

doi: 10.32620/oikit.2026.108.03

УДК 629.735: 658.51.4

І. М. Лисоченко, І. В. Бичков,  
М. І. Бичков, С. М. Рябіков

## Моделювання процесу виготовлення деталей на обладнанні з ЧПК в умовах серійного виробництва машинобудівного підприємства

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»*

У статті розглянуто інформаційне супроводження виробництва високотехнологічної продукції в умовах жорстких індивідуальних вимог замовника до її якості за одночасного обмеження вартості та термінів постачання. Обґрунтовано необхідність створення єдиної комп'ютерної інформаційної системи підприємства, яка дозволяє суттєво скоротити цикли конструкторсько-технологічної підготовки виробництва, підвищити якість розробок та забезпечити безперервність, непротиворічність і повноту даних на всіх етапах життєвого циклу виробу. Запропоновано функціональну архітектуру системи, що складається з чотирьох взаємопов'язаних підсистем. Детально описано модульний склад підсистем, їх інформаційні взаємозв'язки, процедуру прийняття рішень з урахуванням ієрархічної структури управління, а також формування моделі процесу (МП) оброблення на верстатах з ЧПК з використанням аналітичних еталонів обладнання, деталей, заготовок, інструментів і пристосувань. Особливу увагу приділено симуляції технологічних операцій, цифровим засобам візуалізації та контролю геометрії. Запропонований підхід забезпечує повний перехід від традиційних паперових креслень до електронних цифрових моделей і форматів даних за допомогою сучасних цифрових методів візуалізації та доступу. Це дозволяє радикально підвищити оперативність, безпеку та конкурентоспроможність виробництва наукоємної продукції.

**Ключові слова:** інформаційна система підприємства, технологічна підготовка виробництва; аналітичний еталон деталі; аналітичний портрет деталі; модель процесу виготовлення деталей; механічне оброблення; CAD/CAM-системи; устаткування з ЧПК.

### Вступ

В умовах активної цифрової трансформації промисловості та посилення конкуренції на ринку наукоємної продукції традиційні методи інформаційного супроводження виробничих процесів у машинобудуванні, особливо авіаційному, вичерпали свої можливості. Зростання складності виробів і необхідність оперативної адаптації до змінних умов вимагають принципово нових підходів до організації, формалізації та передачі технічних даних на всіх етапах життєвого циклу виробу.

### 1. Стан питання та постановка задачі

У сучасних умовах замовник змушує виробника задовольняти свої індивідуальні вимоги, але з жорсткими обмеженнями на вартість продукції, навіть наукоємної, та на терміни її постачання. Тому виробники, зі свого боку, змушені розв'язувати такі завдання:

- скорочення термінів виконання конструкторських робіт, технологічної підготовки виробництва та передачі необхідної технічної інформації виробничим підрозділам синхронно з виробничими планами;
- поліпшення якості розробок, що призводить до зміни форм і збільшення обсягів передаваної інформації, необхідності її формалізації та структурування.

Для розв'язання сформульованих вище завдань необхідна не лише наявність відповідних інформаційних підсистем, а й певна організація їх взаємодії. Дуже важливим етапом є інформаційна підготовча робота загальнозаводських служб підприємства перед початком технічної підготовки виробництва нового виробу.

Таким чином, функціонування виробничих підприємств сьогодні неможливе без використання комп'ютерних інформаційних систем, а ефективність їх застосування значною мірою визначається розв'язанням таких проблем:

- розроблення нової мови передачі конструкторської та технологічної інформації. Перехід від мови креслярської геометрії до мови аналітичного опису геометрії об'єктів виробництва наполегливо вимагає створення нової системи передачі конструкторської та технологічної інформації виробництву[1];
- надання повної технічної інформації про хід підготовки виробництва, починаючи з ранніх її стадій, керівникам служб інформаційного та матеріально-технічного забезпечення. Це дозволить керівникам інженерно-технічних служб отримувати інформацію про обмеження, що накладаються на виконуваний проєкт, і своєчасно коригувати завдання розробникам об'єкта виробництва;
- організація інформаційної системи підприємства повинна забезпечувати безперервність, непротирічність і повноту даних.

## **2. Отримані результати**

### **2.1. Функціональна взаємодія основних складових інформаційної системи підприємства**

Розв'язання поставлених завдань шляхом реалізації сформульованих вище принципів здійснено в межах інформаційної системи підприємства. Основу системи становлять 4 підсистеми: загального управління, діловодства, технічної підготовки виробництва та виробництва (рис. 1). Кожна з підсистем, у свою чергу, складається з кількох модулів. Підсистема «Загальне управління» має включати як основні модулі: «Персонал», «Економіка і фінанси» та «Договори». Підсистема «Діловодство» включає модуль «Документообіг», який інтегровано з модулем «Електронний архів». Основу підсистеми «Технічна підготовка виробництва» утворюють 3 модулі: «Конструювання», «Технологічна підготовка виробництва», «Основні засоби». Підсистема «Виробництво» організована за допомогою 3 модулів: «Планування виробничих процесів», «Виробництво» та «Рух ТМЦ (товарно-матеріальних цінностей)», який супроводжує переміщення об'єктів виробництва (матеріалів, заготовок, деталей тощо), а також матеріалів, інструменту та пристосувань у прив'язці до обладнання для реалізації виробничих процесів.

У підсистемі загального управління підприємством модуль «Персонал» включає підмодулі: «Штатний розпис», «Відділ кадрів», «Табельний облік». Крім ведення структури підприємства та внесення всієї необхідної інформації для відповідних підрозділів підприємства (відділ кадрів, відділ праці та заробітної плати, підрозділів табельного обліку) ця підсистема повинна фіксувати встановлення прав доступу до інформації в мережі підприємства кожного співробітника та усувати необхідність супроводження та дублювання всієї інформації про персонал у кожному окремому підрозділі підприємства.

Модуль «Договори» призначено для обліку інформації про договори, укладені підприємством, та для ведення інформації про переддоговірну роботу

(листування з потенційним замовником, робота на перспективу, прогнозування попиту). Основне призначення модуля – координація всіх робіт, які веде підприємство за договорами та темами, що дозволить керівнику оцінювати матеріальні та фінансові результати договірної діяльності.

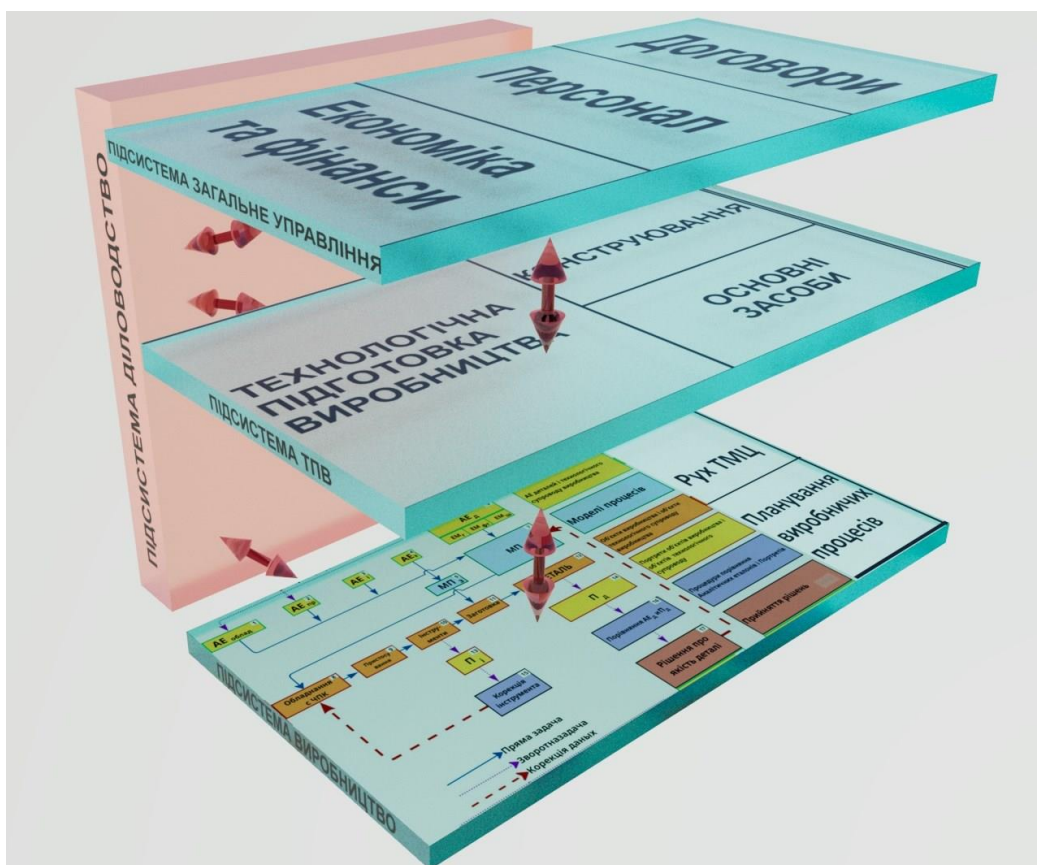


Рис. 1. Взаємозв'язок основних підсистем і модулів інформаційної системи машинобудівного підприємства

Модуль «Економіка і фінанси» інформаційно супроводжує оцінку роботи виробничих та інших підрозділів з погляду фінансових витрат. Визначаються планові та фактичні витрати. Цей модуль забезпечує зв'язок між управлінням виробництвом і управлінням фінансовою діяльністю шляхом розв'язання завдань обліку, контролю та регулювання витрат, що передбачає розв'язання чотирьох завдань: розрахунок із замовниками; розрахунок із постачальниками; розрахунок амортизаційних відрахувань за інформацією модуля «Основні засоби»; ведення головної бухгалтерської книги.

Підсистема «Діловодство» розв'язує одну з нагальних проблем сучасного виробництва – інформаційне супроводження документів. Характерною особливістю вітчизняного управління виробництвом є наявність великої кількості випадкових або суб'єктивних факторів, які вносять невизначеність у структуру ділових процесів, що вкрай ускладнює роботу апарату управління та призводить до використання вільної маршрутизації, тобто визначення послідовності етапів на стадії виконання завдань, а не за заздалегідь визначеним. Без урахування вищесказаного, розроблення модуля не зможе задовольнити користувачів своїм набором функцій для розв'язання поточних завдань.

Підсистема «Технічна підготовка виробництва», як зазначено вище (див. рис. 1), містить модуль «Конструювання», який на сучасних підприємствах реалізується, як правило, з використанням CAD-систем. Але при цьому дуже важливо організувати фіксацію, аналіз і формалізацію досвіду розробників. Одним із рішень цього завдання є створення довідкового підмодуля «Підтримка прийняття рішень» шляхом формування бази стандартизованих і уніфікованих об'єктів або рішень на конкретному підприємстві.

Відповідно, САМ-система є важливою складовою частиною модуля «Технологічна підготовка виробництва», оскільки об'єкти виробництва розробляються в системі CAD. Для ефективного функціонування підприємства дуже важливим є взаємодія цього модуля з багатьма іншими модулями та підсистемами. Наприклад, інформаційний зв'язок з модулем «Основні засоби» забезпечує оперативне надходження інформації для моделювання в САМ-системі обладнання (геометрії та кінематики), а також оперативну інформацію про кожну одиницю обладнання під час планування виробництва та стану в процесі виробництва для виконання оперативних коригувальних впливів. Ефективна організація обліку наявності та руху основних засобів – актуальне завдання для будь-якого підприємства, реалізоване в модулі «Основні засоби». Цей модуль дозволяє розв'язувати як завдання підготовки виробництва, так і багато інших, наприклад, облік нематеріальних активів і капітальних вкладень.

Аналіз предметних областей, описаних у більшості систем САМ, показує, що основну увагу їх розробників приділено розрахунку траєкторії різального інструменту під час механічного оброблення заготовки. Деякі модулі розширені функціями розрахунку руху робочих органів електроерозійних верстатів, установок швидкого прототипування для отримання об'ємних макетів за аналітичними еталонами, розрахунку процесу формоутворення за допомогою трубогнів і холодного штампування листових заготовок. Багатомодульні системи, крім того, оснащені модулями контролю геометрії деталей за допомогою вимірювальних машин, модулями розрахунку процесів лиття пластмас і металів. Однак під час розв'язання всього комплексу завдань технологічної підготовки виробництва за допомогою модуля САМ виникають серйозні проблеми, сенс яких можна проілюструвати на прикладі розроблення технологічних процесів для виробничих підрозділів.

Підсистема «Виробництво», наведена на рис. 1, включає як приклад модуль «Механічне оброблення на обладнанні з ЧПК», модуль «Планування виробничих процесів» призначений для планування запуску партій виробів у виробництво, а також диспетчеризації процесу виробництва. Він використовує інформацію модулів «Конструювання», «Технологічна підготовка виробництва», «Основні засоби», «Персонал» для планування виробництва з урахуванням складу виробів підприємства, маршруту та технологічних процесів їх виготовлення, завантаження обладнання, наявності та потреби в матеріальних і трудових ресурсах.

Модуль «Рух ТМЦ» забезпечує облік інформації про зовнішні та внутрішні переміщення матеріальних цінностей, реалізуючи, таким чином, функції співробітників відділів постачання, збуту, а також складів підприємства.

## 2.2. Процедура прийняття рішень

Процедура переходу від неоднозначних рішень задач формоутворення, яка завжди має місце на будь-якому машинобудівному підприємстві, до єдиного,

яке реалізується при серійному виробництві з використанням наведених вище модулів інформаційної системи, вимагає прийняття рішень на різних рівнях ієрархічної системи управління під час підготовки його виробництва (рис. 2). Так, рішення щодо маршрутних технологій приймають на рівні відділу головного технолога, а рішення щодо технологічних операцій на робочих місцях – у технологічних бюро цехів.

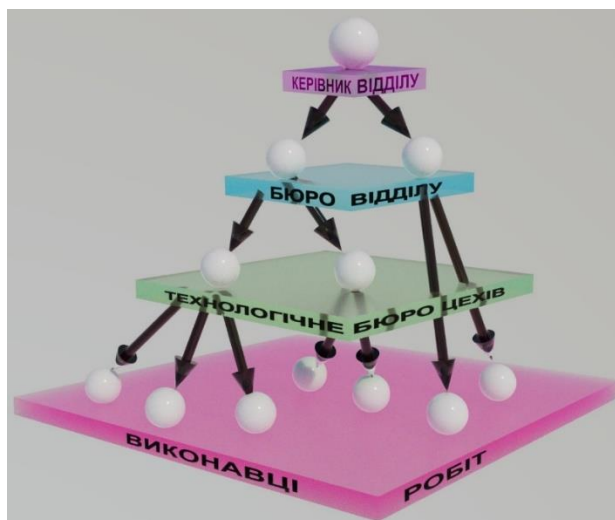


Рис. 2. Дерево підпорядкування під час розв'язання задач формоутворення

Усі рішення щодо процесів формоутворення деталей (виробів) приймаються на етапах технічної підготовки виробництва, коли розробляється вся інформація про майбутній виріб. У колективі, що бере участь у проєкті, відбувається обмін інформацією згідно з ієрархією підпорядкування. Постановка задачі формоутворення повинна виконувати умову прийняття єдиного рішення з усіх можливих і зрозумілим чином інформувати про це рішення всіх учасників проєкту. Практична реалізація цього завдання неможлива без відповідної інформаційної системи.

В інформаційній системі підприємства має діяти таке правило: що ближче виконавець розташований у дереві підпорядкування до кореня ієрархічного дерева, то більше прав, обов'язків і відповідальності за достовірність та актуальність інформації він несе (див. рис. 2). Усіх виконавців, які несуть відповідальність за певну частину інформації, можна ідентифікувати за деревом підпорядкування. Для цього достатньо визначити шлях від кореня дерева до виконавця, відповідального за цю галузь інформації. При цьому за початок шляху приймається виконавець найвищого рівня (керівник підприємства), а кінцевим ланцюгом буде виконавець, який виконує перетворення або внесення інформації.

Розглянемо дерево підпорядкування, показане на рис. 3, де ілюструється розподіл відповідальності під час розв'язання задач формоутворення. Типова ситуація для машинобудівного підприємства: унаслідок поломки деталі вийшов з ладу виріб підприємства під час експлуатації його замовником.

Ймовірною причиною є відхилення геометрії деталі від еталона через помилку в керуючій програмі для верстата з ЧПК. Потрібно визначити відповідальних за брак деталі. Розроблення керуючої програми та безпосереднє перетворення інформації здійснював виконавець **g**. Для цього визначимо шлях  $L = \{a, b, e, g\}$ , який вказує перелік усіх відповідальних. Таким чином, видно, що

відповідальність за інформацію несуть виконавці **a**, **b**, **e** та **g** (кола з заливкою на рис. 3), причому **a** несе найбільшу відповідальність, а **g**, будучи виконавцем нижчого рівня, здійснював безпосереднє перетворення даних (створення, зміну та редагування) під час розроблення керуючої програми. Оскільки **e**, будучи керівником у **g**, несе більшу відповідальність за інформацію, то він має повне право забрати інформацію та здійснити над нею перетворення самостійно або передати її іншому нижчестоящому виконавцю, щоб той здійснив необхідні перетворення на свій розсуд. Встановивши такі відносини між співробітниками та відповідальністю за інформацію, розглянемо процес її перетворення.

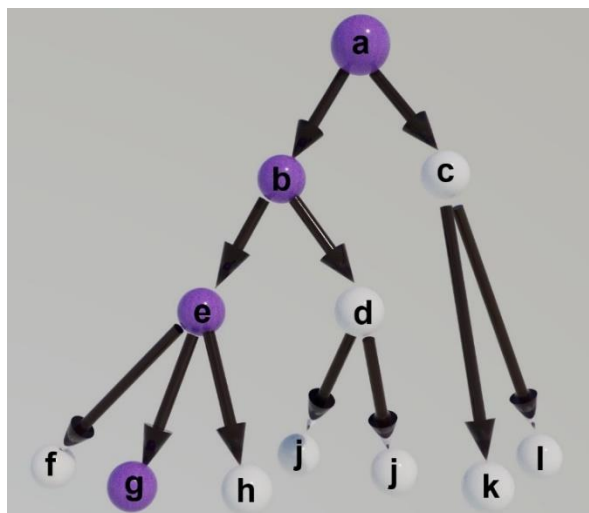


Рис. 3. Схема відповідальності за інформацію

Основні стадії роботи з інформацією такі: створення, редагування, розсилання, зберігання та видалення [2]. Створити інформацію може будь-який співробітник в межах його функціональних обов'язків. Виконавець вищого рівня має право перерозподілу інформації між своїми підлеглими. Редагування інформації здійснюється виконавцем за завданням керівника. Формування цього завдання зумовлене зовнішніми або внутрішніми факторами. Зовнішні умови, як правило, впливають не на підлеглого, а на керівника, оскільки він має більший доступ до інформації. Саме керівник формулює задачу та розподіляє завдання серед підлеглих. У разі помилкових дій підлеглих адміністративні стягнення лягають на коло відповідальних осіб у тій мірі, в якій вони визначені законодавством держави та стандартами підприємства. Інформаційна система в цьому разі повинна надати дані для формування списку відповідальних осіб на поточний момент часу або на момент часу вчинення помилкових дій. Тому система повинна зберігати зміни інформації із зазначенням виконавця, який здійснив ці операції. Видалення інформації повинно відбуватися лише в разі повної втрати її актуальності. Цю операцію може здійснювати будь-який виконавець, однак рішення має бути санкціоноване відповідно до чинного законодавства держави, міжнародних стандартів і стандарту підприємства.

Таким чином, практична реалізація на машинобудівному підприємстві описаних вище процедур переходу до коректної постановки прямих і зворотних задач формоутворення [3] вимагає створення комп'ютерної інформаційної системи підприємства.

## 2.3. Формування моделей процесів (МП)

На рис. 1 у «Підсистемі виробництво» спрощено показано інформаційні складові виробничого процесу в прив'язці до об'єкта виробництва, обладнання, пристосувань та інструменту для механічного оброблення на обладнанні з ЧПК [3].

Розроблені на стадії технологічної підготовки виробництва МП передаються у виробничі підрозділи. У разі виготовлення деталей на обладнанні з ЧПК, КП розробляються в середовищі CAD/CAM-систем. Але крім КП в МП повинна бути включена й додаткова інформація для всіх учасників виробничого процесу, включно з оператором верстата з ЧПК.

Виконаний авторами в роботі [4] аналіз інформаційних потоків під час виготовлення деталі на обладнанні з ЧПК дозволив сформулювати вимоги для реалізації інформаційного супроводження процесу виготовлення об'єкта виробництва на обладнанні з ЧПК в умовах серійного виробництва. Однією з вимог є надання всієї необхідної інформації оператору в доступному та наочному вигляді.

### 2.3.1. Необхідна інформація для формування моделі процесу оброблення на верстатах з ЧПК

На рис. 1 представлено схему (нижній рівень) інформаційних потоків при серійному виробництві на обладнанні з ЧПК [4], де необхідно виділити такі основні компоненти:

- **Аналітичний еталон обладнання (АЕоб)** (рис. 4), який включає еталонну модель геометрії робочого простору верстата або зони можливих переміщень інструменту, зону зміни інструменту, зовнішню геометрію верстата.

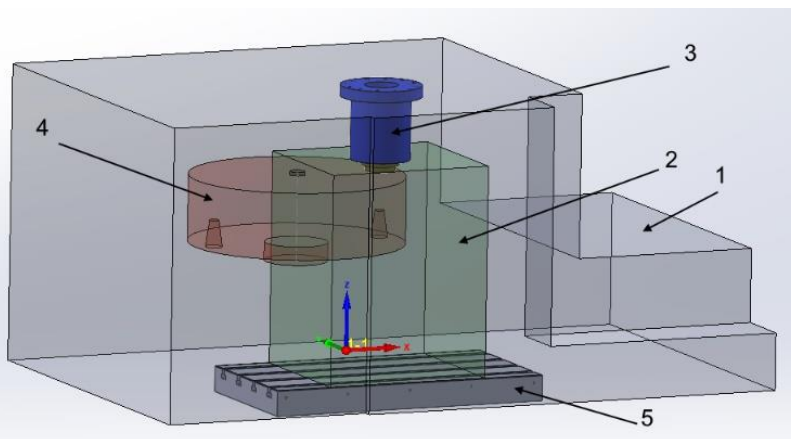


Рис. 4. Аналітичний еталон геометрії обладнання та його компоненти:

1 – модель зовнішньої геометрії станка; 2 – модель зони можливих переміщень інструмента; 3 – модель шпинделя; 4 – модель зони зміни інструментів; 5 – модель столу

- **Аналітичний еталон деталі (АЕд)** (рис. 5), який включає: а – еталонну модель геометрії деталі; б – еталонну модель допусків; в – еталонну модель функціональної точності; г – еталонну модель шорсткості.

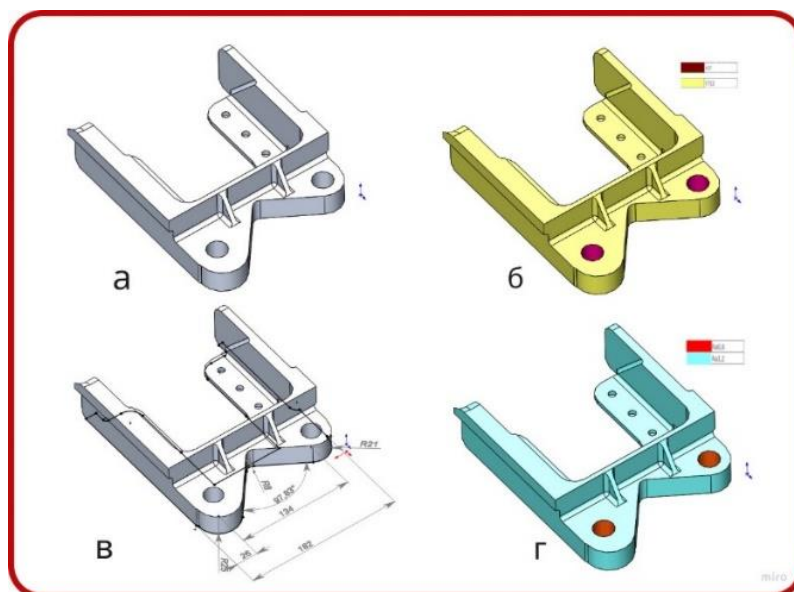


Рис. 5. Аналітичний еталон деталі та його компоненти :  
а – еталонної моделі геометрії , б – еталонна модель допусків;  
в – еталонна модель функціональної точності; г – еталонна модель шорсткості.

- **Аналітичний еталон заготовки (АЕз)**, який проектується з урахуванням інформації АЕд.

- **Аналітичні еталони пристосувань (АЕпр)** (рис. 6), необхідних для встановлення та фіксації заготовки.

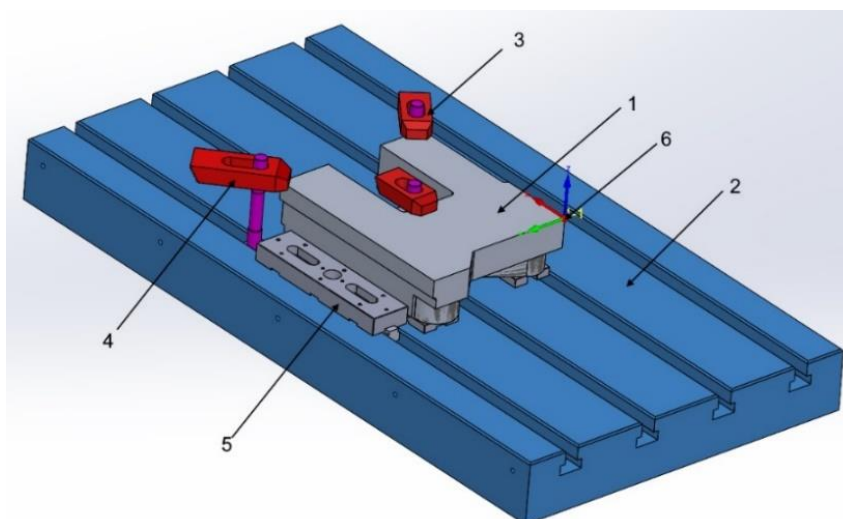


Рис. 6. Моделювання процесу встановлення заготовки (1 – АЕз, 2 – фрагмент АЕобладнання, робочий стіл, 6 – координати нульової точки деталі) з використанням упорів і притисків (3, 4, 5 – АЕпр1, АЕпр2, АЕпр3)

- **Аналітичні еталони інструментів (АЕі)**: – аналітичні еталони геометрії інструментів, вибір яких значною мірою визначає інформація АЕд, наявність інструменту на складі тощо;

– координати встановлення інструментів відносно базових точок верстата (рис. 7).

Место	Тип	Имя инструмента	ST	D	Длина	ø	H	ф	ш	ш	M	g
		TORC_FREZA_D40	1	1	134.523	40.000	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		TORC_FREZA_D40	1	2	74.383	40.000	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
1		RASTOCH_OPRAVKA	1	1	200.000	8.000	90.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2		ZENK_D6_45^	1	1	189.306	6.000	90.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		ZENK_D6_45^	1	2	129.424	6.000	90.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3		3D	1	1	141.588	2.980		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4		FREZA_D12_L95_R4	1	1	160.000	12.000	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		FREZA_D12_L95_R4	1	2	167.513	12.000	4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5		FREZA_D10_L20	1	1	177.774	10.000	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		FREZA_D10_L20	1	2	117.761	10.000	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6		FREZA_D2.5_L25	1	1	151.520	2.500	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		FREZA_D2.5_L25	1	2	91.492	2.500	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7		FREZA_D10_L50_R1	1	1	180.000	0.000	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		FREZA_D10_L50_R1	1	2	120.181	0.000	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8		FREZA_D4_L20_R1	1	1	181.285	4.000	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9		FREZA_D4_L25	1	1	152.762	4.000	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		FREZA_D4_L25	1	2	92.721	4.000	2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10												

Рис. 7. Фото дисплея СЧПУ станка VC450 Spinner с информацией об инструменте

### 2.3.2. Розроблення УП та візуалізація процесу оброблення

На основі моделей АЕД, АЕз(i), АЕОбл, АЕі, АЕпр САМ-система розраховує траєкторію інструменту — це запрограмований шлях, за яким рухається різець, фреза або свердло для видалення матеріалу заготовки з метою реалізації конкретної операції. Керуюча програма є текстовим файлом; якщо обсяг програми дуже великий, то, як правило, її розбивають на кілька програм. На рис. 8 представлено поточну зміну геометрії аналітичного еталона заготовки АЕз(i) в процесі виконання окремих операцій.

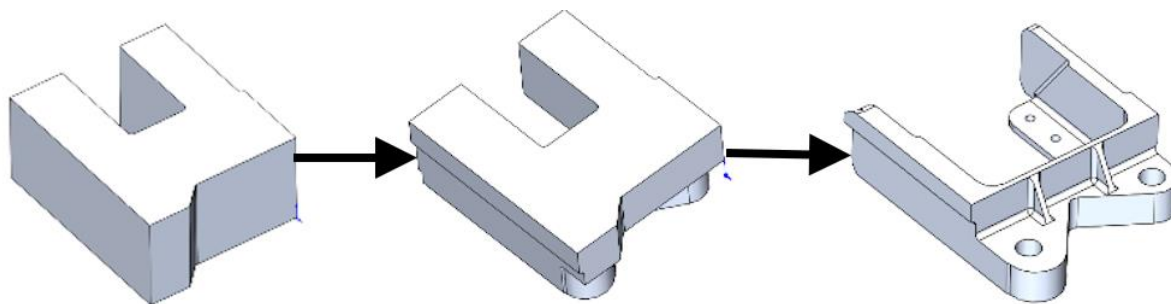


Рис. 8. Изменение геометрии аналитического эталона заготовки АЕз(i) в процессе выполнения текущих операций.

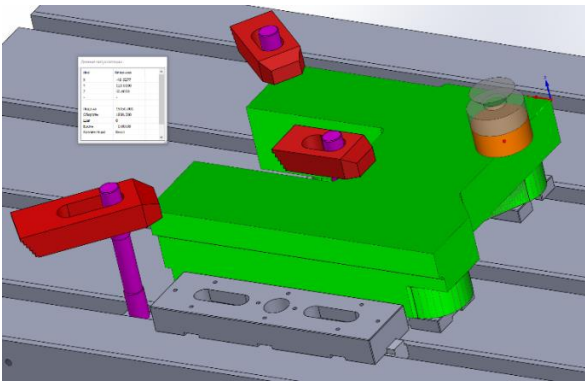
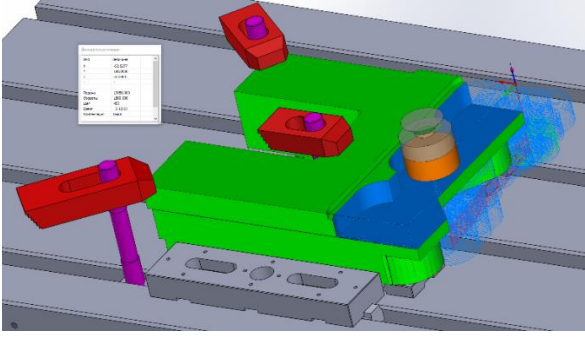
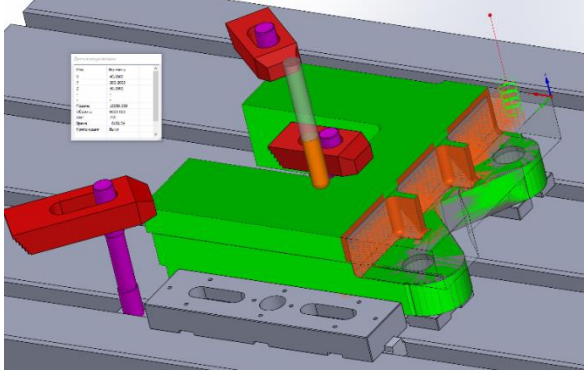
Завдання раціональних параметрів оброблення (швидкість шпинделя, подача, глибина зняття матеріалу) забезпечує виконання КП для кожної операції. Візуалізація руху інструменту здійснюється в середовищі АЕОбл, АЕз, АЕі, АЕпр за інформацією КП. Ця процедура виконується, як правило, в середовищі САМ-систем. Симуляція процесів оброблення дозволяє віртуально моделювати рух інструменту за заданою траєкторією, контролювати точки входу та виходу інструменту, виявляючи потенційні проблеми до початку реального оброблення заготовки, і наочно ілюструє всю необхідну інформацію, потрібну для оцінки якості її процесу. Це мінімізує помилки, такі як колізії, неефективні режими різання

та перевантаження (стрибки значень прискорення, ривка за кожною координатою тощо), тим самим підвищуючи безпеку та ефективність виробництва.

У форматі статті відсутня можливість демонстрації відеофайлу моделювання процесу оброблення, тому ілюструється початковим і кінцевим кадром операції в таблиці 1. Оскільки наведені операції виконуються послідовно одна за одною, то кінець першої операції є початком другої тощо. Через це в таблиці усунуто дублювання інформації та представлено моделі процесу операції лише на початку кадру. Більш детально інформація кадру симуляції представлена на рис. 9.

Таблиця 1

Симуляція моделі процесу обробки

Нава операції	Початок кадру
<p><b>Встановлення заготовки</b></p>	
<p><b>Розвантаження кишені</b></p>	
<p><b>Оброблення стінки чорнове</b></p>	

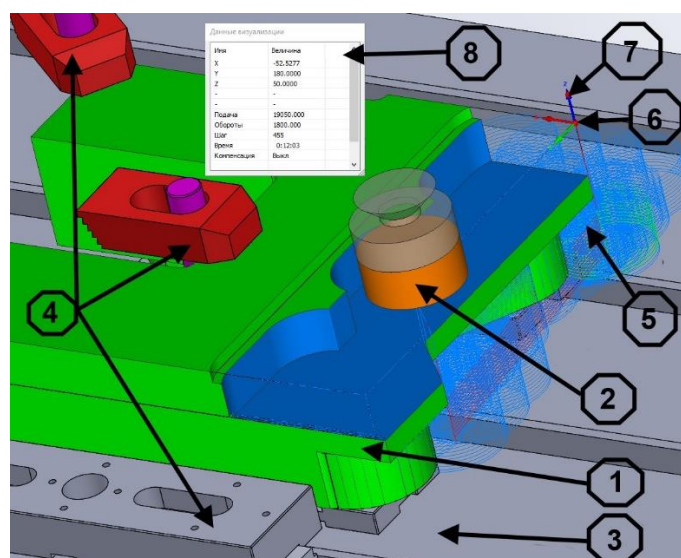


Рис. 9. Кадр симуляції моделі процесу: 1 – поточний стан АЕз(і); 2 – АЕі; 3 – еталонна модель стола (фрагмент АЕ обладнання); 4 – еталонна модель пристосувань; 5 – траєкторія інструменту; 6 – точки входу та виходу інструменту; 7 – нульова точка деталі; 8 – поточні дані моделі процесу (координати інструменту, подача, оберти шпинделя тощо)

### 2.3.3. Засоби вимірювання

Засоби вимірювання забезпечують точність встановлення заготовки та прив'язки інструменту, калібрування осей верстата, а також компенсацію зносу інструментів і контроль розмірів заготовки та деталі після оброблення. Без правильних процедур вимірювання наладка може призвести до неточних траєкторій і поломок, тому вона є важливим етапом реалізації процесу оброблення. Сучасні системи ЧПК (Fanuc, Haas, Siemens) дозволяють автоматичну компенсацію, наприклад, під час зміни діаметра фрези в процесі її спрацювання, але ручні вимірювання залишаються базою для верифікації. Вся інформація про засоби вимірювання (тип приладу, похибка, дата калібрування) необхідна для формування моделі процесу.

Після завершення оброблення або на проміжних етапах проводиться післяопераційний контроль – фінальна перевірка готової деталі для підтвердження відповідності з АЕд та внесення корекцій за потреби. Це дозволяє виявити систематичні помилки (знос інструменту, теплові деформації, зміщення заготовки) і скоригувати процес для наступних деталей. Без післяопераційного контролю неможливо гарантувати якість партії, тому він обов'язковий після першої деталі та періодично в серії.

Вимірювання макроегеометрії поверхні деталі зазвичай виконуються за допомогою координатно-вимірювальних машин (КВМ). Але багато зразків сучасного обладнання з ЧПК забезпечують процедури вимірювання шляхом використання їх координатної системи позиціонування та переміщення робочих органів як координатно-вимірювальної системи. Такий підхід дозволяє суттєво знизити трудомісткість вимірювань за забезпечення вимог точності для побудови портрета геометрії деталі (ПГд) (рис. 10).

Під час виконання вимірювань поверхні, як правило, змінюються з заданим кроком значення двох координат, наприклад X і Y, а значення третьої координати

– Z визначають за допомогою вимірювальної головки. У разі потреби вимірювань у заданих точках деталі вони повинні бути позначені на АЕд. (рис. 10).

У середовищі CAD/CAM для виконання вимірювань формується керуюча програма, яка передається на верстат з ЧПК. Результати вимірювань є основним джерелом інформації для побудови ПГд. Процедура побудови портрета може бути виконана вибором із численних алгоритмів апроксимації [5, 6, 7, 8] або реалізованими функціями, що є в арсеналі CAD/CAM-систем.

Порівняння еталонної моделі геометрії і портрета деталі реалізується також у середовищі CAD/CAM-систем, для чого передбачено спеціальні модулі. Результати замірів можуть бути автоматично оформлені у вигляді звіту відповідно до стандарту підприємства.

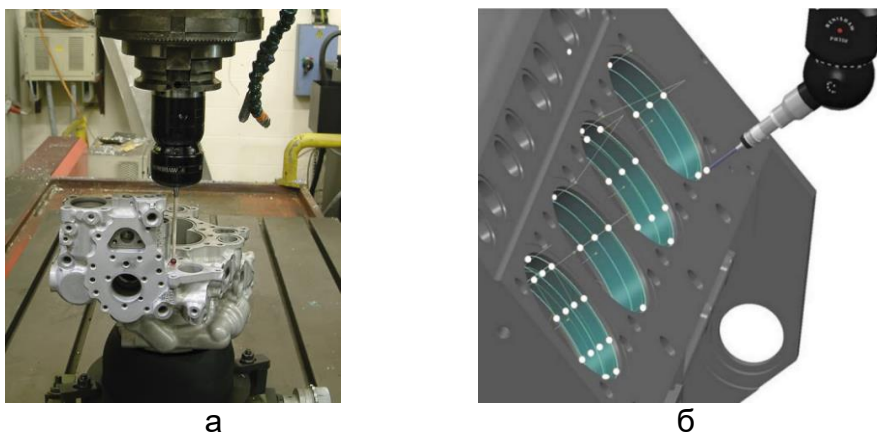


Рис. 10. а – вимірювання корпусної деталі на верстаті з ЧПК,  
б – варіант представлення порівняння еталона та портрета методом  
індексування точок контролю на АЕд

У поєднанні з вимірювальною системою ЧПК тактильні щупи надають можливість автоматичного вимірювання геометричних параметрів інструменту за допомогою інструментальних засобів верстата (рис. 11). Виміряні значення довжини та радіуса інструменту, які формують портрет інструменту (Пі) система ЧПК використовує для їх порівняння з еталонними значеннями, для яких виконано розрахунок КП. Якщо виміряні значення виходять за допустимі межі, описані АЕі, система ЧПК може виконати корекцію траєкторії інструменту, або заблокувати використання цього інструменту, або автоматично замінити його на інший. Щуп оснащений оптичним сенсором, і принцип його дії аналогічний розглянутому раніше тактильному датчику для вимірювання поверхонь деталі. Датчик підключається через кабель або інфрачервоний порт.

Лазерна система контролю стану інструменту забезпечує безконтактний метод вимірювання. Вона дозволяє швидко та надійно вимірювати малорозмірний інструмент, не пошкоджуючи його [9]. Точне вимірювання діаметра та довжини інструменту при номінальній швидкості обертання гарантує високу якість формування поверхні деталі. Незважаючи на номінальну швидкість обертання, можуть виконуватися вимірювання кожного зуба інструменту, а також автоматичний контроль геометрії спеціального інструменту [10].

Усі лазерні системи оснащені вбудованою системою обдування, за допомогою якої інструмент перед вимірюванням може бути очищений від стружки та мастильно-охолоджуючої рідини. Вони випускаються під різну частоту

обертання шпинделя верстата з ЧПК: під стандартний шпиндель або під HSC-шпиндель (понад 30 000 об/хв). Для функціонування такої системи необхідний пристрій підготовки повітря, який складається з тріступеневого фільтра (фільтр попереднього очищення, фільтр тонкого очищення та фільтр з активованим вугіллям), конденсатовідвідника та регулятора тиску з манометром. Лазерні системи TL мають ступінь захисту IP 68 і завдяки цьому можуть бути встановлені в робочому просторі верстата як горизонтально, так і вертикально.

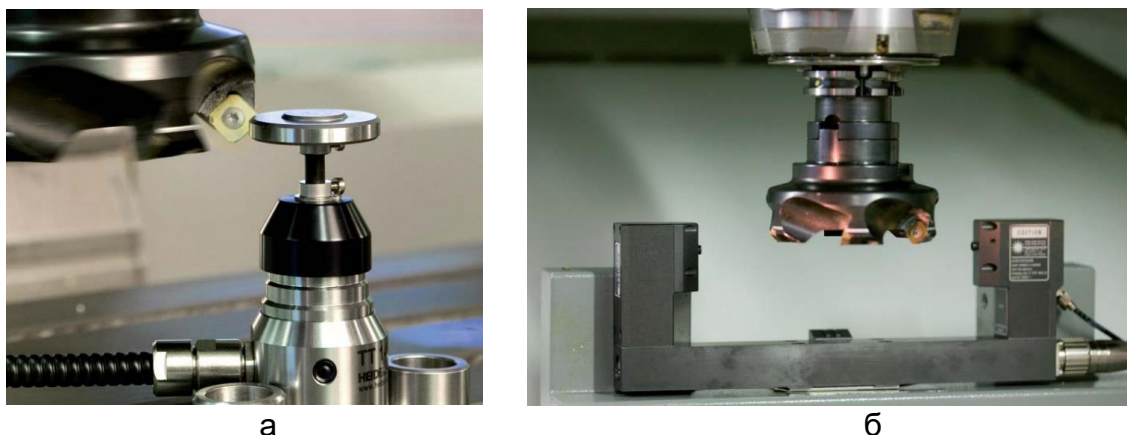


Рис. 11. а – вимірювальний щуп ТТ для вимірювання параметрів інструменту, б – лазерна система контролю стану інструменту.

Уся вищезазначена інформація про обладнання, деталь, заготовку, інструменти, режими, координати та симуляції інтегрується в модель процесу оброблення в електронних форматах, таких як STP, Excel або PDF, і вказується у вигляді посилань (штрих-код або QR-код) на необхідну інформацію – у базовій інформаційній системі підприємства для швидкого доступу. Це дозволяє наладчикам візуалізувати процес через веб-браузери, планшети або хмарні платформи без паперових носіїв, знижуючи помилки та прискорюючи наладку (включно з інтеграцією даних від засобів вимірювання та постконтролю).

Для наочності МП можна представити у вигляді таблиці 2, де для кожної операції вказана необхідна інформація в закодованому штрих-кодом посиланні, відкрити яке можна, маючи відповідне право доступу на використання цієї інформації.

Таблиця 2

Фрагмент моделі процесу обробки деталі на верстаті з КПК

Назва операції	АЕ деталі	Стан АЕ заготовки	АЕ обладнання	АЕ інструмента	АЕ прис-тосув-ань	Пара-метри режимів оброблення	Керую-ча програ-ма	Симу-ляція	Засоби вимі-рювання та контро-лю
Встановлен-ня заготовки									
Розвантажен-ня кишені									
Оброблення стінки чорнове									

## Висновки

1. Сама по собі наявність необхідної кількості обладнання з ЧПК, інтегрованого в єдину комп'ютерну мережу з CAD/CAM системами, не є достатньою умовою для забезпечення технологічності процесу механічної обробки деталей. Аналіз інформаційних потоків авіабудівних підприємств показав, що організація єдиної комп'ютерної системи дозволяє кратно знизити трудомісткість супроводження виробництва всіма підрозділами.

2. Комп'ютерна система підприємства має забезпечити права доступу кожного працівника підприємства до необхідної інформації згідно з його функціональними обов'язками, що забезпечує наявність модуля персоналу та його постійний супровід.

3. Множинність можливих варіантів формоутворення деталей під час виконання технологічної підготовки виробництва зводяться до єдиного, залежно від наявності обладнання та його ресурсу до капітального ремонту, матеріалу, пристроїв, інструменту тощо. Рішення приймаються великою кількістю учасників процесу відповідно до своїх функціональних обов'язків. Інформаційна система має зафіксувати прийняте рішення конкретною особою та повідомити про це всіх зацікавлених осіб.

4. На конкретному прикладі представлені інформаційні об'єкти, які необхідні для опису моделі процесу виготовлення деталей у серійному виробництві на обладнанні з ЧПК: аналітичні еталони деталі, заготовки, обладнання, пристрою, інструменту. Наявність цих моделей дозволяє в середовищі CAD/CAM систем формувати траєкторію переміщення інструменту в робочій зоні обладнання у вигляді керуючої програми. Файл з візуалізацією цього процесу обов'язково необхідно включати до моделі процесу.

5. До моделі процесу включені процедури контролю параметрів деталі, оснащення, інструменту. Показано можливості сучасного обладнання для побудови відповідних портретів для порівняння їх з аналітичними еталонами при виконанні процедур контролю, які є елементами моделі процесу.

6. Великий обсяг інформації моделі процесів вказує на зручність її подання у вигляді таблиці, в якій штрих-кодом оформлені посилання на окремі операції, розміщені на серверах підприємства, які доступні лише учасникам процесу.

## Список літератури

1. Xiao W. Manufacturing crisis and twin-oriented manufacturing [Текст] / W. Xiao, T. Qiu, Q. Liu, G. Zhao, H. Xing, R. Li // Journal of Manufacturing Systems. — 2024. — Vol. 74. — P. 205–222.

2. Бичков І. В. Основи технологічної підготовки авіаційного виробництва складнопрофільних виробів на базі аналітичних моделей процесу формоутворення [Текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступ. д-ра техн. наук : 05.07.02 / Бичков Ігор Валерійович. — Х. : [б. в.], 2011. — 30 с. — Утвердж. 17.02.2012.

3. Бичков І. В. Многоякваріантність технологічних процесів і коректна постановка задач формоутворення [Текст] / І. В. Бичков // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». — Вип. 48. — Х., 2010. — С. 45–50.

4. Бичков І. В. Формування елементів інформаційного простору для забезпечення механічної обробки деталей в літакобудуванні [Текст] / І. В. Бичков,

I. М. Лисоченко, М. І. Бичков, С. М. Рябіков [та ін.] // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології : зб. наук. пр. Нац. аерокосм. ун-ту ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». — Вип. 105. — Х., 2025. — С. 101–111.

5. Piegł L. The NURBS book [Text] / L. Piegł, W. Tiller. — 2nd ed. — Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer, 1997. — 646 p

6. Шелевицький І. В. Сплایни в цифровій обробці даних і сигналів [Текст] : монографія / І. В. Шелевицький, М. О. Шутко, В. М. Шутко, О. О. Колганова. — Кривий Ріг : Видавничий дім, 2008. — 232 с. — ISBN 978-966-2915-86-0.

7. Раїсов Ю. А. Сплاین-апроксимація з спряженням кривих за похідними [Текст] / Ю. А. Раїсов, І. В. Бичков, Н. І. Бичков // Проблеми машинобудування. — 2012. — Т. 15, № 2. — С. 45–55.

8. Raposo-Sánchez M. Á. A novel parametrization of  $\alpha$ -spline functions: Application to digital filter design [Electronic resource] / M. Á. Raposo-Sánchez, J. Sáez Landete, F. Cruz-Roldán // Signal Processing. — 2023. — Vol. 204. — P. 108836.

9. Mauthner G. Industry-Oriented System Architecture for Feature-Based Data Management in CNC Machining Processes [Electronic resource] / G. Mauthner, M. Hoffmann, L. Plessing, T. Trautner, F. Bleicher // Procedia CIRP. — 2023. — Vol. 118. — P. 157–162.

10. Kasiviswanathan S. Machine-Learning- and Internet-of-Things-Driven Techniques for Monitoring Tool Wear in Machining Process: A Comprehensive Review [Electronic resource] / S. Kasiviswanathan, S. Gnanasekaran, M. Thangamuthu, R. Rakkiyannan // Journal of Sensor and Actuator Networks. -2024. - Vol. 13, № 5. - P. 53

## References

1. Xiao W. Manufacturing crisis and twin-oriented manufacturing [Текст] / W. Xiao, T. Qiu, Q. Liu, G. Zhao, H. Xing, R. Li // Journal of Manufacturing Systems. — 2024. — Vol. 74. — P. 205–222.

2. Bychkov I. V. Osnovy tekhnolohichnoi pidhotovky aviatsiinoho vyrobnytstva skladnoprofilnykh vyrobiv na bazi analitychnykh modelei protsesu formoutvorennia [Tekst] : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stup. d-ra tekhn. nauk : 05.07.02 / Bychkov Ihor Valeriyovych. - Kh. : [b. v.], 2011. - 30 s. - Utverdzh. 17.02.2012.

3. Bychkov I. V. Bahatovariantnist tekhnolohichnykh protsesiv i korektna postanovka zadach formoutvorennia [Tekst] / I. V. Bychkov // Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnolohii : zb. nauk. pr. Nats. aerokosm. un-tu im. M. Ye. Zhukovskoho «KHAІ». - Vyp. 48. - Kh., 2010. - S. 45–50.

4. Formation of information space elements to enable machining of parts in aircraft manufacturing/ I. V. Bychkov, I. M. Lysochenko, M. I. Bychkov, S. M. Riabikov, [et al.] // Open Information and Computer Integrated Technologies: Collection of Scientific Papers of the National Aerospace University "KhAI". - 2025. - Iss. 105. - P. 101–111

5. Piegł L. The NURBS book [Text] / L. Piegł, W. Tiller. - 2nd ed. - Berlin ; Heidelberg ; New York : Springer, 1997. - 646 p.

6. Shelevytskyi I. V. Splajny v tsyfrovij obrobtisi danykh i syhnaliv [Tekst] : monohrafiia / I. V. Shelevytskyi, M. O. Shutko, V. M. Shutko, O. O. Kolhanova. - Kryvyi Rih : Vydavnychiy dim, 2008. - 232 s. - ISBN 978-966-2915-86-0.

7. Raisov Yu. A. Splain-aproksymatsiia z spriazhenniam kryvykh za pokhidnymy [Tekst] / Yu. A. Raisov, I. V. Bychkov, N. I. Bychkov // Problemy mashynobuduvannia. - 2012. - T. 15, № 2. - S. 45–55.

8. Raposo-Sánchez M. Á. A novel parametrization of  $\alpha$ -spline functions: Application to digital filter design [Electronic resource] / M. Á. Raposo-Sánchez, J. Sáez Landete, F. Cruz-Roldán // Signal Processing. — 2023. — Vol. 204. — P. 108836.

9. Mauthner G. Industry-Oriented System Architecture for Feature-Based Data Management in CNC Machining Processes [Electronic resource] / G. Mauthner, M. Hoffmann, L. Plessing, T. Trautner, F. Bleicher // Procedia CIRP. - 2023. - Vol. 118. – P. 157–162'.

10. Kasiviswanathan S. Machine-Learning- and Internet-of-Things-Driven Techniques for Monitoring Tool Wear in Machining Process: A Comprehensive Review [Electronic resource] / S. Kasiviswanathan, S. Gnanasekaran, M. Thangamuthu, R. Rakkiyannan // Journal of Sensor and Actuator Networks. - 2024. - Vol. 13, № 5. - P. 53.1

Надійшла до редакції 31.03.2026, розглянута на редколегії 15.04.2026

## **Modeling CNC Manufacturing Processes for Serial Production in Machine Building.**

The article examines information support systems for high-tech manufacturing, specifically focusing on meeting stringent customer quality requirements while managing cost and delivery constraints. The necessity of creating a unified computer information system for the enterprise is substantiated; this system enables a substantial reduction in the cycles of design and technological preparation of production, enhances the quality of developments, and ensures the continuity, consistency, and completeness of data at all stages of the product life cycle. The system's functional architecture comprises four interconnected subsystems. This study provides a detailed description of the modular subsystem architecture and its information interrelations. It specifically examines hierarchical decision-making procedures and the development of CNC machining process models (PM) based on analytical standards for equipment, workpieces, tools, and fixtures. Special emphasis is placed on the simulation of technical operations, digital visualization, and geometric control. This approach streamlines the migration from legacy paper drawings to integrated digital formats, utilizing advanced visualization and real-time access tools. This significantly enhances the operational efficiency, safety, and competitiveness of high-tech manufacturing.

**Keywords:** enterprise information system, technological preparation of production; analytical standard of a part; analytical portrait of a part; model of the part manufacturing process; mechanical machining; CAD/CAM systems; CNC equipment.

### **Відомості про авторів:**

**Лисоченко Ігор Миколайович** – аспірант кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Ел. пошта: i.m.lysochenko@khai.edu, телефон: +380 (67) 1202998, ORCID: 0000-0002-4407-0305.

**Бичков Ігор Валерійович** – д. т. н., професор кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Ел. пошта: i.bychkov@khai.edu, телефон: +380 (93) 95495625, ORCID: 0000-0002-4819-5826.

**Бичков Микола Ігорович** – к. т. н., старший викладач кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Ел. пошта: [m.bychkov@khai.edu](mailto:m.bychkov@khai.edu), телефон: +380 (63) 2835380, ORCID: 0009-0008-1776-9568

**Рябіков Сергій Миколайович** – аспірант кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна. Ел. пошта: [s.ryabikov1957@gmail.com](mailto:s.ryabikov1957@gmail.com), телефон: +380 (97) 8473306, ORCID: 0009-0007-9430-8354.

#### **About the authors:**

**Ihor LYSOCHENKO** – postgraduate student at the Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, Ukraine. Email: [i.lysochenko@khai.edu](mailto:i.lysochenko@khai.edu), phone: +380 (67) 1202998, ORCID: 0000-0002-4407-0305.

**Ihor BYCHKOV** – Doctor of Technical Science, Professor at the Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, Ukraine, Email: [i.bychkov@khai.edu](mailto:i.bychkov@khai.edu), phone: +380 (93) 95495625, ORCID: 0000-0002-4819-5826.

**Mykola BYCHKOV** – Ph.D., Senior Lecturer at the Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, Ukraine. Email: [m.bychkov@khai.edu](mailto:m.bychkov@khai.edu), phone: +380 (63) 2835380, ORCID: 0009-0008-1776-9568

**Serhiy RYABIKOV** – postgraduate student at the Department of technology of aircrafts manufacturing, National aerospace university «Kharkiv aviation institute», Kharkiv, Ukraine. Email: [s.ryabikov1957@gmail.com](mailto:s.ryabikov1957@gmail.com), phone: +380 (97) 8473306, ORCID: 0009-0007-9430-8354