

УДК 515.2

Євген Гавриленко, доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інженерної механіки
та комп'ютерного проектування,

Олександр Мацулевич, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерної механіки
та комп'ютерного проектування,

Галина Антонова, старший викладач кафедри інженерної механіки
та комп'ютерного проектування,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна

ОГЛЯД ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Системи автоматизованого проектування (САПР) належать до найскладніших і найбільш наукоємних класів автоматизованих інформаційних систем. Це пов'язано з тим, що вони не лише виконують інженерні розрахунки й підтримують створення цифрових моделей виробів, а й охоплюють значно ширший спектр задач, пов'язаних із повним життєвим циклом проектування. Окрім безпосереднього виконання проєктних процедур, у сучасних САПР дедалі більшої ваги набуває автоматизація управління самим процесом проектування. У зв'язку з цим на підприємствах середнього та великого масштабу спостерігається чітка тенденція до інтеграції САПР із системами управління виробництвом (АСУП), а також із системами електронного документообігу.

Ключові слова: автоматизована інформаційна система, цифрова модель виробу, життєвий цикл проектування, проєктні процедури, інтеграція САПР, автоматизовані системи управління виробництвом (АСУП), системами електронного документообігу.

Abstract. Computer-Aided Design (CAD) systems are among the most complex and research-intensive classes of automated information systems. This is because they not only perform engineering calculations and support the creation of digital product models, but also cover a much broader range of tasks related to the entire design lifecycle. In addition to the direct execution of design procedures, the automation of the design process itself is becoming increasingly important in modern CAD systems. In this regard, a clear trend toward the integration of CAD systems with production management systems (PMS) as well as with electronic document management systems is observed in medium- and large-scale enterprises.

Keywords: automated information system, digital product model, design life cycle, design procedures, CAD integration with automated production control systems (APCS) and electronic document management systems.

Серед CAD-систем виділяють системи нижнього, середнього та верхнього рівнів. Така класифікація сформувалася наприкінці 80-90-х років минулого століття.

Системи нижнього рівня (або «легкі» системи) – це відносно недорогі САПР, які переважно орієнтовані на 2D-графіку. Їх основне призначення – автоматизація креслярських робіт. Технічно такі системи базувалися на персональних комп'ютерах, які на той час значно поступалися за продуктивністю робочим станціям.

Системи верхнього рівня («важкі» системи або hi-end) створювалися для роботи на потужних робочих станціях або мейнфреймах. Вони є більш складними та дорогими, орієнтованими на тривимірне твердотільне та поверхневе моделювання. У таких системах креслярська документація зазвичай формується на основі попередньо створених 3D-моделей.

Згодом системи, які підтримували лише твердотільне моделювання і займали проміжне положення між «легкими» та «важкими», почали відносити до середнього рівня.

Сьогодні розвиток CAD-систем призвів до того, що межі між рівнями стали менш чіткими. У багатьох системах середнього рівня з'явилися інструменти поверхневого моделювання, а можливості персональних комп'ютерів стали достатніми навіть для складних задач верхнього рівня. У результаті змінився сам підхід до класифікації: тепер «важкими» часто називають комплексні системи CAE/CAD/CAM/PDM, які поєднують конструкторське і технологічне проектування, інженерний аналіз, керування проєктними даними та широкий набір спеціалізованих модулів.

Усі системи одного рівня за функціональністю приблизно рівнозначні: нові можливості, що з'являються в одному програмному комплексі, з часом впроваджуються і в інших.

На великих підприємствах зазвичай використовують CAD-рішення різних рівнів. Це пов'язано з тим, що більшість (понад 80%) конструкторських задач можна виконати на системах нижнього та середнього рівнів, тоді як «важкі» системи є дорогими і застосовуються обмежено. Тому підприємства закупають лише невелику кількість ліцензій верхнього рівня, а основні робочі місця оснащують системами нижчого або середнього рівня.

У зв'язку з цим виникає проблема сумісності та обміну даними між різними CAD-системами, яка вирішується за допомогою стандартів і форматів, що використовуються в CALS-технологіях.

1. Основні функції CAD-систем. Функції CAD-систем у машинобудуванні поділяють на функції двовимірного (2D) та тривимірного (3D) проєктування. До 2D-функцій належать виконання креслень і оформлення конструкторської документації. Натомість 3D-функції включають побудову просторових геометричних моделей, виконання метричних розрахунків, реалістичну візуалізацію, а також взаємні перетворення між 2D- та 3D-уявленнями об'єктів.

Тривимірні моделі можуть задаватися як опис поверхонь, що обмежують деталь, або як визначення об'єму простору, який займає тіло. Поверхні складної форми формуються за допомогою різновидів кінематичного методу, зокрема шляхом переміщення плоского контуру вздовж нормалі до його площини, протягування вздовж просторової кривої, обертання навколо заданої осі або побудови поверхні між кількома заданими перерізами.

Для створення скульптурних поверхонь, які проходять через задані точки простору, використовують моделі на основі кривих Безьє. У випадках, коли потрібна підвищена гладкість поверхні, застосовують моделі на основі B-сплайнів.

Синтез моделей складальних одиниць здійснюється шляхом позиціонування елементів, а також використанням теоретико-множинних операцій – перетину, об'єднання та віднімання – до бібліотечних і новостворених моделей деталей. У деяких системах додатково реалізуються операції компонування обладнання, прокладання з'єднувальних трас та інші інженерні процедури.

Важливими характеристиками CAD-систем є параметризація та асоціативність. Параметризація означає подання геометричних моделей у вигляді набору змінних параметрів замість фіксованих величин. Це дозволяє легко адаптувати модель до різних варіантів конструкції та використовувати її в багатьох проєктах. Також параметричні моделі можуть автоматично підлаштовуватися під просторові обмеження під час включення в складальні вузли.

Асоціативність забезпечує зв'язок між параметрами різних елементів моделі у вигляді математичних залежностей. Завдяки цьому зміни, внесені конструктором в одну частину складальної моделі, автоматично відображаються в інших пов'язаних частинах, оновлюючи відповідні геометричні параметри.

2. Основні функції CAE-систем. Функції CAE-систем є доволі різноплановими, оскільки вони охоплюють проєктні процедури аналізу, математичного моделювання та оптимізації інженерних рішень. У складі машинобудівних CAE-систем зазвичай виокремлюють програмні модулі, призначені для виконання таких основних задач:

- моделювання полів фізичних величин, включаючи розрахунки міцності, що найчастіше реалізуються на основі МСЕ;
- визначення станів об'єктів моделювання та аналіз перехідних процесів із використанням апарату макрорівня;
- імітаційне моделювання складних виробничих систем на базі теорії масового обслуговування та мереж Петрі.

Базову структуру програм, що реалізують аналіз методом МСЕ, утворюють бібліотеки кінцевих елементів, препроцесор, вирішувач і постпроцесор.

Бібліотеки скінченних елементів (СЕ) містять математичні моделі елементів, зокрема їх матриці жорсткості. При цьому набір таких моделей залежить від типу задачі (наприклад, пружні або пластичні деформації, температурні поля, електричні потенціали), геометричної форми елементів (трикутні, чотирикутні тощо у 2D-випадку) та вибраних координатних функцій.

Вхідними даними для препроцесора є геометрична модель об'єкта, яка найчастіше формується в CAD-підсистемі. Основне призначення препроцесора полягає в дискретизації досліджуваної області, тобто представленні деталі у вигляді скінченноелементної сітки.

Вирішувач виконує збирання локальних моделей СЕ в єдину систему алгебраїчних рівнянь і здійснює її розв'язання за допомогою методів для розріджених матриць.

Постпроцесор відповідає за інтерпретацію та візуалізацію результатів обчислень у зручному для користувача вигляді. У машинобудівних САПР результати зазвичай подаються графічно: користувач може аналізувати початкову та деформовану конфігурації деталі, а також розподіли напружень, температур або потенціалів у вигляді кольорових карт, де палітра або інтенсивність відображає значення відповідної змінної.

3. Основні функції САМ-систем. Основні функції САМ-систем включають розробку технологічних процесів, автоматизований синтез керуючих програм для обладнання з ЧПК, моделювання процесів обробки деталей, зокрема побудову траєкторій відносного руху інструмента та заготовки під час обробки, створення постпроцесорів для конкретних типів верстатів з ЧПУ, а також розрахунок норм часу виконання технологічних операцій.

Вихідними даними для формування програм керування ЧПК є результати конструкторського проектування, отримані з CAD-систем. Водночас програмування може здійснюватися і на основі лише креслень деталі та заданих параметрів технологічного процесу, без повної 3D-моделі.

У процесі програмування визначається та кодується геометрія заготовки, траєкторії переміщення робочих органів верстата, а також режими обробки. Для цього використовуються спеціалізовані мови високого рівня, серед яких прикладом є АРТ (Automatically Programmed Tools). У мові АРТ виділяють такі основні групи команд:

- ідентифікаційні – для задання назви деталі та типу постпроцесора;
- геометричні – для опису геометрії оброблюваного об'єкта;
- команди керування рухом ріжучого інструмента;
- команди керування режимами обробки (швидкість подачі, обертання шпинделя, охолодження тощо);
- додаткові команди (наприклад, вибір інструменту та інші допоміжні операції).

Приклади команд АРТ:

P5 = POINT/0.0. 2.5. 0.4 – визначення точки P5 з координатами X=0, Y=2,5, Z=0,4.

GOTO/P7 – переміщення в точку P7.

FEDRAT/6.0 – завдання швидкості подачі 6 дюйм/хв.

Отриманий вихідний код на мові АРТ перетворюється у програму керування переміщенням інструмента та подачею, яка подається у вигляді апаратно незалежного файлу CLData (Cutter Location Data). Цей файл CLData передається до постпроцесора, який виконує його трансляцію у керуючу програму, адаптовану під конкретний тип контролера ЧПК.

Мови керування ЧПК зазвичай використовуються не професійними програмістами, а технологами виробництва, тому до них висуваються вимоги простоти та наочності. У зв'язку з цим бажаним є використання мов, що ґрунтуються на візуальному або графічному представленні технологічних ситуацій. У ряді систем додатково застосовуються схемні мови. Частина таких мов стандартизована та описана в міжнародному стандарті ІЕС 1131-3.

Окреме місце в CAD/CAM-системах займає прототипування – процес виготовлення фізичних прототипів деталей або технологічних шаблонів, які надалі використовуються для серійного виробництва. Прототипування фактично є матеріальним відтворенням розробленої геометричної моделі.

Однією з поширених технологій прототипування є стереолітографія, яка базується на пошаровому формуванні тривимірного об'єкта з фотополімеру, що вибірково твердне під дією лазерного випромінювання. Процес виконується в установці, що містить ванну з рідким полімером і рухому платформу, яка переміщується вертикально. Під час формування кожного шару платформа розташовується нижче поверхні полімеру на товщину одного шару, після чого лазерний промінь проходить по контуру перерізу моделі, забезпечуючи затвердіння відповідної ділянки. Послідовне нашарування дозволяє отримати суцільний твердий прототип.

Стереолітографія може застосовуватися і для виготовлення кінцевих деталей за умови, що фотополімер відповідає вимогам до експлуатаційного матеріалу.

Поряд зі стереолітографією використовуються й інші методи прототипування, зокрема ламінування (LOM – Laminated Object Manufacturing), яке ґрунтується на пошаровому склеюванні матеріалу, що подається у вигляді рулону. У процесі виготовлення кожен шар вирізається лазером відповідно до потрібного контуру перерізу деталі.

4. Огляд машинобудівних САПР. Як правило, машинобудівні САПР мають багатомодульну структуру. Типовим є поділ на модулі, що відповідають різним етапам і задачам проєктування: конструкторське проєктування механічних об'єктів, промисловий дизайн, інженерний аналіз (функціональне моделювання), технологічне проєктування, обмін даними та візуалізація.

На сучасному етапі розвитку (станом на 2006 р.) у світі залишилося кілька провідних систем машинобудівних САПР верхнього рівня, що активно розвивалися. Серед них: Unigraphics (UGS – Unigraphics Solutions), CATIA (Dassault

Systemes) та Pro/Engineer (PTC – Parametric Technology Corporation). Раніше з ними конкурували системи I-DEAS (SDRC), CADD5 (Computervision) та EUCLID (Matra Datavision), однак з часом їх розвиток був або припинений, або інтегрований у більш сучасні платформи.

Компанія Dassault Systemes у співпраці з IBM розвиває систему CATIA V5, яка об'єднала напрацювання попередньої версії CATIA V4 та технологій Euclid Quantum, отриманих від Matra Datavision.

Після придбання SDRC корпорацією EDS було створено підрозділ EDS PLM Solutions, який згодом став самостійною компанією Unigraphics Solutions. У результаті була розроблена версія Unigraphics NX, що поєднала сильні сторони Unigraphics та I-DEAS. Зокрема, I-DEAS мав потужні засоби інженерного аналізу, але поступався Unigraphics у функціях CAM.

Компанія Computervision увійшла до складу PTC ще у 1990-х роках, після чого розвиток CADD5 було зупинено. Наразі PTC впроваджує нову версію Pro/Engineer під назвою Wildfire.

До основних тенденцій розвитку CAD/CAM/CAE-систем належать:

- розвиток САПР як складової частини систем PLM, тобто інтеграція з іншими системами, що підтримують життєвий цикл виробів;
- впровадження можливостей колаборативного (спільного) проєктування на основі використання Internet.

Система Unigraphics NX – універсальна система геометричного моделювання та конструкторсько-технологічного проєктування, яка підтримує розробку великих складальних вузлів, виконання міцнісних розрахунків і підготовку конструкторської документації. У ній застосовується концепція майстер-процесів — інтерактивних засобів проєктування, адаптованих до специфіки конкретних задач і галузей застосування.

У конструкторській частині (CAD-підсистема) реалізовано інструменти для твердотільного моделювання, побудови геометрії на основі сплайнових поверхонь,

автоматичного формування креслень на основі 3D-моделей, а також проєктування складальних конструкцій, у тому числі дуже великих за кількістю компонентів (сотні й тисячі елементів), з підтримкою асоціативності. Також передбачено засоби аналізу допусків та інші інженерні функції. Як графічне ядро використовується Parasolid.

У технологічній частині (CAM-підсистема) забезпечується розробка керуючих програм для токарної та електроерозійної обробки, а також побудова й аналіз траєкторій інструмента при фрезеруванні, включно з трьох- та п'ятикоординатною обробкою. Окремо підтримується проєктування штампів і прес-форм.

Інженерно-розрахункова частина (CAE-підсистема) містить модулі міцнісного аналізу на основі МСЕ з відповідними препроцесорами та постпроцесорами, а також засоби кінематичного й динамічного аналізу механізмів із визначенням сил, швидкостей і прискорень. Додатково реалізовано аналіз процесів лиття та поведінки пластичних матеріалів.

Система CATIA V5 використовується на всіх етапах життєвого циклу виробу – від концептуального проєктування до технологічної підготовки виробництва та планування ресурсів. Вона підтримує як поверхневе, так і твердотільне 3D-моделювання, а також оптимізацію параметрів виробів. У системі застосовується власне графічне ядро CNEXT.

CATIA V5 забезпечує фотореалістичну візуалізацію, а також можливість відновлення математичної моделі на основі фізичного прототипу. Система є масштабованою і пропонує різні конфігурації – від рішень для повного наскрізного проєктування складних виробів до варіантів для малих і середніх підприємств.

До характерних особливостей CATIA V5 належать наявність модуля формалізації знань, орієнтованого на оптимізацію конструкцій і процесів проєктування, а також антропологічного модуля, який дозволяє враховувати параметри людини при моделюванні людино-машинних систем.

Система Pro/Engineer, що веде свою історію з 1986 року, містить базові модулі конструкторського проєктування, призначені для твердотільного та поверхневого моделювання, синтезу конструкцій на основі базових елементів форми, підтримки параметризації та асоціативності, а також для автоматизованого формування проєкційних креслень із нанесенням розмірів і допусків. Користувач має можливість розширювати бібліотеку базових елементів форми (БЕФ), додаючи власні параметричні моделі.

Для САПР компанії PTC розроблено графічне ядро Granite One. Додаткові модулі конструкторського проєктування мають вузькоспеціалізований характер і орієнтовані на окремі галузеві задачі. Серед них – проєктування панелей із композиційних матеріалів, розробка штампів і ливарних прес-форм, трубопровідних систем, зварних конструкцій, а також систем прокладання електричних кабелів і джгутів.

Модулі функціонального моделювання виконують роль препроцесорів і постпроцесорів у задачах кінцево-елементного аналізу (зокрема побудова скінченноелементної сітки та візуалізація результатів розрахунків). Вони також застосовуються для аналізу теплового стану конструкцій, оцінки вібростійкості та інших інженерних досліджень.

Основні модулі технологічного проєктування призначені для моделювання процесів фрезерної, токарної та електроерозійної обробки, а також для формування керуючих програм для обладнання з ЧПК і створення постпроцесорів. Водночас САМ-функціональність у Pro/Engineer традиційно вважається менш розвиненою порівняно з CAD-компонентами.

Модулі обміну даними (конвертори форматів) забезпечують імпорт та експорт інформації між різними CAE/CAD/CAM-системами, підтримуючи інтеграцію в гетерогенних проєктних середовищах.

У версії Wildfire реалізовано розширене використання Internet для організації спільного проєктування, зокрема для проведення відеоконференцій між

розробниками. Також суттєво спрощено інтерфейс користувача завдяки впровадженню ієрархічної системи піктограм.

Серед САПР середнього рівня провідні позиції займають системи SolidWorks (SolidWorks Corporation), Solid Edge (EDS PLM Solutions) та Inventor (Autodesk). Компанія PTC також пропонує рішення середнього рівня під назвою Pro/Desktop. В Україні та країнах СНД широкого поширення набули вітчизняні системи КОМПАС (АСКОН) і T-Flex CAD (Топ Системи), а також інші продукти, зокрема рішення Autodesk, Bentley, Intermech і Bee-Pitron.

Усі ці системи орієнтовані переважно на платформу Wintel і зазвичай включають підсистеми 2D-креслення, твердотільного 3D-моделювання, технологічного проєктування, управління проєктними даними, базові модулі інженерного аналізу, а також бібліотеки типових конструктивних елементів.

Система твердотільного параметричного моделювання механічних конструкцій SolidWorks побудована на графічному ядрі Parasolid. Процес синтезу конструкції починається з формування базового тіла за допомогою операцій типу видавлювання, протягування або обертання ескізу з подальшим додаванням і/або відніманням об'ємів інших тіл. У системі застосовується технологія граничного представлення (B-representation), де поверхні описуються аналітично або за допомогою сплайнів.

Під час проєктування складальних одиниць на основі базових елементів форми (БЕФ) користувач може задавати різні умови взаємного розташування деталей, а також автоматично контролювати зазори та відсутність взаємного перетину компонентів. Передбачено інтерфейси обміну даними з іншими системами, зокрема IGES, DXF та DWG. До складу системи також входить модуль міцнісного аналізу Cosmos/Works.

Суттєвою перевагою Solid Edge є високий рівень інтеграції з системою верхнього рівня Unigraphics, оскільки обидві системи розробляються однією компанією та використовують спільне графічне ядро. Методика конструювання в

Solid Edge подібна до інших сучасних САПР: конструктивні елементи задаються у вигляді 2D-ескізів, які шляхом операцій видавлювання або обертання перетворюються на тривимірні моделі деталей.

Система Inventor призначена для твердотільного параметричного проектування та орієнтована на створення великих складальних конструкцій, що містять сотні й тисячі деталей. Вона має розвинену бібліотеку стандартних елементів, що значно прискорює процес конструювання типових вузлів і механізмів.

Система побудована на графічному ядрі ACIS, на основі якого компанія Autodesk також розробила власне ядро Shape Manager. Побудова тривимірних моделей здійснюється за допомогою операцій видавлювання, обертання, побудови за перетинами та вздовж заданих траєкторій. На основі 3D-моделей автоматично формуються 2D-креслення та специфікації матеріалів.

У системі підтримується колективна робота над проектами, у тому числі одночасна робота з однією складальною моделлю. Реалізовано автоматичну перевірку кінематики механізмів, а також контроль геометричних розмірів деталей з урахуванням положення сусідніх елементів у складі збірки.

Важливою перевагою Inventor є спосіб формування асоціативних зв'язків: вони задаються не через складні математичні рівняння, а безпосередньо через визначення форми та взаємного розташування компонентів, що спрощує роботу конструктора.

Компанія Autodesk також пропонує системи середнього та нижнього рівнів – Mechanical Desktop (MDT) та AutoCAD LT.

У зв'язці з Inventor і Solid Edge може використовуватися система кінцево-елементного аналізу Cosmos/DesignSTAR, яка дозволяє виконувати аналіз напружено-деформованого стану, стаціонарних і нестаціонарних теплових процесів, динаміки рідин і газів, низькочастотних електромагнітних полів, а також визначати власні частоти коливань конструкцій.

У системі КОМПАС для тривимірного твердотілого моделювання використовується власне графічне ядро. Синтез конструкцій здійснюється за допомогою булевих операцій над об'ємними примітивами, а також методів видавлювання, обертання та побудови за заданими перерізами. Передбачено можливість задання параметричних залежностей між елементами конструкції та розрахунок мас-інерційних характеристик.

Підсистема 3D твердотілого моделювання в T-Flex CAD побудована на основі ядра Parasolid. У ній реалізовано двонаправлену параметричну асоціативність, тобто будь-які зміни в кресленні автоматично відображаються в 3D-моделі, і навпаки – коригування геометрії моделі призводить до оновлення креслень. При роботі зі складальними одиницями зміна параметрів або положення однієї деталі викликає автоматичне перебудування пов'язаних елементів, що забезпечує узгодженість усієї конструкції.

Створення тривимірних моделей у системі може виконуватися різними способами: на основі вже існуючого креслення, за допомогою булевих операцій над твердотілими об'єктами, а також через типові геометричні операції — витягування, обертання профілю, протягування вздовж траєкторії, loft-побудови тощо. Система також дозволяє автоматично обчислювати масово-інерційні характеристики виробів. На основі 3D-моделі можна формувати комплект конструкторської документації, включаючи проєкційні креслення.

Окремо варто відзначити, що T-Flex CAD містить низку взаємопов'язаних модулів: T-Flex CAD 2D використовується для параметричного креслення та оформлення документації, T-Flex DOCs забезпечує керування проєктами та електронним документообігом. Технологічна підготовка виробництва реалізується через систему T-Flex/ТехноПро, де виконується розробка технологічних процесів, розрахунок розмірних ланцюгів, підбір інструменту, формування маршрутних і операційних карт, а також супровідної документації (відомостей матеріалів, оснащення, карт контролю). Підготовка керуючих програм для верстатів з ЧПК

здійснюється окремим модулем T-Flex ЧПУ. Крім цього, система включає інструменти інженерних розрахунків і засоби проектування прес-форм та штампів.

У сфері ливарного виробництва відомі рішення компанії Moldflow, зокрема програми Part Adviser і Mold Adviser, які призначені для моделювання процесів лиття пластмас і аналізу поведінки матеріалу у формі.

Серед САМ-систем важливе місце займає Mastercam, яка містить інструменти для генерації керуючих програм для різних видів механічної обробки заготовок. Вона також підтримує моделювання процесів обробки, корекцію геометричних моделей, а головне – має широкий набір конверторів для обміну даними з іншими CAD/CAM-системами (STEP, IGES, Parasolid, ACIS, AutoCAD, Inventor, SolidWorks та інші формати).

Для технологічної підготовки виробництва використовується система TechnologiCS (Consistent Software), яка забезпечує ведення структури виробу, формування специфікацій, керування кресленнями, розробку технологічних процесів, підбір інструментів, розрахунок режимів обробки, нормування матеріалів і оформлення технологічної документації.

Окремо слід згадати САМ-систему SolidCAM, яка інтегрується з CAD-середовищами на основі ядра ACIS і використовується для створення керуючих програм для токарної та багатовісної фрезерної обробки. Подібні функції також реалізує система ТЕХТРАН, що містить модулі для різних типів механічної обробки, включно з електроерозійною.

У галузі інженерного аналізу (CAE) провідними світовими рішеннями залишаються програмні комплекси Nastran і Patran (MSC Software) та Ansys (Ansys Inc.), які широко застосовуються для розрахунку міцності, теплових процесів, динаміки та інших фізичних задач.

Як правило, подібні програмні комплекси складаються з набору взаємопов'язаних модулів, які об'єднані спільною архітектурою математичних методів, інтерфейсів користувача та частково уніфікованим програмним ядром.

Водночас різні компоненти таких систем можуть мати відмінну спеціалізацію, рівень складності, сферу застосування та вартість, а також виконувати різні допоміжні або сервісні функції.

Наприклад, у системі ANSYS базові розрахункові модулі забезпечують широкий спектр інженерного аналізу: визначення міцності конструкцій, теплопровідності, задач гідродинаміки (потoki рідин і газів), акустичних явищ, а також електромагнітних полів. Усі конфігурації системи зазвичай містять інструменти попередньої та постобробки даних (pre-/post-processing), а також засоби взаємодії з базами даних. Крім того, передбачено обмін геометричними й розрахунковими даними з провідними CAD-системами та середовищами машинної графіки, що дозволяє інтегрувати ANSYS у повний цикл проєктування.

Серед систем моделювання механічних процесів на макрорівні, що базуються на розв'язанні систем звичайних диференціальних рівнянь, одним із найвідоміших світових рішень є MSC Adams. Вона використовується для аналізу динаміки багатотілих механічних систем, включаючи розрахунок руху, сил взаємодії, швидкостей і прискорень елементів конструкцій. Серед вітчизняних аналогів подібного призначення можна відзначити програмні комплекси ПА7 і ПА9, які застосовуються для вирішення задач динамічного моделювання механічних систем.

Список використаних джерел

1. Alrefo I. F., Rawashdeh M. O., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O. Designing the functional surfaces of camshaft cams of internal combustion engines. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. Vol. 3. P. 72–78. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-3/072>
2. Alrefo I. F., Matsulevych O., Vershkov O., Halko S., Suprun O., Miroshnyk O. Designing the working surfaces of rotary planetary mechanisms. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 4. P. 82-88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-4/082>. ISSN 2071-2227
3. Мацулевич О. Є. Застосування спеціалізованої PLM-системи Technologi CS при розробці автоматизованої системи ведення конструкторсько-технологічних баз даних підприємства сільськогосподарського машинобудування. *Праці*

- Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Вип. 24, т . 1
<https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-13>
4. Паляничка Н. О., Вершков О. О., Антонова Г. В. Аналіз новітніх пристроїв для гомогенізації. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2017. Вип. 17, т. 3. С. 194-200.
5. Мацулевич О. Є., Гавриленко Є. А., Мірошніченко М. Ю., Гешева Г. В. Набуття навичок комп'ютерної обробки аудіо сигналів з використанням програмного забезпечення Adobe Audition. *Розвиток сучасної науки та освіти* : матеріали IV Міжнародної наук.-практ. Інтернет-конф. (Запоріжжя, 29-31 травня 2023 р.). Запоріжжя : ТДАТУ, 2023. С. 80-86.
6. Вершков О. О., Мацулевич О. Є., Дереза О. О. Загальні налаштування системи MASTERCAM для виконання завдань з розробки управляючих програм токарної обробки валів. *Розвиток сучасної науки та освіти: реалії, проблеми якості, інновації* : матеріали V Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф. (м. Запоріжжя, 29-31 травня 2024 р.). Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. С. 100-105.
7. Гавриленко Е. А., Холодняк Ю. В., Антонова Г. В., Михайленко Е. Ю. Моделирование участков одномерных обводов по заданным условиям. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. Вип. 101. С. 34-44.
<http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/256305> (дата звернення 12.04.2026).
8. Мацулевич О. Є., Гавриленко Є. А., Холодняк Ю. В., Чаплінський А. П. Отримання мастер-модели з восківки методом лиття. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 1. <https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-1-33>
9. Холодняк Ю. В., Гавриленко Є. А. Розробка технології формування САД-моделей поверхонь технічних виробів. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2022. Вип. 12, т. 2.
<https://doi.org/10.31388/2220-8674-2022-2-34>