

## Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

**Метрологія** – це наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення необхідної точності.

У філософському аспекті вимірювання є універсальним методом пізнання фізичних явищ і процесів. Це особливо підкреслює значимість метрології серед інших наук, яка водночас тісно переплітається з ними та обслуговує їх.

В технічних (промислових) вимірюваннях параметрів технологічних процесів метрологія слугує основою для забезпечення якості виготовлюваної продукції, товарів та надаваних послуг. З огляду на це вона є одним із центральних моментів науково-технічного забезпечення впровадження систем четвертої технічної революції «**Промисловість 4.0**».

Терміном «**Промисловість 4.0**» означається сучасна тенденція автоматизації та обміну даними в технологіях виробництва. Вона включає в себе кібер-фізичні системи, Інтернет речей, хмарні обчислення та пізнавальні обчислення.



взаємодіють на різних часових та просторових рівнях та можуть мати різні, відмінні одна від одної моделі поведінки та взаємодіяти одна з одною різними шляхами, які можуть змінюватися в залежності від контексту. Прикладами кіберфізичних систем можна вважати розумні енергосистеми, безпілотні автомобільні системи, автоматизовані системи керування, робототехнічні системи, самокеровані літальні апарати.



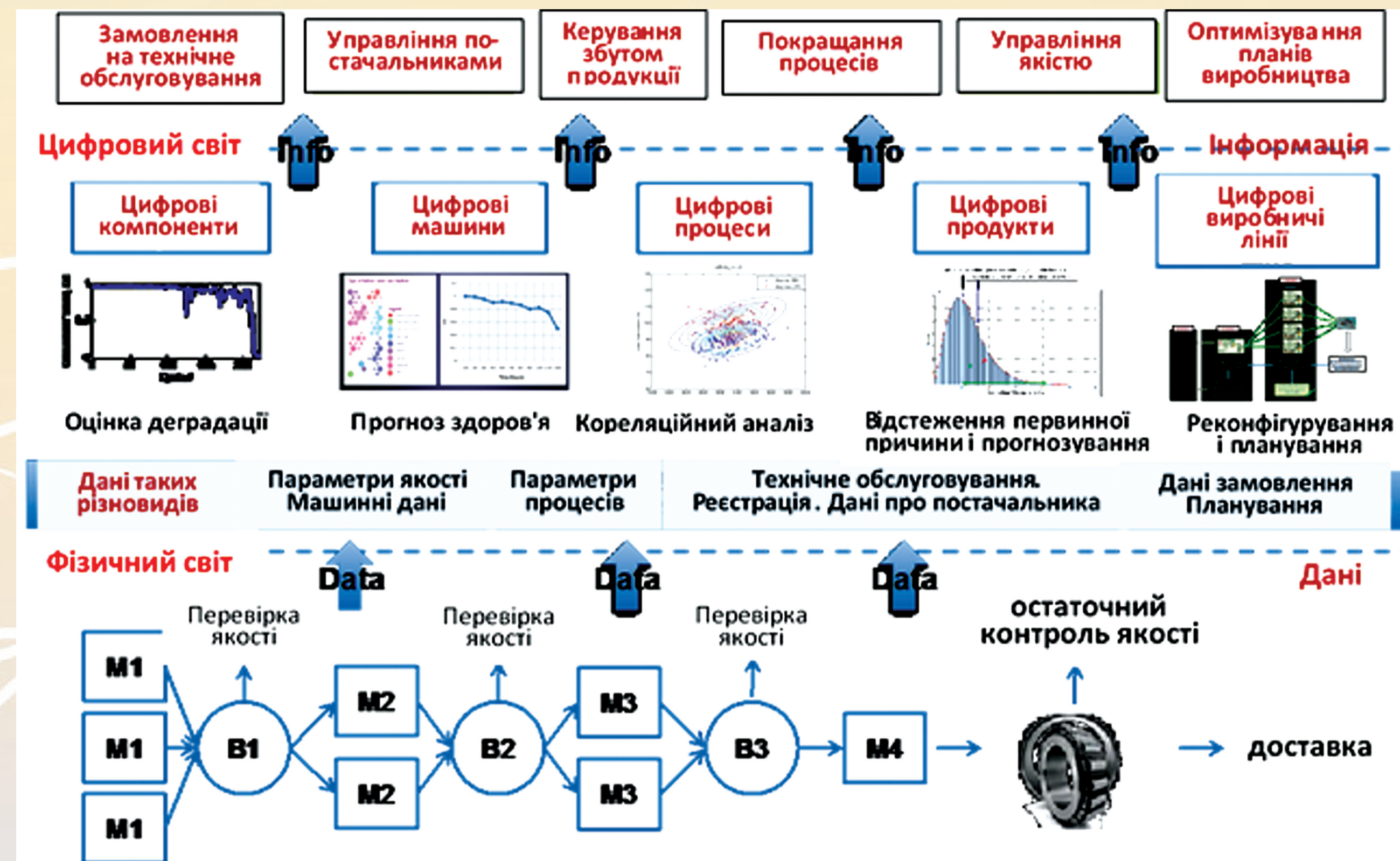
«**Інтернет речей**» (англ. *Internet of Things, IoT*) – концепція мережі, що складається із взаємоз'язаних фізичних пристроїв, які мають вбудовані сенсори, а також програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати передачу і обмін даними між фізичним світом і комп'ютерними системами, за допомогою використання стандартних протоколів зв'язку. Окрім сенсорів, мережа може мати виконавчі пристрої, вбудовані у фізичні об'єкти і пов'язані між собою через дротові чи бездротові мережі. Ці взаємопов'язані пристрої мають можливість зчитування та прив'єднення в дію, функцію програмування та ідентифікації, а також дозволяють виключити необхідність участі людини, за рахунок використання інтелектуальних інтерфейсів.

**Хмарні обчислення** (англ. *Cloud Computing*) – це модель забезпечення повсюдного та зручного через мережу до спільного пулу обчислювальних ресурсів, що підлягають

налаштуванню (наприклад, до комунікаційних мереж, серверів, засобів збереження даних, прикладних програм та сервісів), і які можуть бути оперативно надані та звільнені з мінімальними управлінськими затратами та зверненнями до провайдера. При використанні хмарних обчислень програмне забезпечення надається користувачеві як Інтернет-сервіс.

Основою «Промисловості 4.0» стають розумні виробництва як процеси, які використовують обладнання, підключене до Інтернету, для контролю за загальним виробничим процесом. Головна мета інтелектуального виробництва полягає у визначенні можливостей для автоматизації виробничих операцій та використання аналітичних даних для поліпшення загальної ефективності виробничого процесу. Уся інформаційна структура розумного виробництва розосереджується на двох рівнях – фізичному та цифровому (кібернетичному).

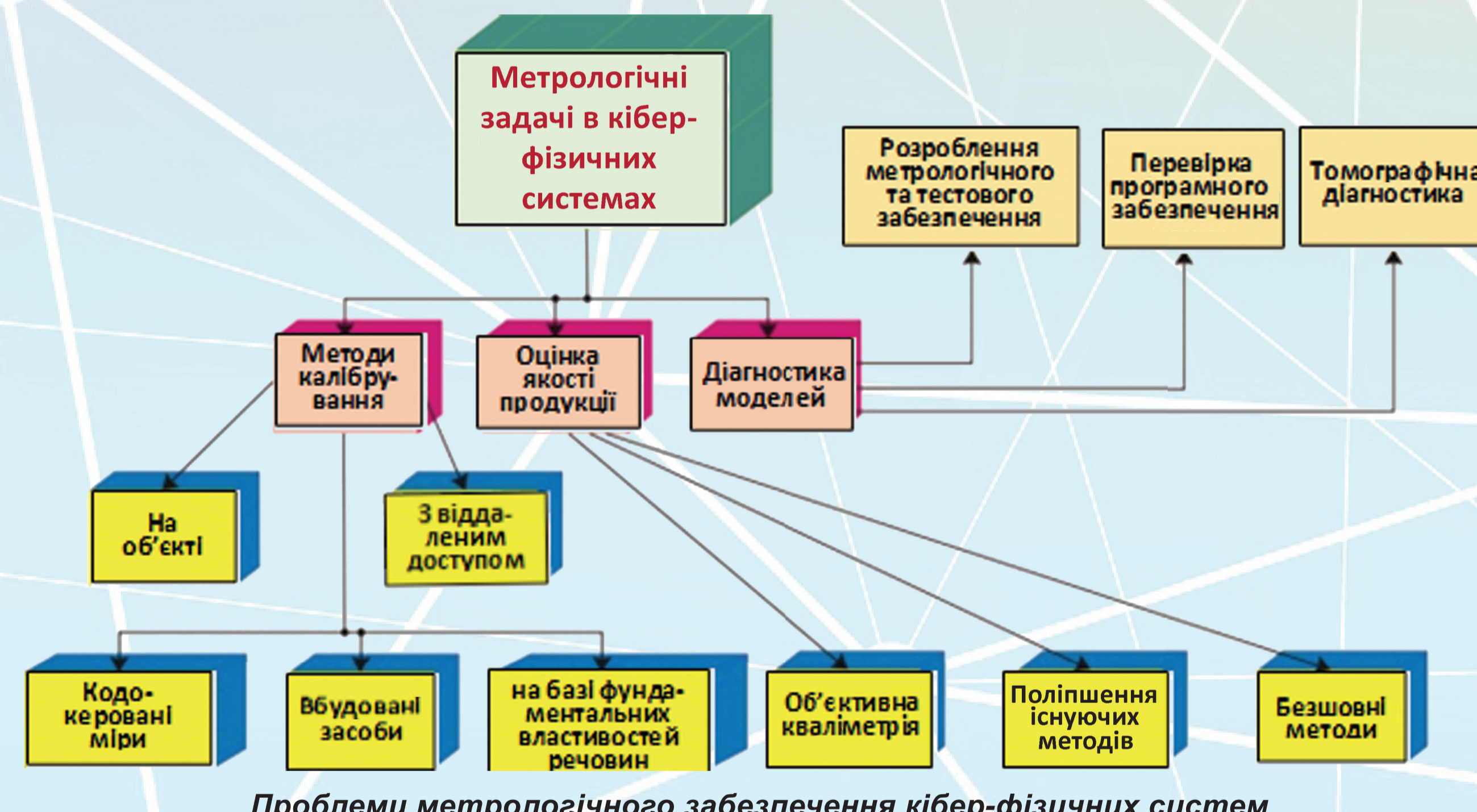
На фізичному рівні завдяки використанню пристроїв IoT в реальному масштабі часу та місцях експлуатації здійснюється постійне контролювання параметрів та управління технологічним процесом з метою виготовлення продукції, товарів та надання послуг встановленої якості.



Структурна схема автоматизованого виробництва

Реалізація інтелектуальних виробничих ініціатив включає в себе розгортання вбудованих датчиків у виробничих машинах для збору даних про їхній робочий стан та продуктивність. Аналізуючи ці дані, інженери-виробники та аналітики даних можуть шукати ознаки того, що певні частини можуть працювати неефективно, що дозволить здійснювати профілактичне обслуговування.

Актуальним завданням «Промисловості 4.0» є розроблення та виготовлення автономних роботів для гнучких «розумних» виробництв.



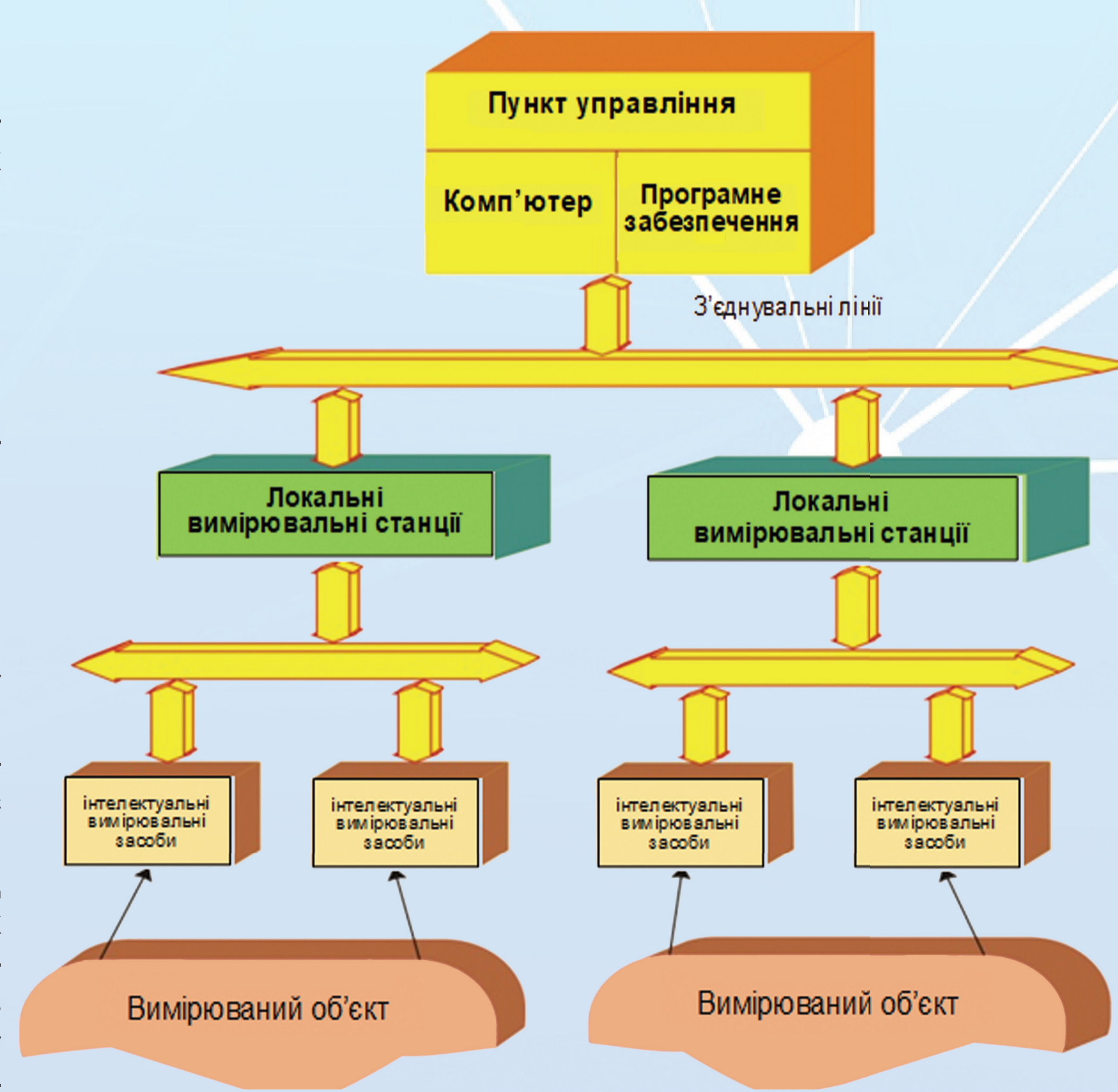
Проблеми метрологічного забезпечення кібер-фізичних систем

Періодично вимірвальні дані подаються на кібернетичний рівень для діагностування поточного стану та прогнозування деградаційних змін параметрів технологічних процесів, за результатами вимірювань та клінічних обстежень встановлення діагнозів пацієнтам в охороні здоров'я, встановлення статистичних залежностей за результатами випробувань, прогнозування і відстеження першопричин неадекватних змін параметрів процесів на фізичному рівні, переналаштування та планування змін програм виробництва тощо.

Виробники також можуть проаналізувати тенденції в даних, щоб спробувати визначити кроки у своїх процесах, коли продукція сповільнюється або неефективна у використанні матеріалів.

У результаті уся інформаційно-вимірвальна система на фізичному рівні стає реконфігурованою та розпорозованою.

Якість і надійність CPS залежить від точності вимірвального обладнання. Їх поліпшення, незалежно від типу CPS, підвищує визначальні характеристики (якість продукції в розумному виробництві, безпеку руху для інтелектуального транспорту, економію енергії в інтелектуальних будівлях тощо).



Структура розпорозених вимірвальних систем

Одним із основних метрологічних ресурсів в області підвищення точності вимірювань є усунення або принаймні мінімізування систематичних похибок. В розпорощених та реконфігурованих вимірювальних системах традиційні підходи метрологічної перевірки та оперативного контролювання вимірювальних каналів практично втрачають сенс через неможливість перевірки ліній зв'язку, якими передається вимірювальна інформація, та пристроїв її відображення, зберігання та приймання/передавання.

Сучасні нормативні рекомендують впроваджувати такі системи керування вимірюваннями, які забезпечують придатність вимірювального обладнання та методів вимірювання до використання за призначенням та заданий рівень ризиків отримання невірогідних результатів вимірювання.

Тому доцільно проведення метрологічного обслуговування вимірювальних каналів CPS безпосередньо на місці експлуатації. Для практичної реалізації цього необхідні калібратори фізичних величин з можливістю розміщення безпосередньо в технологічних об'єктах. На енергетичних об'єктах це здебільшого калібратори електричних величин. Для забезпечення заданої метрологічної надійності такі калібратори повинні перевірятися в спеціальних лабораторіях та переміщатись безпосередньо на вимірювані об'єкти. З огляду на можливі достатньо великі зміни неінформативних параметрів доквілля в таких калібраторах повинна бути передбачена низка конструктивно-технологічних, захисних та запобіжних заходів.



**Оперативне контролювання розпорощених вимірювальних систем на основі переносних калібраторів електричних величин**

Таким чином, вдосконалення і широке впровадження методів і засобів для оперативного контролювання каналів вимірювання пасивних параметрів електричних кіл на місці експлуатації в широкому діапазоні зміни неінформативних параметрів доквілля є актуальною задачею.

Аналіз показав, що одним із шляхів підвищення енергоефективності існуючих електростанцій є здійснення постійного контролю вимірювальних каналів з метою оперативного виявлення їх відхилень від встановлених значень. Це дає можливість в реальному масштабі часу виробляти коригувальні дії для підтримання заданих значень коефіцієнта корисної дії та шкідливих викидів.

З огляду на викладене кафедрою інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету «Львівська політехніка» й проводиться підготовка фахівців для забезпечення розвитку сучасного виробництва «Промисловість 4.0» за спеціалізаціями:

- Інформаційно-вимірювальні технології;
- Тестування засобів вимірювання та їх програмного забезпечення;
- Інформаційно-вимірювальні технології в робототехніці;
- Якість, стандартизація та сертифікація;

#### Фахові компетентності спеціалізації «Метрологія та вимірювальна техніка»

- здатність володіння основами об'єктно-орієнтованого програмування та перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання для наукових досліджень;
- здатність розв'язувати прикладні метрологічні задачі наукових досліджень на основі залучення сучасних методів вимірювань;
- здатність розробляти математичну модель засобу вимірювання та оцінити загальну похибку, а також здатність синтезувати структурні та принципіві схеми засобів вимірювань для наукових досліджень;
- наявність базових знань про кібер-фізичні системи, їх функціонування та специфіку метрологічних вимірювань;
- здатність дослідити електронні вузли приладів методом комп'ютерного моделювання та тестування з метою їх вдосконалення;
- здатність застосовувати на практиці основні принципи побудови інформаційно-вимірювальних комплексів та систем.

#### Фахові компетентності спеціалізації «Тестування засобів вимірювання та їх програмного забезпечення»

- здатність володіння основами об'єктно-орієнтованого програмування, метрологічної перевірки та тестування програмного забезпечення засобів вимірювання;
- здатність розробляти математичну модель засобу вимірювання та оцінити експлуатаційні можливості, наявність помилок і похибок, в тому числі у програмному забезпеченні засобів вимірювань;
- здатність застосовувати і оцінювати у метрологічному плані сучасне програмне забезпечення для опрацювання і аналізу результатів вимірювання;
- наявність базових знань про кібер-фізичні системи, їх функціонування та специфіку віддаленого доступу, захисту, включаючи тестування на безпеку і можливість несанкціонованого доступу;
- здатність забезпечити належний технологічний рівень виготовлення засобів вимірювань, розрахунку та оптимізації їх параметрів завдяки тестуванню;
- здатність дослідити електронні вузли приладів методом комп'ютерного моделювання та тестування з метою їх вдосконалення;
- здатність оцінювати характеристики похибок та непевності вимірювань засобів вимірювальної техніки;
- здатність застосовувати на практиці основні принципи побудови інформаційно-вимірювальних комплексів та систем;
- здатність оцінювати та забезпечувати безпеку тестування засобів вимірювання та їх програмного забезпечення;
- здатність оцінювати імплементацію програмного забезпечення засобів вимірювання, запозичуваного через мережі, включаючи Інтернет.

#### Фахові компетентності спеціалізації «Інформаційно-вимірювальні технології в робототехніці»

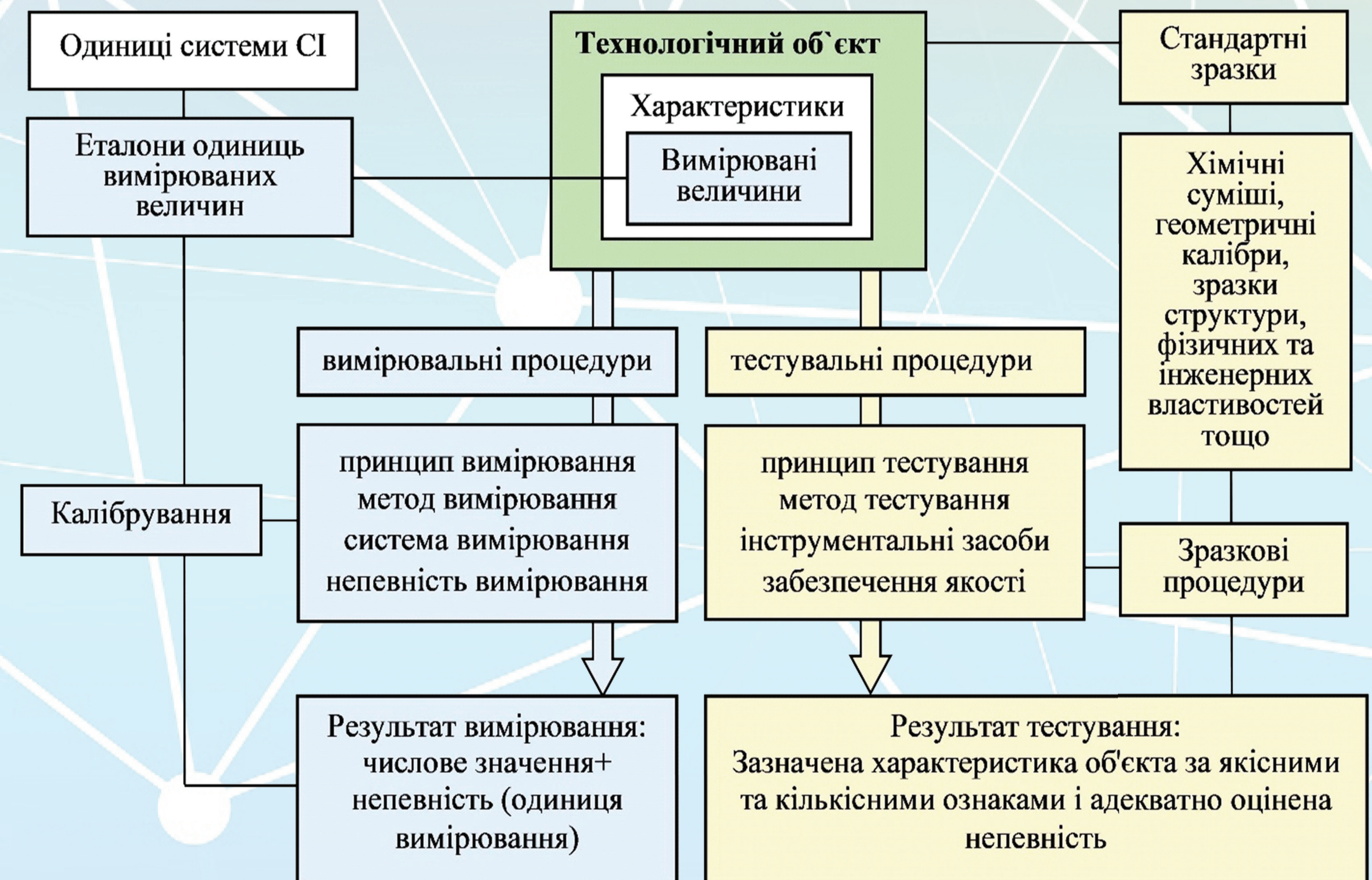
- здатність володіння основами об'єктно-орієнтованого програмування, метрологічної перевірки та тестування програмного забезпечення вимірювальних каналів в робототехніці;
- здатність розробляти математичну модель засобу вимірювання та оцінити експлуатаційні можливості, наявність помилок і похибок, в тому числі у програмному забезпеченні вимірювальних каналів;
- здатність застосовувати і оцінювати у метрологічному плані сучасне програмне забезпечення для опрацювання і аналізу результатів вимірювання;
- наявність базових знань про кібер-фізичні системи, пристроїв «Інтернету речей», їх функціонування та специфіку віддаленого доступу, захисту, включаючи перевірку безпеки і можливість несанкціонованого доступу;
- здатність забезпечити належний технологічний рівень виготовлення вимірювальних каналів робототехнічних пристроїв, розрахунку та оптимізації їх параметрів;
- здатність дослідити електронні вузли вимірювальних каналів робототехнічних пристроїв методом комп'ютерного моделювання та тестування з метою їх вдосконалення;
- здатність оцінювати характеристики похибок та непевності вимірювальних каналів робототехніки;
- здатність застосовувати на практиці основні принципи побудови інформаційно-вимірювальних комплексів та систем в робототехніці;
- здатність оцінювати та забезпечувати безпеку виготовлення і перевірки вимірювальних каналів робототехнічних пристроїв та їх програмного забезпечення;
- здатність оцінювати імплементацію програмного забезпечення вимірювальних каналів в робототехніці, запозичуваного через мережі, включаючи Інтернет.

#### Фахові компетентності спеціалізації «Якість, стандартизація та сертифікація»

- здатність володіння основами об'єктно-орієнтованого програмування та перевірки програмного забезпечення засобів вимірювання для наукових досліджень;
- здатність забезпечити належний технологічний рівень виготовлення засобів вимірювань, розрахунку та оптимізації їх параметрів;
- здатність проводити технічні і спеціальні заходи для встановлення фактів порушень прав споживачів та показників безпеки продукції щодо здоров'я, майна споживачів, доквілля і державних інтересів.
- розробляти і впроваджувати нормативні і нормативно-правові документи, а також необхідні методики в різних сферах господарювання, здійснювати контроль за їх дотриманням та нормоконтроль технічної документації.
- забезпечувати процеси сертифікації продукції, послуг та персоналу, акредитації органів сертифікації, випробувальних і калібрувальних лабораторій органів з оцінювання відповідності.

#### Спеціальність «Метрологія та вимірювальна техніка»

У науці та техніці параметри досліджуваних об'єктів характеризуються вимірюванням і тестуванням. **Вимірювання** – це процес експериментального отримання кількісних характеристик, які можна обґрунтовано віднести до властивості об'єкта або речовини. **Метрологія** – це наука про вимірювання. **Тестування** – це технічна процедура, що стосується визначення характеристик даного об'єкта або процесу, відповідно до зазначеного методу [BIPM: International Vocabulary of Metrology, 3rd edn. (BIPM, Paris 2008), available from <http://www.bipm.org/en/publications/guides/>].



**Загальна структура методології вимірювання (світло-синій колір) та випробування (світло-коричневий колір)**

#### Вимірювання

**Вимірювання** починається із встановлення виду вимірюваної величини та її приблизного значення. Специфікація вимірюваної величини вимагає знання про вид, кількісне значення та опис об'єкта, що містить цю величину. Коли вимірювана величина встановлена, повинен бути вибраний принцип і метод вимірювання, пов'язаний із еталоном вимірюваної величини, та практична реалізація процедури визначення її значення.

**Процедура вимірювання** – це детальний опис процесу вимірювання відповідно до принципу вимірювання та до певного методу вимірювання. Вона заснована на вимірювальній моделі, включаючи будь-які розрахунки для отримання результату вимірювання. Основні особливості процедури вимірювання такі [BIPM: International Vocabulary of Metrology, 3rd edn. (BIPM, Paris 2008)]:

**Принцип вимірювання** – це фізичне явище, що служить основою вимірювань.

**Метод вимірювання** – загальний опис логічно впорядкованих операцій, що використовуються під час вимірювання.

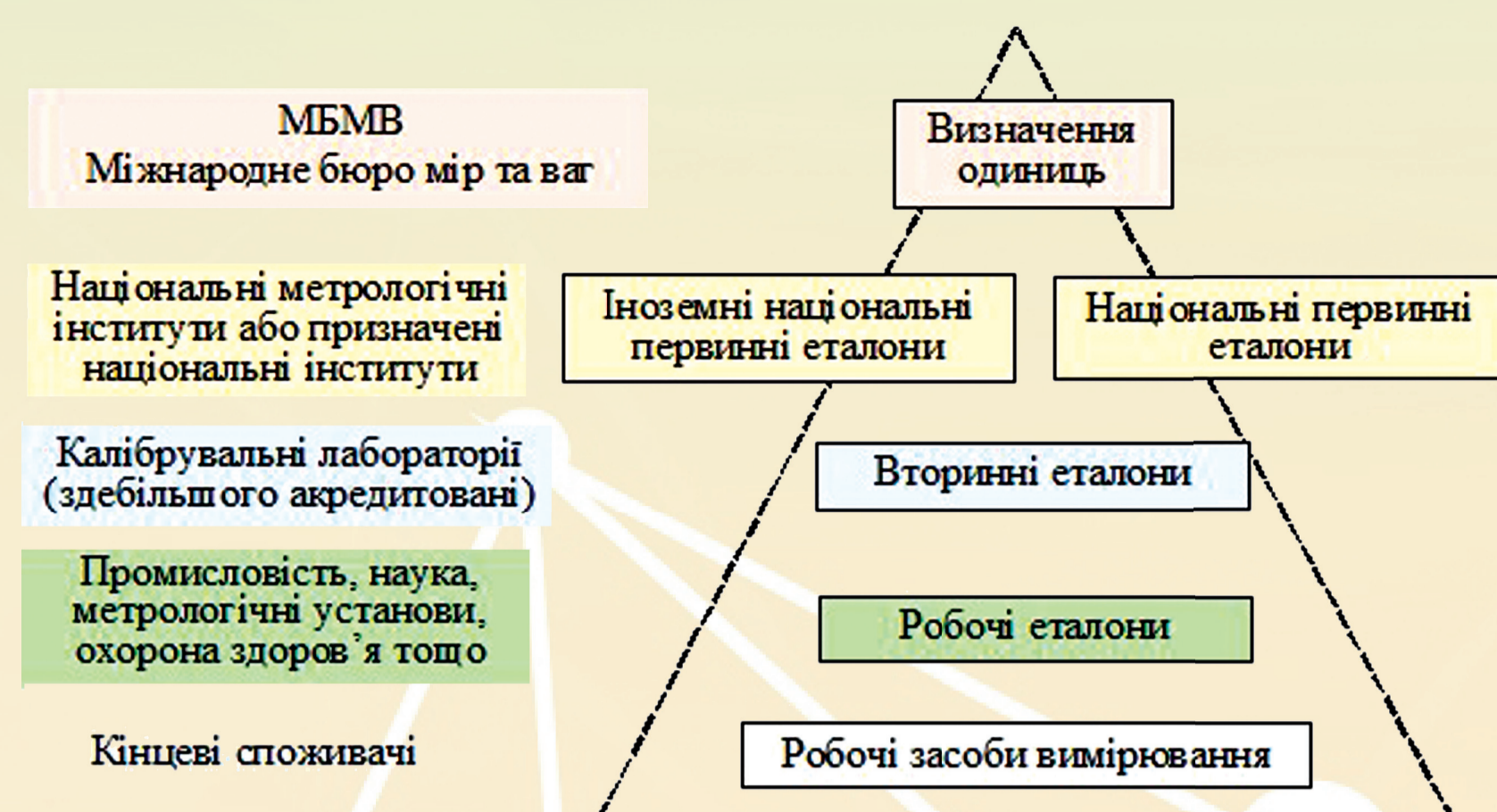
**Система вимірювання** – один або набір декількох вимірювальних приладів, а часто також інших додаткових пристроїв, в тому числі будь-які реагенти і джерела живлення, лінії зв'язку тощо, зібрані та пристосовані для отримання вимірювальної інформації.

**Непевність вимірювань** – невід'ємний параметр, що характеризує дисперсію кількісних значень в заданих інтервалах для величин вказаних видів, які відносяться до вимірюваної величини.

**Результат вимірювання** повинен бути виражений як кількісна величина разом з її непевністю, поданий в одиницях вимірюваної величини.

## Простежуваність та калібрування

Вимірне кількісне значення має бути пов'язане з посиланням через документально підтверджений безперервний ланцюг простежуваності. Ланцюг простежуваності забезпечує співвідношення результату вимірювання з пов'язаним



### Ланцюг простежуваності для вимірювань

Основним інструментом забезпечення простежуваності вимірювання є калібрування засобів вимірювання чи систем, або за допомогою зразкових матеріалів. Під час калібрування зазвичай досягається безпосереднє порівняння з еталонами вимірювання або сертифікованими зразковими матеріалами, що документується сертифікатом калібрування для засобу вимірювань.

Вираз «простежуваність до СІ» означає простежуваність вимірюваного значення до одиниць Міжнародної системи одиниць СІ. Це означає метрологічну простежуваність до дематеріалізованого еталону, оскільки одиниці системи СІ концептуально базуються на природних фундаментальних константах, наприклад, швидкості світла в означенні одиниці довжини.

Отже, характеристика вимірюваної величини повинна бути реалізована з використанням еталонів вимірювання. Якщо вимірюване значення величини є атрибутом матеріального об'єкта (наприклад, хімічна речовина, склад матеріалу або зразок властивостей матеріалу чи виготовлений продукт), то воно також є простежуваним до матеріальних еталонних зразків, необхідних для характеристики об'єкта, який має метрологічно визначене та вимірне значення величини.

## Непевність вимірювань

Непевність вимірювань, як правило, містить багато компонент, які можуть бути визначені по-різному [EUROLAB: Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation, EUROLAB Tech. Rep. No. 1/2007 (EUROLAB, Paris 2007), <http://www.eurolab.org/>]. Основним методом визначення непевності вимірювань є Довідник з вираження непевності вимірювань (GUM) [ISO: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM-1989) (International Organization for Standardization, Geneva 1995)], який спільно використовується Об'єднаним комітетом в організаціях з метрології (JCGM) (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP та OIML).

### Філософія непевності GUM:

- Результат вимірювання  $X$ , значення якого не є точно відомим, вважається стохастичною змінною з певною функцією ймовірності.
- Результат  $X$  вимірювання є оцінкою очікуваного значення  $E(X)$ .
- Стандартна непевність  $u(x)$  дорівнює квадратному кореню значень різниць  $V(X)$ .
- Оцінка непевності типу А. Математичне сподівання і дисперсія оцінюються статистичною обробкою багаторазових вимірювань.
- Оцінка непевності типу В. Математичне сподівання і дисперсія оцінюються іншими методами, ніж ті, що використовуються для оцінок непевності типу А. Найчастіше використовуваний метод полягає в тому, щоб прийняти густину розподілу ймовірності засновану на попередньому досвіді, наприклад, прямокутний розподіл, або будь-яку іншу інформацію.

### Метод оцінювання непевності заснований на філософії GUM.

- Визначити всі важливі компоненти непевності вимірювання. Є багато джерел, які можуть спричинити непевність вимірювань. Застосувати модель фактичного процесу вимірювання для ідентифікації джерел. Використовувати вимірювані величини в математичній моделі.
- Обчислити стандартну непевність кожного компонента непевності вимірювання. Кожна компонента непевності вимірювань виражається в термінах від стандартної непевності, визначеної з оцінок типу А та типу В.
- Обчислити сумарну (комбіновану) непевність  $u$  (бюджет непевності). Комбінована непевність обчислюється шляхом об'єднання окремих компонентів непевності відповідно до закону поширення непевності. На практиці:
  - для суми або різниці компонентів, комбінована непевність обчислюється як квадратний корінь суми квадратів стандартних непевностей компонентів;
  - для добутку або частки компонентів, застосовується правило подібне до правила для сум/різниць, але для відносних стандартних непевностей компонентів.
- Розраховується розширена непевність  $U$ , помноживши комбіновану непевність на коефіцієнт  $k$  покриття.
- Визначається результат вимірювання у формі  $X = x \pm U$ .

## Тестування

Метою тестування є визначення характеристик (властивостей) даного об'єкта та вираження їх якісними та кількісними способами, включаючи адекватно оцінені непевності, як зображено на правій стороні вище поданого рисунка. Для методології тестування метрологія є основою для порівняльності результатів тесту, наприклад, шляхом визначення результатів вимірювань в одиниці вимірюваних величин та пов'язаної з ними непевностей. Основними інструментами, що підтримують тестування, є еталонні матеріали, сертифіковані зразкові матеріали та зразкові процедури.

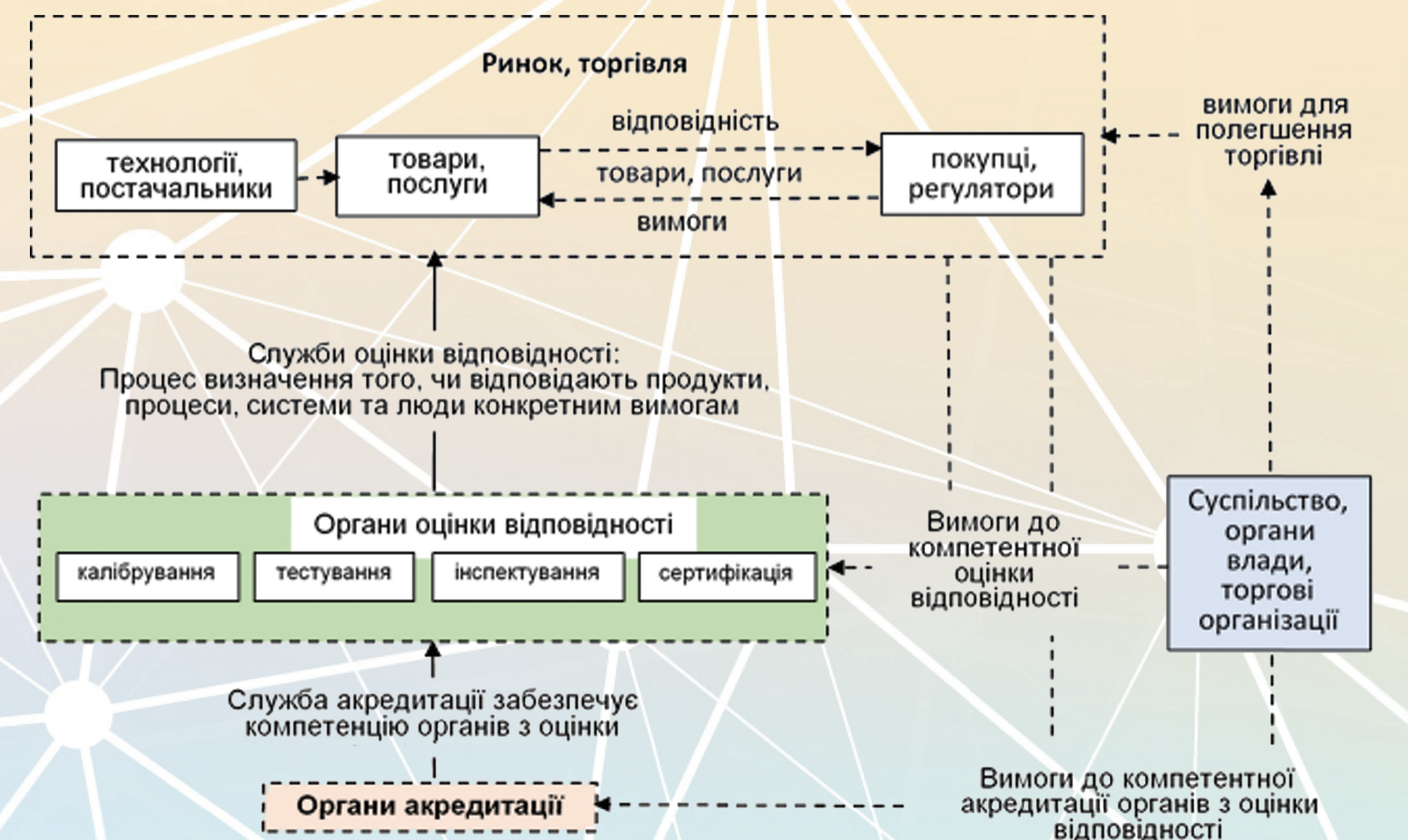
Методологія тестування в поєднанні з вимірюванням наведена на нижче поданому рисунку, наприклад, для визначення механічних характеристик технічного об'єкта.



Поєднання вимірювань та випробувань для визначення механічних характеристик технічного об'єкта

## Оцінка відповідності та акредитація

На сучасному світовому ринку та в світовій торгівлі є велика потреба в оцінці відповідності для забезпечення стану відповідності специфікаціям параметрів продукції та обладнання. Основою для оцінки відповідності є вимірювання в поєднанні з методами калібрування, випробувань, перевірок та сертифікації. Метою оцінки відповідності є надання користувачам, покупцям або регуляторам необхідної впевненості в тому, що продукт, послуга, процес, система або особа відповідає відповідним вимогам. Міжнародні стандарти, що стосуються послуг з оцінки відповідності, надаються Комітетом з оцінки відповідності ISO (CASKO). Інструменти оцінки відповідності використовуються першими сторонами (постачальниками), сторонніми сторонами (клієнтами, регуляторами, торговими організаціями) та третіми сторонами (органами, незалежними від постачальників та замовників). Поряд із зростаючим встановленням такої оцінки відповідності важливим інструментом є потреба в забезпеченні компетенції органів з оцінки відповідності (CABs). Найбільш застосовуваним і визаним інструментом для гарантування цього є акредитація CABs (conformity assessment bodies). Головним міжнародним органом для розробки практик та процедур акредитації лабораторій є Міжнародна лабораторія з акредитаційної співпраці (ILAC, <http://www.ilac.org/>). Це сприяє лабораторній акредитації як інструменту сприяння торгівлі, а також визнання компетентних калібрувань та випробувань по всьому світу. ILAC розпочав свою роботу як конференція в 1977 році і став формальним органом із співпраці у 1996 році. У 2000 році 36 членів ILAC підписали Угоду про взаємне визнання ILAC (MRA), а до 2008 року кількість членів ILAC MRA зросла до 60. Завдяки оцінці органів акредитації, що беруть участь, міжнародне визнання даних тестування та усунення технічних бар'єрів у торгівлі посилюється, як рекомендовано Угодою про технічні бар'єри у торгівлі Світової організації торгівлі (WTO). Огляд взаємозв'язків між ринком, торгівлею, оцінка відповідності та акредитації показано на нижчеподаному рисунку.



Взаємозв'язок між ринком, торгівлею, оцінкою відповідності та акредитацією

## Сучасні вимірювальні пристрої та системи

