

МЕТРОЛОГІЯ В КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМАХ

© Б.Стадник, С.Яцишин, І.Микитин

У даній праці розглянуто комплекс проблем, пов'язаних з роботою кібер-фізичних систем, що зумовлені необхідністю одночасного розвитку метрології. Проаналізовано низку таких проблем та накреслено шляхи їх вирішення, що включають, зокрема, розвиток мобільної еталонної бази зі встановленням таких робочих еталонів на елементах систем, забезпечення віддаленого кодованого доступу до мір з їх спеціальними процедурами самоперевірки, самодіагностики, самокалібрування тощо.

Ключові слова: Кібер-фізична система, Метрологія, Віддалений доступ, Робочий еталон, Самоперевірка

1. Вступ. Постійний розвиток Кібер-фізична систем (далі за текстом – КФС), означений схематично, зокрема в низці документів НІСТ [1-2] на найближчі 7 років, наштовхується на ряд труднощів, обумовлених наступними обставинами.

По-перше, формування КФС на базі промислових можливостей Інтернету передбачає безкоштовне погодження виробів з різних країн. Але, поточний набір стандартів у різних країнах можна вважати недостатнім, для того щоб успішно описати засоби та інструменти сучасної наукової технології, а насправді він постійно розвивається і вдосконалюється.

По-друге, лабораторії та провідні науково-дослідні центри, у яких використовуються сучасне продуктивне обладнання не можуть бути перевірені в сертифікованих лабораторіях в силу своєї складності і проблеми доставки.

По-третє, унікальній техніці часто потрібно самоконтроль і розвинене специфічне оснащення метрологічним обладнанням для забезпечення якості роботи. Установка для вимірювання температури нанооб'єктів, робота якої базується на Раманівському ефекті, може служити яскравим прикладом. Ґрунтуючись на результатах попередніх досліджень для її ефективної роботи запропоновано в якості чорного тіла застосовувати вуглецеві нанотрубки [3].

По-четверте, існуючі еталони втрачають на кілька порядків їх значення характеристик точності при передачі їх до кінцевого споживача, і це вважається нормальною метрологічною практикою. Тим не менш, така практика не може вважатися достатнім для КФС.

По-п'яте, ігнорується переведення метрологією стандартів всіх фізичних величин до нового типу стандартів, що базуються на фундаментальних сталих речовини [4].

2. Метою цієї роботи, яка формує основу низки запланованих праць, включаючи роботи над держбюджетною тематикою, є розвиток метрології кібер-фізичних систем, а саме дослідження метрологічних аспектів зазначених систем на етапах проектування, впровадження та експлуатації, з підходами від провідних метрологічних та стандартизаційних центрів України та світу.

3. Теоретичні й прикладні дослідження.

Розглядувані проблеми включають декілька масивів метрологічних досліджень, що базуються на:

- дослідженні й перевірці метрологічних завдань для параметрів, що визначають керуваність технологічних обладнання, процесів, матеріалів, і базуються на розробленні, впровадженні та реалізації конкретних метрологічних методів, інструментів і так само і метрологічно-апаратного й програмного забезпечення. Потім, апаратна підтримка необхідна, починаючи з етапу проектування і встановлення її в КФС виготовленні цього виробу або при його подальшій експлуатації. Програмне забезпечення повинно бути передано за допомогою Інтернет-базових станцій, воно повинно встановлюватись автоматично, чим забезпечити автоматизоване виконання набору операцій калібрування, вимірювання та визначення характеристик об'єкту (виробу) на місці. Калібрування може бути виконане дистанційно за наявності передбаченого коду доступу до локальної мережі КФС при вбудованому програмному забезпеченні;

- вивченні аспектів метрологічної надійності, в тому числі її передбачення, для певних віддалених вузлів КФС з допомогою інтегрованої метрологічної підсистеми. Це включає в себе не тільки оптичні дослідження у мікрохвильовому діапазоні [2], але методи досліджень на низьких і надвисоких частотах, завдяки яким можуть бути виявлені приховані дефекти складних об'єктів.

3.1. Метрологія як основа для розробки моделі КФС

Основою побудови цієї модельного проектування КФС можна вважати метрологію, що суттєво полегшує точний адекватний опис зовнішнього світу і, отже, адекватну відповідь з боку КФС на відхилення від режимних уставок під час роботи. Для цього метрологія повинна постійно розвиватися, щоб адекватно реагувати на виклики сучасності і засвоїти додаткові наукові дисципліни, які здавалося б, не мають стосунку до проектування. В результаті, розвиваються міждисциплінарні зв'язки [5], а сама метрологія включається в транс дисциплінарне поле сучасної технології.

Основна область застосування КФС, видається, є інтелектуальне виробництво. В галузі промисловості КФС, посилені хмарними технологіями, ведуть до виникнення нових підходів, які прокладають дорогу проекту «Промисловість 4.0» як проекту Європейської Комісії [6]. Розумне виробництво включає в себе Розумні машини, які відрізняються від сучасних багатофункціональністю, невеликими розмірами, адаптаційною здатністю щодо потреб користувачів, і це функціонально реалізується в одній машині. Остання, після отримання інформації про змінені вимоги, може сама по собі внести корективи в технологічний процес. Для її нормального функціонування повинно бути забезпечена змога виконати калібрування, безпосередньо на місці. Із залученням кваліфікованих метрологів, до прикладу фірми «Техноаги», Львів, уже зараз на об'єктах України здійснюється віддалене метрологічне обслуговування прецизійних ваг із залученням вбудованих еталонів - мір маси. Це зумовлює економію часу та коштів, а також дає змогу не переривати виробничий процес.

На цьому шляху створення дистанційної горизонтально-вертикальної структури метрологічного нагляду інтелектуальних приладів як структурного підрозділу КФС, передбачає дистанційне керування і перевірку роботи за допомогою кодового доступу до раніше встановленого програмного забезпечення та апаратних засобів. Таким чином, постає необхідність у новій метрології, що має вирішальне значення для подолання серйозних обмежень, притаманних сучасним методам випробувань обладнання. Так, фундаментом сучасної метрології за [1-2] стає вивчення огинаючої високочастотних сигналів, що спроможне стати основоположною частиною вимірювальної техніки, поза-як можна відтворювано охарактеризувати і порівняти складні сигнали із зменшеними невизначеностями, і, таким чином, забезпечити кількісний опис якості передаваних сигналів. Таким чином, застосування перспективних методів вимірювання для розвитку нової

метрології стає необхідним у її підтримці реалізації високошвидкісного бездротового і оптичного Інтернету.

В області оптичної метрології [7] виклик полягає в розробці або створенні нових методів і стандартів вимірювання для задоволення потреб наступного покоління передових технологій, що повинні опиратися на нанорозмірних матеріалах і технологіях. Важко забезпечити зразки, на яких прецизійні інструменти можуть бути відкалібровані на нанорівні. Калібрувальні стандарти важливі для забезпечення повторюваності результатів досліджень. Важко вибрати універсальний калібрувальний артефакт, з яким можна досягти повторюваності на нанорівні. Тут слід приймати до уваги вплив зовнішніх факторів (шум, вібрація, рух) і внутрішніх факторів, таких, як взаємодія між артефактом і обладнанням, які можуть викликати в ній значні відхилення внаслідок виникнення методичних похибок. Найбільш універсальним методом нанотермометрів, який в-додаток не потребує попереднього градування, вважаємо є метод комбінаційного розсіювання, придатний прямого вимірювання температури мікро- і нано-об'єктів в діапазоні від 100 нм - 100 мкм, причому від криогенних до середньо-високих температур.

Якість і надійність КФС залежить від точності вимірювання і характеристик вимірювальних приладів. Їх поліпшення, незалежно від типу КФС, підвищує визначальні характеристики (якість продукту смарт-виробництва, безпеку водіння в смарт-транспорті, економію енергії в смарт-будівлях і т.д.). Однією з основних метрологічних ресурсів в цій області є підвищення точності вимірювання шляхом усунення або принаймні зведення до мінімуму систематичних складових похибок. Вони приймають форму адитивних і мультиплікативних складових, а також складових, зумовлених нелінійними передавальними характеристиками актуаторів чи градувальники характеристиками давачів.

3.2. Програми розвитку КФС-метрології

У зверненні до Конгресу США щодо фінансування на найближчі роки, зокрема, НІСТ, що відіграє роль органу перспективного наукового планування, акцентує увагу на 3-х наступних чинниках [2]. Перший з них це переважаючий розвиток, дослідження тощо нової генерації комунікаційних технологій. Другий покладається на формуванні нової метрологічної галузі, здатної ефективно підтримати зазначений розвиток шляхом приділення уваги метрологічному тестуванню й вивченню, а також оцінюванню стану цих комунікаційних технологій. І «головна ціль ставиться поміряти і передбачити глобальну поведінку КФС», рознесених у просторі і часі, у їхньому великому інформаційному полі, що «повинно бути притаманним майбутнім комунікаційним системам».

До прикладу, раніше ми досліджували [8] шумові методи вивчення дефектності електронної структури елементів. Низьконадійні елементи можуть бути виявлені за допомогою відповідних параметрів потужності шуму. У порівнянні з іншими методами неруйнівних досліджень електронних елементів метод дослідження за допомогою електричної потужності шуму є багатофункціональним і дає змогу виявляти потенційно низьконадійні елементи.

Разом з тим, вище поставлені проблеми пріоритетного розвитку метрології полягають уже в конкретизованих завданнях [2]. Деякі з них наведені нижче:

- Калібрувальні артефакти з повним (точка за точкою) характеристиками непевностей, що дозволить широкий спектр калібруваних за часом та частотою вимірювань провести в промислових лабораторіях, тим самим прискорюючи розробку кінцевого науково-технічного продукту за рахунок усунення необхідності для проміжних кроках калібрування;
- Розвиток методів вимірювання для промисловості, придатних безпосередньо перевірити в бездротовому режимі, на відстані, технічні характеристики та продуктивність конкретних мобільних устат;

- Розвиток методів кількісної оцінки та перевірки результатів вимірювань великих масивів сигналів мережевого аналізатора, щоб дозволити реалізувати мережі більш широкого динамічного діапазону та вищої пропускної здатності каналів зв'язку з допомогою базових станцій і мобільних устат.

Важливими стають для безпеки і цілісності інформаційних систем стають питання формування кодованості заходів керування [9], що стають актуальними і для самої метрології, і для всієї промисловості. Подібним чином, і ми рухаємось, намагаючись забезпечити ефективне дистанційне керування засобами метрологічного контролю в промисловості. Так, певні метрологічні процедури на елементах КФС, уже зараз оснащених складними інформаційно-вимірювальними системами, дистанційно активуються кваліфікованим метрологом завдяки кодованим сигналам. Поява нового підходу до КФС, в значній мірі, ґрунтується на розбудові процесних багатофункціональних калібраторів, що є досить новим для КФС; це поєднання наших перевірених технологій калібрування тиску, температури тощо з новими можливостями їх автоматизації, в тому числі завдяки використанню Інтернет-можливостей дистанційного доступу.

Пропонується ще один спосіб поліпшити якість продукції КФС. Це вбудовані високоточні міри-еталони, що робота яких базується на фундаментальних сталих речовини. Ми вже розглянули [10] можливість реалізації державного стандарту електричного опору на основі сталої Клітцинга. Так, вуглецеві нанотрубки, перебуваючи в надпровідному стані, завдяки перехідного опору контактів характеризуються опором, який відповідає зворотньому значенню кванту провідності, що становить $(12906.4037 \pm 0,0020)$ Ом. Зараз проводимо аналогічну роботу щодо створення міри-еталону електричної ємності для потреб КФС, а це не тільки поставка і вирішення проблем, пов'язаних зі створенням певного каліброваного номіналу ємності, а й перенесенням його до чинного ряду фіксованих значень ємностей. Величезну практичну роботу проводять інженерно-технічні працівники, в тому числі низки львівських підприємств. Зокрема, фірма «Техноаги», Львів, уже запустила передовий проект по реалізації в межах протоколу TCP/IP дистанційно керованого, вбудованого в КФС міри-еталону одиниці маси, на Авдіївському коксо-хімічному комбінаті. Для цього було використано можливості Ethernet та засади забезпечення метрологічної простежуваності результатів вимірювань, Європейські норми та правила щодо формування метрологічної моделі устави із різних компонентів з власними допустимими значеннями допустимих похибок, щодо організації планованих і позапланових метрологічних перевірок тощо.

У багатьох випадках неможливо уникнути перевірки застосованого метрологічного обладнання та вбудованого його програмного забезпечення. При перевірці останнього виникає проблема, пов'язана з доступом до виконуваної програми. Найчастіше ми не в змозі ввести у програму тестові послідовності чисел і перевірити її. Способи подолання проблеми можуть полягати в модифікації засобів вимірювань, а саме в установці додаткових цифрових входів у метрологічні засоби КФС-підсистем.

3.3. Сучасні вимірювальні технології у розвитку КФС

- Розумні метрологічні інструменти

Беззаперечною вважається потреба у приділенні подальшої уваги роботам щодо оцінки точності в галузі метрології, зокрема розвитку так-званих багатопараметричних інтелектуальних приладів, наприклад Коріюлісового витратоміра, спроможного отримувати за 1 вимірювання чимало значень різних вимірних параметрів одночасно. Такі засоби можуть розглядатися як гнучкі метрологічні інструменти (обладнання), що дає змогу швидко відновити існуючі інженерні процедури чи сформувати нові. У результаті, вибравши правильне рішення вимірювальної техніки ми можемо ефективно поставляти як розробникам, так і виробникам відповідні метрологічні дані. У межах чинної метрологічної

концепції цей розумний пристрій складається з перетворювачів з відповідними давачами і периферійними пристроями та мікропроцесора блоку обробки отриманих сигналів. Давачі визначають швидкість потоку, температуру та надають інформацію у вигляді вихідних сигналів мікропроцесора, що забезпечує доступ до дисплею, головного меню і пристроїв виведення обробленої інформації для взаємодії з іншими системами, наприклад, в системі заправки палива АЗС.

- Самоперевірка, самоадаптація та самокорекція

Розробка КФС піднімає питання деградації їх продуктивності й можливих відмов у цілому. Тому для забезпечення метрологічної підтримки засобів вимірювань на етапі експлуатації звичайні методи метрологічного контролю чинності стають неефективними. Перевага пропозованих [11] методів метрологічного самоконтролю очевидна і показана вище на прикладах перевірки температури, тиску і так далі. При безперервному контролі надійності метрологічних даних і на основі результатів самоконтролю за попередньо встановленого терміну перевірки розвивається прогнозування стану метрологічного пристроїв. Це дає змогу відкоректовувати вимірювані величини та вводити поправки у значення виробничих параметрів. Подібну мету переслідує інтенсивно розроблюваний метод самоперевірки градуювальних характеристик термометрів в окремих точках температурної шкали. За ним в елементах конструкцій КФС слід встановлювати калібрувальні мікроузли у вигляді мікрокомірок з реперними точками окремих металів, що підлягають плавленню при строго фіксованих, наперед відомих температурах, за значеннями яких і калібрують термометри, включаючи термопари. Більше того, маючи попередньо зафіксовану мікроконтролером передісторію таких термопар за рахунок використання раніше нагромаджених результатів їх дрейфу і в межах термодинамічної моделі їх неточності [12], стає можливим і без зазначені мікрокомірок здійснювати автоматичну корекцію їх показів. Це стосується і програмного забезпечення метрологічного обладнання.

Останньому притаманні подібні проблеми: воно має гарантовані для самоадаптивних підсистем необхідні якості дотримання стабільності метрологічних характеристик та їх надійності. Отримані результати показали наступне. Перевірка моделі самоадаптації підсистем вимагає уточнення низки властивостей, таких як стійкість поведінки адаптації, можливості відновлення, невизначеності та кількості ступенів свободи щодо їх розгляду, завадозахищеності і так далі.

Останнім часом методи перевірки засобів вимірювань автоматизуються, причому з використанням програмного забезпечення і кодо-керованих мір, завдяки яким значно виросла продуктивність праці. В автоматизованих самоперевірюваних вимірювальних перетворювачах, цифрових та аналогових вимірювальних приладах комп'ютер за спеціальною програмою генерує спеціальні цифрові значення N_x їх вихідних величин, при яких повинні бути перевірені вимірювальні прилади. Інформація з виходу перевірених інструментів відправляється до обчислювальних засобів для розрахунку помилок і формування відкоректованих сигналів для запису результатів перевірки. Це формує основу для подальшого виконання самоадаптації та самокорекції [13].

- Гнучкі метрологічні системи зі спеціальними імітаційними процедурами

На даний момент розробники продукції і планувальники виробництва шукають по суті те саме: гнучкі системи, яким притаманне просте інтегрування в нові безобслуговувальні (безлюдні) технології, щоб розбутися потреби щоразу переучувати експлуатаційників. Завдання полягає в тому, щоб відповісти на вимоги ринку, використовуючи доступні методи та інструменти. Існують дві опори в цій області – моделювання та проектування виробів. Тим не менше, ці теоретично визначені точки опори та компоненти отримуваних даних все одно повинні бути перевірені на реальних прототипах і в умовах, що імітують максимально

близькі до серійного виробництва. Ці випробування включають дослідження поведінки під механічним навантаженням, вивчення функціональної та довготривалої втоми. Компоненти підлягають механічним навантаженням у всіх випадках, а їх життєвий цикл моделюється за умов якомога ближчих до реального стану.

Для вирішення метрологічних завдань КФС ми запропонували створення місцевих центрів сертифікації, в якому будуть зберігатися робочі міри фізичних величин (рис.1). Так як мобільні міри характеризуються значно меншою точністю в порівнянні з стаціонарними, то цьому питанню має бути приділена належна увага. Залежно від способу реалізації таких мір відстань, на яку вони передаються електричним чи оптичним чином, змінюється (див. на рис.1 міру 1 або міру 2 у вигляді кіл відповідного діаметру). У результаті, утворюється складна просторова структура зазначеної КФС з відповідним забезпеченням мірами, що базується на оптимізації якості виготовлюваних виробів за належного метрологічного супроводу.

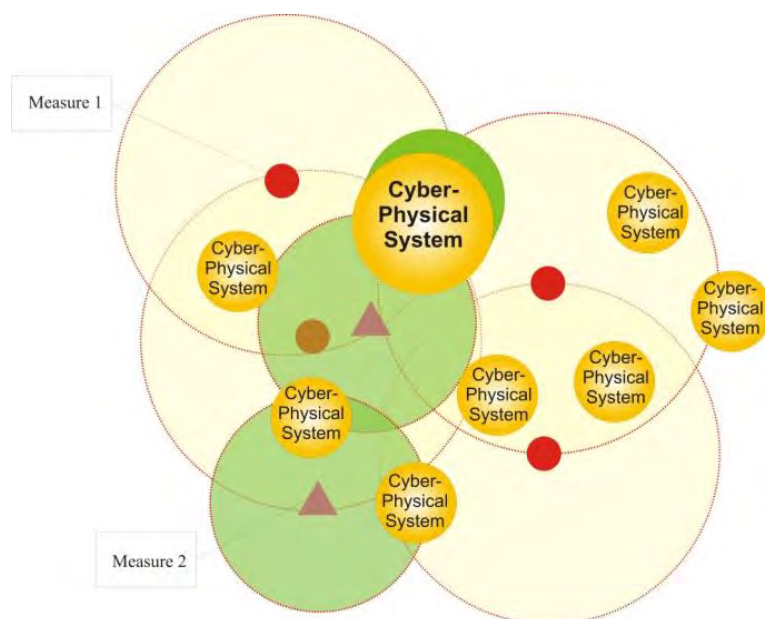


Рис.1. Впровадження калібрувальних процедур залежно від розміщення КФС та сертифікаційних центрів їх обслуговування [14]

У сучасній практиці вимірювальні процеси повинні бути під неперервним наглядом, щоби запевнити необхідну метрологічну надійність. Сьогоднішня нормативна документація рекомендує систематичний і повний контроль над процесом вимірювання, щоб гарантувати необхідний рівень якості товарів, продукції і послуг, що надаються засобами вимірювань. Цей контроль розглядається у вигляді сукупності окремих стало продовжуваних процедур. Частота метрологічних перевірок і основному визначається метрологічною надійністю вимірювань. Для покращення якості останніх частота повинна збільшуватись. Ця характеристика залежить в основному від інтенсивності дрейфу провідної метрологічної характеристики, і результати контролю повинні бути встановлені спеціально, що б допомогти в майбутньому діагностики виробничого циклу відповідно до якості виробництва.

Часто система збирання даних результатів вимірювань виконується у вигляді виокремлених перемикачів, вимірювання, обчислення та інших операцій для того, щоб отримати, акумулювати складні результати вимірювань в широкому діапазоні електричних і неелектричних межерандів. Створюються так звані вимірювальні схеми, призначені для багатоканального перетворення вимірювальних сигналів в цифрову форму, і навпаки - для

формування аналогових вихідних сигналів. Довжина ліній може бути практично необмеженою. Тим не менше, в промислових умовах з'єднувальні лінії, особливо значної довжини, можна додати досить істотний і, що більш важливо, неконтрольований внесок у похибку результату вимірювання. Розподілені вимірювальні системи як підсистеми рознесеної КФС можуть складатися з певної кількості просторово розділених технологічних сегментів (рис.2).

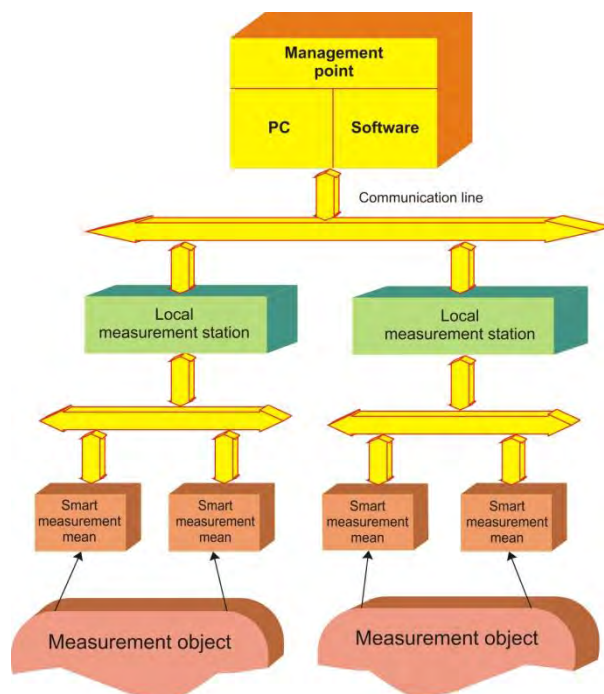


Рис.2. Просторово розподілені вимірювальні підсистеми та об'єкти вимірювань [14]

Виміряні значення контролюються за допомогою окремих вимірювальних каналів (канал + блок формування сигналу + АЦП + МК), які можна розглядати як смарт-вимірювальні прилади.

Результати вимірювань передаються за допомогою інтерфейсів до локальних станцій вимірювання, де виконуються обробка і аналіз, тоді виробляються сигнали управління і корекції і т.д. Звідти через вузли зв'язку і канали (радіо- і оптичних канали) або мережі вони передаються до центрального пункту управління, робота якого базується використанні ПК з відповідним програмним забезпеченням. Таким чином, протяжність ліній зв'язку практично необмежена.

Таким чином, оцінка якості продукції є складним багатофакторним проблемою, в якій важко оцінити роль і відносну вагу кожного фактора, як і виражене у фізичних одиницях чисельне значення цього фактора з метою його валідизації і, нарешті, для визначення певної сумарної характеристики. У кращому випадку, результат виражається як число, що розумно поєднує всі ці фактори впливу.

- **Взаємодія нижчих метрологічних рівнів загальної системи опрацювання масивів інформації із верхніми рівнями**

Оскільки промисловий Інтернет передбачає приблизно 7 рівнів роботи з масивами даних, а метрологічні рівні займають від сили 2 нижні рівні, то основна проблема організації ефективної роботи КФС полягає у стикуванні між собою взаємодії цих 2-х груп рівнів. При цьому, по мірі розвитку технологій неперервно змінюються, уточнюючись, основні поняття, що описують як процес вимірювання, градування та калібрування, тобто поняття

метрології, що адекватно описують той чи інший процес вимірювання, перенесення розміру еталона, перевірки тощо, причому стосуються різних етапів функціонування КФС, контролю їх роботи тощо. Особливого розвитку вони набули в англomовній науково-технічній літературі: поширились поняття не тільки «smart sensors», «smart manufacturing», «smart health-care» тощо у їх означенні як суб'єктів чи окремих елементів КФС. Отримали подальший розвиток поняття самоперевірки цих елементів: «self-check», «self-validation», «self-calibration», «self-adaptation», «self-correction» та інші, що описують особливості різних операцій самоперевірки. Утверджується низка термінів, що стосуються роботи з масивами отримуваної інформації, зокрема з'явився цікавий термін «data mining», що означає розумне формування певними програмними засобами наперед означеної вибірки із отриманого метрологічно надмасиву даних з метою виявлення певних закономірностей або взаємозв'язків між різними змінними: «the analysis step of the "Knowledge Discovery in Databases" process, or KDD». Зазначений термін виступає як передумова до формування вищої спільноти щодо інформаційних над масивів у їх отриманні, опрацьовуваних потужностях, передаванні та зберіганні, що відбуваються у так-званих «інформаційних складах - *data warehouses*»: «Dramatic advances in data capture, processing power, data transmission, and storage capabilities are enabling organizations to integrate their various databases into *data warehouses*. Data warehousing is defined as a process of centralized data management and retrieval».

Таким чином, саме у такому контексті вимірювання та розуміння основних засад роботи з отримуваною інформацією доводиться працювати, намагаючись дотримувати кроку викликам сучасності й достосовуючи досягнення метрологічної науки до потреб неперервно формованого єдиного світового ринку виробництва, послуг, охорони здоров'я тощо, що уже повсякденно реалізується завдяки Світовим інформаційним системам.

Висновки.

1. Поєднання мережних та інформаційно-вимірювальних технологій з матеріальним виробництвом і пов'язаними з ним послугами лежать в основі нового покоління інтелектуальних і гнучких кібер-фізичних систем. Останні можна реалізувати тільки з допомогою розумних сенсорів, високоточного вимірювального обладнання та потужних технологій.
2. Дослідження КФС передбачає приділення основної уваги метрологічним та стандартизаційним проблемам. Їх вирішення впливає не тільки на оцінку збоїв або незапланованих порушень виробничого циклу, але й на якість виконання поставлених завдань (виробництва продукції тощо).
3. Належна увага подальшому розвитку КФС неможлива без вирішення конкретних метрологічних завдань, основне з яких знаходиться у трикутнику «вбудовані апаратні засоби метрологічної підтримки – Інтернет-запозичене програмне метрологічне забезпечення – автоматично встановлюване метрологічне забезпечення», що спільно гарантують належний рівень метрологічного супроводу. Зокрема, це полегшує реалізацію методів вимірювання для промисловості шляхом безпосередньої віддаленої перевірки метрологічних характеристик спеціальних стандартних артефактів-мір і/або мобільних метрологічних пристроїв.
4. Розробка імітаційних моделей для цілей вищевказаного трикутника і методів оцінки надійності КФС, методів неруйнівного контролю та інших методів випробувань, які включають шумові методи, здатні забезпечити підвищення надійності та вдосконалення роботи КФС.
5. Майбутнє метрологічних підсистем КФС проглядається в розробці стандартів фізичних величин, що базуються на фундаментальних сталих речовини та на вивченні їх перетворення

в частотні характеристики, які можуть бути в 10 разів точніше виміряні та значно ефективно передаються на відстані з допомогою Інтернету. Останнє дозволяє реалізувати якісно нову модель безпосередньої передачі розмірів фізичних величин від робочих мір до засобів виробництва.

6. Перспективним напрямом підвищення ефективності КФС слід вважати їх метрологічне оснащення вбудованими самоперевірювальними засобами, що в додаток здатні самоадаптувати, самокоректувати і як результат саморегулювати і самонастроювати підсистеми, в тому числі метрологічні підсистеми з вбудованими робочими мірами фізичних одиниць.

Список літератури

1. NIST National Technical Information Service, FY 2014, Budget Submission to Congress, 2014.
2. NIST Three-Year Programmatic Plan, FY 2014-2016, 2014.
3. B.Stadnyk, S. Yatsyshyn, O. Sehedra. Research in Nanothermometry. Part 6: Metrology of Raman thermometer with universal calibration artifacts, *Sensors and Transducers*, Vol. 142, Issue 7, 2012, pp.1- 9.
4. B.Stadnyk, S.Yatsyshyn. State standard of electrical resistance on the basis of von Klitzing constant, in *Proceedings of 58 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universität Ilmenau, Sept. 08 – 12, 2014, pp.138-141.
5. New Reports Define Strategic Vision, Propose R&D Priorities for Future Cyber-Physical Systems. From NIST Tech Beat: February 6, 2013.
6. Industry 4.0: Revolution in Production, October 10, 2012.
7. Understanding the Spectrum Environment: Data and monitoring to improve spectrum utilization. NITRD Wireless Spectrum R&D Senior Steering Group Workshop V Report, August 2014, 26 p.
8. Z.Kolodiy, B.Stadnyk, S.Yatsyshyn. Development of Noise Measurements. Part 3. Passive Method of Electronic Elements Quality Characterization, *Sensors and Transducers*, Vol. 152, Issue 5, 2013, pp.164-168.
9. R.A.Martin. Making Security Measurable and Manageable, Febr. 28, 2014. (<http://measurablesecurity.mitre.org/index.html>).
10. B.Stadnyk, S.Yatsyshyn, H.Fedorchuk, Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 2. Checked Instrument Based on Quantum Resistance Standard, *Sensors and Transducers*, Vol. 186, Issue 3, 2015, pp.12-17.
11. CPS Instrumentation & Calibration Experts, *The Total Calibration Solution*, New Zealand, 24 Sep., 2014.
12. S.Yatsyshyn, B. Stadnyk. Accuracy and metrological reliability enhancing of thermoelectric transducers, *Sensors and Transducers*, Vol. 123, Issue 12, 2010, pp. 69-75.
13. В.Яцук, П.Малачівський, *Методи покращення точності вимірювань*, Львів, Бескид-Біт, 2008.
14. S.Yatsyshyn, B.Stadnyk, Ya.Lutsyk, V.Yatsuk. Metrological Array of Cyber-Physical Systems. Part 1. Challenge of Modernity, *Sensors and Transducers*, Vol. 186, Issue 3, 2015, pp.1-11.

Наукові результати, подані у цій статті, було отримано в рамках дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015 - 31.12.2017, фінансово підтриманим Міністерством освіти та науки України.