

Досвід створення та впровадження інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва нових авіаційних двигунів

К.Б. Балушок¹

Received: 19 February 2023 / Revised 22 March 2023 / Accepted: 25 March 2023

Анотація. Одним із ключових етапів життєвого циклу виробу (ЖЦВ) при створенні та освоєнні нових авіаційних двигунів є технологічна підготовка виробництва (ТПВ). Для вирішення задач ТПВ застосовують CAD/CAM/CAE-системи, які забезпечують автоматизоване проектування, виробництво та інженерні розрахунки, PDM-системи управління даними про продукцію, ERP-системи планування ресурсів підприємства, об'єднані в PLM-системи інформаційної підтримки ЖЦВ. Стаття присвячена досвіду створення та впровадження АТ “Мотор Січ” інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва нових авіаційних двигунів. Представлена структурна схема впровадженої інтегрованої системи ТПВ, яка містить комплекс взаємозалежних підсистем. Наведено опис системи автоматизованого проектування технологічної документації, яка забезпечує діалогове проектування технологічних процесів. Описана підсистема автоматизованої підготовки програм для верстатів з ЧПК, яка призначена для розрахунку траєкторії ріжучого інструменту при обробці геометрично складних деталей авіаційних двигунів. Описана підсистема автоматизованого проектування засобів технологічного оснащення, яка відповідає вимогам сучасного інструментального виробництва. Зазначено, що у системі автоматизованого проектування технологічного оснащення найбільшого розвитку набули проектуючі підсистеми: ріжучого та зубообробного інструменту; верстатних пристроїв; контрольно-вимірювальних приладів; ливарної та штампової оснастки; контролю зуборізного інструменту за електронними еталонами. Зазначено, що автоматизовані підсистеми аналізу процесів дозволяють виконувати: аналіз процесів лиття металів; аналіз процесів штампування; аналіз процесів різання; аналіз процесів зубообробки. Застосування інтегрованої системи ТПВ дозволило скоротити терміни ТПВ у 1,2...1,5 рази та підвищити продуктивність проектно-конструкторських робіт у 3...3,5 рази.

Ключові слова: інтегрована система підготовки виробництва, деталі авіаційного двигуна, система автоматизованого проектування технологічної документації, підсистема автоматизованої підготовки програм для верстатів з ЧПК, підсистема автоматизованого проектування засобів технологічного оснащення.

Вступ

Сучасне авіадвигунестроєння є однією з найбільш наукомістких галузей машинобудування, основне завдання якого - створення авіаційних двигунів, які значно перевершують попереднє покоління за своїми основними показниками.

Одним із базових понять у сучасному наукомісткому машинобудуванні є поняття життєвого циклу виробу (ЖЦВ), яке, відповідно до прийнятої термінології, включає сукупність взаємопов'язаних процесів

послідовної зміни стану виробу, починаючи з попередніх досліджень ринку, економічних та науково-технічних досліджень, проектування, технологічної підготовки виробництва, виробництва, випробування, контролю, сертифікації, експлуатації, технічного обслуговування, відновлювального ремонту, зберігання та до його утилізації.

Характерною особливістю цього періоду у світовій економіці є перехід до інформаційного способу виробництва, коли всі етапи ЖЦВ перебувають у єдиному інформаційному середовищі та представлені в електронній формі із застосуванням інтегрованих технологій [1].

При цьому застосовують CAD/CAM/CAE-системи [2], які забезпечують автоматизоване проектування, виробництво, інженерні розрахунки, дослідження, ERP-системи планування ресурсів підприємства, PDM-

✉ К.Б. Балушок
ugt@motorsich.com

¹ АО “Мотор Січ”, Запоріжжя, Україна

системи управління даними про продукцію, об'єднані в PLM-системи інформаційної підтримки ЖЦВ.

Одним із ключових етапів ЖЦВ при створенні та освоєнні нових авіаційних двигунів є технологічна підготовка виробництва (ТПВ). Терміни, вартість та якість якої визначають не тільки собівартість виготовлення, але й такі параметри виробу, як міцність, ресурс, живучість та безпека.

Мета

Узагальнити наявний в АТ “Мотор Січ” досвід створення та впровадження інтегрованої системи ТПВ, що є складовою при комплексному підході до науково-технічної підготовки виробництва [3] та забезпечує скорочення термінів, витрат та забезпечує підвищення параметрів якості деталей нових авіаційних двигунів.

Методика реалізації

Основою методики реалізації є створення комплексу засобів автоматизації ТПВ у вигляді інтегрованих видів забезпечення, основними з яких є [4]:

- Організаційного у вигляді системи стандартів підприємства, які встановлюють організаційну структуру, права та обов'язки персоналу.
- Методичного у вигляді інструкцій як технологічних, так і системи якості, що описують технологію функціонування системи.
- Технічного, як сукупності технічних засобів.
- Програмного, як сукупність програмних засобів.

– Інформаційного, як сукупності форм документів, класифікаторів, нормативної бази та рішень щодо об'ємів, розміщенню та формам існування інформації у системі.

Результати

Структурна схема впровадженої інтегрованої системи ТПВ [5] містить комплекс взаємозалежних підсистем, наведений на рис. 1.

Централізована система управління конструкторської та технологічної документації підготовки виробництва: система забезпечує структуроване зберігання та взаємну відповідність інформації та документації ТПВ, виконання вимог безпеки та збереження, а також є джерелом даних для системи управління підприємства [5].

Система автоматизованого проектування технологічної документації (САПР ТД): компонент включає комплекс підсистем, призначених для забезпечення автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення деталей авіаційних двигунів (рис. 2).

За основу САПР ТД прийнято комплекс засобів системи TECHCARD (рис. 3).

Технологічна документація проектується в діалоговому режимі з використанням баз даних та знань з технологічних переходів, режимів різання, інструменту, бланків та ін. (рис. 4).

Автоматизоване проектування технологічних процесів і генерування комплектів технологічних документів дозволило скоротити час їх створення у 1,3...1,5 рази.

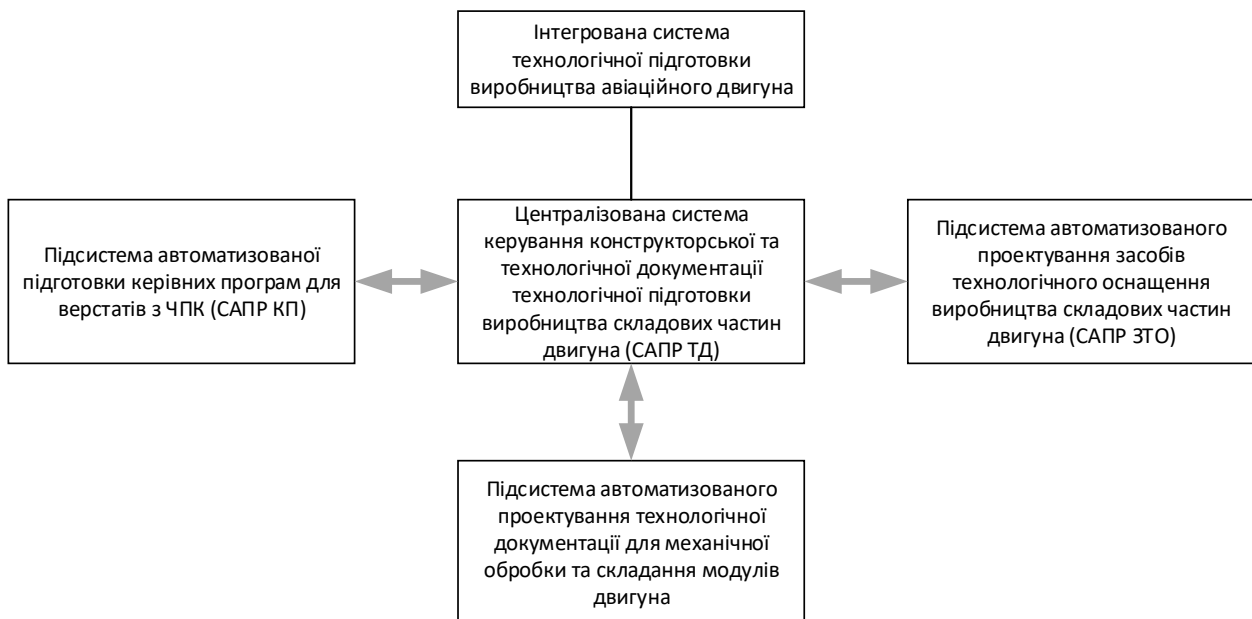


Рис. 1. Структурна схема інтегрованої системи ТПВ авіаційних двигунів

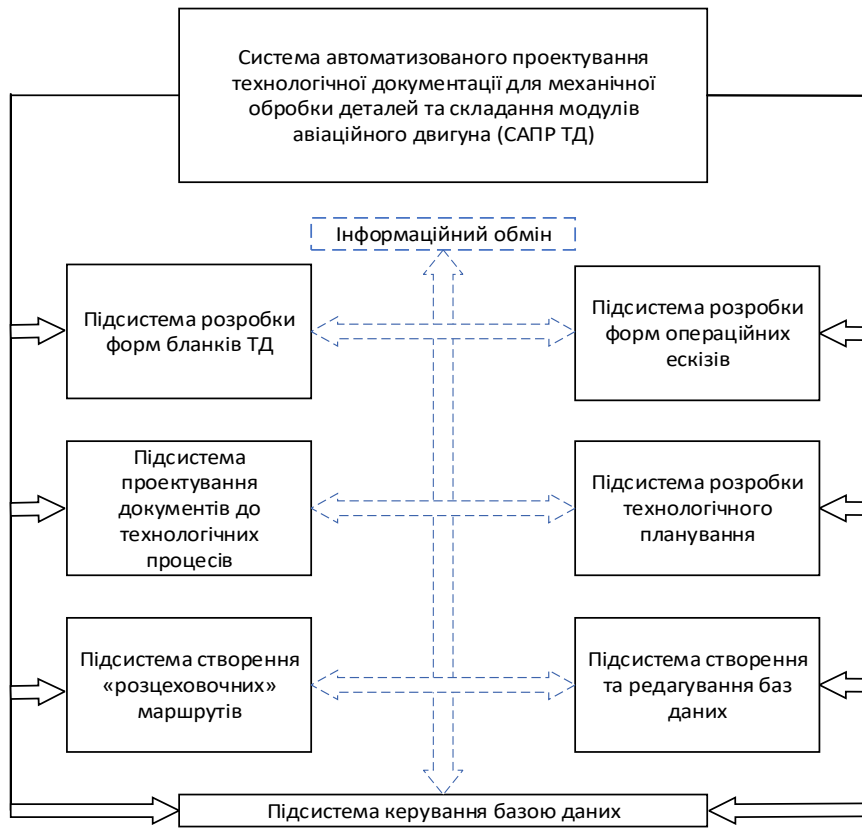


Рис. 2. Структура системи САПР ТД

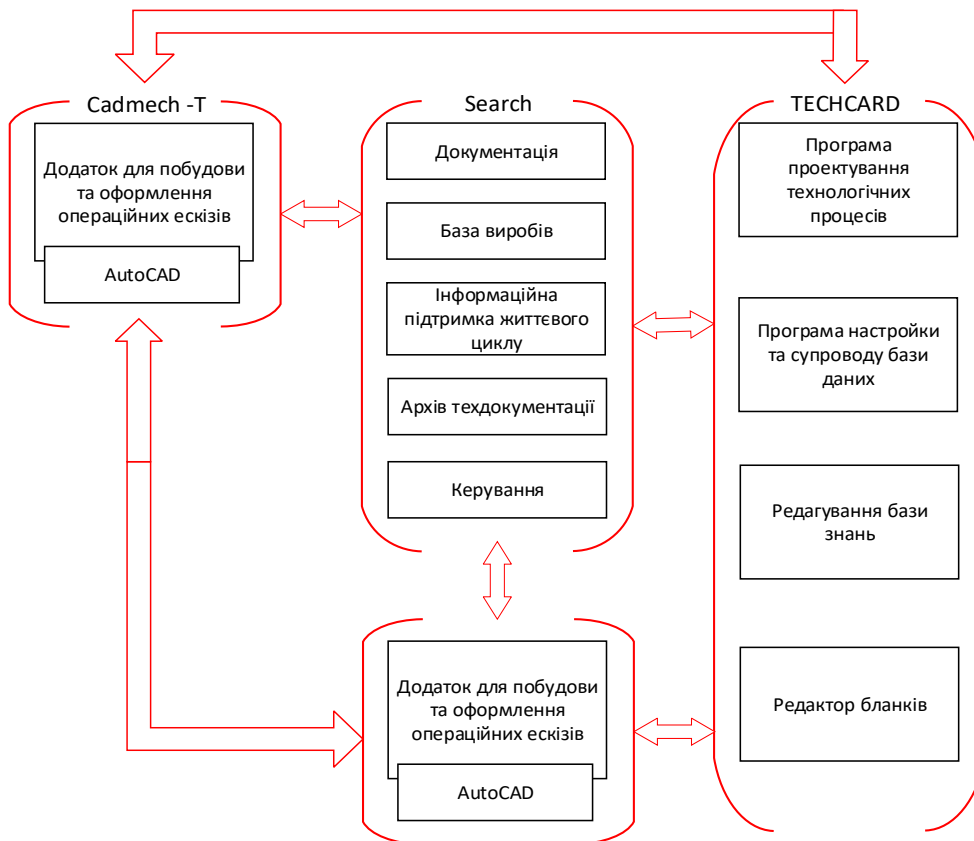


Рис. 3. Структура комплексу засобів автоматизації технологічної підготовки виробництва TECHCARD

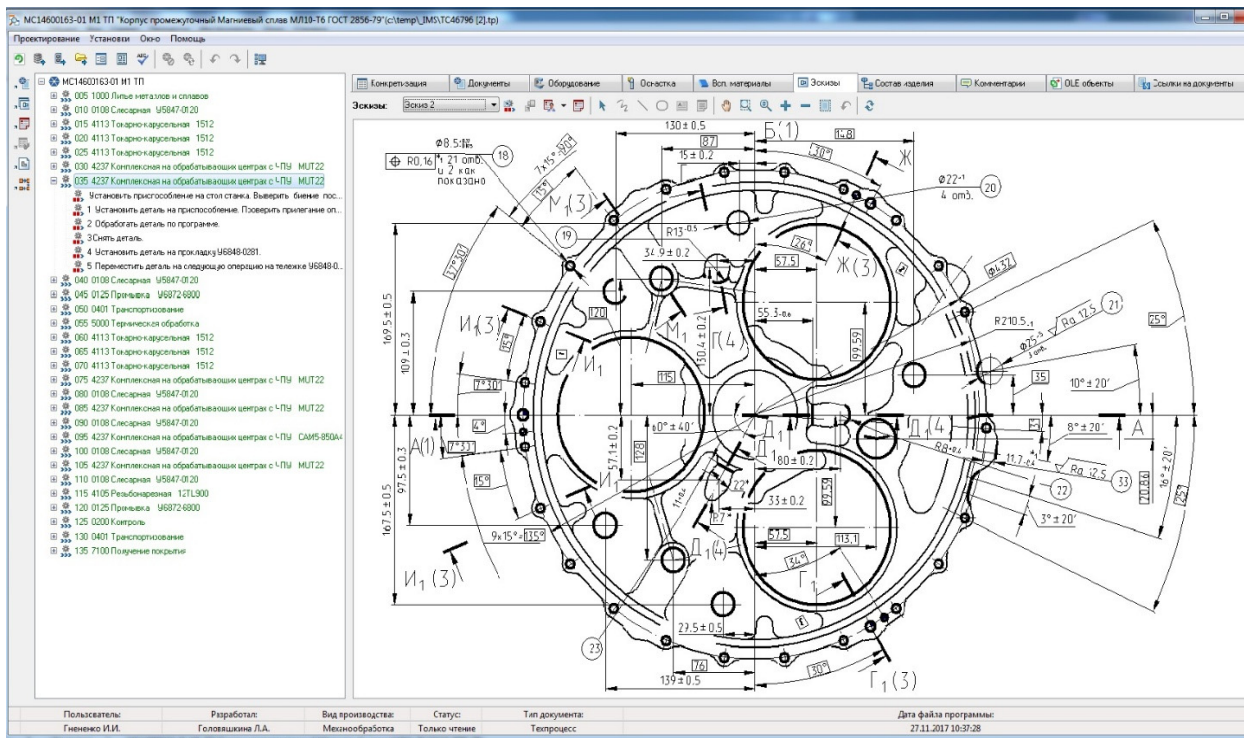


Рис. 4. Проектування ТП в Techcard

Підсистема автоматизованої підготовки програм для верстатів з ЧПК: підсистема призначена для розрахунку траєкторії ріжучого інструменту при обробці геометрично складних деталей авіаційних двигунів. Підсистема забезпечує обладнання з ЧПК керуючими програмами, які визначають точність виготовлення деталей та оптимальну динаміку роботи верстатів з ЧПК, що впливає на параметри якості поверхневого шару поверхонь, що обробляються. Керуючі програми, розроблені в підсистемах, після верифікації зберігаються в єдиній DNC базі підприємства. За допомогою спеціалізованого ПЗ необхідна КП, яка має унікальний номер, передається на верстат з ЧПК. Структуру підсистем наведено на рис. 5.

Підсистеми автоматизованої розробки керуючих програм знайшли застосування для 3-х та 5-ти координатних обробок на верстатах з ЧПК.

Вихідною розробки керуючих програм є електронна модель деталі (рис. 6).

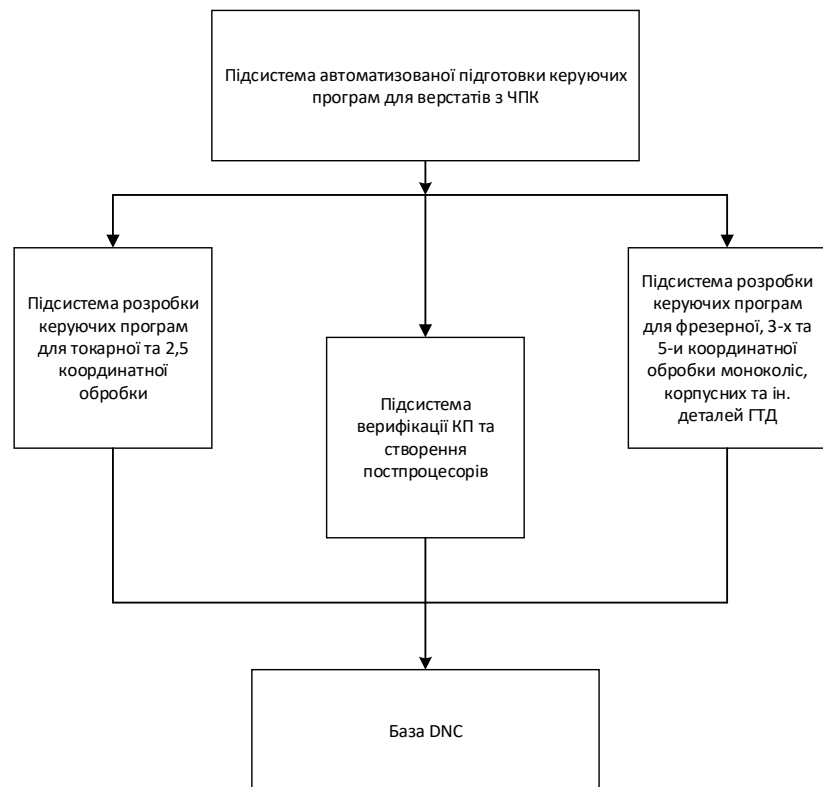


Рис. 5. Структура підсистеми автоматизованої підготовки керівних програм для верстатів з ЧПК

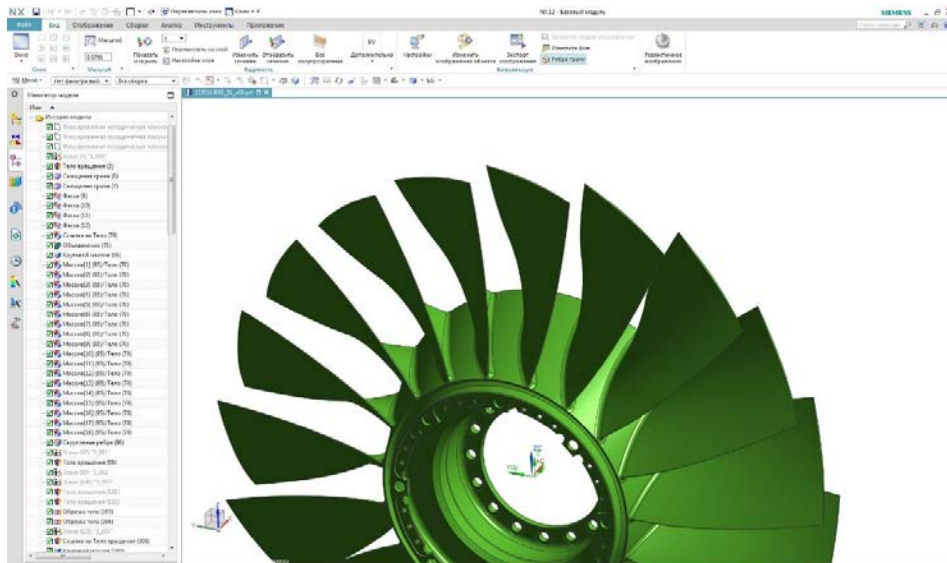


Рис. 6. Електронна геометрична модель BLISK

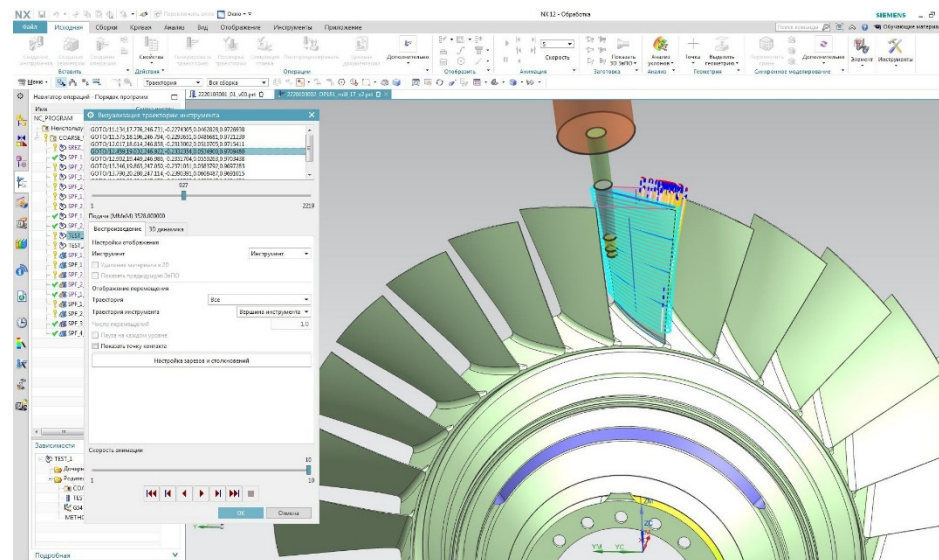


Рис. 7. Розрахована траєкторія інструменту

Як базове програмне забезпечення для 5-ти координатної високошвидкісної обробки моноколів використовується модуль Siemens NX (рис. 7), який надає такі методи управління вектором інструменту: масив векторів; сплайн; крапка; “закон” (абсолют); “закон” (поверхня – UV); “Закон” (поверхня-крива).

Для кожного із зазначених методів вектор попередньо розраховують для кожної кривої, що обмежує проходи, а вектори проміжних проходів обчислюють за лінійним законом.

Підсистема автоматизованого проектування засобів технологічного оснащення: система відповідає вимогам сучасного інструментального виробництва, основними з яких є:

- повний електронний опис геометрії та топології деталей;

- відповідність форматів подання даних;
- інтеграція із суміжними системами у форматі концепції безперервної інформаційної підтримки ЖЦВ.

У системі автоматизованого проектування засобів технологічного оснащення (САПР ЗТО) найбільшого розвитку набули проектуючі автоматизовані підсистеми:

- ріжучого та зубообробного інструменту;
- верстатних пристроїв; включно з універсально-збірними пристроями [6].
- контрольно-вимірювальних приладів;
- ливарної та штампової оснастки;
- контролю зуборізного інструменту за електронними стандартами.

Структурна схема САПР ЗТО представлена на рис. 8.

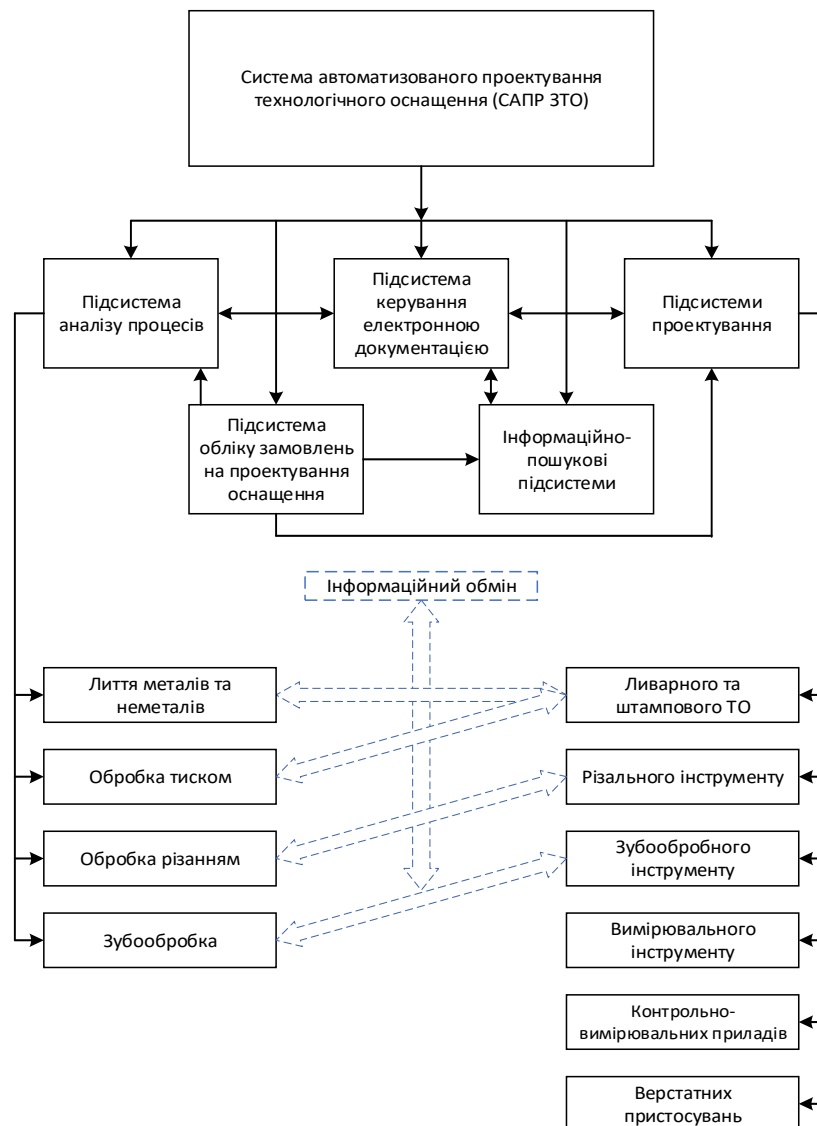


Рис. 8. Структурна схема САПР ЗТО

Однією з найбільш складних підсистем є підсистема проектування ливарного оснащення, основою якого є застосування методу аналітичних еталонів у поєднанні з технологіями швидкого прототипування.

Аналітичний еталон (АЕ) являє собою об'ємну математичну модель деталі, побудовану мовою аналітичної геометрії і несе повну інформацію про геометрію цієї деталі. Суть методу аналітичних еталонів полягає у концентрації всієї інформації про деталі у її аналітичному еталоні. При цьому креслення, створене по АЕ, є лише документом, який доповнює електронне визначення деталі.

При застосуванні цього способу необхідна наявність АЕ деталей прес-форми, потім вони перетворюються в АЕ формочок, які в STL-форматі передаються в систему швидкого прототипування.

Перевагою цього способу в порівнянні з заливкою майстер - моделі є можливість одночасного отримання всіх деталей прес-форми та автоматичне формування поверхонь роз'єму та одноразового зіткнення матеріалу з епоксидною смолою.

Існування взаємопов'язаних аналітичних еталонів виливків лопаток і форм для заливання металополімерної композиції дозволяє організувати замкнений комп'ютеризований цикл управління точності отримання виливків лопаток турбін при литті по виплавлюваних моделях (рис. 9).

Відхилення поверхонь виливка лопатки (рис. 10, рис. 11), виготовленої за існуючою технологією лиття по виплавлюваних моделей, також можуть бути визначені і досліджені методом контролю по АЕ на контрольно вимірювальній машині (КВМ). При цьому вони можуть бути використані для корекції АЕ і, при необхідності, доопрацювання модельної прес-форм.

На рис. 12 представлені електронні геометричні моделі модельної та стрижневої прес-форми. На рис. 13 – електронні еталони лопаткових штампів.

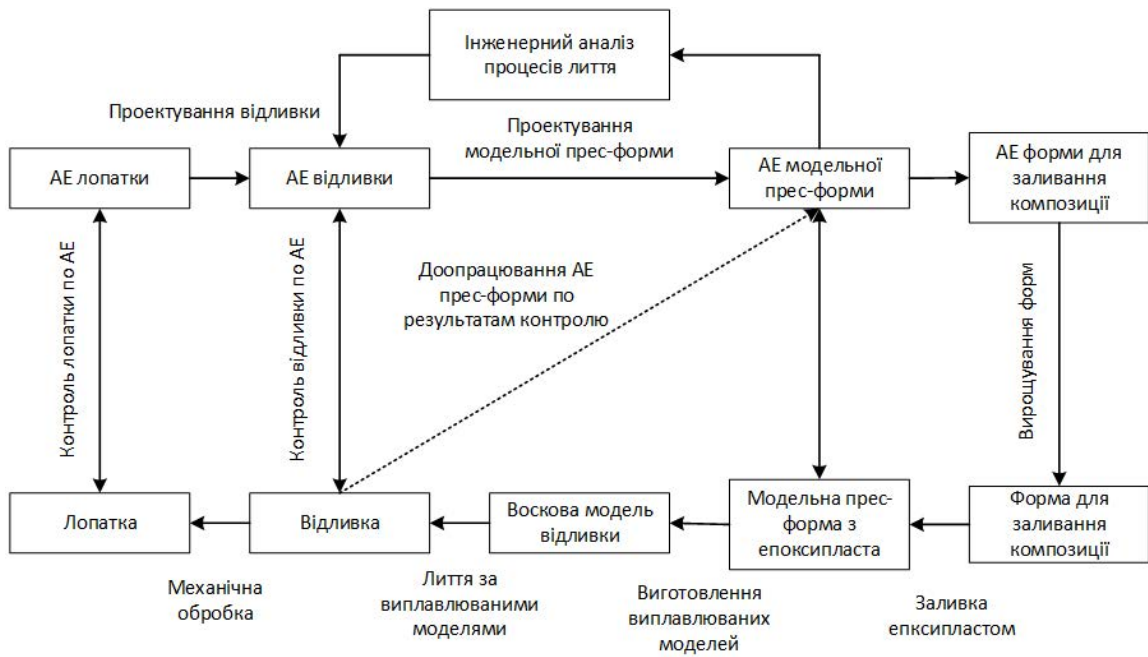


Рис. 9. Замкнутий комп'ютеризований цикл керування точністю виливків лопаток турбін

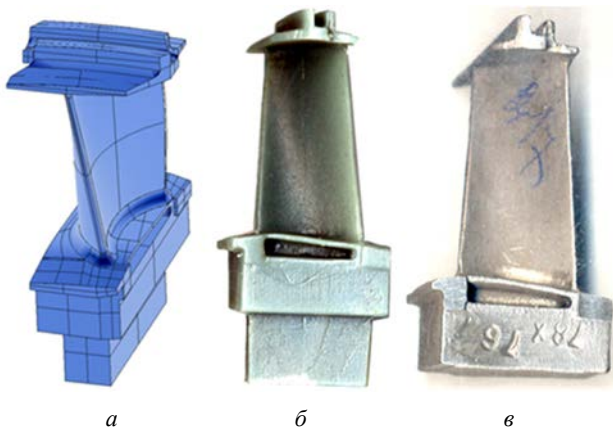


Рис. 10. Зображення аналітичного еталона (а), воскової моделі (б) та виливки турбінної лопатки (в)

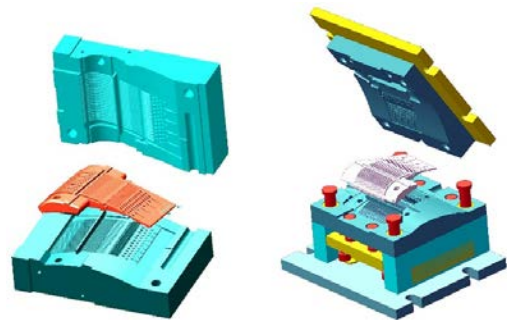
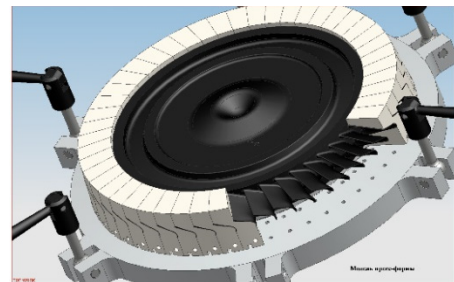


Рис. 12. Електронні геометричні моделі модельної та стрижневої прес-форми

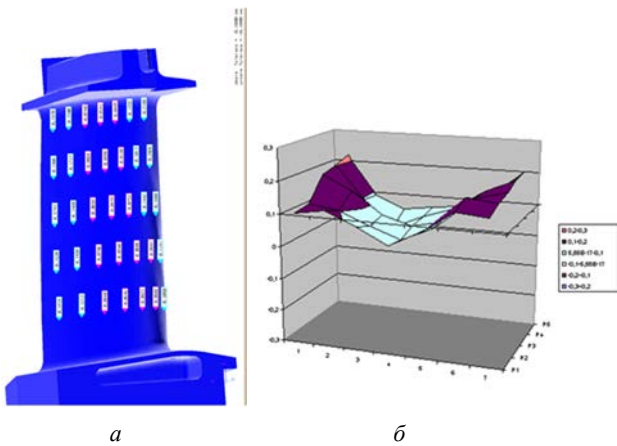


Рис. 11. Контроль виливки лопатки на КВМ: відхилення поверхні спинки від АЕ

Автоматизовані підсистеми аналізу процесів, що застосовуються в даний час при ТПВ, дозволяють виробляти:

- аналіз процесів лиття металів;
- аналіз процесів штампування;
- аналіз процесів різання;
- аналіз процесів зубообробки.

На рис. 14 представлено підсистему аналізу процесів лиття металів MAGMA Soft, а на рис. 15 – підсистема процесів штампування Super Forge.

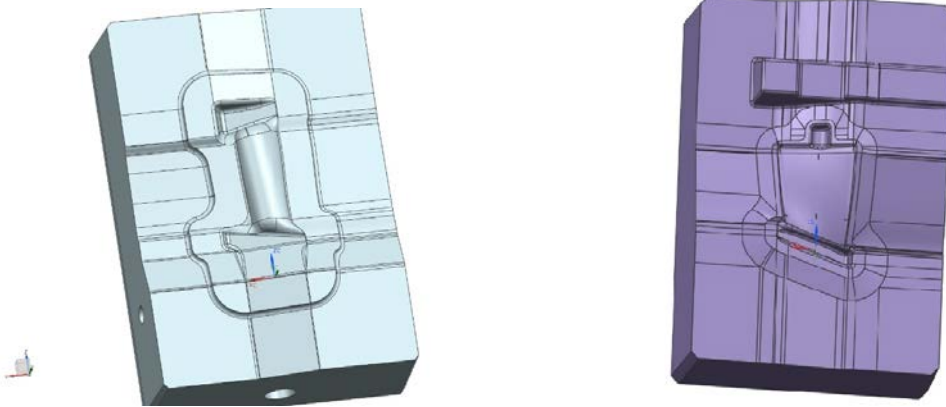


Рис. 13. Електронні еталони лопаткових штамів

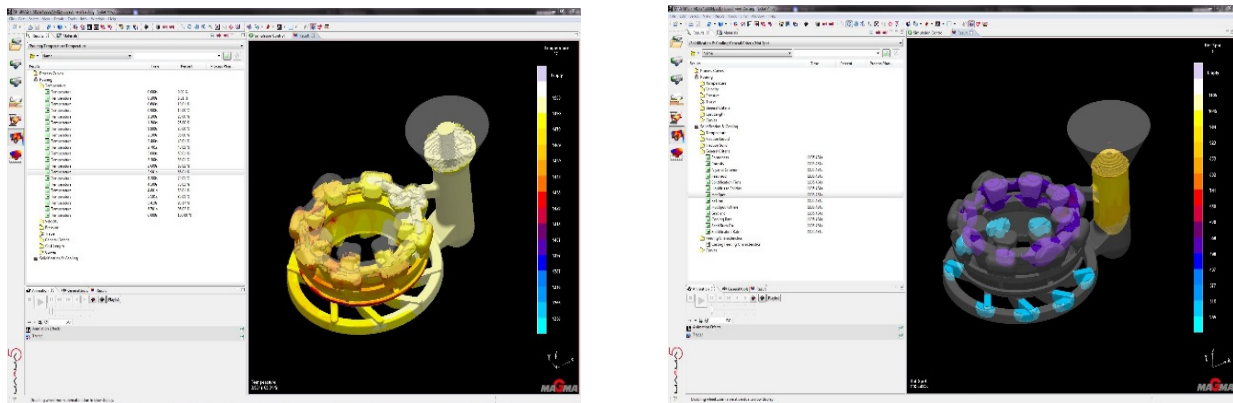


Рис. 14. Підсистема аналізу процесів лиття металів

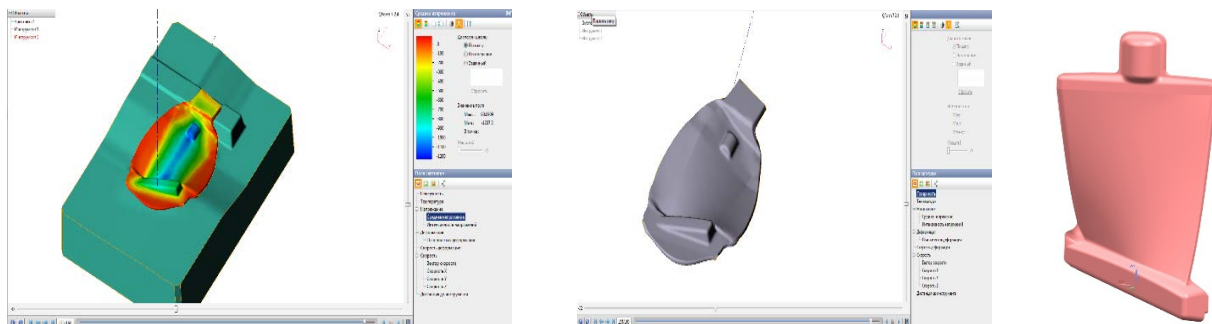


Рис. 15. Підсистема аналізу процесів штампування

Наступною складовою САПР ЗТО є комплексна автоматизована система “Зубообробка”, яка у структурі ТПВ здійснює такі функції (рис. 16):

- проектування та підбір зубонарізного інструменту;
- аналіз придатності інструменту для обробки зубчастих вінців деталей ГТД;
- аналіз точності зубонарізного інструмента;

- аналіз впливу точності інструменту на точність зубчастого вінця деталі;
- створення електронних еталонів для контролю точності зубонарізного інструменту;
- створення бази даних деталей ВМД із зубчастими вінцями;
- створення бази даних зубонарізного інструменту, пов’язаної з базою даних деталей ГТД.

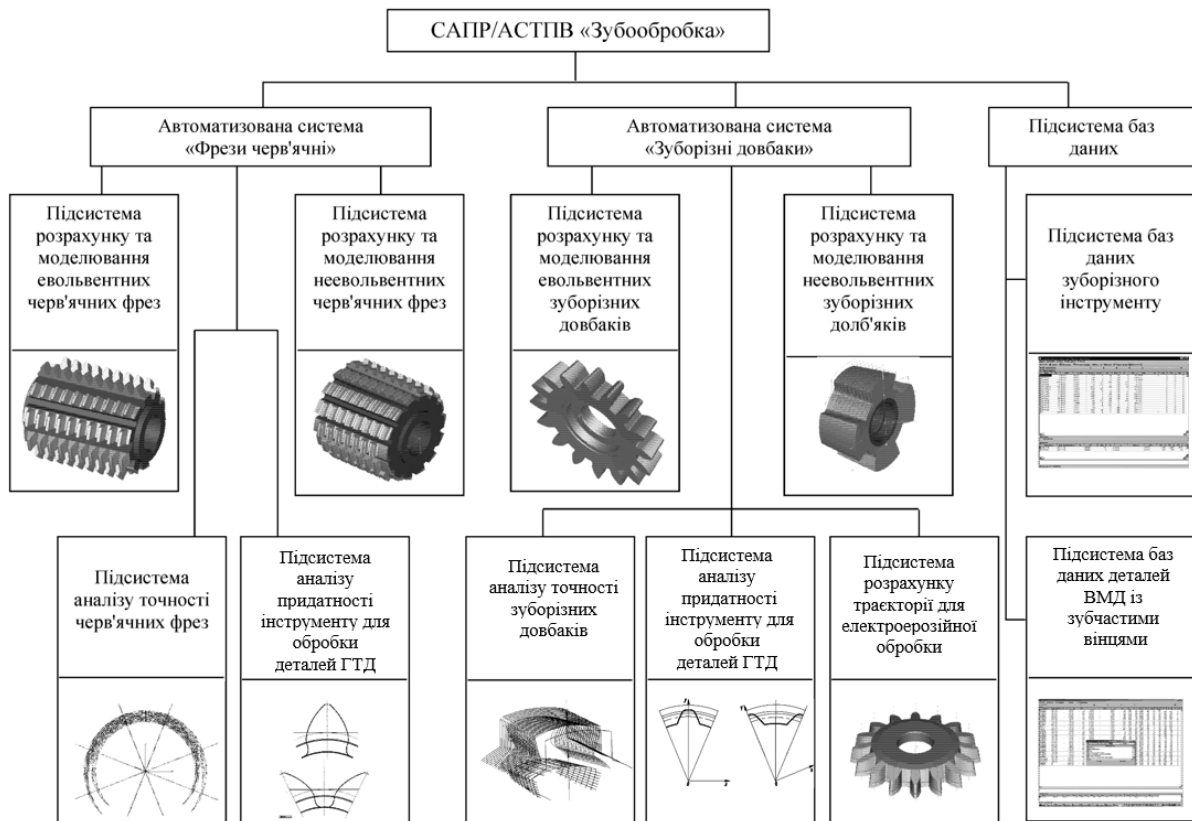


Рис. 16. Структура САПР «Зубообробка»

Очевидно, що інформаційною основою системи забезпечення точності має бути система взаємопов'язаних математичних та комп'ютерних моделей зубчастих вінців деталей, процесів зубообробки та зуборізного інструменту, що застосовується. На основі цієї системи реалізована схема вирішення завдань підготовки виробництва та забезпечення точності деталей із зубчастими вінцями (рис. 17).

Геометрія зубчастого вінця деталі, задана у вигляді комп'ютерної моделі або креслення із зазначенням геометричних параметрів, є підставою для опрацювання на технологічність та виконання проектного розрахунку інструменту. Проектний розрахунок інструменту виконується з використанням моделей обробки та завершується отриманням його АЕ.

Забезпечення заданої геометрії зубчастого вінця деталі неможливе без аналізу придатності інструменту, що виконується на основі моделей обробки. Результатом аналізу придатності інструменту є комп'ютерні моделі профілів зубчастих вінців деталей, які згодом використовуються як АЕ для контролю точності профілю зуба деталі.

Аналітичний еталон інструменту, отриманий при проектному розрахунку, використовується для аналізу точності інструменту та визначення похибок методів проектування та виготовлення, оскільки міс-

тить опис всіх формотворчих поверхонь, необхідних для точного відтворення заданого профілю зубчастого вінця деталі.

Розроблені методики чисельної оцінки похибок проектування та виготовлення інструменту дозволяють (рис. 18):

- для черв'ячних фрез - визначати похибки, спричинені заміною основного черв'яка та радіальним затилюванням зуба інструменту;
- для неевольвентних зуборізних довкаків - визначати похибки заміни формоутворювальних поверхонь зубів інструменту.

Розроблена методика оцінки похибок неевольвентного зуборізного довкака дозволяє обґрунтовано вибрати параметри геометрії поверхонь зубів інструменту з урахуванням як технології його виготовлення, так і зношування, що забезпечує високу точність профілю зубчастих вінців деталей ГТД.

Метод аналітичних еталонів застосовується не тільки для аналізу та оптимізації геометрії формоутворювальних поверхонь зубообробного інструменту, але й при проектуванні та виготовленні інших видів технологічного оснащення, що застосовується в зубообробці.

Зокрема, завдання атестації зубчастих еталонів прямозубих конічних коліс може бути успішно вирішена методом поелементного контролю точності на

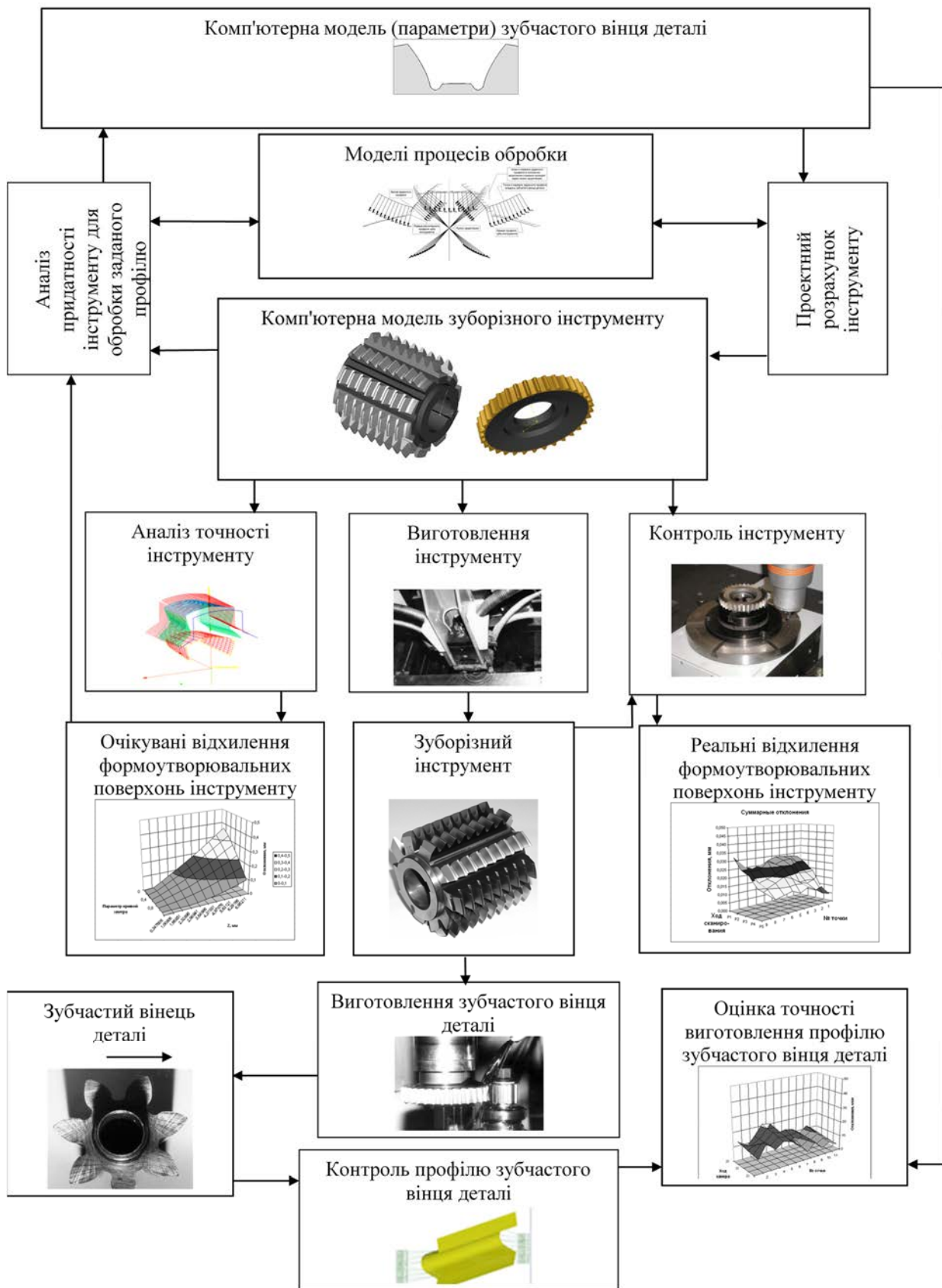


Рис. 17. Схема вирішення завдань підготовки виробництва та забезпечення точності циліндричних зубчастих вінців

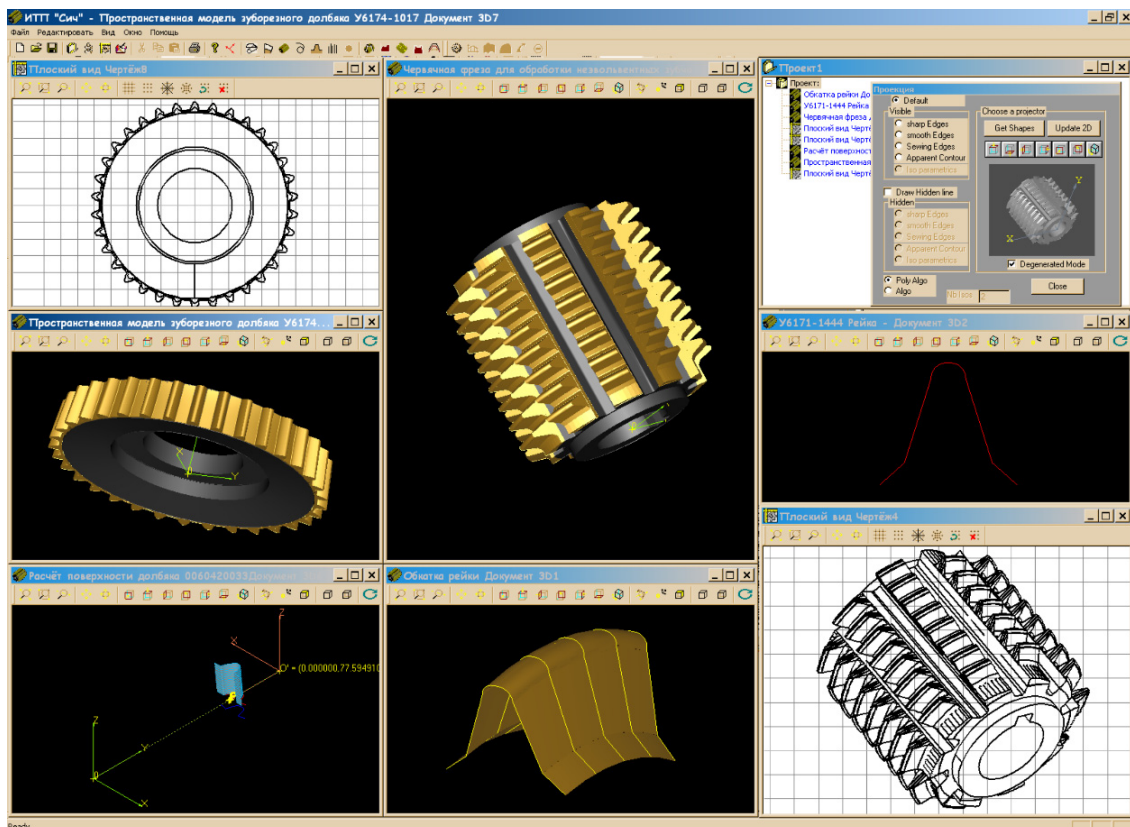


Рис. 18. САПР Зубообработка

універсальній координатно-вимірювальній машині по аналітичному еталону.

Використання розроблених положень комп'ютерного забезпечення точності циліндричних зубчастих вінців дозволило:

- підвищити точність та стабільність геометричних параметрів зубчастих вінців деталей ГТД;
- скоротити терміни ТПВ деталей ГТД із зубчастими вінцями в 1,2–1,5 рази;
- на 77% зменшити номенклатуру інструменту, що знову проектується та виготовляється.

Застосування проєктованих автоматизованих підсистем дозволило скоротити терміни ТПВ у 1,2...1,5 рази та підвищити продуктивність проєктно-конструкторських робіт у 3...3,5 рази.

Конічні зубчасті колеса сучасних ГТД, що становлять 7–8% від загальної кількості деталей із зубчастими вінцями, у більшості випадків виготовляються з круговим зубом, що дозволяє підвищити їхню несучу здатність та забезпечити більшу плавність ходу. Ці властивості забезпечуються лише рахунок високої якості виготовлення. Найбільш прогресивним напрямком забезпечення якості конічних зубчастих коліс є [7, 8]: “Керовані комп'ютером: розробка, виготовлення, перевірка конічних і гіпоїдних зубчастих передач з прямим зворотним зв'язком даних якості з виробничим процесом”. В даний час визнаним світовим лідером з випуску обладнання для виготовлення та контролю зуб-

частих коліс з круговим зубом, а також програмного забезпечення систем підготовки виробництва та контролю зубчастих вінців є корпорація Gleason. Цією фірмою розроблені та представлені на ринок системи розрахунку ріжучого інструменту, моделювання процесу обробки, розрахунку параметрів зуба деталі, розрахунку налагодок та коригувальних величин для будь-якого зубообробного верстата фірми [9]. Розроблений компанією Gleason комплексний підхід до вирішення завдань підготовки виробництва, виготовлення та контролю конічних зубчастих коліс із круговим зубом дозволив вирішити більшість питань, пов'язаних із забезпеченням їх точності.

Висновки

В даний час перспективним напрямком розвитку системи є інтеграція в рамках концепції безперервної інформаційної підтримки ЖЦВ та перехід до реалізації концепції цифрового двійника двигуна [10].

Сучасне виробництво авіаційних двигунів є різносерійним та багатомоделювальним. Продукція характеризується високою конструктивною складністю, великою кількістю оригінальних та унікальних конструктивних рішень, реалізація яких і супроводжується високими вимогами до якості і ресурсу виробів.

Технологічна підготовка виробництва авіаційних двигунів визначається підвищеною складністю проєктованих технологічних процесів та засобів технологічного оснащення.

Перехід до виробництва нових поколінь авіаційних двигунів диктує необхідність запровадження нових високоефективних технологічних процесів та методів проєктування. Ускладнення конструкції виробів визначає зростання витрат та термінів технологічної підготовки виробництва.

У статті узагальнено більш ніж двадцятирічний досвід створення інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва АТ “Мотор Січ”. Створена як компонент єдиного інформаційного середовища підприємства, система є комп’ютеризованою основою впровадження ресурсозберігаючих технологій виготовлення деталей авіаційних двигунів, забезпечення їх несучої здатності і довговічності.

References

- [1] A. Peredriy, “Integration of the scientific and technical preparation of production in the global information space”, *Bulletin of the National technical “KhPI” University: coll. of science Ave. Economic Sciences*, No. 28 (1200), pp. 18–21, 2016.
- [2] O. Babicheva and S. Yesaulov, *Automated design of electromechanical devices, components of digital control systems and diagnostic complexes*, Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 2018.
- [3] M. Razinkova, “Comprehensive approach to the scientific and technical training engineering companies”, *Eastern Europe: Economy, Business and Management*, No. 3, pp. 179–182, 2017.
- [4] V.V. Medvedev, *Automated systems of production organization and management: a course of lectures* [Electronic resource]: study. Visual Aid for students, Specialty 131 “Applied Mechanics”, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021.
- [5] A.G. Bratukhin Ed., *Information technologies in science-intensive mechanical engineering. Computer support of industrial business*, Kyiv: Technika, 2001.
- [6] I.I. Yurchyshyn, Y.M. Lytvyniak and O.P. Khavrak, “Increasing the efficiency of machine-building production by comprehensive implementation of modular technological equipment design systems”, *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University, Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument engineering*, No. 772, pp. 172–176, 2013.
- [7] *Programs for measuring G-AGE and G-RAM bevel wheels*. Coordinate measuring machines operating in CNC mode. Maternal support. Opton Feintechnik GmbH.D-7082 Oberkochen.
- [8] T. Krenzen, *Computer aided corrective machine setting for manufacturing bevel and hypoid gear sets*, AGMA, 1984, 30 p.
- [9] *Gleason Works*, Understanding tooth contact analysis. Rochester, NY 14692, Publication No SD3139, 1981.
- [10] How digital Twin technology can enhance-aviation. Available: <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/discover/2019/how-digital-twin-technology-can-enhance-aviation.aspx>

Experience of designing and implementing integrated system of technological preparation of production for manufacturing new aircraft engines

Balushok Kostyantyn

Motor Sich JSC, Zaporizhzhia, Ukraine

Abstract. *The technological preparation of production (TPV) is one of the key stages of the product life cycle (LPL) when designing and developing new aircraft engines. The TPV system foresees the use of the following instruments: CAD/CAM/CAE systems to ensure the implementation of the following operations: automated design, production and engineering calculations; Product Data Management systems (PDM) to ensure product data management; Enterprise resource planning (ERP) systems for the corporate resource planning. Note that the instruments above are combined into PLM-systems to provide information support for the TPV system. The paper reviews the experience of designing and implementing the integrated TPV system at Motor Sich JSC for the purpose of manufacturing new aircraft engines. The author presents a structural diagram of the implemented integrated system containing a complex of interdependent subsystems along with a description of the system of automated design of process documents, which provides for the on-line design of production processes. The paper gives a description of subsystem of automated preparation of programs for CNC machine tools, which is designed to calculate the trajectory of the cutting tool when machining geometrically complex parts of aircraft engines. The paper specifies the subsystem of automated design of technological equipment, which is in compliance with requirements for modern tool production. The author underlines that the system of automated design of production equipment saw the following design subsystems reaching the highest level of development: subsystems for designing cutting and gear machining tools; subsystems for designing machine tools; subsystems for designing the monitoring and metering instrument; subsystems for designing foundry and stamping equipment; subsystems for designing control of gear cutting tools as per electronic standards. It is noted that the automated subsystems of analyzing production processes allow for performing the following analyses: analyzing metal casting processes; analyzing stamping processes; analyzing cutting processes; analyzing gear-cutting processes. The author provides the following results of implementing the integrated system of technological preparation of production at Motor Sich JSC: i) The TPV period was increased by 1.2–1.5 times, and ii) The efficiency of design and construction works was raised by 3–3.5 times.*

Keywords: *integrated production preparation system, aircraft engine parts, system of automated design of process documents, subsystem of automated preparation of programs for CNC machines, subsystem of automated design of production equipment.*