

ВІРТУАЛЬНІ ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ НЕПЕВНОСТІ

*Гаврилів Д.В., аспірант,
Національний університет «Львівська політехніка», Україна;
e-mail: havryliv.denys@gmail.com
Вельган Р.Б., канд. техн. наук
Національний університет «Львівська політехніка», Україна;*

Анотація

Сучасні засоби вимірювання як високотехнологічні, надточні, багатофункціональні інструменти є складними системами, оцінка непевності (ДСТУ ISO/IEC Guide 98-1 подає цей термін як «невизначеність») яких перетворюються в нетривіальне завдання. Для забезпечення інформації про вірогідність результатів, їх збіжність та відтворюваність необхідно проаналізувати непевність результатів вимірювання, характерних для певного технологічного процесу.

Як підхід для визначення непевності складних систем, для уникнення необхідності виконання багатократних експериментів, зменшення потреби у висококваліфікованому персоналі та дорогих «артефактах», що застосовуються при оцінюванні, існує метод так званого віртуального засобу вимірювання. В цій методиці процес вимірювання моделюється, з врахуванням дії основних факторів впливу та проводиться статистичний аналіз результатів моделювання з використанням методу Монте-Карло. Таким чином характеристики віртуальних модулів повторюють властивості реальних приладів й, водночас, дають змогу швидко та якісно оцінити вплив параметрів середовища на результати вимірювання. Непевність вимірювання зазвичай спричинена кількома основними джерелами, а саме: залежить від методу вимірювання, неточності засобів вимірювання, вплив персоналу та параметрів довкілля. Серед впливів довкілля важливо виділити - зміну освітленості для електронно-оптичних засобів та температури, які можуть змінюватись у виробничому процесі, а також мають вирішальний вплив на непевність вимірювань. В статті проводиться огляд методу віртуального засобу вимірювання та його відомих застосувань.

Ключові слова

Віртуальні засоби вимірювання, непевність вимірювання, моделювання та статистичний аналіз непевності вимірювання, метод Монте Карло, вимірювально-координатна машина.

1. Вступ

Визначення непевності вимірювання - це базова вимога для якісного й економічно вигідного виробничого процесу та включає в себе певний технологічний підхід. Однак в координатній метрології визначення непевності вимірювання - комплексний процес, що вимагає від спеціаліста, що виконує аналіз, певних коригувань для кожного конкретного випадку. Особливості розміру, форми, відхилення форми та аспект доступності при вимірюванні без змін внесених зовні мають суттєвий вплив. Таким чином об'ємний спектр видів деталей з декількома варіаціями форми та водночас наявність малих допусків вимагають використання простих, але ефективних і в той же час достатньо універсальних методів. Отже, існує три різних підходи до оцінювання непевності результату вимірювання – аналітичні бюджети непевності, експериментальне визначення та чисельне моделювання [1-3]. Усі ці підходи вимагають наявності адекватної математичної моделі та відповідного опису кількісних оцінок складових непевності.

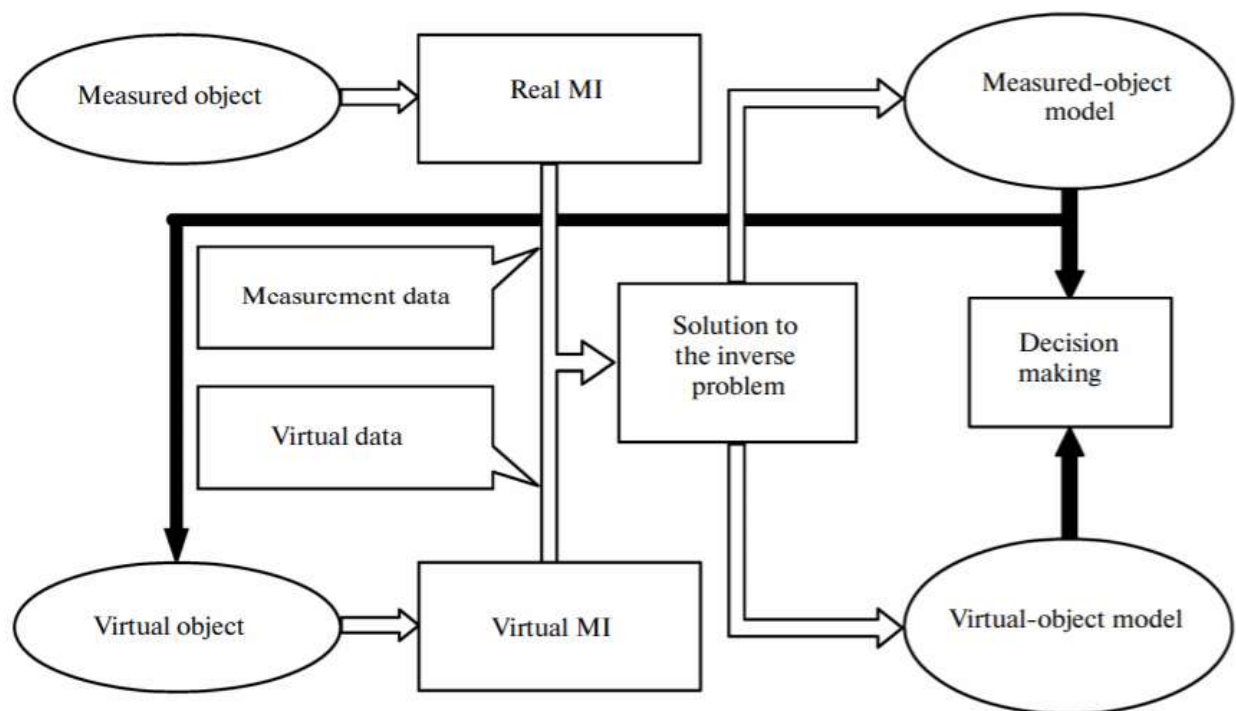
Оцінювання непевності вимірювання з використанням аналітичного методу (або бюджету непевності), базується на детальному описі складових похибки. Розрахунки виконуються за методикою, описаною у настановах з подання непевності вимірювання [1], [4].

Експериментальний підхід методологічно узгоджується з ISO 15530-3 [2], згідно з яким необхідно виконати багатократні вимірювання калібрувального тіла. ISO/TS 15530-4 [3] описує загальні вимоги до методів моделювання.

Чисельне моделювання це - ефективний та гнучкий спосіб оцінювання непевності вимірювання у координатній метрології. Базові елементи цього методу описані в додатку до настанов з подання непевності у вимірюваннях [5].

Слід зазначити, що існує відмінність у поняттях віртуального засобу вимірювальної техніки в Україні і закордоном. Українські спеціалісти «віртуальним» називають комп'ютеризований засіб [6, 7]. Натомість розробники віртуальної КВМ з Німецького національного метрологічного інституту РТВ віртуальним засобом вимірювальної техніки (вЗВТ) називають комп'ютерну програму для визначення непевності результату вимірювання [8]. На відміну від комп'ютеризованого засобу, у якому відбувається реальне вимірювання, у цій програмі симулюється сам процес вимірювання для імітації впливу факторів похибок при багатократних

вимірюваннях. Вихідні дані аналогічні до вихідних даних реального засобу вимірювання, а вхідні дані повторюють характеристики об'єкту вимірювання так, наче вони виміряні реальним засобом вимірювальної



техніки (ЗВТ). Хід вимірювання вЗВТ повторює вимірювання реального ЗВТ (рис. 1). Реальна та віртуальна гілки пов'язані між собою трьома аспектами. По-перше, вихідні дані реального вимірювання є вхідними даними для віртуального вимірювання. По-друге, в реальній та віртуальній гілках вимірювання, розв'язування зворотної задачі здійснюється використанням тих же методів, параметри яких рівнозначно застосовні для обох гілок. По-третє, коректність вимірювання верифікується порівнянням реального об'єкта вимірювання та віртуальної моделі об'єкта.

Реальний ЗВТ вимірює та фіксує певні характеристики об'єкта. Їх параметри отримуються із розв'язку зворотної задачі. У результаті цього процесу отримуємо модель об'єкта вимірювання та його характеристики. Оскільки модель об'єкта отримана з певною непевністю, далі необхідно її, непевність, розрахувати. Цю непевність можна отримати використовуючи вЗВТ. Створення моделі об'єкта вимірювання забезпечує можливість створення віртуальної моделі дослідження, яка у свою чергу служить для формування віртуального об'єкта. Після чого віртуальний об'єкт використовується для генерування даних віртуального вимірювання та розв'язання зворотної задачі. Наступним кроком є порівняння вимірювань реальної і віртуальної моделей та оцінка непевності. У випадку розбіжності між моделями здійснюється розв'язання зворотної задачі з використанням інших параметрів або іншого комп'ютерного методу. Створюється нова повторно-виміряна реальна та новостворена віртуальна модель об'єкта вимірювання. Зазначимо, що узгодження реальної та віртуальної моделей необхідно гарантувати на першому етапі налаштування вЗВТ (надалі модель може доповнюватися іншими впливними чинниками але саме перша валідація гарантує узгодження моделі та реального вимірювання). При невідомих вхідних параметрах використання верифікованого вЗВТ гарантує коректність та повторюваність процесу вимірювання ЗВТ загалом [9].

Рис. 1. Загальна характеристична схема опису реального та віртуального ЗВТ.

(Адаптована схема) [9]

2. Мета роботи

Метою роботи є зробити огляд концепцій і підходів до створення віртуальних засобів вимірювальної техніки і намітити структуру власного віртуального засобу вимірювальної техніки.

3. Підходи до створення вЗВТ

На сьогоднішній день можна виділити два підходи до створення вЗВТ – імітаційний та симуляційний [10].

Імітація базується на моделюванні певних базових процесів, що виникають в реальному ЗВТ в процесі вимірювання. Іншими словами, імітація - це моделювання операцій ЗВТ.

Симуляція базується на моделюванні інформації, тобто сигналу, який отримуються в процесі вимірювання ЗВТ. Симуляція на відміну від імітації не моделює ЗВТ. Програма вЗВТ виконує, передбачені в своїй роботі процедури, базуючись на статичному моделюванні з використанням методу Монте-Карло [11]. У [9] зазначається необхідність виконання трьох передумов для імітаційних, як складніших з точки зору моделювання, програм, а саме:

- 1) з використанням сучасних персональних комп'ютерів, тривалість генерування інформації не повинна бути надто довгою, повинна займати часу не більше, ніж реальний ЗВТ;
- 2) кількість незалежних випадкових чисел, які створюються генератором, повинна бути достатньою для досягнення поставленої мети;
- 3) метод, який використовує підхід Монте-Карло, повинен коректно відтворювати роботу ЗВТ.

У випадку, коли одна з цих вимог не виконується або задовольняється не повністю, тоді метод імітації не можна використовувати для створення вЗВТ. Проаналізуємо ці вимоги детальніше.

Тривалість генерування набору даних. Моделювання з використанням методу Монте-Карло традиційно використовуються для імітації процесів вимірювання ЗВТ. Але потрібно зазначити, що метод Монте-Карло є одним з найповільніших комп'ютерних методів. На сьогодні завдяки наявності запиту крипто-індустрії на потужні комп'ютери та модернізацію алгоритмів роботи з випадковими числами отримано змогу використання цих досягнень для моделювання інженерних завдань. Аналіз сучасних алгоритмів генерування псевдовипадкових чисел [12], реалізований на ноутбукі Ivy Bridge i7 з частотою 2.6 GHz, показав великий приріст швидкості генерації 109 чисел за сучасним алгоритмом Xoshiro256+ порівняно з класичним Mersenne Twister. Генерування такої кількості псевдовипадкових чисел тривало 1.279 секунди порівняно з 4.522 секундами класичним Mersenne Twister. Отже швидкість алгоритмів генерації випадкових чисел зростає, що покращує застосовність моделювання.

Кількість випадкових чисел. Періодичність. Метод Монте-Карло передбачає використання великого масиву випадкових взаємно незалежних чисел. Одним з недоліків попередньо розроблених алгоритмів є наявність так званої періодичності. Періодичність як повторюваність результатів генератора випадкових чисел становить близько 30 мільйонів [9]. У випадку імітації роботи, наприклад, растрового електронного мікроскопа (РЕМ) необхідна кількість незалежних чисел може становити 600 мільярдів [13]. На сьогодні періодичність найуживаніших і швидких генераторів починається з 264 та досягає 232830 [14]. Таким чином, можна стверджувати, що періодичність генератора є задовільною для імітаційної роботи РЕМ.

Застосування методу Монте-Карло залежить від виконання попередньо встановлених умов і не завжди потребує моделювання роботи ЗВТ. Необхідна комп'ютерна програма, яка буде надавати дані ідентичні до даних отриманих реальним ЗВТ. Програма оцінювання непевності (ПОН аналог вЗВТ) базується на комп'ютерних математичних моделях процесу вимірювання. У цій моделі, процес вимірювання представлено повністю, від вимірювання до запису результату, беручи до уваги усі впливні чинники. При симуляції, ці чинники змінюються в межах допустимих значень (описаних за допомогою їх відповідних розподілів), а процес віртуального вимірювання багаторазово повторюється, використовуючи різні комбінації впливних чинників. Непевність же визначається з оцінки варіації остаточного результату віртуального вимірювання [3].

Причини застосування чисельних методів.

Одною з причин використання чисельного моделювання замість класичного підходу є кількість джерел непевності. Так, наприклад, при використанні координатно-вимірювальної машини (КВМ) спеціалісти з національного метрологічного інституту Об'єднаного Королівства - NPL особливо виділяють просторові та обчислювальні джерела непевності [15].

Просторова похибка - це похибка при вимірюванні координати точки на поверхні вимірюваного тіла і визначається такими складовими:

- точність виготовлення компонент КВМ - напрямних, шкал, системи зонда та еталонної сфери, використаної для метрологічної перевірки;
- середовище, в якому працює КВМ, а саме: значення температури, її градієнти, вологість повітря та вібрації;
- стратегія вимірювання - значення та напрям сили проби, тип стилуса зонда та швидкість вимірювання;
- характеристики об'єкта вимірювання - еластичність, шорсткість поверхні, твердість та маса компонента.

Похибка обчислювання - це похибка оцінювання відхилення форми та розмірів об'єкта вимірювання, яка визначається:

- програмним забезпеченням КВМ, що оцінює геометрію об'єкта;
- чисельною точністю комп'ютера КВМ;
- кількістю та розташуванням точок вимірювання;
- мірою відхилення геометричної форми об'єкта вимірювання від ідеальної.

Геометричні відхилення КВМ зазвичай вимірюються безпосередньо, використовуючи лазерні інтерферометри, та спеціалізовану оптику, або опосередковано, використовуючи послідовне багатопозиційне лазерне вимірювання [15]. Визначивши дані відхилення надалі використовуємо їх для коригування вимірювання, так звана точність отримана за допомогою комп'ютера (computer-aided accuracy). Згідно з [15] для КВМ

враховують 21 джерело кінематичних джерел похибки. *Кінематичні похибки* виникають внаслідок недосконалості виготовлення деталей чи внаслідок зношення деталей машини.

Кожна з цих похибок ретельно визначена і формує відповідну частину карти похибок КВМ відповідно до схеми вимірювання та джерел непевностей машини (рис 2). Нажаль, при вимірюванні цих геометричних відхилень також присутня непевність. Це означає, що осі координат також введені з непевністю. Вимірювання за допомогою КВМ передбачають наявність багатьох контактних точок та низки обчислень. Непевність в координатах кожної виміряної точки впливає на наступні вимірювання і на непевність вимірювання деталі загалом.

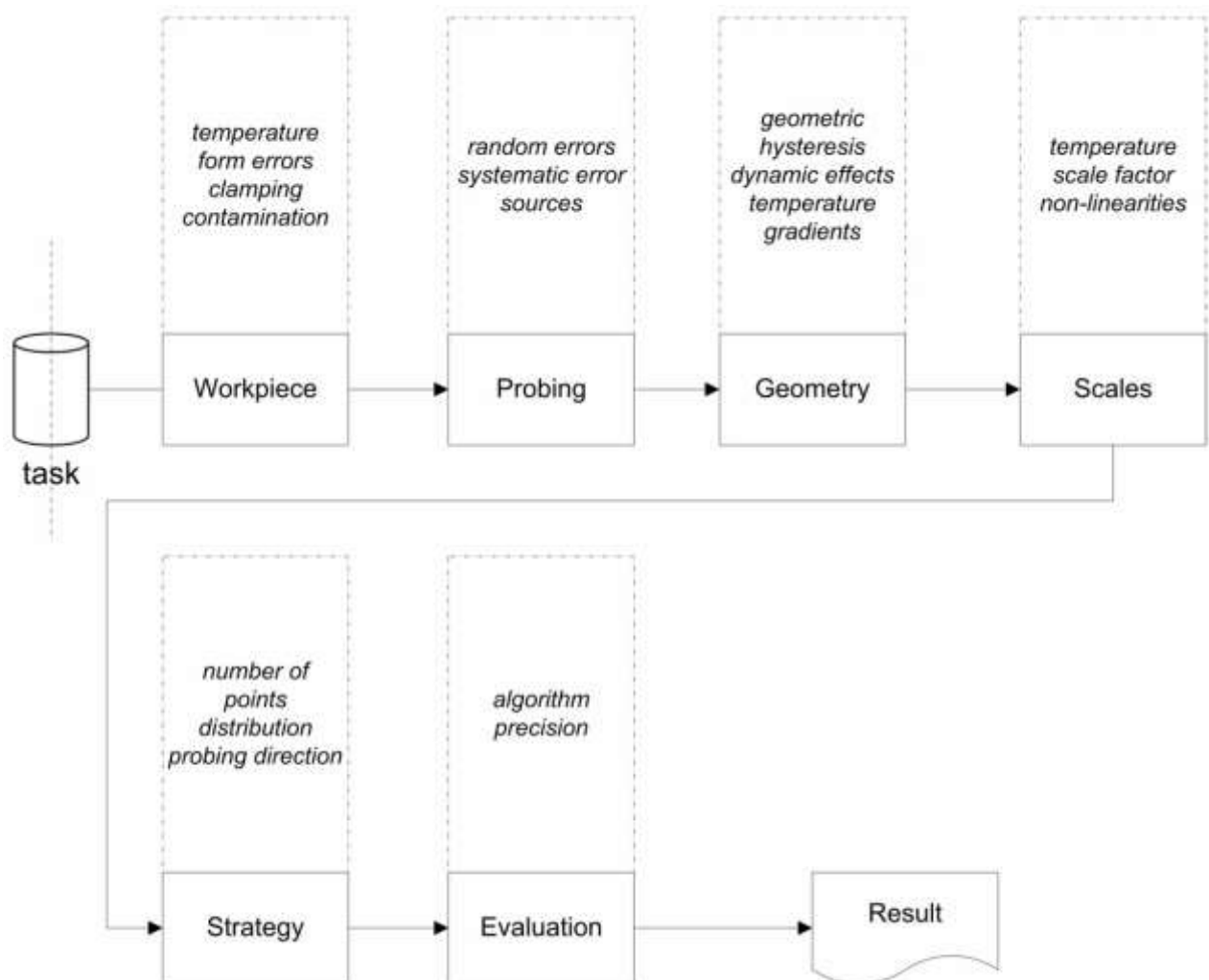


Рис. 2. Блок-схема вимірювання КВМ. (Адаптована схема B.1 ISO 15530-4) [4]

Нормативна документація для вЗВТ

Обчислення непевності при використанні вЗВТ базується на ISO/TS 15530-4:2008, назву якого можна перекласти як «Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS) – Координатно-вимірювальні машини (КВМ): метод визначення непевності вимірювання – Частина 4: Оцінювання специфічної непевності вимірювання, використовуючи чисельне моделювання». Це стандарт беруть за основу як користувач КВМ, так і виробник для оцінювання непевності вимірювання при використанні КВМ. Також стандарт пропонує методи тестування таких програмних модулів, описуючи переваги і недоліки цих методів. Зрештою, описуються різні методики тестування для визначення непевності для спеціалізованих вимірювань (непевність пов'язана з конкретними вимірами та конкретною методикою вимірювання), використовуючи моделювання для вимірювань КВМ, беручи до уваги, вимірювальний пристрій, середовище, методику вимірювання та об'єкт вимірювання. Цей документ описує загальні функції не обмежуючи можливі технічні реалізації. Настанови для верифікації та оцінювання розроблених пакетів включенні до стандарту.

Програма оцінювання непевності повторює віртуальне вимірювання елемента сотні разів (метод Монте-Карло), кожного разу змінюючи чинники впливу та характеристики, і змінний набір входних даних. Входні дані значною мірою залежать від непевності геометрії ЗВТ та її впливу на карту похибок. Визначено два види віртуальних КВМ: он-лайн та оф-лайн. Якщо оцінювання виконується найбільш близько до опрацювання реальних даних, використовуючи той же програмний пакет, що й реальна КВМ, ту ж послідовність операцій оцінювання, як при реальному вимірюванні (включаючи однакову систему детектування стилуса та його розмірів, та систему визначення орієнтації об'єкта), тоді віртуальну КВМ визначають як он-лайн. Якщо ж використано стороннє програмне забезпечення, таке що не використовуються при реальному процесі

вимірювання та послідовність опрацювання даних що лише схожа на реальну для симуляції вимірювання, таку віртуальну КВМ визначають як оф-лайн. Таким чином, узагальнюючи стандарт для КВМ на всі вЗВТ, імітацію роботи засобу можна називати оф-лайн вЗВТ, а симуляцію на основі даних, отриманих такими ЗВТ в процесі роботи, он-лайн вЗВТ. Також скористаємося поясненням віртуальної КВМ, запропонованим Німецьким національним метрологічним інститутом РТВ, а саме частини 2 (Єдність вимірювань координат при використанні методу віртуальної вимірювальної машини) [16], а саме:

- 1) віртуальна КВМ використовує послідовну симуляцію точкових вимірювань з точним моделюванням елементарних внесків в непевність, що збурює кожен з пробних точок;
- 2) існує три головних видів внесків, а саме: відомі систематичні (які не завжди можуть бути відомі користувачу), невідомі систематичні (відтворювані тільки в короткому часовому проміжку) та випадкові внески;
- 3) оцінка координат отриманих в процесі симуляції повинна бути якомога ближчою до оцінки реальних координат;
- 4) симуляція повторюється статистично вагому кількість разів.

Усі відомі систематичні внески залишаються незмінними, всі невідомі систематичні внески змінюються в кожній симуляції, беручи до уваги їх межі та на всьому проміжку функцій їх можливих значень, беручи до уваги припущення щодо їх розподілу. Після кожної симуляції розраховується різниця між реальним вимірюванням і значеннями, отриманими в процесі роботи програми. Після закінчення необхідної кількості віртуальних експериментів проводиться статистичне оцінювання отриманих результатів. Зрештою, розширена непевність U для ($k = 2$) вноситься до звіту про вимірювання [15]. Моделювання з використанням методу Монте-Карло, математичної основи програм для оцінювання непевності, описано в Додатку до подання непевності у вимірюваннях GUM [5]), використовуючи розподіли імовірних внесків і математичну модель вимірювання непевності вимірювання та її реалізацію методом Монте-Карло. Цей метод передбачає довільну кількість вхідних величин, але вихідними даними є лише одна величина. Описаний метод є практичною та ефективною альтернативою до запропонованого в GUM підходу до визначення непевності.

Приклади реалізації вЗВТ

Розглянемо реалізацію вЗВТ на прикладі типової КВМ. В такій реалізації першочерговим завданням є оцінювання поля залишків, зазвичай це виконується виробником. Для цього необхідний еталон наприклад, плита з круглими отворами, в ідеальному випадку виготовлена з матеріалу з низьким коефіцієнтом теплового розширення (наприклад церодур). Ця плита в свою чергу вимірюється в шести конфігураціях – площинах, що описують умовний куб – об'єм вимірювання. Типовими площинами вимірювання є паралельні до ХУ-площини (на двох різних висотах), площини, паралельні до ХZ (вимірювання з обох боків) та паралельні до YZ площини (вимірювання з обох боків). Наступним кроком є вимірювання температурних градієнтів навколо КВМ. Нарешті, важливо описати кінематичний ланцюг, тобто послідовність рухомих осей. За допомогою цієї інформації програма вЗВТ моделює реальний КВМ. На практиці необхідно надати результати калібрування системи зондів та дані щодо зміни температури досліджуваного об'єкта. Далі програмою здійснюється симуляція (100 – 200 разів) на вЗВТ, змінюючи щоразу вхідні дані, внески машини, середовища.

Сьогодні комерційно доступний пакет для віртуального КВМ MegaKal можна інтегрувати у програмне середовище КВМ Calypso від Zeiss та Quindos від Leitz [15]. Програма інстальється на комп'ютер КВМ та працює одночасно з вимірюванням (он-лайн). Вхідними параметрами для програми є геометричні похибки, похибки зонда, стратегія вимірювання та пробні точки. Геометричні похибки і похибка зонда визначається експериментально, використовуючи програму Kalkom [15]. Стратегія вимірювання і координати точок зондування імпортуються з програмного забезпечення КВМ. Перевагою такого підходу моделювання з використанням методу Монте-Карло є його лише одноразове виконання, доки умови вимірювання деталі не змінюються. Важливою перевагою такого методу оцінювання непевності є можливість його здійснення без проведення реального дослідження. Таким чином можна підібрати, таку кількість точок вимірювання та конфігурацію стилуса, щоб забезпечити найкращі результати вимірювання. Віртуальні засоби вимірювання пройшли довгий шлях для забезпечення вітворюваності вимірювання і на даному етапі активно виконуються роботи з включення до віртуальної КВМ сканувальних та індексних обертових столів [15].

Спроби створення вЗВТ характерні не лише для КВМ, але й для інших засобів, наприклад, створення віртуального растрового електронного мікроскопа [10, 13, 17-19]. В процесі цього дослідження було встановлено неможливість створення програми на основі імітатора через складність розрахунків, зате було створено програму на основі симулятора і проведено дослідження щодо її використання. Передбачається розробка вЗВТ і для інших галузей науки і техніки [20]. На важливість створення віртуальних засобів вказує також відкриття центру вивчення і навчання у сфері вЗВТ при національному метрологічному інституті РТВ (ФРН).

5. Висновки

Сьогодні віртуальні засоби вимірювання є ефективним способом оцінювання непевності координатно-вимірюваних машин. Швидко визначення непевності вимірювання дає змогу якісно проводити навчання спеціалістів у цій сфері, наочно показуючи переваги та недоліки різних стратегій вимірювання. Це уможливило якісне оцінювання непевності вимірювання у різних умовах, використовуючи різну кількість точок, конфігурації стилуса та швидкість вимірювання. Таким чином розробка відповідних віртуальних засобів вимірювання для інших засобів вимірювання, що передбачають велику кількість впливних чинників є цікавим та необхідним завданням. Дослідження і впровадження віртуальних засобів вимірювання для цифрового мікроскопа є нашим наступним завданням.

Список літератури

- [1] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections). 2008, Paris: BIPM Joint Committee for Guides in Metrology. [Online]. Available: https://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf. Accessed on Aug 7, 2020.
- [2] EN ISO 15530-3:2011 Geometrical product specifications (GPS) - Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards.
- [3] ISO/TS 15530-4:2008 Geometrical product specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement – Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation.
- [4] K.D. Sommer, B.R. Siebert, "Praxisgerechtes bestimmen der messunsicherheit nach gum (practical determination of the measurement uncertainty under gum)", *tm-Technisches Messen/Sensoren, Geräte, Systeme*, no. 2(71), pp.52-66, 2004.
- [5] JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data-supplement 1 to the guide to the expression of uncertainty in measurement-propagation of distributions using a Monte Carlo method [Online]. Available: https://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf. Accessed on Aug 7, 2020.
- [6] R. Hanus, B. I. Stadnyk, A Kowalczyk, "Virtualnyi zasib dlia vymiruvannia zapiznennia metodom spektralnoi hustyny potuzhnosti", *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politehnika"*: *Avtomatyka, vymiruvannia ta keruvannia*, no. 475, pp. 3–8, 2003. (in Ukrainian).
- [7] A. Ozghovych, I. Likhnovskiy, O. Tyshchenko, A. Kuzii, "Pobudova shkal virtualnykh vymiruvalnykh pryladiv", *Vymiruvalna tekhnika ta metrolohiia*, vol. 75, pp. 27-3, 2014. (in Ukrainian).
- [8] M. Trenk, M. Franke and H. Schwenke, "The 'Virtual CMM' a software tool for uncertainty evaluation—practical application in an accredited calibration lab", in *Proc. of ASPE: Uncertainty Analysis in Measurement and Design*, 2004.
- [9] Y. A. Novikov, "Virtual Measuring Instruments", *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, vol.10, pp. 68–75, 2016.
- [10] Y. A. Novykov, "Vyrtnalnyi rastrovyy elektronnyi mykroskop. 2. Pryntsypy postroyeniya prybora", *Mykroelektronika*, vol. 42, no. 4, pp. 262-270, 2013. (in Russian).
- [11] S. Mordechai, *Applications of Monte Carlo Methods in Science and Engineering*, London, UK, IntechOpen, 2011.
- [12] S. Thompson, "Random number generators for C++ performance tested". [Online] Available: <http://thompsonsed.co.uk/random-number-generators-for-c-performance-tested>. Accessed on Aug 7, 2020.
- [13] Y. A. Novykov, "Vyrtnalnyi rastrovyy elektronnyi mykroskop. 4. Realyzatsiya na osnove symuliatora", *Mykroelektronika*, vol. 43, no. 6, pp. 456-467, 2014. (in Russian).
- [14] M. E. O'Neill, "PCG: A Family of Simple Fast Space-Efficient Statistically Good Algorithms for Random Number Generation". [Online]. Available: <https://www.cs.hmc.edu/tr/hmc-cs-2014-0905.pdf>. 2014. Accessed on Aug 7, 2020.
- [15] D. Flack, "Good Practice Guide No. 130. Coordinate measuring machine task-specific measurement uncertainties", 2013. [Online]. Available: https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg130_machine. Accessed on Aug 7, 2020..
- [16] E. Trapet, "Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine: Part 2 of the Final Report Project MAT1-CT94-0076", Braunschweig, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, vol. 35, pp. 147, 1999.
- [17] Y. A. Novykov, "Vyrtnalnyi rastrovyy elektronnyi mykroskop. 1. Tsely y zadachy vyrtualnykh pryborov", *Mykroelektronika*, vol. 42, no. 1, pp. 34-41, 2013. (in Russian).
- [18] Y. A. Novykov, "Vyrtnalnyi rastrovyy elektronnyi mykroskop. 3. Poluempyrycheskaia model formyrovaniya syhnala REM", *Mykroelektronika*, vol. 43, no. 4, pp. 263-274, 2014. (in Russian).
- [19] Yu. A. Novykov, "Vyrtnalnyi rastrovyy elektronnyi mykroskop. 5. Prymeneniye v nanotekhnolohyy y v mykro y nanoelektronnyke", *Mykroelektronika*, vol. 44, no. 4, pp. 306-320, 2015. (in Russian).
- [20] PTB Competence Center "Metrology for Virtual Measuring Instruments"(VirtMet). [Online]. Available: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/PSt/pst1/VirtMet_Whitepaper_public_EN.pdf. Accessed on Aug 7, 2020.