

---

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>8</b>
--------------------	----------

<b>РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ КОНЦЕПЦІЇ НЕПЕВНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ, КОНТРОЛЮ ТА ВИПРОБУВАНЬ.....</b>	<b>11</b>
--	-----------

1.1 Поняття непевності вимірювання .....	11
1.2 Класифікація непевностей вимірювання .....	14
1.3 Способи оцінювання стандартних непевностей .....	17
1.3.1 Оцінювання непевності за типом А .....	17
1.4 Форми подання складових непевностей.....	24
1.4.1 Форма подання стандартної непевності .....	26
1.4.2 Форма подання комбінованої непевності при некорельованих вхідних величинах.....	34
1.4.3 Форма подання комбінованої непевності при корельованих вхідних величинах.....	39
1.4.4 Форма подання розширеної непевності.....	42
1.4.5 Форма подання відносних непевностей. ....	45
1.4.6 Критерій перевірки наявності кореляції між парами результатів вимірювань. ....	46
Контрольні запитання .....	47

<b>РОЗДІЛ 2. ВИДИ НЕПЕВНОСТЕЙ.....</b>	<b>49</b>
--	-----------

2.1 Систематизація видів непевностей .....	49
2.1.1 Інструментальні складові непевності .....	49
2.1.2 Методичні складові непевності. ....	51
2.1.3 Суб'єктивні складові непевності.....	53
2.2 Сфера застосування суб'єктивних вимірювань .....	54
2.3 Принцип непевності Гейзенберга.....	56
2.4 Принцип доповнюваності і співвідношення непевностей.....	58
2.5 Принцип суперпозиції .....	60
2.6 Критерій нікчемної непевності.....	61
Контрольні запитання .....	63

### **РОЗДІЛ 3. ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ОСНОВІ КОНЦЕПЦІЇ НЕПЕВНОСТІ.....64**

3.1 Опрацювання результатів прямих вимірювань .....	64
3.1.1 Опрацювання результатів прямих вимірювань з одноразовими спостереженнями. ....	64
3.1.2 Опрацювання результатів прямих вимірювань із багаторазовими спостереженнями. ....	67
3.1.3 Опрацювання груп прямих вимірювань з багато- разовими спостереженнями. ....	70
3.2 Опрацювання результатів опосередкованих вимірювань .....	75
3.2.1 Оцінювання некорельованих вхідних величин. ....	77
3.2.2 Оцінювання корельованих вхідних величин.....	79
3.3 Опрацювання результатів сумісних вимірювань .....	80
3.4 Опрацювання результатів сукупних вимірювань .....	89
Контрольні запитання.....	93

### **РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА ПРИКЛАДИ ОЦІНЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ НЕПЕВНОСТІ .....94**

4.1 Практичні рекомендації щодо кількісного оцінювання непевності .....	94
4.1.1 Випадковість та повторність спостережень.....	94
4.1.2 Щодо оцінювання кореляції між вхідними величинами.....	95
4.1.3 Щодо оцінювання складових непевності типу В.....	98
4.1.4 Щодо оцінювання математично детермінованих розподілів .....	99
4.1.5 Щодо оцінювання запозичених значень величин .....	100
4.1.6 Деякі тонкощі оцінювання вхідних величин .....	101
4.1.7 Щодо оцінювання непевності зразка.....	105
4.2 Узагальнений алгоритм оцінювання та представлення непевностей вимірювань.....	106
4.3 Порівняльний аналіз двох підходів щодо вираження характеристик точності вимірювань.....	109
4.3.1 Методика перерахунку характеристик похибок в характеристики непевності вимірювань.....	117
4.3.2 Методика перерахунку характеристик непевності в характеристики похибки .....	120

---

4.4 Приклади оцінювання непевностей результатів вимірювань, контролю та випробувань.....	121
4.4.1 Калібрування кінцевої міри довжини .....	121
4.4.2 Вимірювання активної і реактивної складових імпедансів... ..	129
4.4.3 Калібрування термометра .....	135
4.4.4 Вимірювання активності.....	140
4.4.5 Вимірювання сили електричного струму .....	146
4.4.6 Багаторазові вимірювання частоти синусоїдального сигналу .....	152
4.4.7 Опрацювання груп спостережень при калібруванні еталона напруги .....	156
4.4.8 Оцінювання непевності результатів вимірювального контролю різниці частот обертання роторів електродвигунів .....	159
4.4.9 Оцінювання непевності вимірювального каналу активності іонів.....	166
4.4.10 Оцінювання непевності вимірювального контролю параметрів якості електроенергії.....	171
4.4.11 Оцінювання непевності опосередкованого вимірювання моменту інерції ротора за амплітудою крутильних коливань .....	179
4.4.12 Оцінювання непевності вимірювання довжини штрихової міри .....	185
4.4.13 Оцінювання непевності вимірювання зусилля .....	188
4.4.14 Оцінювання непевності вимірювання віброприскорення при калібруванні акселерометра.....	194
4.4.15 Оцінювання непевності вимірювання частоти обертання роторних систем .....	197
4.4.16 Оцінювання непевності сукупного вимірювання маси .....	205
4.4.17 Оцінювання непевності вимірювання надлишкового тиску газоподібного середовища за допомогою манометра МП-50М .....	207
4.4.18 Оцінювання непевності вимірювання густини твердого тіла .....	211
4.4.19 Оцінювання непевності вимірювання деформації клейковини.....	215
4.4.20 Методика оцінювання непевності результатів сукупних вимірювань .....	218

4.4.21 Оцінювання непевності результатів вимірювань опору ізоляції .....	224
4.4.22 Оцінювання непевності результатів вимірювань рН води .....	228
4.4.23 Оцінювання непевності вимірювання крутного моменту електродвигунів .....	231
4.4.24 Методика коригування міжкалібрувального інтервалу ЗВ на основі концепції непевності .....	235
4.5 Рекомендації щодо складання звіту про непевність .....	248
Контрольні запитання.....	251

## **РОЗДІЛ 5. НЕПЕВНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ .....252**

5.1 Динамічні характеристики засобів вимірювання .....	252
5.2 Форма представлення непевності динамічних вимірювань.....	258
5.3 Оцінювання динамічної непевності при вимірюванні віброприскорення.....	263
5.4 Оцінювання непевності вимірювання динамічного моменту роторних систем.....	274
5.5 Непевність відновлення сигналів під час динамічних вимірювань .....	280
Контрольні запитання.....	286

## **РОЗДІЛ 6. ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ.....287**

6.1 Експериментальний підхід до оцінювання непевності результатів випробувань .....	300
6.2 Приклад оцінювання непевності результатів випробувань при визначенні об'ємної частки бензолу .....	308
6.3 Застосування робастних методів при оцінюванні повторюваності результатів випробувань.....	311
6.4 Приклад застосування робастних методів при оцінюванні повторюваності лабораторних випробувань.....	319
6.5 Методика використання абсолютного медіаного відхилення при оцінюванні точності результатів випробувань.....	323

---

6.6 Приклад використання абсолютного медіаного відхилення при оцінюванні відтворюваності методики лабораторних випробувань .....	329
Контрольні запитання .....	332

<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>333</b>
---	------------

<b>ДОДАТКИ .....</b>	<b>341</b>
----------------------	------------

Додаток А Значення коефіцієнта $t_p(v)$ для випадкової величини, що має розподіл Стюдента з $v$ ступенями вільності.....	341
Додаток Б Квантиль F-розподілу при $p = 0,95$ .....	342
Додаток В Деякі перетворення Лапласа .....	343
Додаток Г Зв'язок між динамічними характеристиками засобів виміральної техніки.....	345
Додаток Д Таблиця інтегралів і їх перетворень.....	346
Додаток Е Варіанти контрольних завдань.....	347

## ВСТУП

При складанні звіту про результат вимірювання фізичної величини необхідно подати кількісне зазначення якості результату так, щоб можна було правильно оцінити його надійність. Без такого зазначення результати вимірювань не можна порівняти ні між собою, ні з довідковими величинами, поданими у специфікації чи стандарті. Тому необхідно, щоб була легкоздійсненна, зрозуміла і загальноприйнята процедура опрацювання результатів вимірювань, контролю та випробувань, що будується на основі концепції представлення непевності.

Поняття непевності як кількісної характеристики є порівняно новим у вимірюваннях, хоча похибка та аналіз похибки давно використовуються в метрології. На сьогоднішній день загальновизнано, що, коли вже оцінені всі відомі й допустимі компоненти похибки і внесені відповідні поправки, все ще залишається непевність відносно істинності встановленого результату, тобто сумніви у тому, наскільки добре результат вимірювання відображає значення вимірюваної величини.

Так само як практично універсальне використання Міжнародної системи одиниць (*SI*) внесло узгодженість у всі наукові і технологічні вимірювання, так і всесвітня узгодженість в оцінюванні та представленні непевності вимірювання повинна забезпечити належне розуміння і правильне використання широкого спектра результатів вимірювань в науці, техніці, торгівлі, промисловості, медицині. В еру світового ринку визначальним є те, щоб методика оцінювання і представлення непевності була однаковою у цілому світі, в результаті чого вимірювання, проведені в різних країнах, можна було легко порівняти.

Ідеальна методика оцінювання і представлення непевності результату вимірювання повинна бути універсальною: придатною для всіх видів вимірювань і для всіх типів вхідних даних, що використовуються у вимірюваннях.

Величина, яка безпосередньо використовується для представлення непевності, повинна бути внутрішньо узгоджена:

безпосередньо виведена з компонентів, які її утворюють, а також не повинна залежати від групування цих компонентів і від їх розкладу на субкомпоненти; повинна бути можливість прямого використання непевності одного результату як компонента оцінювання непевності іншого, в якому використовується перший результат.

Далі, у багатьох галузях промисловості і торгівлі, а також у сферах здоров'я і безпеки часто необхідно подавати результат вимірювання з інтервалом, у якому, можливо, знаходиться більша частина розподілу значень, які обґрунтовано можуть характеризувати кількісно вимірювану величину. Таким чином, ідеальна методика оцінювання і представлення непевності повинна забезпечувати такий інтервал, зокрема, інтервал з ймовірністю охоплення або рівнем довіри, які реально відповідають йому.

Цей підручник базується на методах, наведених у Міжнародному стандарті ISO/IEC GUIDE 98-3:2008, Керівництві з представлення непевностей у вимірюваннях (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) та Рекомендаціях Об'єднаного комітету по керівництвам в метрології JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology).

Непевність результату вимірювання у загальному випадку складається з кількох компонентів, які можна згрупувати у дві категорії, залежно від способу оцінювання їх числового значення: тип А – компоненти, оцінені статистичними методами; тип В – компоненти, оцінені іншими (нестатистичними) способами.

Між поділом на категорії А та В і поділом на «випадкові» і «систематичні» непевності, які раніше використовувалися, не завжди існує проста відповідність. Вираз «систематична непевність» може бути незрозумілим, його потрібно уникати.

Кожний детальний звіт про непевності повинен містити повний перелік компонентів і для кожного з них – метод, який використовувався при одержанні його числового значення.

Компоненти категорії А характеризуються оціненими дисперсіями  $S_i^2$  (або оціненими «стандартними відхиленнями»  $S_i$ ) і числом степенів вільності. У випадку необхідності слід зазначати коваріації.

Компоненти категорії В повинні характеризуватися величинами  $u_j^2$ , які можна розглядати як наближення до відповідних дисперсій, існування яких допускається. Величини  $u_j^2$  можна розглядати як дисперсії, а  $u_j$  – як стандартні відхилення. При необхідності, коваріації повинні розглядатися аналогічно.

Комбінована непевність повинна характеризуватися числовим значенням, одержаним при застосуванні звичайного методу для складання дисперсій. Комбінована непевність і її компоненти повинні представлятися у формі «стандартних відхилень».

Якщо в окремих випадках для одержання розширеної непевності комбіновану непевність необхідно множити на коефіцієнт, то коефіцієнт множення повинен бути завжди зазначений.

Основна мета підручника – набуття здобувачами вищої освіти компетентностей (умінь та знань) щодо способів оцінювання непевності результатів вимірювань, контролю та випробувань, а також представлення результатів досліджень на основі концепції непевності та наведених практичних прикладів розв'язання метрологічних завдань.

# РОЗДІЛ 1

## ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ КОНЦЕПЦІЇ НЕПЕВНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ, КОНТРОЛЮ ТА ВИПРОБУВАНЬ

### 1.1 Поняття непевності вимірювання

Слово непевність означає сумнів, і, таким чином, у широкому сенсі «непевність вимірювання» означає сумнів щодо достовірності результату вимірювання. Формальне означення терміну «непевність вимірювання» таке: **непевність вимірювання – невід’ємний параметр, пов’язаний з результатом вимірювання, який характеризує дисперсію значень, що можуть бути достатньо обґрунтовано приписані вимірюваній величині [1–4].**

Непевність (*uncertainty*) результату вимірювання відображає відсутність точного знання значення вимірюваної величини. Результат вимірювання після внесення поправки на відомі систематичні ефекти залишається лише оцінкою значення вимірюваної величини через непевності внаслідок випадкових ефектів і неточної поправки результату на систематичні ефекти.

Результат вимірювання (після внесення поправки) може бути максимально близьким до значення вимірюваної величини (і тому мати дуже малу похибку), навіть якщо він має велику непевність. Таким чином, непевність результату вимірювання не можна плутати з невідомою похибкою, що залишилась.

Оскільки точні значення складової похибки результату вимірювання невідомі і непізнавані, то непевності, пов’язані з випадковими і систематичними ефектами, що призводять до похибки, можуть бути оцінені. Але, навіть якщо оцінені непевності незначні, немає ніякої гарантії, що похибка результату вимірювання буде незначною, тому що при визначенні поправки або в оцінюванні неповноти знання якийсь систематичний ефект може не враховуватися, оскільки він не був розпізнаний. Таким чином, непевність результату вимірювання необов’язково є вказанням на правдоподібність того, що результат вимірювання близький до

значення вимірюваної величини; це просто оцінювання близькості результату вимірювання до найкращого значення, що відповідає наявним на цей час знанням.

Непевність вимірювання (*uncertainty of measurement*) виражає той факт, що для даної вимірюваної величини і для даного результату її вимірювання немає єдиного значення, а є нескінченне число значень, розсіяних навколо результату, який узгоджується з усіма спостереженнями та даними, а також зі знанням фізичного світу, який з різним ступенем упевненості може бути приписаний вимірюваній величині.

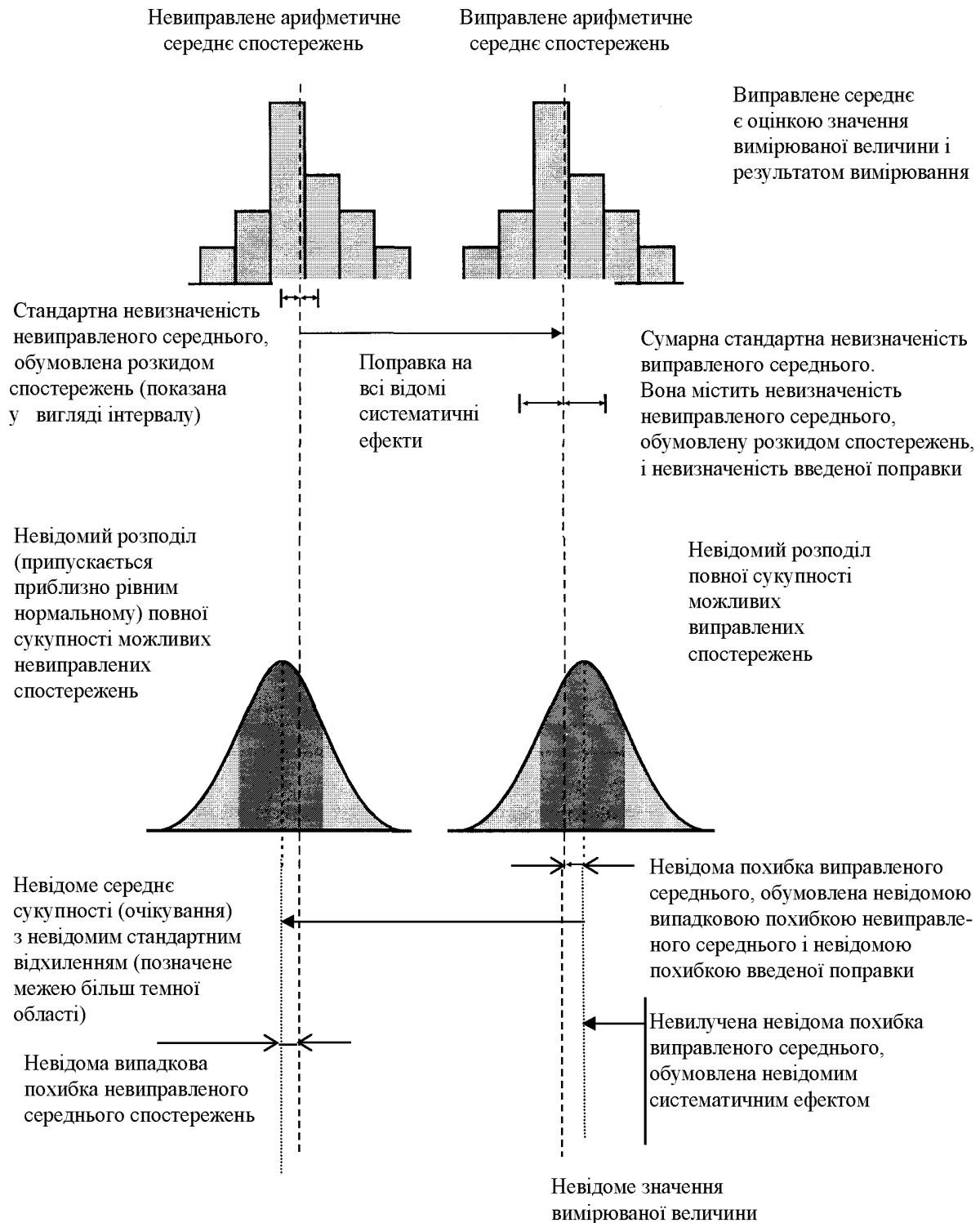
На рис. 1.1 наведено ілюстрацію значення непевності вимірювання. З цього рисунка видно, чому основна увага сконцентрована на непевності, а не на похибці [2–4].

Точне значення похибки результату вимірювання, як правило, невідомо. Усе, що можна зробити – це оцінити значення вхідних величин, враховуючи поправки на відомі систематичні ефекти разом із їхніми стандартними непевностями (оціненими стандартними відхиленнями), обумовленими як невідомими розподілами ймовірностей, вибірки для яких одержують шляхом повторних спостережень, так і суб'єктивними або апріорними розподілами, заснованими на всій наявній інформації; а потім розрахувати результат вимірювання за допомогою оцінених значень вхідних величин і комбінованої непевності цього результату; за допомогою стандартних непевностей у випадку, якщо є тверда впевненість у тому, що всі ці операції були виконані правильно і всі значимі систематичні ефекти були враховані. Можна припустити, що результат вимірювання є надійною оцінкою вимірюваної величини і що його комбінована непевність є надійною мірою її можливої похибки.

На практиці існує багато можливих джерел непевностей вимірювань, зокрема такі:

- а) неповне визначення величини;
- б) неточна реалізація визначення величини;
- в) вибірка, що не відображається, – отримане значення може не відображати величину;
- г) неточні відомості про вплив навколишнього середовища на вимірювання або недосконале вимірювання умов навколишнього середовища;

Розділ 1. Основні поняття концепції непевності результатів вимірювань, контролю та випробувань



**Рисунок 1.1 – Графічна ілюстрація значення непевності вимірювання**

д) суб'єктивна систематична похибка оператора при знятті показань з аналогових приладів;

е) кінцева роздільна здатність приладу або поріг чутливості;

ж) неточні значення, приписані еталонам, стандартним зразкам речовин і матеріалів;

и) неточні значення констант і інших параметрів, які були отримані із зовнішніх джерел та використовуються в алгоритмі опрацювання даних;

к) апроксимації та припущення, що використовуються у методі вимірювання і вимірювальній процедурі;

л) зміни в повторних спостереженнях величини при явно однакових умовах.

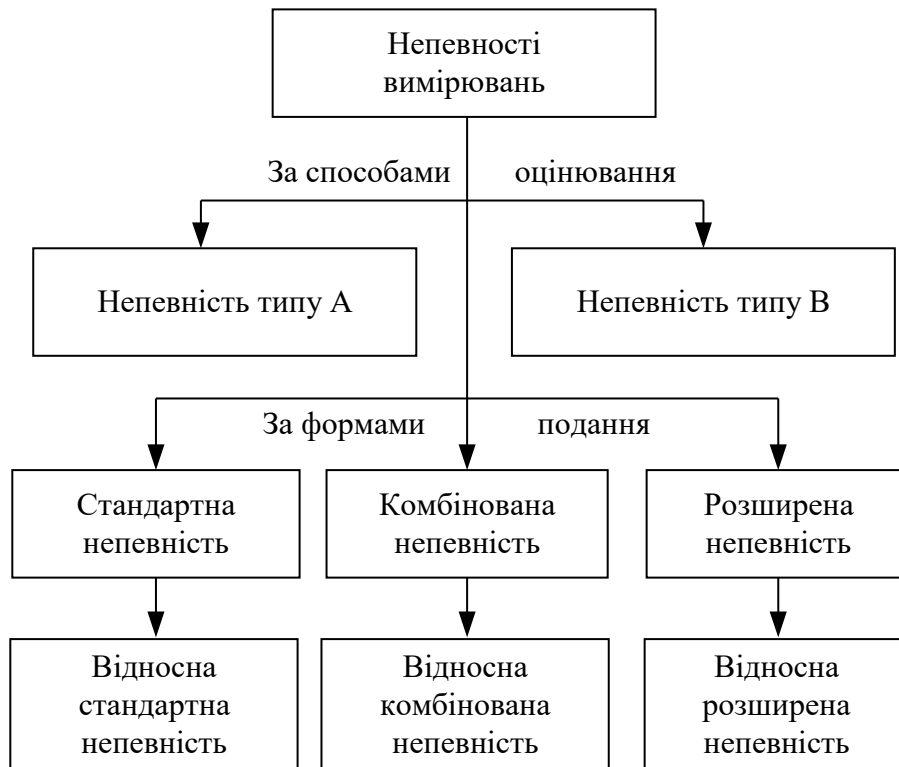
Ці джерела необов'язково є незалежними, і деякі з джерел від (а) до (к) можуть вносити вклад у джерело (л). Звичайно, невідомий систематичний ефект не може бути внесений в оцінку непевності результату вимірювання, але він вносить вклад у його похибку.

Введення поняття «непевність вимірювання» є вимушеною мірою, необхідною для одноманітного і спрощеного оцінювання достовірності вимірювання, оскільки її визначення здійснюється на основі одержуваних результатів вимірювання, відомих умов вимірювань і характеристик використовуваної апаратури, а не на невідомому істинному значенні вимірюваної величини.

## 1.2 Класифікація непевностей вимірювання

Непевності вимірювання можна класифікувати за такими ознаками: за *способами оцінювання* та за *формами подання* (рис. 1.2) [2–4].

Всі непевності за *способами оцінювання* поділяються на тип А і тип В. Метою поділу на тип А та В є показ двох різних способів оцінювання компонентів непевності, і він використовується тільки для зручності обговорення; він не призначений для показу того факту, що існує розходження в природі цих компонентів, що є результатом даних двох типів оцінювання. Обидва типи оцінювання базуються на розподілах ймовірностей, і компоненти непевності кожного типу кількісно визначаються дисперсією або стандартним відхиленням.



**Рисунок 1.2 – Класифікація непевностей вимірювання**

За типом А оцінюються непевності, що підлягають повторним вимірюванням до яких можна застосувати статистичні методи.

Апостеріорне оцінювання (*aposteriori evaluation*) проводиться за результатами вимірювання, контролю чи випробувань і можливе тільки при проведенні багаторазових спостережень вимірюваної величини. Такі вимірювання можуть проводитися у двох варіантах:

а) в умовах повторюваності (для оцінювання і мінімізації непевності вимірювань, обумовленої випадковими ефектами);

б) при зміні однієї з умов спостережень так, щоб одержати спостережувану змінність результатів (для оцінювання і мінімізації непевності результатів вимірювань, обумовленою змінною частиною невиключеної складової відомого систематичного ефекту) [5–8].

В результаті опрацювання методами математичної статистики багатократних спостережень можна отримати міру їх розсіювання навколо оцінки очікуваного значення (опорного значення), що