

Індустрія 4.0 та дигіталізація національних еталонів

В.В. Склярів, О.В. Прокопов

Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна
vladimir.skliarov@gmail.com

Анотація

Розглянуто питання застосування сучасних програмних засобів, орієнтованих на цифрові технології, при створенні та вдосконаленні національних еталонів. Наведено важливу роль метрології для реалізації схваленої урядом Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки. Цифрова економіка ґрунтується на інформаційно-комунікаційних та цифрових технологіях, стрімкий розвиток та поширення яких вже сьогодні впливають на традиційну економіку, трансформуючи її від такої, що споживає ресурси, до економіки, що створює ресурси. Оцифрування (дигіталізація) є невід'ємною складовою частиною побудови сучасних вимірювальних процесів. Невпинний розвиток світових технологій та далекоюсяжні рішення 26-ї Генеральної конференції з мір та ваг спонукають до відповідного розвитку та вдосконалення національних еталонів України, пошуку нових шляхів у побудові та дослідженні складових частин вимірювальних комплексів.

Побудова та вдосконалення сучасних вимірювальних комплексів і систем неможливі без застосування CAD/CAM/CAE програмних інженерних пакетів. Дослідження, розрахунки та аналіз складових компонентів еталонів дозволяють визначити та вирішити проблемні питання побудови на етапі "проєкт", зекономити час та матеріальні ресурси. Без використання моделювання та елементів симуляції зробити це практично неможливо.

Сучасні комп'ютерні технології дозволяють моделювати функціонування будь-яких пристроїв і аналізувати їхню поведінку вже на етапі підготовки проєктних рішень. Таким чином, аналіз можливих модифікацій дозволяє вибрати найбільш ефективно з них, що зводить до мінімуму дорогі дослідження та випробування дослідних зразків.

Метою роботи є аналіз та обґрунтування принципів використання комп'ютерного моделювання при побудові та вдосконаленні національних еталонів. Наведено зв'язок CAD/CAM/CAE програмних пакетів з групами еталонів, відповідно до їх міжнародної класифікації за видами вимірювань.

Ключові слова: цифрова економіка; дигіталізація; Індустрія 4.0; програмні пакети; національні еталони.

Отримано: 29.08.2019

Відредаговано: 25.09.2019

Схвалено до друку: 27.09.2019

1. Вступ

Цифрові технології відкривають унікальні можливості для розвитку економіки України та підвищення якості життя громадян. Швидкі та глибокі наслідки від переходу на "цифру" будуть можливими лише тоді, коли "цифрова" трансформація стане основою життєдіяльності українського суспільства, бізнесу та державних установ, стане звичним та повсякденним явищем, нашим ДНК, ключовою умовою на шляху до процвітання, основою добробуту України. Цифрові технології – світ, де створюються наші нові можливості; сфера, що визначає суть трансформацій у країні – для кращого життя, роботи, творчості, навчання, відпочинку українців та громадян інших держав, дорослих та дітей [1].

Сучасний стан розвитку суспільства характеризується таким явищем, як переведення усієї наявної інформації в цифровий формат – дигі-

талізацією. Основною метою схваленої урядом Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки та планом заходів щодо її реалізації (розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 січня 2018 року № 67-р) є реалізація плану заходів щодо усунення бар'єрів на шляху цифрової трансформації України у найбільш перспективних сферах [2].

З підписанням Угоди про асоціацію з ЄС Україна взяла зобов'язання адаптувати існуючі національні програми та нормативи до стандартів, які існують у країнах ЄС. Програма партнерства з міжнародними та європейськими ініціативами з розвитку Індустрії 4.0 відкриває для України можливість участі у міжнародних проєктах Горизонт 2020, EMPIR, Factories of the Future, Ear plus та ін.

Проєкт національної стратегії Індустрії 4.0, розроблений групою експертів від Асоціації Підприємств Промислової Автоматизації України та руху 4.0, вийшов у грудні 2018 року. Сьогодні він

перебуває на розгляді в КМУ та доступний для експертного обговорення. Стратегія 4.0 — програмний документ розвитку Індустрії 4.0 в Україні, який орієнтує основних зацікавлених сторін цього напрямку за головними пріоритетами та ініціативами 4.0 на 3-річний період. Стратегію розроблено за класичним принципом: від аналітики стану до визначення перспективних поглядів, ключових показників ефективності, стратегічних напрямів розвитку та конкретних проєктів, що їх реалізують.

Одним із таких напрямків є поняття цифрового суспільства, що відображає впровадження та інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у виробництво та оцифровування сучасних технологічних розробок. Дигіталізація корегує суспільство, економіку та галузі, прискорює сучасні технологічні розробки. Мобільні та “хмарні” технології (cloud technology), “великі дані” та Інтернет речей (IoT) пропонують нові можливості, стимулюючи зростання, поліпшення життя та ефективності праці громадян у багатьох сферах, включаючи медичні послуги, транспорт, енергетику, сільське господарство, виробництво, роздрібну торгівлю та державне управління.

Розвиток цивілізації тісно пов’язаний із розвитком промисловості, технологій і науки, який є неможливим без розвитку метрології. Останні три століття розвиток цивілізації знаменувався стрімким розвитком промисловості та індустріальними революціями. Умовно визначено чотири індустріальні революції. Етапи промислового розвитку з моменту використання енергії води і пари до розвитку електроніки та інформаційних технологій у кінці 20 століття вимагали і супроводжувалися розвитком відповідних методів та засобів вимірювань і метрологічного забезпечення. Остання промислова революція (Індустрія 4.0) являє собою інтеграцію інтелектуальних виробничих систем та передових інформаційних технологій і, як наслідок, розвиток нових методів метрологічного забезпечення процесу виробництва. Індустрія 4.0 ототожнюється з появою кіберфізичних систем та оцифровуванням виробництв і промисловості.

Проєкт національної стратегії Індустрії 4.0 містить концептуальні положення та пропозиції з дигіталізації у ключових секторах промисловості та енергетики, серед яких створення нових програмних продуктів та їх застосування посідає чи не найголовніше місце [3].

2. Індустрія 4.0 та дигіталізація

Проєкт національної стратегії Індустрії 4.0 визначає 7 найбільш перспективних напрямків для розвитку Індустрії 4.0 в Україні: машинобудування, військово-промисловий комплекс, аерокосмічна галузь, комплексний інжиніринг, створення нових матеріалів, технології для альтернативної енергетики та інформаційно-комунікаційні технології.

Одним з нових та перспективних напрямків дигіталізації в Індустрії 4.0 є адитивне виробництво, тобто процес виготовлення фізичних об’єктів за допомогою 3D-моделювання та друку. Адитивне виробництво (AB) — процес створення монолітних тривимірних об’єктів практично будь-якої геометричної форми на основі цифрової моделі. AB ґрунтується на концепції побудови об’єкта шляхом послідовного нанесення шарів матеріалу, які повторюють контури тривимірної моделі об’єкта. Таким чином, об’єкт будується дискретною кількістю шарів.

Існує багато способів класифікації технологій AB. Популярним є підхід до класифікації відповідно до базового напрямку технології: чи використовує цей процес лазерне випромінювання, використовується метал чи полімер, застосовується спікання часток матеріалу чи плавлення будівного матеріалу. Інший підхід до цього — класифікація залежно від типу матеріалу, з якого друкується об’єкт. ASTM International (American Society for Testing and Materials) — американська міжнародна організація, що розробляє та видає добровільні стандарти для матеріалів, продуктів, систем та послуг, визначила сім основних напрямків адитивного виробництва, які складаються з декількох технологій, що розвиваються та вдосконалюються. Крім того, набувають розвитку багатокомпонентні гібридні технології, які поєднують елементи процесу, визначені в стандарті ASTM F2792 [4]. Відповідно до ASTM F2792, ці напрямки різняться за принципом побудови тривимірного об’єкта, типу матеріалу, що використовується, та шляхами подальшого використання [5].

Для побудови дискретних шарів для тривимірного друку використовується відповідне програмне забезпечення — так звана програма слайсер. Слайсер — це програмне забезпечення з відкритим вихідним цифровим кодом, який означає, що весь вміст програми є відкритим для громадськості і, відповідно, відкритим для потенційного розвитку.

Адитивне виробництво є новою ключовою технологією при вирішенні завдань цифрової економіки, Індустрії 4.0 та дигіталізації суспільства. Відповідно до Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 рр., Індустрія 4.0 є наступним етапом дигіталізації виробництв та промисловості, на якому головну роль відіграють такі технології та концепти, як Інтернет речей, “великі дані” (big data), “предикативна аналітика”, “хмарні” технології, штучний інтелект та адитивне виробництво [1].

Реалізація національної стратегії Індустрії 4.0 тісно пов’язана з розвитком промисловості, технологій і науки, які неможливі без розвитку метрології. Таким чином, науково-прикладна технічна проблема необхідності системних досліджень, пов’язаних із пошуком найбільш зручних методів при побудові національних еталонів України відповідно до концепції дигіталізації, є актуальною.

3. Чисельно-аналітичні методи для Індустрії 4.0

При реалізації сучасних науково-технічних прикладних задач важливе місце посідають цифровий дизайн, моделювання та адитивне виробництво. Вирішення цих задач можливе з використанням широкого спектра диференціальних рівнянь, на яких ґрунтуються сучасні чисельно-аналітичні методи [6, 7].

Найбільш поширеними чисельними методами на сьогодні є метод скінченних елементів, метод скінченних різниць, метод граничних елементів або метод граничних інтегральних рівнянь [8–10].

Метод скінченних елементів (МСЕ, the FEM (*finite element method*)) ґрунтується на розбитті досліджуваного тіла на ряд підобластей простої геометрії, званих скінченними елементами. В основі чисельної моделі лежать варіаційні принципи механіки, найчастіше принцип мінімуму потенційної енергії. Ясність ідеології і широкі практичні можливості методу пояснюють його популярність серед дослідників. При вирішенні комплексних завдань методом кінцевих елементів можлива досить складна геометрія об'єкта дослідження (стрижнева або тонкостінна просторова система, об'ємне тіло і т. д., досить точно апроксимується кінцево-елементною моделлю). Порівняно легко враховуються умови закріплення конструкції та її нелінійні властивості (геометрична, фізична і конструктивна нелінійність). Однак реалізація МСЕ пов'язана з необхідністю розбиття на кінцеві елементи (дискретизацію) досліджуваного об'єкта, що в свою чергу призводить до необхідності вирішення систем алгебраїчних рівнянь високих порядків.

Метод скінченних різниць (МСР, the FDM (*finite difference method*)) пов'язаний із безпосередньою реалізацією оператора різниць – відповідного вихідного диференціального рівняння задачі. Цей підхід має одну суттєву властивість: він дозволяє легко поширити методику на рішення нелінійних задач і не вимагає складних математичних перетворень. На жаль, точність одержуваних результатів виявляється невисокою.

Метод граничних елементів (МГЕ, the BEM (*boundary element method*)) ґрунтується на вихідній системі диференціальних рівнянь просторової задачі теорії пружності, яка перетворюється в граничне інтегральне рівняння відносно невідомих поверхневих переміщень і напружень. Для чисельного рішення цього рівняння вся поверхня тіла розбивається на ряд елементів, у межах яких переміщення і напруження інтерполюються за допомогою поліноміальних функцій через їх значення у вузлових точках. МГЕ призводить до системи рівнянь, що містить значення шуканих функцій тільки на кордоні розглянутої області, а не всередині. Така система, природно, меншого порядку, ніж при використанні МСЕ. У МГЕ дискретизуються лише граничні поверхні розраховуваного

об'єкта, а не весь об'єкт, тому загальна розмірність розв'язуваної задачі в МГЕ на одиницю нижча, ніж у МСЕ. МГЕ особливо ефективний для областей, що містять частину кордонів, спрямовуються в нескінченність. Для побудови рівнянь МГЕ потрібно мати аналітичний розв'язок задачі (наприклад, теорії пружності) для нескінченної області, відповідно до одиничного впливу (зосереджена сила або пара сил), заданого всередині області. Це рішення називають функцією Гріна або функцією впливу. Метод граничних елементів має певні недоліки. Так, для побудови граничних елементів треба мати функцію Гріна для відповідної області. Такі функції поки що знайдені не для всіх можливих областей. Окремі підобласті об'єкта, що розраховується, повинні бути однорідними [11, 12].

Таким чином, метод чисельного розрахунку та аналізу, що отримав найбільшу реалізацію в інженерних пакетах автоматизованого проектування та розрахунку, є методом скінченних елементів.

Велику кількість (понад 250) розроблених систем автоматизованого проектування можна умовно розділити за цільовим призначенням на три класи:

- CAD (computer-aided design/drafting) — засоби автоматизованого проектування креслень і геометричного моделювання;
- CAM (computer-aided manufacturing) — засоби автоматизованої технологічної підготовки виробництва;
- CAE (computer-aided engineering) — засоби автоматизації інженерних обчислень і аналізу отриманих рішень [6, 13, 14].

З точки зору побудови математичної моделі та проведення чисельного розрахунку, найбільш цікавими є CAE-системи. Аналіз, що виконується CAE-системою, в загальному випадку можна розділити на три етапи:

- побудова геометричної моделі (виконує так званий препроцесор);
- аналіз моделі за допомогою спеціалізованого вирішувача (виконує препроцесор);
- аналіз і візуалізація результатів розрахунків математичної моделі (виконує постпроцесор).

Програмні комплекси скінченно-елементного аналізу включають до себе бібліотеки скінченних елементів, вирішувач, препроцесор і постпроцесор. Бібліотеки скінченних елементів (SE) включають до себе матриці жорсткості SE. Проте МСЕ має деякі обмеження, пов'язані з необхідністю побудови сітки скінченних елементів на об'єкті моделювання. Існуючі методи безсіткового рішення фізичних процесів дозволяють уникнути побудови скінченно-елементної сітки без зниження точності отриманих рішень [15–17]. Основним недоліком МСЕ є побудова скінченно-елементної сітки тривимірних об'єктів складної конфігурації з нерегулярною фізичною структурою та генерація сітки при динамічному аналізі. У порівнянні з "сітко-

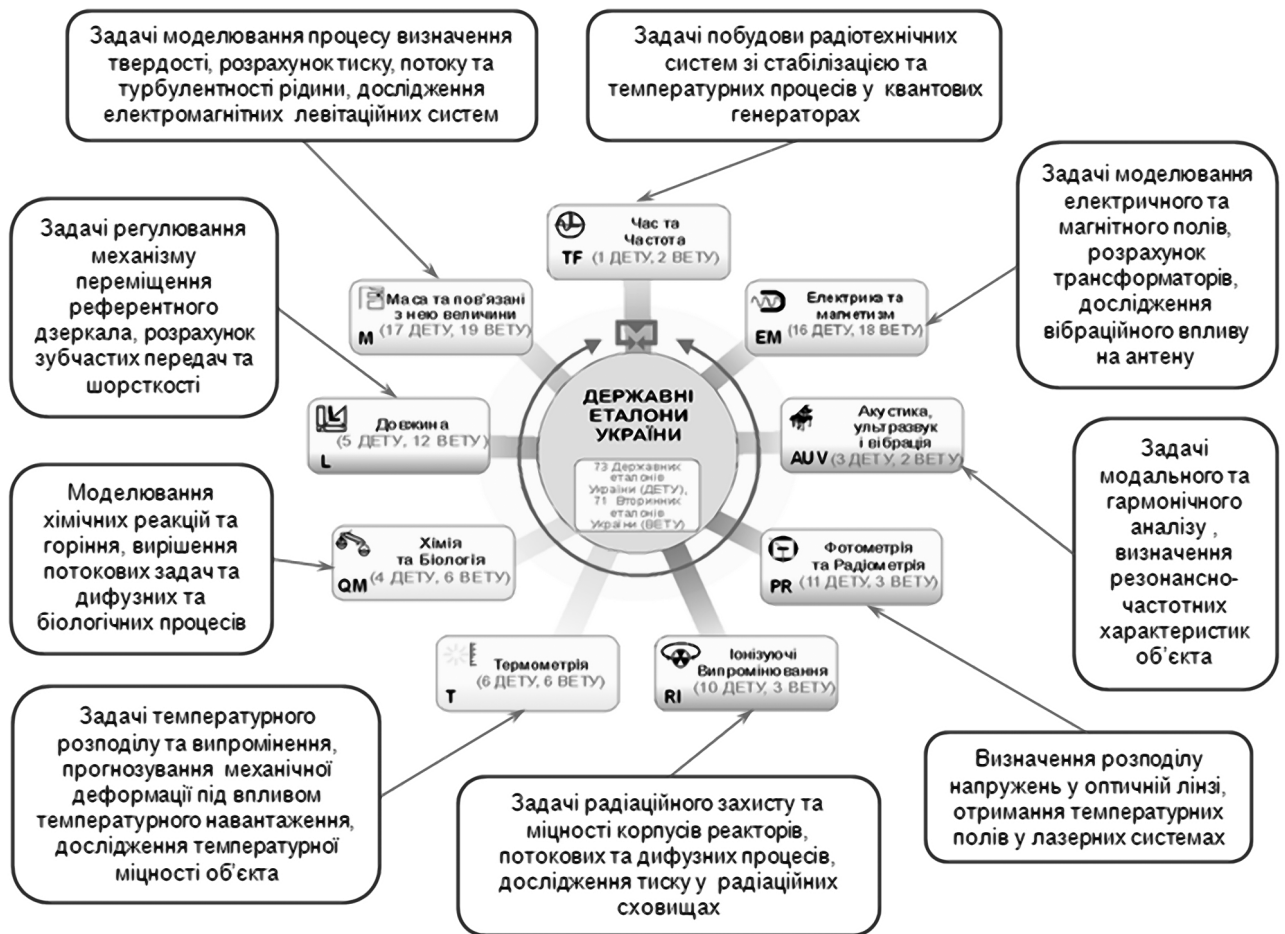


Рис. 1. Наукові та інженерні задачі, відповідно до видів вимірювання

вим” методом, безсіткові методи мають більший час обчислення об’єкта при однаковій кількості вузлів, однак дають більшу точність. Розрахунковий час пояснюється більшою кількістю вузлів інтегрування, Глобальна система рівнянь має більшу кількість ненульових елементів, крім того, у кожному вузлі інтегрування треба виконати розрахунки для визначення значення функції форми. Безсіткові методи мають відносну легкість при побудові вузлів, не залежать від якості сітки та мають можливість застосовуватися в задачах із багаторазовою схемою побудування сітки. Ці властивості безсіткового методу дозволяють вирішувати задачі моделювання великих деформацій, деформаційні задачі руйнування з великою кількістю уламків та аналізувати тріщини.

Між системами CAE і CAD існує інтеграція, передбачено експорт та імпорт геометричних моделей. Препроцесор подає геометричну модель об’єкта в сітковому вигляді. Вирішувач збирає моделі окремих КЕ в загальну систему алгебраїчних рівнянь. Постпроцесор подає результати рішення в графічній формі. Користувач отримує кольорове відображення вихідної і деформованої форми деталі, поля напружень, потенціалів, температур, відповідно до початкових умов задачі [18].

Більшість розроблених систем використовує метод скінченних елементів для розрахунку, а також характеризується наявністю графічних засобів аналізу результатів і створення розрахункової моделі [19–22]. Для вирішення багатьох інженерних задач використовується МСЕ. Великою перевагою МСЕ перед іншими методами є швидкість обчислень, точність, програмна реалізація та функціональна повнота [6, 14, 18]. Відповідно до швидкості обчислень, точності, програмної реалізації та функціональної повноти існуючі CAD/CAM/CAE програмні пакети, що реалізують МСЕ, MCP, MGE або безсітковий метод, можна класифікувати на три рівні. До першого (нижнього) рівня відносяться пакети, що реалізують двовимірні моделі у вигляді ескізів, малюнків, креслень. До другого (середнього) рівня – програмні пакети, які мають можливість створювати тривимірні геометричні моделі за допомогою “твердотільного” моделювання. Третій (верхній) рівень програмних пакетів поєднує системи, які можуть не тільки моделювати (будувати та створювати) тривимірні об’єкти, але й виконувати розрахунки у реальному масштабі часу та з реальними геометричними розмірами об’єкта. Наукоємність існуючих програмних пакетів, складність та спектр задач, що ставляться перед ними, зростають від нижнього рівня до верхнього.

4. Наукові та інженерні задачі, що стосуються національних еталонів

Виконані в різні роки (починаючи з 1991 р.) роботи зі створення та вдосконалення державних еталонів України, а також дослідження, проведені при підготовці державних еталонів до міжнародних звірень, вимагають вирішення відповідних наукових та інженерних задач. Систематизуємо відомі наукові, фізичні та виробничі процеси для вирішення задач створення та вдосконалення національних еталонів України (рис. 1).

Виконавши системний аналіз та за умов комплексного підходу, у табл. 1 групуємо найсуттєвіші існуючі задачі при створенні та вдосконаленні національних еталонів України.

Таблиця 1

Перелік найсуттєвіших задач

Тип задач	Фізико-технічні особливості
Структурні	Лінійні Геометричні та матеріальні нелінійності Контактні Статичні Динамічні Перехідні, частотні, гармонічні, спектральні Вільні вібраційні Оптимізаційні для топології
Потокові	Стаціонарний або перехідний режим Стисливість або нестисливість Ламінарність або турбулентність Ньютонівський або не Ньютонівський Вільний, примусовий Змішаний конвекційний обмін Радіаційна передача тепла "поверхня-поверхня"
Термічні	Стаціонарний або перехідний режим Провідність Конвекція Радіація Фазові зміни
Акустичні	Ближня або дальня зони Гармонічні, перехідні Модальний аналіз Зв'язана рідина або структура
Мульти-фізичні	Тепломеханічні Теплоелектричні Теплоелектричні структурні Електромеханічні П'єзоелектричні П'єзорезистивні Ефект Пельтьє Ефект Зеебека Ефект термопар Симулятор електромеханічної схеми

CAD/CAM/CAE програмні пакети (коди програмного забезпечення) для вирішення наукових та інженерних задач можна розділити на пакети загального використання, які моделюють науковий процес або явище, програмні засоби, що використовуються для детального моделювання мікроструктурних процесів та явищ (фазові переходи, термохімічна рівновага, вирішення ідеальних газофазних систем, моделювання молекулярної динаміки молекул і твердих тіл) та програмні засоби моделювання властивостей речовин та матеріалів.

5. Сучасні коди програмного забезпечення та модельних рішень

Коди програмного забезпечення розроблені для роботи на багатоядерних комп'ютерах, що налаштовані на модельне рішення щодо конкретної фізичної системи. Складні та багатокомпонентні вимірювальні комплекси (національні еталони України) вимагають комбінації та одночасного або послідовного використання різноманітних програмних засобів та інструментів моделювання. Виникає низка додаткових питань: як поєднати програмні рішення, які коди програмного забезпечення використовувати та як підтвердити коректність розрахунків отриманих рішень.

Незалежно від спеціалізації галузей та сфер застосування, можна виділити такі типи програмних кодів: коди загального призначення, комерційні коди та власні коди (корпоративні коди) [7].

Коди загального призначення дозволяють користувачам визначати широкий спектр проблем щодо виробничих процесів. Вони вимагають дуже досвідчених користувачів. Такі коди відображають виробничі процеси в моделях, але складність моделювання та обчислення роблять їх непривабливими для використання.

Комерційні коди спеціалізуються на розрахунках та моделюванні одного процесу або явища – первинного формування, зварювання, термообробки або моделюванні потоку. Спеціалізація в цьому контексті означає найкраще пристосування до конкретних галузей наукових досліджень.

Власні коди найчастіше є вузькоспеціалізованими рішеннями для охоплення одного певного типу процесу або технологічного ланцюжка. Вони майже не мають гнучкості у вирішенні інших проблем, але можуть забезпечити чудовий результат для дуже специфічного застосування.

На сьогодні повний список доступних програмних кодів складно перерахувати. Протягом останніх років більшість постачальників програмного забезпечення почали надавати повні програмні комплекти, які включають до себе всі процедури попередньої обробки, пост-обробки та оптимізації в єдиному середовищі. За допомогою такого програмного забезпечення з'являється можливість для

Найбільш використовувані комерційні програмні коди

Найменування програмного коду	Опис програмного коду, основні можливості, задачі, які виконуються
ABAQUS	Програмний пакет розроблений для вирішення складних нелінійних проблем, великих масштабних додатків лінійної динаміки та рутинного моделювання моделей у широкому спектрі промислових застосувань. Вирішує статичні та низькошвидкісні динамічні події, де високоточні рішення для напруження є критично важливими
ANSYS (Thermal, Structural, Fluent, Maxwell, Acoustic, Multiphysics)	Пропонується широкий спектр наборів рішень для інженерного моделювання, що забезпечує доступ до практично будь-якої галузі інженерного моделювання, що вимагає процесу проектування. Містить широкі можливості фізичного моделювання, необхідні для моделювання потоку, турбулентності, теплопередачі, електричних полів та реакцій для широкого спектра промислового застосування
AVOGADRO	AVOGADRO є безкоштовним, відкритим засобом візуалізації, призначеним для використання в обчислювальній хімії, молекулярному моделюванні, біоінформатиці, матеріалознавстві та суміжних галузях.
COMSOL	Мультифізичне програмне забезпечення полегшує всі етапи процесу моделювання – визначення геометрії, сітки, визначення фізичних параметрів, вирішення, а потім візуалізації результатів
DEFORM	Це інженерне програмне забезпечення, яке дозволяє розробникам аналізувати металообробку, термічну обробку, механічну обробку та механічні процеси з'єднання
ANSYS LS-DYNA	Програма високонелінійних розрахунків LS-DYNA об'єднує традиційні методи вирішення зі зверненням матриць, спеціалізовані контактні алгоритми, безліч рівнянь стану і метод інтегрування, що дозволяє чисельно моделювати процеси формування матеріалів, аналізу аварійних зіткнень і ударів при кінцевих деформаціях, при нелінійній поведінці матеріалу і контактній взаємодії великого числа тіл. Можуть бути вирішені завдання динамічної поведінки попередньо напружених конструкцій і завдання дослідження розвантаження конструкцій, підданих великим деформаціям
NASTRAN	Мультидисциплінарна програма структурного аналізу, що використовується інженерами для виконання статичного, динамічного та термічного аналізу в лінійних та нелінійних областях, аналізу напруг, вібрацій, структурних навантажень, довговічності, передачі тепла, шуму/акустики та аеропружності
SIMTEC	Надає повний спектр аналізу скінченних елементів, який включає до себе потік рідини, охолодження і затвердіння, залишкові напруги, а також напруження, що надходять від зовнішнього навантаження, і візуалізацію результуючого спотворення
ZENCRACK	Сучасний програмний інструмент для моделювання 3D механіки руйнування. Використовує метод скінченних елементів через інтерфейси ABAQUS та ANSYS, дозволяє виконати розрахунок параметрів механіки руйнування, таких як швидкість вивільнення енергії та коефіцієнт інтенсивності напружень

аналізу цілих технологічних ланцюгів, технологічних та вимірювальних процесів [13, 19–22]. Найбільш використовувані комерційні програмні коди наведено у табл. 2.

Окрім розрахункових пакетів інженерного аналізу, результати яких можливо використовувати при виконанні наукових досліджень, існують програми моделювання, які дають оціночні дані та виконують роль програм для візуалізації фізичних процесів.

Систематизуємо інженерні програмні коди відповідно до груп національних еталонів України за видом вимірювання (рис. 2).

Індустрія сучасного програмного забезпечення ідентифікує, задовольняє та передбачає

потреби користувачів програмних пакетів інженерного аналізу. Існуючі програмні пакети відповідають потребам користувача і стають практичною мотивацією для подальших наукових досліджень та вдосконалення існуючих апаратних комплексів.

6. Висновки

Сучасні національні еталони являють собою складні технічні системи, що komponуються з пов'язаних елементів, які здійснюють певний вплив один на одного. Хоча еталонні системи і виступають як єдине ціле, але кожна з частин має своє функціональне призначення. Проектування всіх компонентів частин еталонів

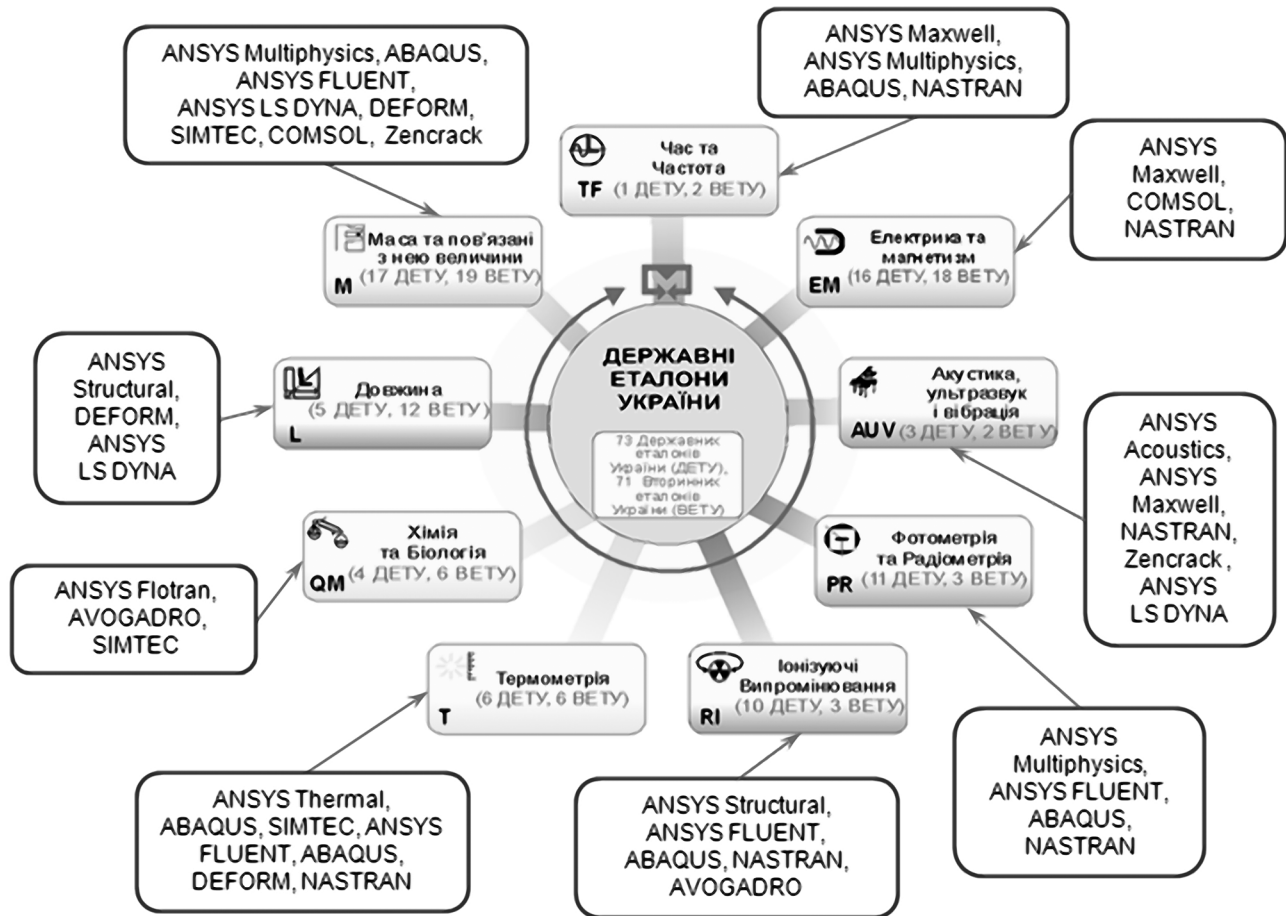


Рис. 2. CAD/CAM/CAE програмні пакети, відповідно до видів вимірювання

має здійснюватися відповідно до концепції дигіталізації, тобто за допомогою розрахункових пакетів цифрового моделювання. Більшість існуючих програмних комплексів комп'ютерного інжинірингу дозволяють якомога повніше охопити весь процес проектування сучасних еталонних систем.

Як перспективний напрям подальших досліджень передбачається застосування методу скінченних елементів та програмних пакетів інженерного аналізу для підвищення точності результатів вимірювання з використанням національних еталонів України та дослідження складових бюджету невизначеності результатів вимірювання.

Індустрія 4.0 и дигитализация национальных эталонов

В.В. Скляр, А.В. Прокопов

Национальный научный центр "Институт метрологии", ул. Мироносицкая, 42, 61002, Харьков, Украина
vladimir.skliarov@gmail.com

Аннотация

Рассмотрены вопросы применения современных цифровых программных технологий при создании и совершенствовании национальных эталонов. Приведена важная роль метрологии для реализации одобренной правительством Концепции развития цифровой экономики и общества Украины на 2018–2020 гг. Цифровая экономика базируется на информационно-коммуникационных и цифровых технологиях, стремительное развитие и распространение которых уже сегодня влияют на традиционную экономику, трансформируя ее от ресурсопотребляемой к экономике, которая создает ресурсы. Оцифровка (дигитализация) является неотъемлемой составной частью построения современных измерительных процессов. Непрерывное развитие мировых технологий и далеко идущие решения 26-й Генеральной конференции по мерам и весам побуждают к соответствующему развитию и совершенствованию национальных эталонов Украины, поиску новых путей в построении и исследованию составляющих частей измерительных комплексов.

Построение и совершенствование современных измерительных комплексов и систем невозможны без применения CAD/CAM/CAE программных инженерных пакетов. Исследования, расчеты и анализ составляющих компонентов стандартов позволяют определить и решить проблемные вопросы построения на этапе “проект”, сэкономить время и материальные ресурсы. Без использования моделирования и элементов симуляции сделать это практически невозможно.

Целью работы является анализ и обоснование принципов использования компьютерного моделирования при построении и совершенствовании национальных эталонов. Приведена связь CAD/CAM/CAE программных пакетов с группами национальных эталонов в соответствии с их международной классификацией по видам измерений.

Ключевые слова: цифровая экономика; дигитализация; программные пакеты; Индустрия 4.0; национальные эталоны.

Industry 4.0 and digitalization of the national measurement standards

V. Skliarov, O. Prokopov

National Scientific Centre “Institute of Metrology”, Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine
vladimir.skliarov@gmail.com

Abstract

The article considers the use of modern digital software technologies in the creation and improvement of the national measurement standards. The important role of metrology for the implementation of the Concept of the development of the digital economy and society of Ukraine approved by the Government for 2018–2020 is discussed. The digital economy is based on information and communication and digital technologies, the rapid development and distribution of which already affects the traditional economy, transforming it from a resource-consumable, to an economy that creates resources. Digitization is an integral part of the construction of modern measuring processes. The continuous development of world technologies and far-reaching decisions of the 26th General Conference on Weights and Measures encourage the development and improvement of the national measurement standards of Ukraine, the search for new ways to build and research the components of measuring complexes.

The construction and improvement of modern measuring systems and systems are impossible without the use of CAD/CAM CAE software engineering packages. Research, calculations and analysis of the constituent components of the measurement standards make it possible to identify and solve problematic issues of construction at the “project” stage, to save time and material resources. Without the use of modeling and simulation elements, this is almost impossible to do.

The above studies suggest a number of calculations to assess the dynamic characteristics, strength, reliability and economic optimality. Modern computer technologies make it possible to simulate the functioning of any devices and analyze their behavior already at the stage of preparing design solutions. Thus, the analysis of possible modifications allows to choose the most effective of them, minimizes costly research and testing of prototypes.

The purpose of the work is to analyze and substantiate the principles of using computer modeling in the construction and improvement of the national measurement standards. The paper presents the communication of CAD/CAM/CAE software packages with groups of the national measurement standards, in accordance with their international classification by type of measurement.

Keywords: digital economy; digitalization; Industry 4.0; software packages; national measurement standards.

Список літератури

1. Цифрова аженда України. Постанова КМУ від січня 2018 р. URL: <https://strategy.uifuture.org/kraina-z-rozvinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html>
2. Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018–2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%80>
3. Українська стратегія Індустрії 4.0 — 7 напрямів розвитку. URL: <https://industry4-0-ukraine.com.ua/2019/01/02/ukrainska-strategiya-industrii-4-0-7-napriankiv-rozvtuku/>

4. ASTM F2792–12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. URL: www.astm.org
5. Neyezhnikov P.I., Skliarov V.V., Prokopov A.V. Analysis of the capability of the national measurement standards of Ukraine for assurance of traceability in the field of additive manufacturing. *Український метрологічний журнал — Ukrainian Metrological Journal*. 2018. № 1. С. 22–29. doi: 10.24027/2306–7039.1.2018.134056
6. Ли К. Основы САПР (CAD, CAM, CAE). Санкт-Петербург: Питер, 2004. 560 с.
7. Schmitz G.J., Prah U. Handbook of Software Solutions for ICME. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2016. 632 p.
8. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. Москва: Мир, 1975. 541 с.
9. Метод конечных элементов в механике твердых тел. Под ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. Киев: Вища школа; Лейпциг: Фех Фахбухверлаг, 1982. 420 с.
10. Бенержи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках. Пер. с англ. Москва: Мир, 1984. 494 с.
11. URL: https://studme.org/54926/tovarovedenie/metod_granichnyh_elementov
12. URL: <http://masters.donntu.org/2000/fvti/sugonyak/du/mge.htm>
13. Киричевский В.В., Гоменюк С.И., Гребенюк С.Н., Киричевский Р.В. Развитие метода конечных элементов и его применение в САПР. *Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки*. 2006. № 1. С. 38–56.
14. Козлова О.С., Гоменюк С.И. Современные тенденции развития САПР в механике. *Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки*. 2014. № 1. С. 38–51.
15. Колодяжный В.М., Лисина О.Ю. Бессеточные методы в задачах моделирования физических процессов. *Проблемы машиностроения*. 2010. Т. 13. № 3. С. 67–74.
16. Лукьянов А.А., Пеньков В.Б. Моделирование деформирования твердого тела с использованием бессеточных методов. *Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия*. 2007. № 6(56). С. 62–70.
17. Belytschko T., Krondauz Y., Organ D., Fleming M., Ktysl P. Meshless methods: an overview and recent developments. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, vol. 139, issues 1–4, pp. 3–47.
18. Иванов С.Е. Интеллектуальные программные комплексы для технической и технологической подготовки производства. Ч. 5. Системы инженерного расчета и анализа деталей и сборочных единиц. Под ред. Д.Д. Куликова. Учеб.-метод. пособие. Санкт-Петербург: ИТМО, 2011. 48 с.
19. Павлов С. САЕ — технологии в 2016 году: обзор достижений и анализ рынка. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2017. № 6(114). URL: www.modlab.lv/publications/2017/SP_2017_CAE.pdf
20. Синецкий Т.В. Обзор CAD/CAM/CAE-систем. URL: <http://www.cad.dp.ua/obzors/obzor-cad.php>
21. Селяков М.Ю. Отечественные и зарубежные CAD/CAM системы. *Успехи современного естествознания*. 2011. № 7. С. 193–197.
22. Чумаченко Е.Н., Полякова Т.В., Аксенов С.А., Бобер С.А., Логашина И.В., Корзо В.Н., Ерохина О.С. Математическое моделирование в нелинейной механике (обзор программных комплексов для решения задач моделирования сложных систем). Москва: Институт Космических исследований РАН, 2009. 23 с.

References

1. Digital agenda of Ukraine. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine (CMU) from January 2018. Available at: <https://strategy.uifuture.org/kraina-z-rozvinutoyu-cifrovoyu-ekonomikoyu.html>
2. On approval of the Concept of development of the digital economy and society of Ukraine for 2018–2020 and approval of the Plan of measures for its implementation. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2018-%D1%8>
3. Ukrainian strategy of Industry 4.0 — 7 directions of development. Available at: <https://industry4-0-ukraine.com.ua/2019/01/02/ukrainian-strategiya-industrii-4-0-7-napriankiv-rozvitku/>
4. ASTM F2792–12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012. Available at: www.astm.org
5. Neyezhnikov P.I., Skliarov V.V., Prokopov A.V. Analysis of the capability of the national measurement standards of Ukraine for assurance of traceability in the field of additive manufacturing. *Ukrainian Metrological Journal*, 2018, no. 1, pp. 22–29. doi: 10.24027/2306–7039.1.2018.134056
6. Lee K. Osnovy SAPR (CAD, CAM, CAE) [Principles of CAD (CAD, CAM, CAE) Systems]. St. Petersburg, Piter, 2004. 560 p. (in Russian).
7. Schmitz G.J., Prah U. Handbook of Software Solutions for ICME. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2016. 632 p.
8. Zenkevich O.S. Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in technology]. Moscow, Mir, 1975. 541 p. (in Russian).
9. Metod konechnykh elementov v mekhanike tverdykh tel [The finite element method in the mechanics of solids]. Edited by A.S. Sakharov and I. Altenbakh. Kiev, Vishcha shkola; Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1982. 420 p. (in Russian).

10. Banerjee P., Butterfield R. Metod granichnykh elementov v prikladnykh naukakh [Translation from English. Boundary element methods in engineering science]. Moscow, Mir, 1984. 494 p. (in Russian).
11. Available at: https://studme.org/54926/tovarovedenie/metod_granichnykh_elementov
12. Available at: <http://masters.donntu.org/2000/fvti/sugonyak/du/mge.htm>
13. Kirichevskiy V.V., Gomenyuk S.I., Grebenyuk S.N., Kirichevskiy R.V. Razvitiye metoda konechnykh elementov i yego primeneniye v SAPR [Development of the finite element method and its application in CAD]. *Visnyk of Zaporizhzhya National University. Physical and mathematical Sciences*, 2006, no. 1, pp. 38–56 (in Russian).
14. Kozlova O.S., Gomenyuk S.I. Sovremennyye tendentsii razvitiya SAPR v mekhanike [Modern trends of CAD development in mechanics]. *Visnyk of Zaporizhzhya National University. Physical and mathematical Sciences*, 2014, no. 1, pp. 38–51 (in Russian).
15. Kolodyazhnyy V.M., Lisina O. Yu. Bessetochnyye metody v zadachakh modelirovaniya fizicheskikh protsessov [Meshless methods in modeling problems of physical processes]. *Problemy mashinostroyeniya — Journal of Mechanical Engineering*, 2010, vol. 13, no. 3, pp. 67–74 (in Russian).
16. Lukyanov A.A., Penkov V.B. Modelirovaniye deformirovaniya tverdogo tela s ispolzovaniyem bessetochnykh metodov [Modeling the deformation of a solid using meshless methods]. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2007, no. 6 (56), pp. 62–70 (in Russian).
17. Belytschko T., Krongauz Y., Organ D., Fleming M., Ktysl P. Meshless methods: an overview and recent developments. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, vol. 139, issues 1–4, pp. 3–47.
18. Ivanov S.E. Intellektualnyye programmnyye komplekxy dlya tekhnicheskoy i tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva. Ch. 5. Sistemy inzhenernogo rascheta i analiza detaley i sborochnykh yedynits [Intelligent software systems for technical and technological preparation of production. Part 5. Systems of engineering calculation and analysis of parts and assembly units]. Edited by D.D. Kulikov. Study guide. St. Petersburg, ITMO, 2011. 48 p. (in Russian).
19. Pavlov S. CAE-tekhnologii v 2016 godu: obzor dostizheniy i analiz rynka [CAE technology in 2016: review of achievements and market analysis]. *CAD/CAM/CAE Observer*. 2017, no. 6(114). Available at: www.modlab.lv/publications/2017/SP_2017_CAE.pdf
20. Sineokiy T.V. Obzor CAD/CAM/CAE-sistem [Review of CAD/CAM/CAE systems]. Available at: <http://www.cad.dp.ua/obzors/obzor-cad.php>
21. Selyakov M. Yu. Otechestvennyye i zarubezhnyye CAD/SAM sistemy [Domestic and foreign CAD/CAM systems]. *Advances in Current Natural Sciences*, 2011, no. 7, pp. 193–197 (in Russian).
22. Chumachenko Ye.N., Polyakova T.V., Akse-nov S.A., Bober S.A., Logashina I.V., Kor-zo V.N., Yerokhina O.S. Matematicheskoye modelirovaniye v nelineynoy mekhanike (obzor programmnykh kompleksov dlya resheniya zadach modelirovaniya slozhnykh sistem) [Mathematical modeling in nonlinear mechanics (a review of software systems for solving problems of modeling complex systems)]. Moscow, Russian Space Research Institute of RAS, 2009. 23 p. (in Russian).