as an integrated digital manufacturing environment that

ensures the unity of design, technological, organizational, and manufacturing information within the system of technical preparation of UAV production. It was shown that the use of the CEPD creates the basis for the transition to adaptive digitally controlled manufacturing systems and implementation of jigless assembly methods in modern aerospace manufacturing. The scientific novelty of the work lies in the creation of a conceptual CEPD structure for fixed-wing UAVs within the system of technical preparation of production, which, unlike classical CAD/PDM approaches, ensures integration of design, technological, organizational, inspection, and manufacturing data within a unified coordinate-consistent digital environment. The concept of digital coordinate alignment in jigless UAV manufacturing was further developed through integration of virtual assembly, digital geometry inspection, and digital manufacturing data into the CEPD structure. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed solutions in the development of digital systems for technical preparation of UAV production, implementation of jigless assembly methods, development of reconfigurable manufacturing systems, formation of digital manufacturing environments, and integration of CAD/CAM/CAE/PLM systems in aerospace engineering.

Keywords: *complete electronic product definition, electronic product model, technical preparation of production, UAV, digital coordinate alignment, jigless manufacturing, digital thread, virtual assembly, technological tooling, digital manufacturing environment.*

Воробйов Юрій Анатолійович – д-р техн. наук, проф., Заслужений працівник освіти України, проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Майорова Катерина Володимирівна – канд. техн. наук, доц., зав. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Богач Олексій Анатолійович – асп. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Гаврилов Євген Павлович – в.о. Генерального директора АТ «Антонов», Київ, Україна.

Iurii Vorobiov – Doctor of Engineering Science, Professor, Honored Worker of Education of Ukraine, Professor at the Department of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: i.vorobiov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-6401-7790, Scopus Author ID: 57205383504.

Kateryna Maiorova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: kate.majorova@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3949-0791, Scopus Author ID: 57204427689.

Oleksiy Bogach – Postgraduate Student of the Department of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.a.bohach@khai.edu, ORCID: 0009-0001-6951-0821.

Ievgen Gavrylov – Acting General Director of JSC “Antonov Company”, Kyiv, Ukraine,
e-mail: magura196@proton.me, ORCID: 0009-0007-2240-5198, Scopus Author ID 57366196400.