

УДК 658.512.4:629.7

doi: 10.32620/aktt.2022.2.08

В. Т. СІКУЛЬСЬКИЙ¹, К. В. МАЙОРОВА¹, І. В. БИЧКОВ¹,
М. М. БОЙКО¹, О. Л. КОМІСАРОВ²

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Україна

² Публічне акціонерне товариство «Мотор Січ», Україна

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ПРОЦЕСІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ НА ЕТАПІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Предметом вивчення в статті є алгоритми процесів формоутворення для виготовлення авіаційної техніки (АТ) на етапі технологічної підготовки виробництва (ТПВ). Метою є зниження термінів ТПВ АТ. Завдання: встановити технологічні заходи при ТПВ та визначити їх роль з метою скорочення термінів ТПВ; запропонувати алгоритми процесів формоутворення для виготовлення АТ при ТПВ з вирішенням прямих та зворотних завдань на базі аналітичного еталону (АЕ). Використовуваними методами є: аналіз існуючих і розповсюджених технологічних заходів ТПВ АТ, математичні моделі для оцінювання виконання прямих та зворотних завдань при розробці, виробництві та контролі. Отримані такі результати. Згідно аналізу встановлені технологічні заходи ТПВ та визначена їх роль у скороченні термінів ТПВ. Взаємопов'язані поняття «проектна технологічність» та «технологічність» як складові процесу розробки виробу, а також «виробнича технологічність» та «експлуатаційна технологічність» як складові процесів виробництва та експлуатації. Показано, що вирішальним у встановленні термінів ТПВ АТ стає коректність створення АЕ, що використовують на всіх етапах ТПВ у прямих та зворотних завданнях. Використання АЕ оминає додаткове створення моделей та стикується з ЧПК та САД/САМ-системами, що скорочує терміни ТПВ та полегшує взаємозв'язок її конструкторських і технологічних етапів. Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: логічно згруповані технологічні заходи та визначена їх роль з метою скорочення термінів ТПВ АТ; розроблені алгоритми процесів формоутворення для виготовлення АТ при ТПВ з вирішенням прямих та зворотних завдань; відповідно до єдиного АЕ встановлені наступні моделі: постачання матеріалу та доведення його до стану заготовок, формоутворення з метою виготовлення деталей, комплектації деталей перед складанням та виконання складальних операцій шляхом зміни форми з'єднувальних елементів. Запропоновані алгоритми можуть бути розвинуті для АТ, яку було утворено застарілими методами складання та яка потребує ремонту, прототипування з використанням сучасних інжинірингових методів, що може стати темою наступних досліджень.

Ключові слова: авіаційна техніка; аналітичний еталон; алгоритм; формоутворення; технологічна підготовка виробництва; пряме та зворотне завдання.

Вступ

Термін «технологічна підготовка виробництва» (ТПВ) визначається як «сукупність заходів, яка охоплює проектування технологічних процесів виробництва, вибір та розміщення устаткування, визначення технологічного оснащення, розроблення методів технічного контролю, нормування матеріально-технічних витрат і забезпечує випуск продукції потрібного рівня якості за встановлених термінів та обсягів випуску» [1].

Термін «технологічна готовність виробництва» визначається стандартом як «наявність на підприємстві повних комплектів конструкторської та технологічної документації та засобів технологічного оснащення, необхідних для виконання заданого

об'єму випуску продукції з встановленими техніко-економічними показниками» [2].

Таким чином ТПВ охоплює значний обсяг організаційних, технічних та економічних заходів, від виконання яких значною мірою залежить якість продукції [3].

Виробництво авіаційної техніки (АТ) характеризується великою наукоємністю продукції, що виробляється. Це означає, що для випуску нової АТ та її конкурентоспроможності у своєму складі вона має нести як мінімум 20...30 % нових технологічних процесів, які будуть робити цю АТ затребуваною на ринку протягом всього життєвого циклу [4]. Це може бути досягнуто, якщо виріб матиме підвищені техніко-економічні показники, які матимуть переваги протягом усього життєвого циклу виробу [5]. Практично реалізувати та підтримувати такі пере-

ваги протягом тривалого періоду дуже складно. Тому багато авіаційних фірм для досягнення технічної переваги виробляють вироби після конструкторської та технологічної модифікації.

Однак сама по собі модифікація виробів відволає ресурси і може збільшити термін ТПВ. Для скорочення термінів ТПВ з цієї причини все більше і більше використовують сучасні інжинірингові методи з використанням інтелектуальних технологій, автоматизації, роботизації тощо на базі CAD/CAM/CAE-систем.

Ключовим моментом сучасного виробництва є перехід від дискретного до електронного опису виробу (ЕОВ). Основою ЕОВ є безпаперове подання інформаційної моделі виробу, що містить усі відомості про виріб із урахуванням міжнародних стандартів. Однак в цьому випадку існує складність стикування існуючої ТПВ, особливо це стосується АТ, яку було виготовлено понад 20 років тому, із сучасними конструктивними та технологічними рішеннями відповідно до створеної нової модифікації, прототипування або ремонту. На допомогу в цьому прийшли технології реінжинірингу (reverse engineering), що розуміється як комплекс методів, технологій і устаткування для реалізації схеми «ідея-макет-виріб» на відміну від звичайної для інженера схеми «ідея-креслення-виріб» [6].

1. Постановка задач досліджень

Для розробки алгоритмів створення нових заходів ТПВ з використанням сучасних технологій інжинірингу слід вирішити наступні завдання:

- встановити існуючі технологічні заходи при ТПВ та їх роль при скороченні термінів ТПВ на базі єдиного носія інформації – аналітичного еталону (АЕ);
- запропонувати алгоритми процесів формування для виготовлення АТ при ТПВ з використанням сучасних інжинірингових систем.

2. Існуючі технологічні заходи при ТПВ та їх роль при скороченні термінів ТПВ на базі єдиного носія інформації – АЕ

ТПВ АТ на серійному заводі включає наступні роботи [7, 8]:

- технологічне оброблення серійних креслень АТ;
- проведення робіт із забезпечення технологічності;
- проектування та впровадження передових технологічних процесів виготовлення АТ;

- проектування та впровадження передових методів та засобів технічного контролю якості виготовлення АТ;

- проектування, виготовлення та налагодження технологічного оснащення для устаткування всіх видів технологічних процесів, а також спеціального обладнання та засобів механізації;

- встановлення прогресивних розрахунково-технічних норм режимів технологічного процесу та витрат часу на виконання операцій, витрати матеріалів та інструменту, палива та енергії для технологічних цілей, а також використання обладнання;

- розрахунок потрібних обсягів енергетичних ресурсів;

- проектування та впровадження передових форм організації виробничих процесів та праці;

- встановлення обсягів робіт цехів основного виробництва («розцеховування» виробу) та розробка документації технологічного планування;

- розрахунок обладнання та площ, складання планувань цехів та технічного плану реконструкції заводу.

Вдосконалення організаційних форм ТПВ означає насамперед:

- маневрування кількістю виконавців у технічних підрозділах за принципом скорочення критичного шляху;

- розбиття процесу підготовки технологічного обладнання на етапи.

Зазвичай розрізняють три черги виготовлення оснащення [1, 9].

Перша черга включає оснащення, без якого практично неможливо або вкрай скрутно високоякісне виготовлення виробу. Оснащення першої черги забезпечує виготовлення першої АТ та головної серії.

Друга черга включає оснащення, яке разом з оснащенням першої черги становить технологічний комплект оснащення виробу, що спроектований за серійною технологією. Друга черга оснащення забезпечує докорінне зниження трудомісткості та скорочення циклів виготовлення виробу.

Третя черга включає дублери в кількості, що забезпечує заданий масштаб випуску, а також пристрої для подальшого розвитку механізації, скорочення ручних робіт, зниження трудомісткості виготовлення виробу та забезпечення його модифікацій та конструктивних змін.

Третя черга оснащення забезпечує:

- серійне виробництво виробів, що встановилося;

- встановлення місця, послідовності та тривалості виготовлення деталей, вузлів, агрегатів та виробу в цілому;

- визначення порядку руху, комплектування та складання деталей, вузлів, агрегатів та виробу;
- раціональне розміщення всіх ділянок виробництва на виробничих площах з урахуванням потокового виробництва.

Важливим етапом у процесі ТПВ є відпрацювання конструкцій виробу на технологічність у процесі конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Близьке за змістом формулювання технологічності наведено в [2, 10-12]: технологічність конструкції визначається сукупністю її властивостей, що дозволяють застосувати під час виготовлення прогресивні технологічні процеси, високопродуктивне автоматизоване або автоматичне обладнання, нові матеріали та забезпечити високу якість за мінімальних витрат праці та часу.

У цих та інших джерелах нечітко проглядається три складові (аспекти) поняття технологічності, також взаємопов'язаних між собою, що закладаються (формується) здебільшого на етапах проектування виробу (проектна технологічність), і реалізуються на стадії виробництва (виробнича технологічність) і в процесі експлуатації (експлуатаційна технологічність).

Деякі автори зазначають, що великі резерви скорочення ТПВ криються у взаємодії та узгодженості конструктивної (проектної) технологічності та виробничої технологічності [12]. Експлуатаційна технологічність визначає свої якості в процесі експлуатації виробу і є переважно результатом конструкторського етапу ТПВ. На цьому етапі технічного розвитку найважливішим чинником скорочення термінів ТПВ є стан інформаційної автоматизованої підтримки ТПВ АТ [14, 15].

Основним резервом підвищення ефективності ТПВ та скорочення термінів її виконання є реалізація системи автоматизованого конструювання та виготовлення пристроїв при ТПВ АТ у режимі віртуальної реальності [16].

Зміст робіт з ТПВ нової АТ залежить від великої кількості факторів:

- складності та новизни технічних рішень у виробі, що створюється;
- масштабів майбутнього виробництва;
- розподілу робіт між проектними та виробничими підприємствами;
- наявності експериментальної бази на підприємствах;
- рівня автоматизації праці інженерно-технічного персоналу;
- досвіду та структури виробничо-адміністративних підрозділів підприємства.

Найбільш важливою проблемою ТПВ є поєднання етапів конструкторської та технологічної підготовки, що представлені у таблиці 1 [17].

Таблиця 1

Поєднання етапів ТПВ

Конструкторський етап ТПВ	Технологічний етап ТПВ
Технічне завдання	–
Технічна пропозиція	–
Ескізний проект	Попередній проект
Технічний проект	
Розробка робочої документації на дослідний зразок	Розробка технічної документації
Виготовлення та випробування зразка (серії)	Виготовлення та випробування зразка (серії)
Серійне виробництво	Серійне виробництво

При вирішенні сучасних наукових проблем, що належать до проблеми створення АТ, доводиться одночасно вирішувати питання конструкторського та технологічного відпрацювання у ТПВ, включаючи створення нового обладнання, нових технологічних процесів та виробництв, підготовку кадрів та ін.

Відмінною рисою ТПВ є її багатоваріантність, під якою мається на увазі можливість отримання заданих параметрів процесів, вузлів та виробів в цілому різними способами. Тому найважливішим завданням, що вирішують технологи, полягає у пошуку оптимальних рішень, які дозволяють забезпечувати випуск запланованої продукції за найменших трудових та матеріальних ресурсів.

При цьому передбачається взаємопов'язане рішення конструкторських та технологічних завдань, спрямованих на підвищення продуктивності праці, зниження трудових витрат, економію матеріальних ресурсів, скорочення часу на розробку, виготовлення та ремонт виробу за заданими показниками якості.

Проблемним питанням є той факт, що на етапах проектування виробу багато показників для технологічних та економічних розрахунків не мають точного значення.

Цей факт диктує умову, що на етапах ТПВ необхідна чітка координація між виконавцями робіт, застосування науково обґрунтованих та практично перевірених методів планування, що виключають ризики від зривів строків виконання робіт та помилок планування.

Система планування ТПВ на авіаційних підприємствах виконується за принципом відповідності диференціального планування у кожному окремому

підрозділі вільному плануванню по комплексним об'єктам нової АТ.

Вільне планування зазвичай покладається на бюро ТПВ. Реалізація цього принципу забезпечується веденням системи планової документації, плинним розглядом і затвердженням планів, постійним обліком і контролем їх виконання. До основних елементів системи планування за календарними графіками слід віднести такі роботи:

- створення та систематичне вдосконалення нормативів витрат часу, тривалості циклу, вартості витрат на ТПВ;

- облік та контроль ходу виконання робіт за графіками;

- організація планових робіт ТПВ.

Всі представлені роботи та конструктивно-технологічні рішення, які виконуються при ТПВ та представлені вище, у сучасному виробництві будуються на єдиному носії інформації – АЕ. Всі процеси формоутворення при ТПВ АТ на базі АЕ реалізуються шляхом вирішення прямих та зворотних завдань [17]. Саме після створення АЕ як носія первинної інформації виробу починається розбудова ТПВ.

АЕ дозволяє на початку проведення ТПВ сформулювати коректну постановку прямих і зворотних завдань в умовах промислових підприємств, в інформаційному супроводі цих процесів, у наявності та ефективному застосуванні економічно виправданих інструментальних засобів.

Конструктор надає інформацію про об'єкт виробництва за допомогою АЕ деталі для всіх учасників виробничого процесу.

Технологічний процес містить опис змін об'єкта виробництва в часі, що означає необхідність розробки моделей формотворчих процесів, зміни заготовки до отримання деталі, виконання технологічних вимірювань для отримання її портрета і порівняння з АЕ в рамках процедур контролю.

АЕ складання описує взаємне розташування у просторі всіх комплектуючих виробів, а складальний технологічний процес представляє опис операцій із встановлення деталей у складальне положення, з'єднання їх у вузли, панелі, агрегати та АТ в цілому в часі з виконанням контрольних процедур, що означає необхідність розробки відповідних моделей процесів.

3. Алгоритми процесів формоутворення на етапі ТПВ АТ з використанням сучасних інжинірингових систем

Формоутворення дослідної АТ у виробництві при рішенні прямих і зворотних завдань реалізу-

ється з використанням сучасних центрів з ЧПК шляхом оснащення їх засобами контролю, де пряме завдання вирішується на етапах проектування, а зворотне – на етапах контролю. Безпосередньо перед виготовленням АТ виконуються проектувальні розрахунки з метою отримання геометрії – АЕ_{АТ}.

Відповідно до технічного завдання визначаються аеродинамічні характеристики профілів, виконуються додаткові уточнюючі розрахунки для формування аналітичного еталону заготовки – АЕ_{АТЗ}. Наступним етапом вирішення прямого завдання формоутворення стає вибір обладнання, інструменту, способу кріплення матеріалу в стані поставки та розробляються моделі процесів отримання заготовки – МП_{АТЗ}, по яким саме і виготовляється заготовка та остаточна деталь.

Зворотне завдання формоутворення реалізується за технологією реінжинірингу за результатами вимірювань реальної АТ з подальшою відбудовою аналітичних даних АЕ_{АТ} за необхідністю.

Зворотне завдання формоутворення – це операції контролю готової АТ шляхом порівняння портрету П_{АТ}, отриманого 3D-скануванням АТ, з аналітичним еталоном АЕ_{АТ}. За результатами контролю з урахуванням перевірочних розрахунків приймається рішення щодо якості виготовленої АТ і, при позитивному рішенні, завдання формоутворення вважається виконаним, а при негативному – виконується коригування АЕ_{АТ} і МП_{АТЗ}.

У таблиці 2 наведені укрупнені алгоритми процесів формоутворення для виробництва АТ:

- постачання матеріалу та доведення його до стану заготовок, при цьому наявність аналітичного еталону заготовки АЕ_З (модель 1) є обов'язковою умовою початку цих процесів;

- формоутворення з метою виготовлення деталей відповідно до аналітичного еталону деталі АЕ_Д (модель 2);

- комплектація деталей перед складанням, що завершується формуванням складальних комплектів, куди входять усі деталі та вузли після технологічного контролю цеху виробника та номенклатура від зовнішніх організацій, що описується аналітичним еталоном комплекту АЕ_{КОМП} (модель 3). При застосуванні клепальних автоматів попереднє складання комплектів агрегатів виконується у спрощених складальних пристосуваннях;

- виконання складальних операцій шляхом зміни форми з'єднувальних елементів (у ручному або автоматичному режимі), їх завершення означає закінчення формоутворення згідно з технологічними процесами складання об'єкта виробництва та описується аналітичним еталоном складеного виробу АЕ_{СВ} (модель 4).

Таблиця 2

Алгоритми процесів формоутворення АТ з урахуванням ТПВ

Аналітичні еталони:				
Заготовок	Деталей	Складального комплекту	Складеного виробу	Формоутворюючого оснащення
1 АЕ _З	2 АЕ _Д	3 АЕ _{КОМП}	4 АЕ _{СВ}	5 АЕ _О
Процеси формоутворення:				
Заготовок	Деталей	Складального комплекту	Складеного виробу	Оснащення
6 МП _З	7 МП _Д	8 МП _{СВ}		9 МП _О
Процеси вимірювань:				
Заготовок	Деталей	Покупних виробів	Складеного виробу	Оснащення
10 МП _{ВЗ}	11 МП _{ВД}	12 МП _{ВПВ}	13 МП _{ВСВ}	14 МП _{ВО}
Аналітичні портрети:				
Заготовок	Деталей	Покупних виробів	Складеного виробу	Оснащення
15 П _З	16 П _Д	17 П _{ПВ}	18 П _{СВ}	19 П _О
Виконання процедур контролю:				
20 Порівняння П _З та АЕ _З	21 Порівняння П _Д та АЕ _Д	22 Порівняння П _{ПВ} та АЕ _{КОМП}	23 Порівняння П _{СВ} та АЕ _{СВ}	24 Порівняння П _О та АЕ _О
27 Рішення щодо якості заготовок	28 Рішення щодо якості деталей	29 Рішення щодо якості покупних виробів	30 Рішення щодо якості складеного виробу	31 Рішення щодо якості оснащення

Наявність відповідних АЕ перед початком виконання кожного з вище перерахованих етапів дозволяє формулювати постановку прямого та зворотного завдань формоутворення для них.

На першому етапі пряме завдання формоутворення зводиться до отримання заготовок за наявними АЕ_З. Для реалізації цього завдання вибирається обладнання, інструмент, спосіб кріплення матеріалу в стані постачання та розробляються моделі процесу отримання заготовок МП_З (модель 6). Закінчення виконання МП_З означає вирішення прямого завдання формоутворення. Потім вирішується зворотне завдання формоутворення – за результатами вимірювань будують аналітичні портрети заготовок П_З (модель 15). Для реалізації процедур контролю (модель 20) необхідно виконати порівняння АЕ_З та їх портретів П_З (модель 15)

$$|F(АЕ_З) - F(П_З)| \leq F(\Delta), \quad (1)$$

де $F(АЕ_З)$ – визначальні параметри АЕ_З;

$F(П_З)$ – визначальні параметри портретів заготовок;

$F(\Delta)$ – допустимі похибки визначальних параметрів.

Позитивні результати виконання умови (1) означають завершення вирішення прямого та зворотного завдання формоутворення (модель 27) на цьому етапі, що дозволяє приступити до наступного.

На другому етапі пряме завдання формоутворення передбачає виготовлення деталей за інформацією з АЕ_Д (модель 2). Для реалізації цього завдання вибирається обладнання, інструмент, спосіб кріплення заготовок та розробляються моделі процесу отримання деталей МП_Д (модель 7). Якщо в якості обладнання обраний верстат з ЧПК, то моделі про-

цесів включають керуючі програми. Закінчення виконання моделей процесу означає вирішення прямого завдання формоутворення з виготовлення деталей. Потім необхідно розв'язати зворотне завдання формоутворення з метою виконання контрольних операцій. Якщо при виготовленні деталей використовувалося обладнання з ЧПК, то раціонально виконати на цьому обладнанні вимірювальні процедури, замінивши формоутворюючий інструмент вимірювальним. Для виконання процедур вимірювання деталі необхідно розробити відповідні моделі процесів вимірювання деталей МП_{Вд} (модель 11). За результатами вимірювань будують аналітичні портрети деталей П_д (модель 16). Для реалізації процедури контролю (модель 21) необхідно виконати порівняння АЕ_д (модель 2) з їх портретами П_д (модель 16):

$$|F(AE_d) - F(P_d)| \leq F(\Delta), \quad (2)$$

де $F(AE_d)$ – визначальні параметри AE_d ;

$F(P_d)$ – визначальні параметри портретів деталей.

Третій етап не передбачає вирішення прямого завдання формоутворення за інформацією $AE_{\text{комп}}$ (модель 3), оскільки всі деталі виготовлені з виконанням процедур контролю. Для цього етапу передбачено вирішення зворотного завдання формоутворення щодо проведення контрольних операцій для покупних виробів (модель 22) за умовою (2), що дозволяє прийняти рішення про якість покупних виробів перед їх складанням (процедура 29).

На четвертому етапі метою прямого завдання формоутворення стає утворення аналітичного еталону складеного виробу $AE_{\text{СВ}}$ (модель 4). Для реалізації цього завдання вибирають складальні пристрої та інструмент, після чого створюють модель складеного виробу МП_{СВ} (модель 8). Закінчення складання означає вирішення прямого завдання формоутворення. Потім вирішується зворотне завдання – отримання аналітичного портрету складеного виробу та виконання процедур порівняння. Для виконання вимірювальних процедур необхідно розробити відповідні моделі процесів вимірювання МП_{СВ} (модель 13). За результатами вимірювань будується аналітичний портрет складеного виробу П_{СВ} (модель 18). Процедура контролю (модель 23) полягає у порівнянні $AE_{\text{СВ}}$ (модель 4) та П_{СВ} (модель 18):

$$|F(AE_{\text{СВ}}) - F(P_{\text{СВ}})| \leq F(\Delta), \quad (3)$$

де $F(AE_{\text{СВ}})$ – визначальні параметри $AE_{\text{СВ}}$;

$F(P_{\text{СВ}})$ – визначальні параметри П_{СВ}.

Виконання умови (3) означає, що вирішення завдання формоутворення на етапі складання виробу (процедура 30) успішно завершено.

Аналіз складальних операцій дозволив виявити деякі особливості інформаційного супроводу таких процесів. Якщо потрібно вирішити пряме завдання формоутворення шляхом складання об'єкта виробництва, то крім аналітичного еталону $AE_{\text{СВ}}$ розробки моделі процесу складання МП_{СВ} (модель 8) необхідно мати аналітичні зразки геометрії складального оснащення AE_0 (модель 5).

Розробка АЕ обладнання з ЧПК, у тому числі й клепальних автоматів, не потребує великих трудовитрат, оскільки в багатьох CAD/CAM-системах вже сформовані бази з моделями найпопулярнішого обладнання. У більшості систем є можливість створення моделей обладнання, що бракує. Тому після виконання ТПВ в інформаційну систему підприємства можуть бути включені всі одиниці обладнання з ЧПК та все технологічне оснащення. Використання інформації у такому вигляді створює можливість вирішення великої кількості завдань з обслуговування формоутворюючих систем, розробки матеріальних та трудових норм, проведення робіт з розробки планів-графіків ТПВ, впровадження технологічних процесів, нормалізації та уніфікації технологічного обладнання, модернізації обладнання тощо.

Висновки

1. Встановлені технологічні заходи при ТПВ та визначена їх роль з метою скорочення термінів ТПВ. Взаємопов'язані наступні складові: поняття «проектна технологічність» та «технологічність» як складові процесу розробки виробу, а також «виробнича технологічність» та «експлуатаційна технологічність» як складові процесу виробництва та експлуатації. Показана основна проблема ТПВ – поєднання конструкторського та технологічного етапів, та наданий їй аналіз.

2. Показано, що вирішальну роль для скорочення термінів при ТПВ АТ мають процеси формоутворення, які реалізовані шляхом вирішення прямих та зворотних завдань на базі АЕ як носія повної інформації виробу. Складність ТПВ АТ полягає у створенні коректного АЕ для всіх учасників виробничого процесу, від якого залежить взаємозв'язок конструкторських і технологічних етапів ТПВ.

3. Запропоновані алгоритми процесів формоутворення для виготовлення АТ при ТПВ, які базуються на вирішенні прямих та зворотних завдань. Показано, що пряме завдання формоутворення виготовлення АТ виконується відповідно до інформації з моделі процесу МП_{АТ} по аналітичному еталону

АЕ_{АТ}, а процес створення АЕ_{АТ} з реальної АТ стає зворотним завданням формоутворення.

4. Обґрунтоване зниження термінів загальної трудомісткості ТПВ АТ за рахунок використання єдиного АЕ для будь-яких алгоритмів при вирішенні прямих та зворотних завдань. Показано, що АЕ стикається з ЧПК та САД/САМ-системами.

Література

1. *Technology of Airplane and Helicopter Manufacturing. Fundamental of Aircraft Manufacturing : the lecture course summary in English and Russian for foreign students [Text] / V. Sikulskiy, Yu. Boborykin, S. Vasilchenko, A. Pyankov, V. Demenko. – Kharkiv : National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, 2006. – 206 p.*
2. ДСТУ 2974-95. Технологічне підготовлення виробництва. Основні терміни та визначення [Текст]. – Введ. 23.06.1995. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 28 с.
3. ISO/IEC/IEEE 26531:2015. Systems and software engineering – Content management for product life-cycle, user and service management documentation [Text]. – Issued 2015-05. – IEEE, 2015. – 49 p.
4. Аналіз тенденцій вітчизняного авіаційного виробництва [Текст] / Ю. А. Воробйов, І. В. Бичков, К. В. Майорова, О. Л. Комісаров, С. М. Рябіков // Scientific Collection “InterConf”, (90) : with the Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference “Current Issues and Prospects for the Development of Scientific Research” (December 7-8, 2021). – Orléans, 2021. – P. 329–333. DOI: 10.51582/interconf.7-8.12.2021.038.
5. Информационное сопровождение производства авиационных изделий [Текст] / Е. В. Майорова, В. Т. Сиккульский, И. В. Бычков, В. О. Супонина, О. Л. Комиссаров // Scientific Collection “InterConf”, (98) : with the Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference “Modern Scientific Trends and Standards” (February 16-18, 2022). – Santa Rosa, 2022. – P. 321–332.
6. Abigail, A. A. Reverse Engineering [Text] / A. A. Abigail // Campbellsville, 2021. – 12 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.28030.51520
7. Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling [Text] / S. A. Lyubomudrov, I. N. Khrushtaleva, A. A. Tolspoles, A. P. Maslakov // Journal of Mining Institution. – 2019. – Vol. 240. – P. 669–677. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.669
8. On the problem of the variability of processes in improving the technological preparation of aircraft components production [Text] / V. A. Kudryashov, B. T. Arazveliev, E. V. Seltsov, Y. V. Zhukova // Тенденції розвитку науки і образования. – 2021. – № 72-1. – С. 154–157. DOI: 10.18411/lj-04-2021-40
9. Lee, J. J. A comparative study of technological learning and organizational capability development in complex products systems: Distinctive paths of three latecomers in military aircraft industry [Text] / J. J. Lee, H. Yoon // Research policy. – 2015. – Vol. 44 (7). – P. 1296–1313. DOI: 10.1016/j.respol.2015.03.007.
10. ISO 17599:2015. Technical product documentation (TPD) – General requirements of digital mock-up for mechanical products [Text]. – Issued 2015-01. – ISO, 2015. – 25 p.
11. Frigo, M. A. Augmented reality in aerospace manufacturing: A review [Text] / M. A. Frigo, E. C. da Silva, G. F. Barbosa // Journal of Industrial and Intelligent Information. – 2016. – Vol. 4, No. 2. – P. 125–130. DOI: 10.18178/jiii.4.2.125-130.
12. Augmented and virtual reality for inspection and maintenance processes in the aviation industry [Text] / H. Eschen, T. Kötter, R. Rodeck, M. Harnisch, T. Schüppstuhl // Procedia manufacturing. – 2018. – Vol. 19. – P. 156–163. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.01.022.
13. Integrated manufacturing features and Design-for-manufacture guidelines for reducing product cost under CAD/CAM environment [Text] / A. S. M Hoque, P. K. Halder, M. S. Parvez, T. Szecsi // Computers & Industrial Engineering. – 2013. – Vol. 66, Iss. 4. – P. 988–1003. DOI: 10.1016/j.cie.2013.08.016.
14. Smart inspection tools in robotized aircraft panels manufacturing [Text] / A. Bruni, E. Concettoni, C. Cristalli, M. Nisi // 2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – 2019. – P. 649–654. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869690.
15. Early cost estimate of product during design stage using design for manufacturing and assembly (DFMA) principles [Text] / K. Annamalai, C. D. Naiju, S. Karthik, M. Prashanth // Advanced Materials Research. – 2013. – Vols 622–623. – P. 540–544. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.622-623.540.
16. Шабалкин, Д. Ю. Применение системы виртуального инжиниринга в конструкторско-технологической подготовке на авиационном предприятии [Текст] / Д. Ю. Шабалкин, А. С. Буяндюков, Н. А. Лукьянов // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли : Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 10-12 августа 2016 г.: Сборник докладов. – Казань, 2016. – Том 2. – С. 287–291.
17. Бычков, И. В. Основы технологической подготовки авиационного производства сложнопрофильных изделий на базе аналитических моделей процесса формообразования [Текст] : автореф.

дис. ... д-ра техн. наук : 05.07.02 / Бычков Игорь Валерьевич ; Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2011.

References

1. Sikulskiy, V., Boborykin, Yu., Vasilchenko, S., Pyankov, A., Demenko, V. *Technology of Airplane and Helicopter Manufacturing. Fundamental of Aircraft Manufacturing : the lecture course summary in English and Russian for foreign students*. Kharkiv, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” Publ., 2006. 206 p.
2. DSTU 2974-95. *Tekhnologichne pidhotovlennya vyrobnytstva. Osnovni terminy ta vyznachennya* [State Standard of Ukraine 2974-95. Technological Preparation of Production]. Kyiv, Derzhstandart Ukrayiny Publ., 1995. 28 p. (In Ukrainian).
3. ISO/IEC/IEEE 26531:2015. *Systems and software engineering – Content management for product life-cycle, user and service management documentation*. IEEE Publ., 2015. 49 p.
4. Vorobyov, Yu. A., Bychkov, I. V., Mayorova, K. V., Komisarov, O. L., Ryabikov S. M. Analiz tendentsiy vitchyznyanoho aviatsiynoho vyrobnytstva [Analysis of the domestic aviation production trends]. *Scientific Collection “InterConf”*, 2021, no. 90, pp. 329–333. DOI: 10.51582/interconf.7-8.12.2021.038. (In Ukrainian).
5. Maiorova, E. V., Sikul'skii, V. T., Bychkov, I. V., Suponina, V. O., Komissarov, O. L. Informatsionnoe soprovozhdenie proizvodstva aviatsionnykh izdelii [Information support for the aviation products production]. *Scientific Collection “InterConf”*, 2022, no. 98, pp. 321–332. (In Russian).
6. Abigail, A. A. Reverse Engineering, 2021. 12 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.28030.51520.
7. Lyubomudrov, S. A., Khrushtaleva, I. N., Tolspoles, A. A., Maslakov, A. P. Improving the efficiency of technological preparation of single and small batch production based on simulation modeling. *Journal of Mining Institution*, 2019, vol. 240, pp. 669-677. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.669.
8. Kudryashov, V. A., Arazveliev, B. T., Seltsov, E. V., Zhukova, Y. V. On the problem of the variability of processes in improving the technological preparation of aircraft components production. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya – Trends in the development of science and education*, 2021, no. 72-1, pp. 154-157. DOI: 10.18411/lj-04-2021-40.
9. Lee, J. J., Yoon, H. A comparative study of technological learning and organizational capability development in complex products systems: Distinctive paths of three latecomers in military aircraft industry. *Research policy*, 2015, vol. 44 (7), pp. 1296–1313. DOI: 10.1016/j.respol.2015.03.007.
10. ISO 17599:2015. *Technical product documentation (TPD) – General requirements of digital mock-up for mechanical products*. ISO Publ., 2015. 25 p.
11. Frigo, M. A., da Silva, E. C., Barbosa, G. F. Augmented reality in aerospace manufacturing: A review. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, 2016, vol. 4, no. 2. pp. 125–130. DOI: 10.18178/jiii.4.2.125-130.
12. Eschen, H., Kötter, T., Rodeck, R., Harnisch, M., Schüppstuhl, T. Augmented and virtual reality for inspection and maintenance processes in the aviation industry. *Procedia manufacturing*, 2018, vol. 19, pp. 156-163. DOI: 10.1016/j.promfg.2018.01.022.
13. Hoque, A. S. M., Halder, P. K., Parvez, M. S., Szecsi, T. Integrated manufacturing features and Design-for-manufacture guidelines for reducing product cost under CAD/CAM environment. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, vol. 66, iss. 4, pp. 988–1003. DOI: 10.1016/j.cie.2013.08.016.
14. Bruni, A., Concettoni, E., Cristalli, C., Nisi, M. Smart inspection tools in robotized aircraft panels manufacturing. *2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, 2019, pp. 649-654. DOI: 10.1109/MetroAeroSpace.2019.8869690.
15. Annamalai, K., Naiju, C. D., Karthik, S., Prashanth, M. Early cost estimate of product during design stage using design for manufacturing and assembly (DFMA) principles. *Advanced Materials Research*, 2013, vols 622–623, pp. 540-544. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.622-623.540.
16. Shabalkin, D. Yu., Buyandukov, A. S., Luk'yanov, N. A. Primenenie sistemy virtual'nogo inzhiniringa v konstruktorsko-tehnologicheskoi podgotovke na aviastroitel'nom predpriyatii [Application of the virtual engineering system in design and technological preparation at an aircraft manufacturing enterprise]. *Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie rossiiskoi aviakosmicheskoi otrasli – New technologies, material and equipment of the Russian aerospace industry*, 2016, vol. 2, pp. 287–291.
17. Bychkov, I. V. *Osnovy tekhnologicheskoi podgotovki aviatsionnogo proizvodstva slozhnoprofil'nykh izdelii na baze analiticheskikh modelei protsessa formoobrazovaniya*. Avtoref. dis. ... doktora tekhn. nauk [Fundamentals of technological preparation of aviation production of complex-shaped products based on analytical models of the shaping process. Dr. tech. sci. diss. abstr.]. Kharkiv, National Aerospace University “KhAI” Publ., 2011.

Надійшла до редакції 10.01.2022, розглянута на редколегії 15.04.2022

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ЭТАПЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

*В. Т. Сикутьский, Е. В. Майорова, И.В. Бычков,
М. Н. Бойко, О. Л. Комиссаров*

Предметом исследования в статье являются алгоритмы процессов формообразования для производства авиационной техники (АТ) на этапе технологической подготовки производства (ТПП). Целью является понижение сроков ТПП АТ. Задачи: установить технологические мероприятия при ТПП и определить их роль с целью сокращения сроков ТПП; предложить алгоритмы процессов формообразования для изготовления АТ при ТПП с решением прямых и обратных задач на базе аналитического эталона (АЭ). Используемыми методами являются: анализ существующих и распространенных технологических мероприятий ТПП АТ, математические модели для оценки выполнения прямых и обратных задач при разработке, производстве и контроле. Получены следующие результаты. Согласно анализу, установлены технологические мероприятия ТПП и определена их роль в сокращении сроков ТПП. Взаимосвязаны понятия «проектная технологичность» и «технологичность» как составляющие процесса разработки изделия, а также «производственная технологичность» и «эксплуатационная технологичность» как составляющие процессов производства и эксплуатации. Показано, что решающим в установлении сроков ТПП АТ становится корректность создания АЭ, используемых на всех этапах ТПП в прямых и обратных задачах. Использование АЭ обходит дополнительное создание моделей и стыкуется с ЧПУ и CAD/CAM-системами, что сокращает сроки ТПП и облегчает взаимосвязь ее конструкторских и технологических этапов. Выводы. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: логически сгруппированы технологические мероприятия и определена их роль в целях сокращения сроков ТПП АТ; разработаны алгоритмы процессов формообразования для изготовления АТ при ТПП решением прямых и обратных задач; в соответствии с единым АЭ установлены следующие модели: поставка материала и доведение его до состояния заготовок, формообразование с целью изготовления деталей, комплектации деталей перед сборкой и выполнения сборочных операций путем изменения формы соединительных элементов. Предлагаемые алгоритмы могут быть развиты для АТ, которая была образована устаревшими методами сборки, и которая требует ремонта, прототипирования с использованием современных инжиниринговых методов, что может стать темой следующих исследований.

Ключевые слова: авиационная техника; аналитический эталон; алгоритм; формообразование; технологическая подготовка производства; прямая и обратная задача.

DEVELOPMENT OF SHAPING PROCESS ALGORITHMS AT THE STAGE OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF THE PRODUCTION OF THE AIRCRAFT

*Valeriy Sikulskiy, Kateryna Maiorova, Ihor Bychkov,
Maksym Boiko, Oleh Komisarov*

The subject of study in this article is the shaping process algorithms for aircraft (A/C) manufacturing during the technological preparation of production (TPP). The goal is to reduce the terms of the A/C TPP. Objectives: to establish production engineering measures during the TPP and determine their role in reducing the TPP terms; to propose the shaping process algorithms for the A/C manufacturing during the TPP by solving forward and inverse problems based on the digital mockup (DMU). The following methods were used: analysis of existing and common production engineering measures of the A/C TPP, mathematical models for evaluating the performance of forward and inverse problems during development, production and control. The following results were obtained. According to the analysis, production engineering measures of the TPP are established and their role in reducing the TPP terms is determined. The concepts of “design manufacturability” and “manufacturability” as components of the product development process are interconnected, as well as “production manufacturability” and “operational manufacturability” as components of the production and operation processes are interconnected. It is shown that the creation correctness of the DMU used in forward and inverse problems with all TPP stages becomes decisive in setting the A/C TPP terms. The use of the DMU bypasses the additional creation of models and fits with CNC and CAD/CAM-systems, which reduces the TPP terms and facilitates the interconnection between its design and technological stages. Conclusions. The scientific novelty of the obtained results is as follows: production engineering measures are logically grouped and their role is defined to reduce the A/C TPP terms; shaping process algorithms for the A/C manufacturing during the TPP are developed by solving forward and inverse problems;

following a single DMU, the following models are established: supply of material and bringing it to the workpieces state, shaping for parts manufacturing, parts kitting before assembly and performing assembly operations by changing the shape of the connecting elements. The proposed algorithms can be developed for the A/C created using outdated assembly methods and which require repair or prototyping using modern engineering methods, which can be the subject of further research.

Keywords: aircraft; digital mockup; algorithm; shaping; technological preparation of production, forward and inverse task.

Сікульський Валерій Терентійович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

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

Бичков Ігор Валерійович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Бойко Максим Миколайович – асп. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Комісаров Олег Леонідович – директор з виробництва, Акціонерне товариство «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Valeriy Sikulskiy – Doctor of Technical Science, Full Professor, Professor at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vsikulskij@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5944-4728.

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

Ihor Bychkov – Doctor of Technical Science, Senior Researcher, Professor at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: i.bychkov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-2436-4215.

Maksym Boiko – PhD Student at the Technology of Aircraft Manufacturing Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: maksym.boiko@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4982-839X.

Oleh Komisarov – Production Director at the Motor Sich JSC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: oleh.komisarov@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8429-0521.