

УДК 621.9.014

О.М. ШЕЛКОВИЙ<sup>1</sup>, В.А. ФАДЕЄВ<sup>2</sup>, Ю.Г. ГУЦАЛЕНКО<sup>1</sup>, Є.А. КОСТИГОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «ХПИ», Харків, Україна

<sup>2</sup>ДП «Харківський машинобудівний завод ім. Ф.Е. Дзержинського», Харків, Україна

<sup>3</sup>ВАТ «ХАРВЕРСТ», Харків, Україна

## ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПІДРОЗДІЛІВ АВІАЦІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Авіаційна промисловість є одним з напрямків світового промислового виробництва, що динамічно розвивається. Їй властиві такі якості, як мобільність, високі точність і продуктивність, широке використання передових технологій, висока наукоємність і, як наслідок, великі поточні і капітальні витрати. Тому при переході на випуск нових виробів дуже важливо правильно модернізувати технічну, технологічну і організаційну структури виробничого процесу. В статті показаний один з підходів до вирішення цієї задачі на основі імітаційного моделювання організаційно-технологічної структури ділянки механічної обробки деталі ГП 25.380 «Блок циліндрів» на державному підприємстві «Харківський машинобудівний завод імені Ф.Е. Дзержинського».

**авіаційна промисловість, структура, ефективність, оптимізація, технологія металообробки, імітаційне моделювання**

### Вступ

Сьогодні, важко уявити конструкторсько-технологічну підготовку виробництва без програмних засобів автоматизації. Повсюдне впровадження систем автоматизованого проектування дозволило по-новому поглянути на процес проектування і виготовлення виробів.

Самі наукоємні галузі промисловості стали активними користувачами і прихильниками комп'ютерних технологій. Можливість моделювання майбутньої зовнішності виробу, процесу виготовлення оснащення і відробітку технології переросла в потребу.

*Об'ємне моделювання.* Ідеологія систем об'ємного 3-D моделювання базується на об'ємній моделі об'єкта проектування.

В основі систем об'ємного 3-D моделювання лежать методи побудовиповерхонь на основі плоских і неплоских профілів. У загальному випадку профіль – об'єкт, що описується відрізками, дугами і кривими. Для конструктора профілі – це перетини, види, осьові лінії.

Об'ємне моделювання розвивалося по двох паралельних шляхах. Перший – поверхневе моделювання, другий – твердотільна.

*Підготовка виробництва.* На практиці об'ємні моделі рідко обробляються за один прохід. В першу чергу проводять чорнову обробку, яка по стратегії формування траєкторії руху інструменту схожа на плоску багаторівневу обробку, з тією лише різницею, що при розрахунках необхідно враховувати об'ємну модель. В результаті виходить ступінчаста поверхня, придатна для подальшої чистової обробки. Чистова обробка, як правило, також буває багато прохідною. Це пов'язано з тим, що для окремих ділянок моделі повинні застосовуватися різні стратегії обробки.

Застосування верстатів із ЧПК, що забезпечують автоматичне виконання обробки металів різанням, деталей будь-якої складної форми, при використанні автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСК ТП) дозволяє здійснити комплексну автоматизацію машинобудівного виробництва.

Найбільш складною проблемою, від рішення якої залежить ефективно використання верстатів із ЧПК, є швидка і якісна підготовка керуючих програм (КП). Зі збільшенням масштабів застосування верстатів з ЧПК, розширенням їхніх технологічних можливостей у напрямку багатоінструментальної об'ємної обробки і створенням на цій базі гнучких виробничих систем (ГВС). Підготовка КП стала неможливою без автоматизації цього процесу за допомогою ЕОМ.

Застосування верстатів із ЧПК дозволяє також забезпечити скорочення термінів підготовки виробництва при зміні продукції, що особливо важливо в умовах прискорення науково-технічного прогресу, для швидкого освоєння нових виробів.

Найважливішими задачами економічно-технічних процесів є вивчення методів досягнення максимальної продуктивності праці і найменшої собівартості шляхом встановлень оптимальних умов виробництва. При виборі варіантів технології процесів повинне бути віддана перевага такому варіанту, що забезпечує найбільший ріст продуктивності праці.

Основним завданням проектування організаційно-технологічної структури ГВС є формування сукупності технологічних процесів. Технологічний процес – це система, для якої характерні поняття структури й організації. При розробці ТП ураховують: геометричні характеристики деталей; класифікатор методів обробки й таблиці досягнення якісних характеристик обробки поверхонь, а також обмеження на можливі сполучення послідовностей переходів; можливі варіанти комплексів обробних пристроїв; особливості сполучення виконання (реалізації) безлічі різних ТП на обмеженому комплекті встаткування.

Для отримання підстав модернізації технологічного процесу треба визначити теоретичні значення якостей двох типів виробництва, що передбачає здійснення математичного та програмного моделювання цих виробництв. За допомогою математично-

го моделювання процесу обробки, можна визначити стан цієї системи на будь-якому етапі моделювання, що дозволяє вивести кілька показників якості технологічного процесу обробки – таких як коефіцієнт корисної дії (ККД), енергоспоживання, завантаження, та ін. Тому головним методом модернізації технології обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” є математичне моделювання структури і параметрів системи обробки.

Таким чином, у статі роботі розглянуті наступні питання:

- аналіз діючого виробництва деталі ГП 25.380 – „Блок циліндрів” на ДП ХМЗ „ФЕД” шляхом імітаційної моделювання системи обробки;
- розробка твердотільної моделі деталі і технологічного процесу обробки ГП 25.380 – „Блок циліндрів” для умов автоматизованого виробництва;
- модернізація діючого виробництва деталі ГП 25.380 – „Блок циліндрів” шляхом імітаційної моделювання його структури і параметрів;
- порівняльний аналіз існуючого і модернізованого виробництв, вибір кінцевої схеми обробки.

### 1. Формулювання проблеми

Деталь ГП 25.380 „Блок циліндрів” (рис. 1) використовується у приводі генератора літаків таких, як АН-140, МІГ-27, СУ-29, та інші, у якості насосу (режим нагнітання) або генератора (режим гальмування) [1].



Рис. 1. Деталь ГП 25.380 „Блок циліндрів”

Оцінка технологічності конструкції деталі є важливим етапом технологічної підготовки вироб-

ництва. Конструкція деталі є технологічною, якщо при її виготовленні й експлуатації витрати матеріалу, часу й засобів мінімальні. Оцінка технологічності проводиться якісно й кількісно з розрахунком показників технологічності за ДСТ 14.201 – 83 [5]. Якісна оцінка («добре», «погано») передує кількісній. У всіх випадках аналіз технологічності завершується розрахунком техніко-економічних показників. Деталь ГП 25.380 „Блок циліндрів” відноситься до класу деталей типу диск (діаметр = 61,15 мм більше довжини = 39 мм). Ця деталь є збіркою трьох деталей, які у комплектації одночасно обробляються на останніх стадіях обробки, як одне ціле. Блок циліндрів складається з: блоку циліндрів – 0,174 кг із сталі 7ХГ2ВМФ; дев’ять втулок – 0,0185 кг (кожна), матеріал – Бр.010С2НЗ; пластина – 0,018 кг, матеріал – Бр.010С2НЗ.

Найбільш вагомою та головною деталлю є сам блок, який виконує певну функцію у вузлі, а втулка та пластина виконують роль проміжного матеріалу між взаємно рухомими поверхнями деталей, тобто виконують роль підшипника ковзання, що дає змогу запобігти використанню роликових, або кулькових підшипників, та зменшити вагу агрегату і збільшити його ККД та моторесурс. Цей блок виготовлений із сталі 7ХГ2ВМФ ГОСТ 5950-73.

Заготівкою деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” є круг 65В ГОСТ2590-88, Ø65×6000. Деталь має переважно токарну обробку внутрішніх поверхонь, також має зубчастий вінець, що характеризує наявність зубообробної операції. На задній стінці блоку є дугові пази, які характеризують наявність фрезерної операції.

При визначенні ефективності використання верстатів зі ЧПК вирішуються дві задачі: 1) оптимальний вибір верстата із ЧПК для обробки заданої номенклатури деталей; 2) оптимальний вибір конструкцій деталей для завантаження заданого устаткування – верстатів із ЧПК. Встановлено, що коефіцієнт складності обробки деталі (С) [5] складає:

$$C = (0,02 \cdot 33) \cdot (1,6 |_{HH=229-331}) \cdot \left( \frac{41+62}{120} \right) \times \left( \frac{1-0,4}{1-1,6} \cdot 0,6 + 0,4 \right) \cdot 1 \cdot \left( \frac{4}{33} \right) \cdot 0,4 = 0,87.$$

Значення коефіцієнту складності обробки деталі 0,87 вказує на те, що деталь не відноситься до типу важкооброблюваних ( $C > 1,6$ ), або нетехнологічних ( $C < 0,1$ ) деталей для умов обробки у ГВС на верстатах із ЧПК. Тому можна зробити висновок: *деталь є повністю технологічною для обробки у ГВС, та відповідає правилу: чим більша складною є конструкція деталі – тим більш, вона технологічна для обробки на верстаті з ЧПК.*

Кожна складова ГП на будь-якому рівні декомпозиції реалізується, в загальному випадку, однієї й тією же процедурою адресації, що полягає у виборі (за принципом неостаточних рішень) уніфікованого рішення, уточненні складу й зв'язків, прийнятих раніше для відповідної складової ГП – аналога, і параметричному налаштуванню.

Тоді ціллю модернізації діючого виробництва деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” на ДП ХМЗ „ФЕД” є підвищення техніко-економічних показників діючого технологічного процесу в умовах неавтоматизованого дрібносерійного виробництва на основі автоматизації окремих технологічних операцій шляхом введення технологічного обладнання високого рівня із програмним керуванням (рис. 2).

## 2. Розробка імітаційної моделі системи обробки деталі ГП 25.380 – „Блок циліндрів” в умовах діючого виробництва

Вихідними даними для створення імітаційної моделі є: загальні види технологічних модулів; технологія обробки; налашки; керуючі програми робочих модулів; керуюча програма роботи складу. Підготовку вихідних даних, загальні види технологічних модулів, автоматизовано за допомогою наступних CAD/CAM/CAE/ERP – систем: КОМПАС 3D V9; RX SpoolLight; SolidWorks, T-FLEX, LCad, ТехноПро; SolidCAM, ProEdit, GPS.

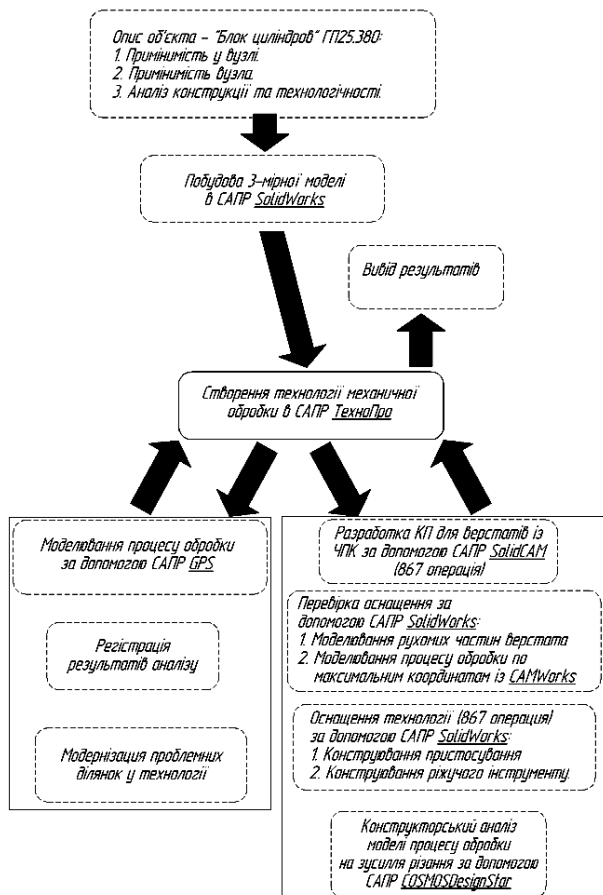


Рис. 2. Схема технологічного процесу

За допомогою RX SpoolLight розпізнається растрована графіка відсканованого зображення головного виду технологічного обладнання, та передається у форматі **dwg** до CAD КОМПАС 3D v.9. За допомогою КОМПАС – 3D V9 здійснені усі необхідні креслення – це установочні креслення технологічного обладнання та схематичне зображення людини, які використовуються у технологічному процесі обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів”. За допомогою цієї ж САПР збережено малюнки у форматі **igs**, що дає змогу зберегти векторну інформацію малюнків (координати початку та кінця ліній на площині XY).

Для системи імітаційного моделювання (СІМ) GPS кореговано файл зображення і приведено його до необхідного вигляду.

Підготовку вихідних даних наладки автоматизовано за допомогою пакетів програм: ТехноПро; MS Word. САПР ТП ТехноПро використовує АРІ–функції MS Word для виведення на печать технологічного процесу у необхідному вигляді – згідно

із ГОСТ 12485-72, тобто це маршрутна карта, операційна карта, та інші. В системних файлах САПР ТехноПро є заздалегідь підготовлені шаблони технологічних карт, до яких виводиться із баз даних КТП (конкретні технологічні процеси) та інформація, яка зберігається у змінних бази. Ці змінні розташовані у відповідних місцях технологічної карти. Розроблено шаблон “Наладка.dot”, який містить ті змінні, які потрібні для розробки наладки у СІМ GPS, а саме: назва операції; код операції; час виконання операції; технологічне обладнання. Після чого файл Наладка.nal перейменовується та надходить до папки [NAL] в директорії [Тест] системних файлів СІМ GPS.

Моделювання роботи ділянки обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” в середовищі СІМ GPS [3] полягає у наступному (рис. 3):

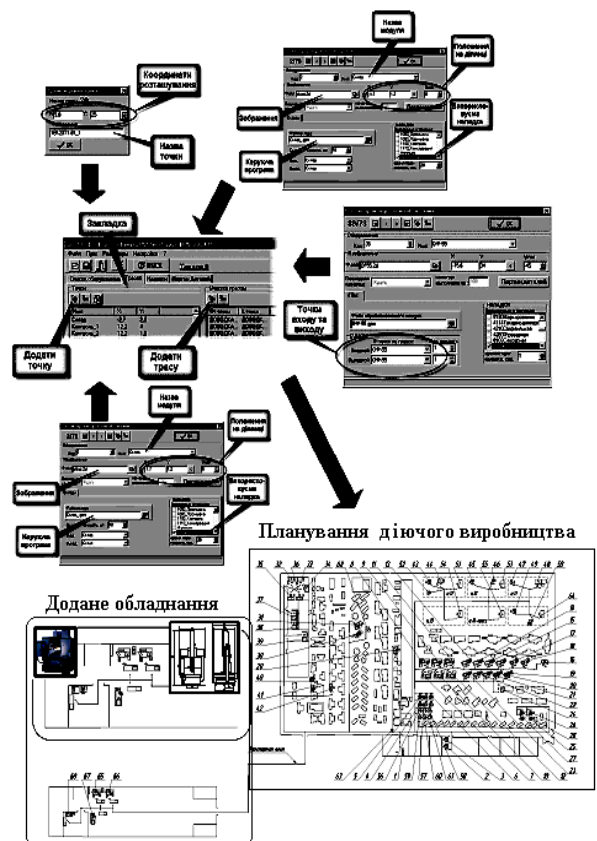


Рис. 3. Моделювання роботи ділянки обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів”

1. Розташування технологічного обладнання на ділянці та присвоєння йому відповідної наладки (рис. 3).

2. Встановлення маршруту руху транспортного засобу (людина з транспортером): реєстрація у CIM GPS транспортного засобу; встановлення точок входу та виходу у робочий модуль; встановлення ділянок траси.

3. У CIM GPS існує три типи технологічних модулів: виробничий модуль, модуль складської системи, транспортний модуль. Тому, з урахуванням цих типів технологічних модулів і потреб обробки, виконується розташування їх на плануванні.

Для автоматизації аналізу та проектування нового ТП застосовано поопераційне моделювання трьохмірної моделі за допомогою CAD SolidWorks, що дає змогу бачити модель на кожній операції, а кінцевий результат цього моделювання – це готова трьохмірна модель деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів”. Поопераційне моделювання полягає в тому, щоб виконувати 3-D моделювання процесу обробки згідно кожної операції, застосовуючи при цьому набір інструментів, які відтворюють формоутворюючі рухи при обробці деталі на верстаті (рис. 4).

Вихідні дані, які залишилось підготувати – це технологія виготовлення деталі. Загальний вигляд технології у CIM GPS діючого виробництва зображено на рис. 5.

Імітація системи обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” в умовах діючого виробництва дає змогу оцінити параметри якості технологічного процесу та його економічні показники [4, 7].

Параметри якості ТП передбачають наявність замкнутого кола циклу виробництва та поточність виробництва. До параметрів якості ТП відносять час на виробництво (час, який займає виготовлення деталі на кожній операції у сумі) та графік завантаження обладнання. До економічних показників відносять ККД виробництва, фінансові показники (собівартість деталі в цілому) та енергетичні затрати на виробництво, а також амортизація.

У CIM GPS здійснено процес моделювання роботи ділянки по обробці деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів”. Виходячи з графіку, зображеного на рис. 6 –

завантаження виробничої системи, можна процес обробки поділити на два етапи:

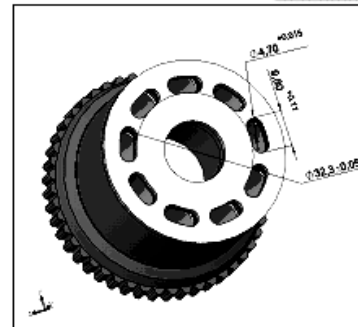


Рис. 4. Поопераційне моделювання

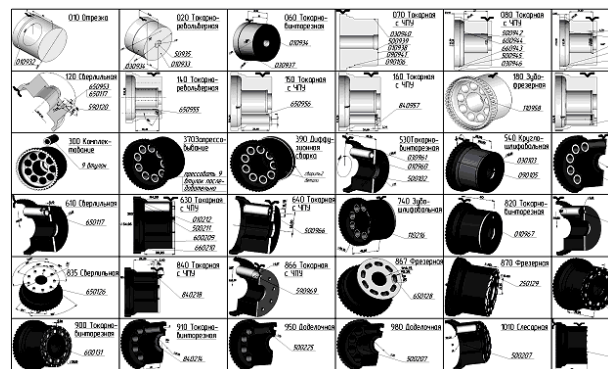


Рис. 5. Загальний вигляд технології у CIM GPS

1. Невстановлений процес – коли виконується розподіл завдань між технологічним обладнанням, цей етап характеризується підвищеним рівнем завантаженості – до 100%.

2. Встановлений процес – коли розподіл завдань відбувся і кожен модуль виробничої системи очікує своєї черги для виконання технологічної операції,

цей етап характеризується середньою завантаженістю виробничої системи, етап триває до кінця циклу обробки деталі.

Графік витрат енергії у виробничій системі (ВС) – є похідним із завантаження ВС. Тут можна виділити три характерних графіка використання енергії виробничими об'єктами у ВС, і графік використання енергії усією ВС в цілому. Цей графік є сумарним значенням усіх користувачів джерела енергії.

Графік використання потужності у виробничій системі, зображений на рис. 6, характеризує середньостатистичне використання потужностей технологічного обладнання. Виходячи з цього графіку можна зробити висновок: технологічне обладнання використовується не на всю потужність, яку воно може видавати. Про це свідчить і графік ККД виробничої системи, зображений на рис. 6.

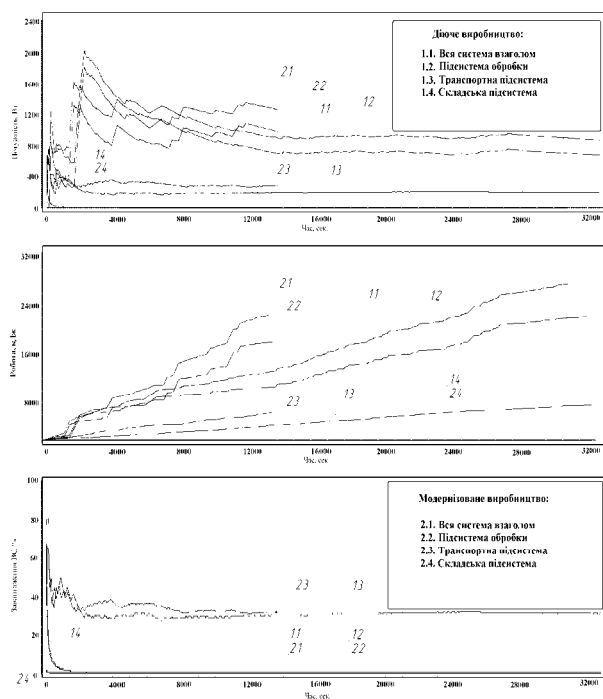


Рис. 6. Графіки використання потужності у виробничій системі

Виходячи з аналізу організаційно-технологічної структури системи обробки деталі запропоновано створення ГВС на базі верстатів із ЧПК, залишивши універсальне технологічне обладнання для чорнових операцій, що дає змогу підвищити техніко-економічні показники виробничої системи.

### 3. Розробка технологічного процесу обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів”

Згідно із завданням на проектування розробляється модернізований технологічний процес обробки деталі в умовах автоматизованого виробництва (в нашому випадку – деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів”) за базовим технологічним процесом з переводом деяких операцій з універсального технологічного обладнання на верстати більш високого рівня автоматизації:

1. Розробляється узагальнений маршрут обробки групи подібних деталей (УМО).

2. Формується конкретний ТП (КТП) за даними деталі, що обробляється.

3. Обробка деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” у ГВС пов'язана з введенням верстатів з ЧПК нового покоління, які більш мобільні у переналадці та дозволяють приєднуватись до загальної ЕОМ і обмінюватись інформацією з нею. Тому ці верстати можна об'єднати у мережу типу DNC, яка дозволяє на одній ЕОМ розробити керуючу програму для верстату з ЧПК та завантажити її на окремий верстат не зважаючи на те, що кожен різновид верстату має свій пост процесор (який, в загальному випадку, може бути несумісним з пост процесорами інших верстатів) [2].

Найбільш сучасною та розвинутою системою автоматизації підготовки керуючих програм для верстатів з ЧПК є система підготовки керування верстатами з ЧПК (САП) SolidCAM, яка інтегрована із САПР SolidWorks та використовує тривимірні моделі заготовки і деталі.

Це дозволяє скоротити час на підготовку і відпрацювання керуючої програми, адже у цій системі можна випробувати програму руху технологічних частин верстату та виявити ймовірні зіткнення цих частин.

Окрім виявлення зіткнень, вона дозволяє дослідити якість поверхневого слою деталі після обробки та відповідно рекомендувати режими різання (рис. 7).



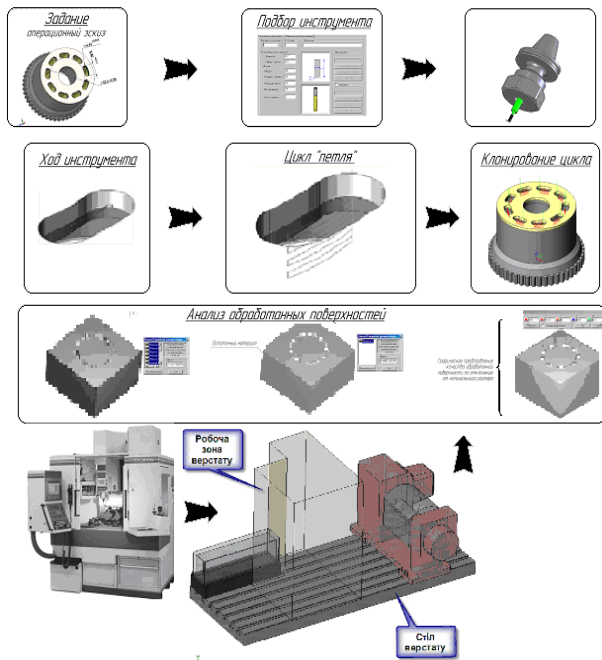


Рис. 7. Система підготовки керування верстатами з ЧПК (САП) SolidCAM

**4. Розробка імітаційної моделі ділянки ГВС для обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” та аналіз ефективності її функціонування**

Модернізована система обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” на базі ГВС відповідає наступним вимогам:

- базовими верстатами вибрано: 5-ти координатний фрезерний верстат з ЧПК мод. PICOMAX-60M; – 2 токарних верстата з ЧПК мод. WEILER; контрольно-вимірну машину мод. WENZEL.

- на верстатах PICOMAX-60M і WEILER виконують кінцеву точну обробку, а ряд універсальних верстатів залишені для чорнової обробки та підготовки технологічних баз;

- верстати для чистової обробки виділені в окрему ділянку (рис. 3), що дозволяє реалізувати автоматизацію виробництва в рамках ділянки, не порушуючи структури основного виробництва.

Модернізований ТП (рис. 8) і результати моделювання за ним обробки деталі ГП 25.380 „Блок циліндрів” (рис. 3, 6) дозволили отримати характеристики нової системи обробки та порівняти їхні значення із базовими (табл. 1).

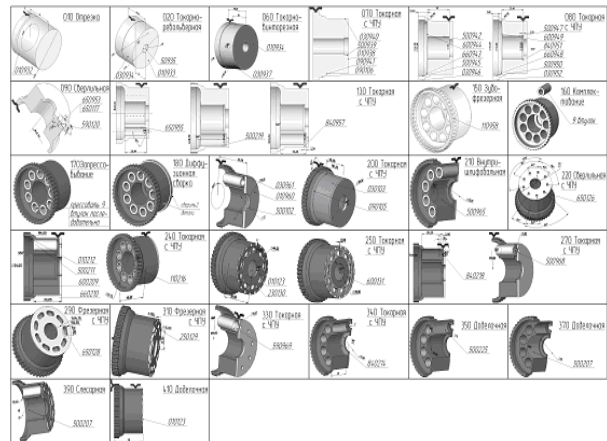


Рис. 8. Модернізований ТП

Таблиця 1

Характеристики системи обробки

№ п/п	Найменування параметра	Значення параметра	
		Базовий ТП	Модернізований ТП
1.	Кількість операцій, шт.	27	40
2.	Кількість переходів, шт.	179	133
3.	Частка основних переходів, %	48,3	67,7
4.	Частка контрольних операцій, %	14,8	27,6
5.	Частка високоточних переходів, %	10,3	11,2
6.	Частка операцій механічної обробки, %	86	70
7.	Кількість одиниць металорізального устаткування, шт.	19	26
8.	На переході: A <sub>мін</sub> , кДж A <sub>мах</sub> , кДж	981 2154	1100 2350
9.	На операції: A <sub>мін</sub> , кДж A <sub>мах</sub> , кДж	1125 2741	1120 3958
10.	В цілому по маршруту: A, кДж	27845	22145
<b>Характеристики виробничої системи</b>			
11.	На переході: W <sub>мін</sub> , Вт W <sub>мах</sub> , Вт	452 1587	947 2052
12.	На операції: W <sub>мін</sub> , Вт W <sub>мах</sub> , Вт	411 1641	871 1984
13.	В цілому по маршруту: W, Вт	911	1321
14.	На переході: T <sub>мін</sub> , с T <sub>мах</sub> , с	5 187	6 154
15.	На операції: T <sub>мін</sub> , с T <sub>мах</sub> , с	110 298	114 315
16.	В цілому по маршруту: T, с	32814	13895

Зміна структури технологічних операцій у бік їх укрупнення при остаточній обробці (збільшення кількості основних переходів на 40,3% і зменшення допоміжних переходів на 25,6%), застосування високопродуктивного багатоопераційного устаткування (середня потужність обробки збільшилася на 45%), збільшення кількості контрольних операцій на 86% (за рахунок їхньої автоматизації), скорочення транспортних маршрутів (за рахунок концентрації обробки на оброблювальних центрах) дозволили скоротити тривалість обробки виробу на 57,6% і зменшити кількість браку на 11,5%. При цьому витрати енергії скоротилися на 7%.

### Висновки

1. Розроблено методологію прогнозування розвитку авіаційного виробництва й, зокрема, переділу механічної обробки в ньому на основі аналізу зміни структурно-параметричних характеристик металообробного комплексу високоточних деталей з часом.

2. Проведення технологічного аналізу базується на порівнянні структурно-параметричних характеристик діючої системи механічної обробки й синтезованої на основі їхнього імітаційного моделювання.

3. Створення принципів гарантованої технології механічної обробки, характерної при виготовленні високоточних деталей, базується на технологічному прогнозуванні, метою якого є визначення на перспективу змін структурно-параметричних характеристик технологічних процесів і реалізуючих їхніх устаткувань і засобів оснащення, які формуються на основі аналізу структури й параметрів об'єкта обробки, а також адекватних змін у витратах на виробництво.

4. Розроблена методика технологічного прогнозування розвитку ГП ХМЗ «ФЭД» дозволила ефективно підійти до виробітку перспективного плану розвитку складноструктурного промислового підприємства, до складання щорічних бізнес-планів модернізації виробництва й комплектації сучасним

металорізальним устаткуванням, інструментом і вимірювальною технікою.

### Література

1. Технічні умови приводу генератора ГП 25, 1987 р. АКБ „Рубин”, Москва.

2. Шелковой А.Н. Практика модернизации компонок производственных систем на основе имитационного моделирования // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.-техн. сборник. – Х.: НТУ "ХПИ", 2002. – Вып. 62. – С. 197-204.

3. Шелковой А.Н., Гуцаленко Ю.Г., Рузметов А.Р. Реинжиниринг производственных систем методами имитационного моделирования // Инструмент и технологии. – С.-Пб., 2002. – № 9-10. – С. 4-7.

4. Shelkovoј A., Gucalenko Y., Krukova N. Simulation modeling of flexible industrial systems with hybrid transport systems // 29<sup>nd</sup> Scientific-Expert Conference with International Participation; Mechanical Engineering Faculty University of Nis: Savez Mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS) Belgrade, Vršjačka Banja, 19.-21.V 2004. – P. 463-469.

5. Сайт Авиатехно [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://WWW.aviatechno.com.ua>.

6. Павлов А. Проектирование групповых технологических процессов в системе ТехноПро // САПР и графика. – М., 2002. – № 6. – С. 48-50.

7. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения // Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.8. «Оптимизация технологических процессов в машиностроении». – Одесса: ОНПУ, 2005. – 509 с.

*Надійшла до редакції 27.05.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Л.А. Тимофеева, Українська державна академія залізничного транспорту, Харків.