

УДК 378.14

**К.О. Самойчук, д.т.н., проф., С.В. Петриченко, к.т.н., доц.**  
Таврійський державний агротехнологічний університет  
імені Дмитра Моторного

## **ОГЛЯД ОСНОВНИХ ТЕНДЕНЦІЙ, МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ СУЧАСНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО ІНЖИНІРИНГУ ХАРЧОВИХ І ПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ**

*Анотація.* Робота розкриває сутність наукомістких технологій комп'ютерного інжинірингу (Computer-Aided Engineering, CAE) як однієї з центральних і найбільш наукоємних технологій сучасної промисловості, які забезпечують конкурентоспроможність продукції нового покоління. Описано основні тенденції та підходи сучасного комп'ютерного інжинірингу.

*Ключові слова:* комп'ютерний інжиніринг, система автоматизації проектних робіт, кінцево-елементний аналіз, цифрове виробництво обчислювальна гідрогазодинаміка, цифрове моделювання.

**Постановка проблеми.** Володіння передовими технологіями є найважливішим фактором забезпечення національної безпеки і процвітання національної економіки будь-якої країни. Перевага країни в технологічній сфері забезпечує їй пріоритетні позиції на світових ринках і одночасно забезпечує її продовольчу безпеку, дозволяючи компенсувати рівнем і якістю високих технологій необхідні кількісні скорочення, що диктуються економічними потребами. Відстати в розвитку базових і критичних технологій, що представляють фундаментальну основу технологічної бази і забезпечують інноваційні прориви, значить, безнадійно відстати в загальнолюдському прогресі.

Процес розвитку базових технологій в різних країнах різний і нерівномірний. В даний час США, Євросоюз і Японія є представниками високорозвинених в технологічному відношенні країн, які тримають в своїх руках ключові технології і забезпечують собі стійке положення на міжнародних ринках готової продукції, як промислового, так і продовольчого призначення. Це дає їм можливість займати домінуюче становище в світі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Набуття незалежності поставило перед Україною складну історичну задачу - увійти в світову економічну систему. У зв'язку з цим важливо відзначити, що стратегія технологічного розвитку України в корені відрізняється від стратегії ЄСРП і ґрунтується на відмові від концепції «замкнутого технологічного простору» - створення всього спектру наукомістких технологій власними силами, що бачиться малореальним через існування серйозних фінансових обмежень [1]. У ситуації, що склалася, необхідно ефективно використовувати технологічні досягнення інших розвинених країн («відкриті технологічні інновації», «Open

Innovations»), розвивати технологічне співробітництво (по можливості, «вбудовуватися» в технологічні ланцюжки фірм-лідерів), прагнути до максимально широкої кооперації і міжнародного співробітництва, з огляду на динаміку цих процесів у всьому світі, і, найголовніше, систематично акумулюючи і застосовуючи передові наукомісткі технології світового рівня. Необхідно розуміти, що передові в технологічному відношенні країни вже фактично створили єдиний технологічний простір [1, 2].

**Формулювання цілей статті.** Метою даної публікації є огляд основних тенденцій та підходів сучасного комп'ютерного інжинірингу, розкриття сутності наукомістких технологій комп'ютерного інжинірингу (Computer-Aided Engineering, CAE) як однієї з центральних і найбільш наукоємних технологій сучасної промисловості, які забезпечують конкурентоспроможність продукції нового покоління.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Розглянемо основні тенденції, методи і технології сучасного комп'ютерного інжинірингу.

1. «MultiDisciplinary & MultiScale & MultiStage Research & Engineering» - мультидисциплінарні, багатомасштабні (багаторівневі) і багатостадійні дослідження і інжиніринг на основі між- / мульти- / трансдисциплінарних, іноді званих «мультифізичними» («MultiPhysics»), комп'ютерних технологій, в першу чергу, наукомістких технологій комп'ютерного інжинірингу (Computer-Aided Engineering). Як правило, здійснюється перехід від окремих дисциплін, наприклад, теплопровідності і механіки, на основі термомеханіки, електромагнетизму та обчислювальної математики до мультидисциплінарної обчислювальної термо-електро-магніто-механіки (концепція MultiDisciplinary), від одномасштабних моделей до багатомасштабних ієрархічних нано-мікро-мезо-макро моделей (концепція MultiScale), застосовуваних при створенні нових матеріалів зі спеціальними властивостями, розробці конкурентоспроможних систем, конструкцій і продуктів нового покоління на всіх технологічних етапах формування і складання конструкцій (наприклад, лиття - штампування / кутання / ... / вигинання - зварювання і т.д., концепція MultiStage).

2. «Simulation Based Design» - комп'ютерне проектування конкурентоспроможної продукції, засноване на ефективному та всебічному застосуванні звичайно-елементного моделювання (Finite Element Simulation, FE Simulation) - де-факто основоположна парадигма сучасного машинобудування в самому широкому сенсі цього терміна. В основі концепції «Simulation Based Design» лежить метод скінчених елементів (MSE; Finite Element Method, FEM) і передові комп'ютерні технології, тотально використовуються сучасні засоби візуалізації:

- CAD, (Computer-Aided Design) - комп'ютерне проектування (САПР, Система Автоматизованого Проектування, або, точніше, але більш довго Система Автоматизації Проектних Робіт, а тому використовується рідше); в даний час розрізняють три основних підгрупи CAD: машинобудівні CAD (MCAD - Mechanical CAD), CAD друкованих плат (ECAD - Electronic CAD /

EDA - Electronic Design Automation) і архітектурно-будівельні CAD (CAD / AEC - Architectural, Engineering and Construction), відзначимо, що найбільш розвиненими є MCAD-технології і відповідний сегмент ринку. Підсумком широкого впровадження CAD-систем в різні сфери інженерної діяльності стало те, що близько 40 років тому Національний науковий фонд США назвав появу CAD-систем найвизначнішою подією з точки зору підвищення продуктивності інженерної праці з часів винаходу електрики;

- FEA, Finite Element Analysis - кінцево-елементний аналіз, в першу чергу, завдань механіки деформованого твердого тіла, статички, коливань, стійкості динаміки і міцності машин, конструкцій, приладів, апаратури, установок і споруд, тобто всього спектру продуктів і виробів з різних галузей промисловості; за допомогою різних варіантів МСЕ ефективно вирішують задачі теплообміну, електромагнетизму і акустики, будівельної механіки, технологічні завдання (в першу чергу, завдання пластичної обробки металів), завдання механіки руйнування, завдання механіки композитів і композитних структур;

- CFD, Computational Fluid Dynamics - обчислювальна гідрогазодинаміка, де основним методом вирішення завдань механіки рідини і газу виступає метод кінцевих обсягів CAE, Computer-Aided Engineering - наукомісткий комп'ютерний інжиніринг, заснований на ефективному застосуванні мультидисциплінарних надгалузевий CAE-систем, заснованих на FEA, CFD і інших сучасних обчислювальних методах. За допомогою CAE-систем розробляють і застосовують раціональні математичні моделі, що мають високий рівень адекватності реальним об'єктам і реальним фізико-механічним процесам, виконують ефективне рішення багатомірних дослідних і промислових завдань, описуваних нестационарними нелінійними диференціальними рівняннями в приватних похідних; часто FEA, CFD і MBD (Multi Body Dynamics) вважають взаємодоповнюючими компонентами комп'ютерного інжинірингу (CAE), а термінами уточнюють спеціалізацію, наприклад, MCAE (Mechanical CAE), ECAE (Electrical CAE), AEC (Architecture, Engineering and Construction CAE) і т. д.

- CALS - постійна інформаційна підтримка постачання і життєвого циклу.

Зокрема, вимірюванням складності системи може бути число її можливих станів або число ступенів свободи. При цьому складною буде система з таким числом складностей, наскільки багато у дослідника засобів опису й аналізу її поведінки. Як правило, звичайно-елементні моделі складних конструкцій і механічних систем містять  $10^5 \dots 10^6$  ступенів свободи, що відповідає порядку системи диференціальних або алгебраїчних рівнянь, яку необхідно вирішити. Звернемося до рекордів. Наприклад, для CFD-завдань рекорд становить  $10^9$  осередків (комп'ютерне моделювання гідро- і аеродинаміки океанської яхти з використанням CAE-системи ANSYS, серпень 2008 року [2]), або використання програмних комплексів ANSYS з кількістю розрахункових осередків  $12 \cdot 10^9$ , завдяки чому команда BMW Sauber F1

досягла кращих за свою історію результатів - другого місця в Кубку конструкторів за підсумками сезону-2007 [3], для FEA-завдань -  $5 \cdot 10^8$  рівнянь (звичайно-елементне моделювання в турбомашинобудування із застосуванням CAE - системи NX Nastran від Siemens PLM Software, грудень 2008 року).

Мультидисциплінарні дослідження виступають фундаментальною науковою основою надгалузевих технологій (ІКТ, наукомісткі суперкомп'ютерні технології на основі результатів багаторічних між-, мульти- і транс- дисциплінарних досліджень, трудомісткість створення яких становить десятки тисяч людино-років, нанотехнології, ...). Надгалузеві технології сприяють стрімкому поширенню і проникненню нових між- і мультидисциплінарних знань в нові області, так званому міжгалузевому трансферу передових «інваріантних» технологій. Саме цьому мультидисциплінарні знання і надгалузеві наукомісткі технології є «конкурентними перевагами завтрашнього дня». Їх широке впровадження дозволить забезпечити інноваційний розвиток високотехнологічних підприємств національної економіки [4].

У ХХІ столітті основна концепція «Simulation Based Design» інтенсивно розвивалася силами провідних фірм-вендорів CAE-систем і промислових компаній. Еволюцію основних підходів, тенденцій, концепцій та парадигм від «Simulation Based Design» до «Digital Manufacturing» («Цифрове виробництво») можна представити таким чином:

- Simulation Based Design (проектування);
- Simulation Based Design / Engineering (не тільки «проектування», але і «інжиніринг»);
- MultiDisciplinary Simulation Based Design / Engineering («мультидисциплінарність» - завдання стають комплексними, які вимагають для свого рішення знань з суміжних дисциплін);
- SuperComputer Simulation Based Design (широке застосування НРС-технологій (High Performance Computing), суперкомп'ютерів, високопродуктивних обчислювальних систем і кластерів в рамках ієрархічних кіберінфраструктур для вирішення складних мультидисциплінарних завдань, виконання багатомодельних завдань і різноманітних розрахунків);
- SuperComputer (MultiScale / MultiStage \* MultiDisciplinary \* MultiTechnology) Simulation Based Design / Engineering (застосування тріади: «багатомасштабність» / «многостадійність» \* «мультидисциплінарність» \* «мультитехнологічність»);
- SuperComputer (Material Science \* Mechanics) (Multi<sup>3</sup>) Simulation Based Design / Engineering (одночасне комп'ютерне проектування та інжиніринг матеріалів і елементів конструкцій з них - гармонійне поєднання механіки матеріалів і конструкцій);
- SuperComputer (SmartMat \* Mech) \* (Multi<sup>3</sup>) Simulation and Optimization Based Design / Engineering (застосування Smart-матеріалів / «розумних» матеріалів, застосування різних видів оптимізації (параметричної,

багатовимірної, структурної, топологічної, многокритеріальної і т.д.),  
раціональної оптимізації технологічних процесів і т.д.);

- SuperComputer (SmartMat \* Mech) \* (Multi<sup>3</sup>) Simulation and Optimization  
Based Product Development (проектування, інжиніринг та оптимізацію  
розширюємо до виробництва продукції і переходимо до Virtual Product  
Development - віртуальної розробки продукції / виробів);

- Digital Mock-Up / Digital Manufacturing («цифровий прототип» -  
віртуальна, цифрова 3-D модель виробу і всіх його компонентів, що дозволяє  
виключити з процесу розробки виробу створення дорогих натурних моделей-  
прототипів та дозволяє «вимірювати» і моделювати будь-які характеристики  
об'єкта в будь-яких умовах експлуатації / «цифрове виробництво» - як основні  
компоненти «розумних» заводів і фабрик). Для сучасного інжинірингу, крім  
концепцій SuperComputer (SmartMat \* Mech) \* (Multi<sup>3</sup>) Simulation and  
Optimization Based Product Development, Virtual Product Development і Digital  
Manufacturing характерним є застосування наступних підходів і інноваційних  
технологій [5].

CAD / CAM-технології (Computer-Aided Design / Manufacturing), які  
інтегрують CAD- і CAM- системи і забезпечують інтегроване рішення задач  
конструкторського і технологічного проектування, включаючи засоби 3-D  
параметричного моделювання, випуску креслень, а також засоби  
технологічної підготовки виробництва, в першу чергу, за допомогою програм  
для станків з ЧПУ або, останнім часом, за допомогою технологій швидкого  
прототипування (Rapid Prototyping, RP) або адитивних технологій (Additive  
Technologies, AD).

Concurrent Engineering (CE) - «конкурентне» проектування / паралельне  
проектування / спільне проектування) - спільна робота експертів з різних  
функціональних підрозділів підприємства на якомога більш ранній стадії  
розробки продукту з метою досягнення високої якості, функціональності і  
технологічності за якомога коротший час з мінімальними витратами. CE є,  
головним чином, вираженням бажання збільшити конкурентоспроможність  
продукції за рахунок скорочення життєвого циклу виробу, а також підвищення  
якості та зниження ціни.

PDM-системи (Product Data Management, PDM) - системи управління  
даними про виріб, іноді звані системами для колективної роботи з  
інженерними даними (Collaborative PDM, cPDM).

Research Knowledge Management - менеджмент, генерація, капіталізація  
і тиражування формалізованих і, що принципово більш важливо,  
неформалізованих знань - основне джерело конкурентоспроможності. Для  
доповнення мультидисциплінарних надгалузевий CAE-систем з точки зору  
управління знаннями (зберігання і управління: даними, data; результатами,  
results, методами, methods; процесами, processes) були розроблені системи:  
управління інженерними знаннями (Engineering Knowledge Management,  
ЕКМ), управління життєвим циклом кінцево-елементного (KE) моделювання  
(симуляції) (Simulation Lifecycle Management, SLM); управління процесами KE

моделювання (Simulation Process Management, SPM); управління KE моделюванням виробів (Product Simulation Management, PSM), нарешті, управління KE моделюванням на рівні підприємства (Enterprise Simulation Management, ESM).

Крім застосування CAD / CAM / CAE / PDM-систем, починаючи з 1990-х років минулого століття в промисловості використовуються ERP-системи (Enterprise Resources Planning, ERP) - системи планування і управління ресурсами підприємства, а на початку нинішнього століття найсерйознішу увагу було звернуто на MES-системи (Manufacturing Enterprise Solutions, MES) - корпоративні системи управління виробництвом на рівні цеху, SCM-системи (Supply Chain Management, SCM) - системи управління ланцюжком поставок і взаємовідносинами з постачальниками -), CRM-системи (Customer Relationship Management, CRM) - системи управління взаємовідносинами з замовниками.

Проблеми організації командної роботи над проектами та ефективного управління інформацією про виріб на протязі його життєвого циклу привертала до себе увагу з 1980-х років минулого століття. Для вирішення цих проблем пропонувалися різні підходи, наприклад, Міністерство оборони США запропонувало методику автоматизованої підтримки прийняття рішень щодо придбання виробів і матеріально-технічного забезпечення (Computer-aided Acquisition and Logistics Support, CALS), а корпорація IBM висунула концепцію комп'ютерного інтегрованого виробництва (Computer Integrated Manufacturing, CIM). Можливо, ці ініціативи випередили свій час, але в силу ряду причин вони не набули широкого поширення і не викликали особливого ентузіазму у користувачів.

В кінці минулого тисячоліття IBM розробила нову концепцію - PLM, якій пощастило значно більше, ніж CALS- і CIM-технологіям, і попит на PLM-продукти став рости, незважаючи на спади і кризи світової економіки.

Основне призначення PLM-технологій - об'єднання і ефективна взаємодія ізольованих ділянок автоматизації, що утворилися в результаті впровадження різних систем - CAD / CAM, CAE, PDM, EKM / SLM / SPM / PSM / ESM, RP / AD, ERP, MES, SCM і CRM - в рамках єдиного інформаційного простору, а також для реалізації наскрізного конструкторського, технологічного та комерційного циклів виробництва продукції - «від зародження ідеї, створення продукту, його експлуатації та, нарешті, до його утилізації».

Принципово важливо розуміти, що основу PLM-технологій складають CAD / CAM-, CAE- і PDM (EKM / SLM / SPM / PSM / ESM) -технології, завдяки спільному використанню яких традиційний послідовний підхід до розробки нових виробів замінений сучасним інтегрованим підходом.

3D Visualization & Virtual Reality & Global Visual Collaboration - глобальне співробітництво між розосередженими по всьому світу командами, що ефективно взаємодіють на основі комп'ютерних технологій візуалізації, віртуальної реальності, моделювання реалістичної поведінки і створення

«ефекту присутності»;

**Висновки.** CAE-системи з кожним роком стають зручніше і наочніше в застосуванні, володіючи при цьому широким спектром можливостей візуалізації результатів чисельних розрахунків.

Комп'ютерне моделювання в даний час можна і дуже бажано використовувати спільно з натурними експериментами, як для валідації одержуваних чисельних результатів, так і для ідентифікації параметрів математичних моделей, «тонкої» настройки математичних / механічних / комп'ютерних моделей з метою підвищення рівня адекватності розроблених моделей реальним об'єктам і / або фізико-механічним процесам, що веде до підвищення точності результатів комп'ютерного моделювання.

Надзвичайно важливо відзначити, що багато з вищевказаних підходів, технологій і тенденцій сучасного інжинірингу є надгалузевими технологіями - «конкурентні переваги завтрашнього дня» - технології, що застосовуються в багатьох галузях промисловості, що сприяють міжгалузевому трансферу передових «інваріантних» технологій, надгалузевому трансферу мультидисциплінарних комп'ютерних технологій.

#### **Список використаних джерел.**

1. Дубовой В.М., Кветний Р.Н Основы застосування ЕОМ у інженерній діяльності. К.: ІСДО України, 1994. 285 с.
2. CompMechLab-переводы. ANSYS преодолевает планку в 1 миллиард ячеек. Електрон. текст. дані. URL: <https://fea.ru/news/4784>.
3. ANSYS помогает завоевывать награды. Електрон. текст. дані. URL: <https://fea.ru/news/4809>.
4. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Ч. 1: навчальний посібник / за заг. ред. Р.Н. Кветного. Вінниця: ВНТУ. 2012. 193 с.
5. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие / А. И. Боровков и др. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2012. 93 с.

#### **Samoychuk K., Petrychenko S. Overview of main trends, methods and technologies of modern computer engineering of food and processing production**

*Summary. The work reveals the essence of computer-aided engineering technologies (CAE) as one of the central and most science-intensive technologies of modern industry, which ensure the competitiveness of new generation products. The main tendencies and approaches of modern computer engineering are described.*

*Keywords: computer engineering, system of automation of design works, finite element analysis, digital production, computational hydrogas dynamics, digital modeling.*