

УДК 389.14

В.В. Новіков

*Одеська державна академія технічного регулювання та якості, Одеса, Україна*

## ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО: СТАН, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ

*В даній роботі проведено аналіз методу Монте-Карло оцінювання невизначеності результатів вимірювань. Виділено модифікацію методу Монте-Карло, як перспективний напрямок вирішення проблеми підвищення точності оцінювання невизначеності вимірювань. Проаналізовано можливості використання новітніх інформаційних технологій для реалізації даного методу. Висвітлене коло подальших досліджень з метою впровадження модифікації методу Монте-Карло в практичну діяльність.*

**Ключові слова:** невизначеність вимірювання, метод Монте-Карло, інформаційні технології

### Вступ

Більшість галузей діяльності людини так чи інакше пов'язана з проведенням вимірювань. Зрозуміло, що вимірювання несуть в собі невизначеність, яка може бути по різному виражена та обчислена для конкретних результатів вимірювань. Задачі підвищення точності результатів вимірювань були і залишаються актуальними не тільки в метрології, а і у багатьох сферах науки та техніки, які використовують результати вимірювань.

Потреби сучасної науки та техніки у дешевих та достовірних, але, одночасно, складних та масових вимірюваннях виражаються особливо стрімко в новітній час, коли розширюється коло вимірювальних задач, виникають нові області вимірювань, змінюються концепції застосувань вимірювань, переглядаються основні фізичні постулати, змінюються стандарти автоматизованих виробництв та програмного забезпечення обчислювальних систем та інформаційно-управляючих систем, систем прийняття рішень, тощо. З розвитком обчислювальної техніки, появою мережі Інтернет, об'єми та складність вимірювань в світі стрімко зростає, з одночасним зростанням вимог щодо точності останніх [1, 2].

Точність результатів вимірювань прямо впливає на якість наукових досліджень [1 – 3]. При недостовірному вимірюванні може бути отриманий неправильний результат, тобто хибні висновки чи інтерпретації, що може привести до фатальних наслідків. З іншого боку, підвищення точності результатів вимірювань дозволяє отримати нове знання або нову технологію, наприклад, поява та існування будь-якої нанотехнології залежить від нової якості результатів вимірювань [4].

Від точності результатів вимірювань в сучасному світі залежить життя людини. Під час діагностування та лікування хворого для приймання того чи іншого рішення використовується цілий спектр різних результатів вимірювань [5, 6]. Недостовірне

вимірювання показників безпеки харчової продукції чи техніки може призвести до катастрофічних наслідків. З іншого боку, підвищення точності результатів вимірювань призводить до нової якості побуту та життя людини [3, 7].

Від характеристик точності значень фізичних величин національних еталонів залежать всі вимірювання в країні. Тобто, підвищення точності значення фізичної величини, що відтворюється національним еталоном призводить до підвищення точності всіх вимірювань даної фізичної величини в країні. Від точності значень фізичних величин, що відтворюються національними еталонами всіх країн, зважаючи на ключові міжнародні порівняння, залежать результати вимірювань в усьому світі [8].

Одним із можливих шляхів вирішення проблеми підвищення точності вимірювань є вдосконалення засобів та методів вимірювань. Проте очевидно, що будь-яке вдосконалення такого типу пов'язане із значними матеріальними витратами, вимогами до технологій, що не завжди можуть бути вирішені [1, 9]. Інший шлях вирішення проблеми підвищення точності результатів вимірювань полягає у вдосконаленні саме методів та засобів обробки результатів вимірювань.

З зростанням обчислювальних потужностей, в останнє десятиліття можна виділити новий етап розвитку взаємодії метрології та інформаційних технологій з метою створення методів обробки результатів вимірювань [10]. Метод Монте-Карло (ММК) оцінювання результату вимірювання та його невизначеності позначає цей етап [11 – 22]. На даний момент, метод вважається таким, що може задовольнити сучасні вимоги галузей застосувань результатів вимірювань та регламентований міжнародними нормативними документами.

Проте, незважаючи на проведені дослідження та певну стандартизацію методу, аналіз показав, що, задачі практичного використання методу, дослідження обмежень застосування та умов щодо точ-

ності його роботи не були вирішені, зважаючи на недоліки методу.

Тому, метою даної роботи є дослідження методу ММК оцінювання невизначеності результатів вимірювань в рамках сучасних обчислювальних та інформаційних технологій.

### Методи оцінювання невизначеності в рамках модельного підходу

Даний підхід використовує функцію щільності розподілу(або функцію розподілу) та її параметри для вираження та опису знань щодо значень показників точності вимірювань [9]. Фундаментальною залежністю між вхідними величинами та вимірюваною величиною згідно даного підходу є модель. Нехай  $n$  вхідних(випадкових) величин позначені як  $X = (X_1, \dots, X_n)^T$  і вимірювана величина, вихідна величина як  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)^T$ . Тоді математична модель вимірювання  $Y = f(X)$  може бути аналітичною функціональною залежністю, чисельно наближеною функцією або певним алгоритмом.

Розглянемо аналітичні методи оцінювання точності результатів вимірювань. Основа для точних аналітичних методів – так звана формула Маркова [34, 35]:

$$g(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} g_{in}(x) \delta(y - f(x)) dx_n dx_{n-1} \dots dx_1, \quad (1)$$

тут  $\delta(\cdot)$  – дельта функція Дірака;  $g_{in}(x)$  – сумісна функція щільності (далі – PDF) розподілу вхідних величин;  $g(y)$  – PDF вихідної величини.

Загальновідомо, що задача точного аналітичного визначення  $g(y)$  чи  $G(y)$  вирішена лише для найпростіших випадків [9, 23]. Наприклад, для суми/різниці двох чи будь-якої скінченної кількості нормально-розподілених величин отримані точні аналітичні результати за допомогою формули згортки та швидкого перетворення Фур'є [11, 24]. Оскільки клас вимірювальних задач не обмежується тільки адитивними моделями нормально-розподілених величин, використовуються наближені аналітичні методи [1, 9].

Наближені аналітичні методи [9, 23] базуються на розкладі моделі вимірювання в ряд Тейлора до членів певного порядку малості для оцінки стандартного відхилення вихідної величини(результату вимірювання) з відомих оцінок стандартних відхилень вхідних величин. Розглядають поняття оцінювання стандартних невизначеностей вхідних величин за типом А та за типом В [9]. В практичній діяльності, найчастіше розглядають розклад до першого порядку малості, тобто, лінеаризацію моделі. Цей метод в деякій літературі називається законом розповсю-

дження(чи поширення) дисперсій (ЗРД) [1, 9, 16]. Отримавши оцінку дисперсії, робиться емпіричне припущення щодо закону розподілу  $Y$ . Інтервал покриття(чи довірчий інтервал), що необхідний для практичних цілей знаходиться шляхом множення оцінки стандартного відхилення на певний квантіль відповідного розподілу.

У випадку припущень щодо різних законів розподілів результату вимірювання, знаходження відповідних квантілів може бути складною задачею [9, 12, 25]. Наприклад, для закону Ст'юдента необхідно оцінити так зване число «ефективних ступенів свободи» з метою обчислення квантілю. Для цього необхідно застосовувати формулу Вельча-Саттерсвейта [26], яка сама по собі має певні обмеження щодо застосування та використовує деякі припущення.

Враховуючи всі вищезазнані спрощення, припущення, недоліки та деякі обчислювальні складності даного методу, можна поставити питання про достовірність отримуваних результатів роботи ЗРД в загальному випадку. Як показано в ряді робіт [10, 13 – 15, 27], цей метод не задовольняє вимоги щодо точності і може бути застосований не для всіх практичних задач.

Розвиток чисельних методів оцінювання точності результатів вимірювань відбувався послідовно за аналітичними, не спроможними отримати розв'язки або необхідну достовірність цих розв'язків і, в більшості випадків, базувався на них. Чисельні методи можна поділити на реалізацію ЗРД чисельними методами, реалізацію чисельного інтегрування та метод Монте-Карло (далі – ММК).

ЗРД чисельними методами реалізовано всебічно в рамках багатьох програмних продуктів для автоматизації процесу оцінювання невизначеності вимірювань [28]. Подібне програмне забезпечення на даний момент широко використовується в практиці зарубіжних та вітчизняних випробувальних лабораторій, але, як і звичайне застосування ЗРД, має всі притаманні недоліки.

Зрозуміло, що пряме застосування формули (1), як бази для чисельних методів, тобто чисельного інтегрування, є сумнівним. Була б необхідна багатовимірна чисельна процедура інтегрування з заданою точністю для кожного  $y$ . Більше того, процедуру необхідно було б повторити для великої множини значень  $y$ , щоб адекватно оцінювати  $g(y)$ . Для практичних задач це потребує величезного об'єму обчислень. Авторам відомі лише деякі спроби отримати результати таким методом [11, 23, 24].

Замість того, щоб оцінювати інтеграл (1), метод Монте-Карло пропонує інший підхід, що базується на імітаційному чисельному моделюванні вимірювання.

## Метод Монте-Карло оцінювання невизначеності вимірювань

Авторами методу Монте-Карло прийнято вважати Дж. фон Неймана та С. Улама. Датою народження загального ММК прийнято вважати 1949р., коли з'явилася робота під назвою «Метод Монте-Карло» Н. Метрополіса і С. Улама [29]. Але можна згадати і роботу Енріко Фермі, який вже у 1934 році фактично використав метод Монте-Карло (ще без такої назви) для вирішення задачі дифузії нейтронів [30]. Зрозуміло, що до появи обчислювальної машини цей метод не міг знайти широкого застосування, оскільки моделювати випадкові величини вручну – дуже трудомістка робота. Поява ММК як універсального чисельного методу стало можливим лише завдяки створенню та подальшому розвитку обчислювальної техніки.

В СРСР перші статті було опубліковано В.В. Чавчанідзе, Ю.А. Шрейдером та В.С. Владіміровим в 1955–57 рр.[31]. Розвиненням теорії застосування ММК для вирішення різних математичних задач займалися І.М.Соболь, Н.П. Бусленко, С.М. Ермаков [32]. Зрозуміло, що нові підходи та нові застосування були тісно пов'язані із зростанням обчислювальних потужностей комп'ютерів, а отже, і з розширенням класу вирішуваних ММК задач.

На разі, ММК продовжує суттєво впливати на розвиток методів обчислювальної математики та при розв'язку багатьох задач успішно поєднується з іншими методами, сучасними технологіями та доповнює їх. Його застосування виправдане в тих задачах, котрі допускають теоретико-імовірнісний опис, а також мають невизначеність. Це пояснюється як природністю отримання розв'язку з деякою заданою імовірністю в задачах з імовірнісним змістом, так і суттєвим спрощенням процедури розв'язку.

Процес вимірювання очевидно має імовірнісний зміст і невизначеність, а отже ММК природно і інтуїтивно застосований в цій області.

Нещодавно ММК почали використовувати для обчислення невизначеності в різних задачах, у тому числі не метрологічних [33 – 35]. З іншого боку, завжди виникала необхідність оптимізації ММК, для зменшення його обчислювальної складності [10, 28, 34, 35].

Слід відмітити, що в останні шість-сім років кількість публікацій з застосувань ММК для оцінювання невизначеності вимірювань стрімко зростає [11 – 23], що пояснюється спектром переваг цього методу. Переваги перш за все полягають у точності вираження невизначеності результатів вимірювань та відсутності необхідності робити будь-які апріорні припущення в порівнянні з методами, що розглянуті вище. Вперше застосування ММК в новій області,

для оцінювання невизначеності вимірювань було запропоновано М. Коксом [18].

В Україні цей метод вперше було представлено І.П. Захаровим [13] для перевірки правильності роботи наближених аналітичних методів. Враховуючи обчислювальні складнощі та необхідність потужної обчислювальної техніки класу супер – ЕОМ, на той час припущення щодо широкого застосування технології в практиці було сумнівне.

Однак, автори вважають, що саме ММК в рамках сучасних інформаційних технологій є одним із основних напрямків підвищення достовірності оцінок точності результатів вимірювань. В роботі [15] було запропоновано повністю відмовитися від наближених аналітичних та інших чисельних методів, і використовувати тільки ММК для реалізації інформаційних технологій з обробки результатів вимірювань в метрологічній практиці.

Алгоритм класичного ММК оцінювання невизначеності вимірювань коротко описується наступними кроками (для одновимірного випадку) [11]:

1. Згідно до заданих функцій щільності розподілів вхідних величин  $g_{in}(x)$  (або сумісної щільності) згенерувати  $M$  реалізацій наборів вхідних величин. Для цього повинні використовуватись генератори псевдовипадкових чисел з періодом набагато більшим за  $M$ .

2. Використовуючи математичну модель вимірювання  $f(x)$  обчислити  $M$  значень  $y_1...y_M$ .

3. За результат вимірювання приймається  $y$  – середнє арифметичне набору  $y_1...y_M$ , стандартну невизначеність – оцінку стандартного відхилення, наприклад середньоквадратичне відхилення  $y_1...y_M$ . Отримані  $y_1...y_M$  сортуються за зростанням якими можна оцінювати PDF. Визначається інтервал покриття для імовірності  $p$

$$: y_{\left[\frac{(1-p)*M}{2}\right]}, y_{\left[\frac{(1+p)*M}{2}\right]},$$

припускаючи симетричний закон розподілу. За необхідності, можна отримати оцінки вищих моментів з отриманої послідовності реалізацій.

Згідно центральної граничної теореми оцінка першого моменту збігається зі швидкістю  $1/\sqrt{M}$ , якщо стандартне відхилення  $y$  існує, тобто не залежить від кількості вхідних величин, на відміну від задачі чисельного інтегрування (1). Тобто, необхідно (тільки) збільшити  $M$  в 4 рази, щоб очікувати покращення чисельної точності  $y$  на одну двійкову цифру. Для порівняння, під час застосування процедури чисельного інтегрування порядок збільшення був би кратний  $2^{M/2}$ .

Достовірність результатів, отриманих за ММК для практичних вимірювальних задач неодноразово

було підтверджено в роботах [11, 13 – 15, 23]. Нормативний документ [10] формально регламентує оцінювання невизначеності вимірювань за ММК і рекомендує використовувати цей метод для оцінювання невизначеності вимірювань, як найбільш точний з усіх описаних в НД. Хоча і зауважує його обчислювальну складність і тому, не вимагає застосування для всіх вимірювальних задач.

### **Модифікації ММК та їх необхідність**

Авторам відомий ряд досліджень [11 – 13, 17, 18, 23], у яких рекомендують вибирати  $M = 10^5 \dots 10^6$  для практичних вимірювальних задач, з аргументуванням, що для більшості задач такого  $M$  повинно бути достатньо для отримання необхідної точності.

Якщо вибирати  $M$  апіорі таким чином, то можливо реалізувати такі два випадки:

1. Алгоритм буде задовольняти вимоги задачі щодо точності (можливо навіть з більшою точністю, ніж необхідно), але будуть проведені зайві обчислення. Тобто, алгоритм буде не ефективним, особливо зважаючи на те, що для складних задач з великою кількістю вхідних величин час роботи алгоритму є досить суттєвий – від секунд до хвилин (для  $M = 10^6$ ) на сучасних комп'ютерах, але давати достовірні результати.

2. Вибраного  $M$  буде недостатньо для даної задачі і алгоритм не буде задовольняти вимоги щодо точності для конкретної задачі.

Питанням вибору параметру  $M$  алгоритму ММК залишається відкритим. Більше того, цей параметр не можна вибрати заздалегідь якимось чином щоб гарантовано отримувати необхідну точність із за випадкової природи моделювання. Тому логічним кроком до підвищення ефективності алгоритму, зменшення обчислень та гарантування точності є модифікація ММК.

Кокс М. у 2006 році запропонував так званий «блочний» ММК [11]. Він базується на багатократному застосуванні класичного ММК і обробки результатів роботи окремих запусків ММК. Тобто, окрім параметру  $M$  (розмір «блоку») додається ще параметр –  $M1$  (кількість «блоків»). Критерій зупинки методу, тобто кількість «блоків», базується на стабілізації відхилення в рамках заданої точності. Блочний ММК оптимізує обчислення та може (в більшості задач) гарантувати точність. Слід зауважити, що збіжність такого «блочного» ММК не слідує очевидно зі збіжності класичного ММК. Авторам відомі задачі [20, 22], які не мали коректного розв'язку з точки зору заданої точності та мали відсутність збіжності методу на практиці [21]. Лише нещодавно [36] отримані результати щодо умов збіжності «блочного» ММК.

Автори роботи [19] пропонують ввести адаптивність до алгоритму ММК. Зважаючи на стохастичну природу чисельного методу, адаптивний ММК реалізує послідовний ітеративний вибір параметра  $M$  в залежності від заданої точності (до оцінок точності). Адаптивний ММК перевіряє умову щодо достатньої достовірності своїх результатів (у вигляді обмеження на довірчий інтервал) і, якщо вона не виконується, то продовжує збільшення кількості реалізацій до того моменту, поки умови щодо достовірності оцінок невизначеності буде виконано. Отримані результати обчислювального експерименту показали високу ефективність даної модифікації [19]. Окрім того, метод може гарантувати точність отримуваних результатів з певною імовірністю. Збіжність такої модифікації очевидним чином витікає зі збіжності класичного ММК. На думку авторів, подібна оптимізація ММК дозволить впроваджувати алгоритм у вигляді програмних засобів та блоків обробки результатів вимірювань певних інструментальних засобів вимірювальної техніки для деяких реальних вимірювальних задач.

### **Реалізація ММК з застосуванням новітніх обчислювальних технологій**

Розглядаючи практичну сторону реалізації ММК, з врахуванням кількості реалізацій методу, складності обчислень та розмірності вимірювальних задач, його застосування потребує значного обчислювального часу. Зі збільшенням вимог до достовірності необхідних оцінок точності, адаптивний ММК може мати суттєвий час обчислення [19], що може зробити результат обчислення неактуальним, а отже і непотрібним. Авторам відомі інші роботи [21, 37] в яких не вистачало обчислювальних потужностей комп'ютерів для отримання результатів оцінювання невизначеності практичних вимірювальних задач, наприклад, вимірювання еталону довжини [37] з застосуванням ММК. Зрозуміло, що для таких задач можна застосовувати потужності супер-ЕОМ, але з економічної точки зору необхідно шукати інші шляхи вирішення даної проблеми.

Кілька років тому були отримані результати реалізації класичного ММК на розподілених обчислювальних системах для одної складної вимірювальної задачі [21]. Результати роботи показали ефективність використання розподілених обчислювальних систем для цієї задачі, але були поставлені питання необхідності певних критеріїв для розподілення обчислень ММК з метою їх подальшої оптимізації.

Зрозуміло, що сучасні обчислювальні машини є багатоядерними та багатопроцесорними, що дає базис для реалізації ММК на таких машинах. Можливість паралельності обчислень в алгоритмі ММК не

викликає сумнів. Наприклад, можна розділити обчислення по кожній окремій реалізації методу, по етапам алгоритму, тощо.

З точки зору авторів, цікавою є також реалізація ММК на GPU (Graphical Processing Unit). Це пояснюється природою обчислень, що виникають в ММК. Задачі, що виникають в ММК, а саме задачі генерування псевдовипадкових чисел, обчислення складних функцій та сортування великих масивів можуть з високою швидкістю виконуватись на GPU [38]. Беручи до уваги технологію GPU, іншим можливим шляхом оптимізації алгоритму може бути розділення алгоритму по окремим реалізаціям ММК, що необхідно окремо дослідити.

Обидва запропонованих підходи вирішення проблеми є більш економічно вигідними, ніж застосування супер – ЕОМ чи розподілених обчислювальних систем.

### Обмеження застосування ММК

До нещодавнього часу вважалося, що ММК є універсальним методом для оцінювання невизначеності вимірювань, що може використовуватися для перевірки коректності роботи наближених аналітичних чи інших чисельних методів. Як показано авторами [39], існує клас задач, для яких ММК (як класичний так і адаптивний) дає в певному сенсі недостовірні результати [20, 39] при будь-якій (скінченній) кількості реалізацій. Було запропоновано вдосконалення методу, що збільшує клас математичних моделей вимірювань, до яких можна застосовувати ММК, але дещо збільшує обчислювальну складність методу. Сформовано певні критерії застосовності ММК, що необхідні для універсально використання ММК і реалізації ММК в рамках програмного продукту з метою практичного використання в практиці для отримання достовірних оцінок точності результатів вимірювань.

Також, до недоліків ММК варто віднести загальні недоліки модельного підходу, а саме: евристичність підходу, спрощеність та обмеженість модельних рівнянь, неточність визначення вхідних величин, їх характеристик, тощо.

### Висновки

В роботі розглянуто метод Монте-Карло оцінювання невизначеності результатів вимірювань, як перспективний серед інших підходів до вирішення задачі оцінювання невизначеності результатів вимірювань. Висвітлено новітні результати з покращень та модифікацій цього методу, оглянуто коло подальших досліджень з метою підвищення достовірності результатів вимірювань, їх оцінок точності. Показана необхідність проведення міждисциплінарних досліджень в рамках інформаційних технологій та метрології.

### Список літератури

1. Захаров И.П. Оценивание точности измерений: состояние, проблемы, перспективы / И.П. Захаров // АСУ и приборы автоматики. – 2005. – Вып. 131. – С. 176-181.
2. Large Hadron Collider Project Reports [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://cdsweb.cern.ch/collection/LHC%20Project%20Reports?ln=ru>.
3. Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений / М.А. Земельман. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 228 с.
4. Тодуа П.А. Метрология в нанотехнологии / П.А. Тодуа // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 1-2. – С. 61-69.
5. Эмануэль В.Л. Медицина по мере развития лабораторных и инструментальных технологий из области искусства избранных все больше становится наукой одаренных [Електронний ресурс] / В.Л. Эмануэль. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.clinlab.ru/win/Qualit/article2.htm>.
6. Медичні клініко-діагностичні лабораторії: особливості міжнародних вимог до компетенції / Д. Зоргач, О. Никитюк, В. Новіков, А. Пазюк // Стандартизація, Сертифікація, Якість. – 2009. – № 2. – С. 31-33.
7. Винер Н. Кибернетика. Управление и связь в животном и машине / Н. Винер. – М., 1958.
8. Cox M.G. The evaluation of key comparison data / M.G. Cox // Metrologia. – 2002. – 39. – P. 589-595.
9. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). – First edition 2008. – JCGM. – 2008. – 120 p.
10. 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 – First edition 2008. – JCGM. – 2008. – 82 p.
11. Cox M.G. The use of a Monte Carlo method for evaluating uncertainty and expanded uncertainty / M.G. Cox, B. Siebert // Metrologia. – 2006. – Vol. 43. – P. 178-188.
12. Захаров И.П. Развитие теории и методов оценивания точности результатов измерений с учетом концепции неопределенности: дисс. ... докт. техн. наук: 05.11.15 / И.П. Захаров. – Х., 2006. – 351 с.
13. Захаров И.П. Применение метода Монте-Карло для реализации алгоритма статистической обработки результатов измерительного эксперимента / И.П. Захаров, Н.В. Штефан // Український метрологічний журнал. – 2004. – № 1. – С. 8-14.
14. Новиков В.В. Вычисление расширенной неопределенности / В.В. Новиков // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2007. – Вип. 6 (64). – С. 73-77.
15. Новиков В.В. Численные методы в вычислении неопределенности / В.В. Новиков // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 4 (71). – С. 126-128.
16. Walter Bich. Evolution of the ‘Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement’ / Walter Bich, Maurice G. Cox, Peter M. Harris. // Metrologia. – 2006. – № 43. – P. 161-166.
17. Захаров И.П. Применение метода Монте-Карло для оценивания неопределенности в измерениях / И.П. Захаров, С.В. Водотыка // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2008. – Вип. 4 (71). – С. 34-37.
18. Кокс М. Оценивание неопределенности измерений на основе трансформирования распределений с использованием моделирования по методу Монте-Карло / М. Кокс, П. Харрис, Б.П.-Л. Зиберт // Измерительная техника. – 2003. – № 9. – С. 9-14.
19. Новіков В.В. Інформаційні технології та оптимі-

- зація методів оцінювання точності результатів вимірювань з урахуванням концепції невизначеності / В.В. Новиков // Нові технології. – Кременчук, 2009. – Вип. 1 (23). – С. 101-114.
20. Hall B.D. Evaluating methods of calculating measurement uncertainty / B.D. Hall // Metrologia. – 2008. – Vol. 45. – P. L5-L8.
21. A Monte Carlo method for uncertainty evaluation implemented on a distributed computing system / T.J. Esward, P.M. Harris, and others. // Metrologia. – 2007. – Vol. 44. – P. 319-326.
22. Muller M., Wolf M., Rosslein M., Gander W. Limits of the uncertainty propagation: examples and solutions using the Monte Carlo method Transverse Disciplines in Metrology: Proc. 13th Int. Metrology Congress (Lille, France, 2007).
23. Cox M. and others. Best Practice Guide No6. Uncertainty and statistical modeling. Technical Report, National Physical Laboratory, Teddington, UK-2001.
24. Korc'zynski M.J. Convolution and uncertainty evaluation / M.J. Korc'zynski, M.G. Cox, P.M. Harris // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology VII ed P Ciarlini et al Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences vol. 72 (New Jersey: World Scientific). – 2006. – P. 188-195.
25. Willink R. A classical method for uncertainty analysis with multidimensional data / R. Willink, B.D. Hall // Metrologia. – 2002. – № 39. – P. 361-369.
26. Satterthwaite F.E. An approximate distribution of estimates of variance components / F.E. Satterthwaite // Biometrics Bulletin 2. – 1946. – P. 110-114.
27. Оценивание неопределенности первичного акустического эталона численными методами / В.П. Чальый, В.В. Паракуда, А.А. Костеров и др. // Измерительная техника. – 2005. – № 5. – С. 15-19.
28. Новиков В.В. Автоматизация процесса вычисления оценок неопределенности измерений / В.В. Новиков, А.Н. Коцюба // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2006. – Вип. 7 (56). – С. 59-61.
29. Metropolis N. The Monte Carlo Method / N. Metropolis, S. Ulam // J. Amer. statistical assoc. – 1949. – № 44 (247). – P. 335-341.
30. Segre E., ed. 1965. The Collected Works of Enrico Fermi. Chicago: The University of Chicago Press.
31. Бусленко Н.П. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах / Н.П. Бусленко, Ю.А. Шрейдер. – М.: Физматгиз, 1961. – 202 с.
32. Соболев И.М. Метод Монте-Карло / И.М. Соболев. – 4-е изд., доп. и перераб. – М.: Наука, 1985. – 78 с.
33. Soon Thiam Khu Reduction of Monte-Carlo simulation runs for uncertainty estimation in hydrological modeling / Soon Thiam Khu, Micha G.F. Werner // Hydrology and Earth System Sciences. – 2003. – № 7(5). – P. 680-692.
34. Monte-Carlo-Type Techniques for Processing Interval Uncertainty, and Their Potential Engineering Applications [Електронний ресурс] / V. Kreinovich, J. Beck, C. Ferregut, A. Sanchez, G.R. Keller, M. Averill, S.A. Starks. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.cs.utep.edu/vladik/2004/tr04-23c.pdf>.
35. Exploring uncertainty in glacier mass balance modelling with Monte Carlo simulation / H. Machguth, R.S. Purves, J. Oerlemans, M. Hoelzle, F. Paul // The Cryosphere Discuss. – 2008. – № 2. – P. 447-485.
36. Muller Martin. On the convergence of the Monte Carlo block design / Martin Muller, Christian Rink // Metrologia. – 2008. – Vol. 45. – P. L5-L8.
37. Testing phase-shifting algorithms for uncertainty evaluation in interferometric gauge block calibration / V Alvarez-Valado, H Gonz'alez-Jorge and others // Metrologia. – 2009. – Vol. 46. – P. 637-645.
38. Stream processors: a new platform for Monte Carlo calculations / Philippe Despr'es, Jean Rinkel, Bruce H. Hasegawa, Sven Prevrhal // Journal of Physics. – Conference Series. – 2008. – № 102 – P. 1-6.
39. Novikov V.V. Some considerations about validity of a Monte-Carlo method for evaluating measurement uncertainty / V.V. Novikov, Yu.A. Timoshenko // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.: ХУПС, 2009. – Вип. 4 (78). – С. 47-50.

Надійшла до редколегії 16.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

#### ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В.В. Новиков

В данной работе проведен анализ метода Монте-Карло оценки неопределенности результатов измерений. Выделено модификацию метода Монте-Карло, как перспективное направление решения проблемы повышения точности оценки неопределенности измерений. Проанализированы возможности использования новейших информационных технологий для реализации данного метода. Освещен круг дальнейших исследований с целью внедрения модификации метода Монте-Карло в практическую деятельность.

**Ключевые слова:** неопределенность измерений, метод Монте-Карло, информационные технологии.

#### MODERN SOLUTIONS TRENDS OF MEASUREMENT ACCURACY EVALUATION

V.V. Novikov

Paper discusses an analysis of the Monte Carlo method for estimating uncertainty of measurement results. The modification of the Monte Carlo method is noted as a promising solution to the problem of improving the accuracy evaluation of measurement uncertainty. The possibilities of the use of advanced information technologies for the implementation of this method are discussed. The scope of further research with the goal of practical implementation of the Monte-Carlo method is shown.

**Keywords:** measurement uncertainty, Monte-Carlo method, information technologies.