

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ТА НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ

Є.Т. Володарський¹, М.В. Добролюбова¹, Л.О. Кошева²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, vet-1@ukr.net, m.dobroliubova@ukr.net

²Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, Київ, Україна, L.kosh@ukr.net

Анотація

Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) займають особливе місце серед засобів вимірювальної техніки і є сукупністю функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів для отримання вимірювальної інформації, її перетворення і обробки з метою надання в необхідному вигляді. В залежності від розв'язуваної задачі використовується паралельна або послідовно-паралельна структурна організація багатоканальної ІВС. Найчастіше застосовують послідовно-паралельну структурну організацію. Якщо результати вимірювального перетворення окремих фізичних величин надалі використовуються для функціональної обробки, то з'являється стохастичний зв'язок між вихідними величинами вимірювального каналу (ВК), рознесеними в часі, оскільки уніфіковані вихідні величини вимірюються одним і тим самим ВК, тобто неточність ВК є спільною впливаючою величиною при формуванні результату. Неідеальність ВК може характеризуватися зміщенням характеристики перетворення і зміною її чутливості (кута нахилу характеристики). Оцінюється внесок кореляції двох функціонально пов'язаних вхідних величин в невизначеність результату перетворення за наявності адитивної і мультиплікативної складових реальної характеристики перетворення ВК. В якості базових функціональних перетворень розглядаються додавання, віднімання, множення і ділення. Аналізується вплив співвідношення між вхідними величинами на додаткову складову невизначеності функціонального перетворення, робляться узагальнення і даються рекомендації.

Ключові слова: інформаційно-вимірювальна система; вимірювальний канал; реальна характеристика; адитивна та мультиплікативна складові; невизначеність вимірювання; функціональне перетворення; кореляція.

Вступ

Точність експериментальних процедур характеризується невизначеністю отриманого результату, який в більшості випадків дістають шляхом проведення обчислювальних операцій над наявними результатами вимірювань [1]. Існування стохастичного зв'язку між вхідними величинами – результатами вимірювань характеристик об'єкту, може істотно вплинути на сумарну стандартну невизначеність. У більшості випадків розглядають невизначеність за типом А, яка обумовлена впливом випадкових величин і проявляється при багаторазових вимірах. При цьому, проводиться оцінювання наявності і тісноти стохастичного зв'язку між вхідними величинами. Основи такого підходу викладені в [2] і в цьому напрямку є певні успіхи. Однак, не менш важливим є питання дослідження стохастичного зв'язку при оцінюванні точності результату за типом В [3]. Останнім часом це питання, виходячи із загальних позицій, піднімається в роботах Зигмунта Варші, наприклад [4]. Однак для таких засобів вимірювання, як інформаційно-вимірювальні системи (ІВС), які сприймають, перетворюють і вимірюють різні фізичні величини, формуючи результати дослідження, загального підходу недостатньо.

Необхідно оцінити вплив реальної характеристики вимірювального каналу на результат вимірювання, провести детальний аналіз переходу від модельного рівняння до рівняння вимірювання, оцінити сумарну стандартну невизначеність отриманого результату з урахуванням кореляції, обумовленої використанням одного вимірювального каналу.

Основна частина

ІВС займають особливе місце серед засобів вимірювальної техніки і є сукупністю функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів, призначених для отримання вимірювальної інформації про величини, що відображають властивості досліджуваного об'єкта, її перетворення і обробки з метою надання в необхідному вигляді [5].

При дослідженні складних об'єктів, для отримання інформації про параметри необхідно проводити комплексні вимірювання, а значення величини, що оцінюється, отримувати розрахунковим шляхом на основі відомої функціональної залежності (модельного рівняння).

Таким чином, ІВС повинна бути багатоканальною і, в залежності від розв'язуваної задачі, з паралельною або послідовно-паралельною структурою.

Паралельна структурна організація ІВС обумовлена швидкістю зміни вимірюваних фізичних величин і необхідністю мати інформацію в реальному часі. В цьому випадку для кожної контрольної точки досліджуваного об'єкта створюється «свій» вимірювальний канал (ВК), в якому відбувається сприйняття, перетворення і вимірювання фізичних величин. ВК пов'язаний з центральним модулем ІВС – засобом обчислювальної техніки, який, відповідно до модельного рівняння $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, обчислює значення параметра. Для найпростішого випадку, коли параметр, що визначається, є функцією двох величин Q_1 і Q_2 , матиме місце наступна послідовність дій

$$\{Q_1, Q_2\} \rightarrow \{x_1, x_2\} \rightarrow \{F(x_1, x_2)\},$$

де x_1 і x_2 – вихідна величина відповідного вимірювального каналу (результат вимірювання Q_1 і Q_2).

Оскільки вимірювальні канали знаходяться в однакових робочих умовах, на них впливають ті ж самі реалізації неконтрольованих випадкових величин. Відповідно [2], дві випадкові величини X_1 і X_2 , що спостерігаються повторно і одночасно, будуть корельовані. Наявність стохастичного зв'язку між вхідними величинами в загальному випадку призводить до появи додаткової складової у виразі для квадрата сумарної невизначеності $u_c^2(y)$, пов'язаної з результатом вимірювання

$$2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j),$$

де x_i і x_j – оцінки X_i і X_j , $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ – оцінка коваріації, пов'язаної з x_i і x_j .

Якщо особливих вимог до ІВС не пред'являється, то найчастіше використовують послідовно-паралельну структурну організацію ІВС. Це пояснюється відсутністю надлишковості, як в паралельній структурі, оскільки використовується один ВК, до якого з виходів датчиків / перетворювачів по черзі (або відповідно до обраного алгоритму) подається уніфікований сигнал (найчастіше напруга постійного струму), який пропорційний вимірюваній фізичній величині. При цьому кореляція між вхідними величинами, обумовлена впливом випадкових величин (по типу А або експериментальна), відсутня.

Відповідно до розділу F.1.2.3 [2] вхідні величини бувають корельовані у випадку, коли для їх оцінки використовується один і той самий еталон, датчик, засіб вимірювання, стандартні дані і навіть метод вимірювання. При паралельно-послідовній структурній організації ІВС результати вимірювання x_1 і x_2 фізичних величин Q_1 і Q_2 , які використовуються для визначення параметру, піддаються функціональному перетворенню відповідно до модельного рівняння. Для отримання результатів вимірювання фізичних величин Q_1 і Q_2 використовується один і той самий ВК.

Самі по собі і фізичні величини, і результати їх вимірювання є незалежними. Однак, проведення відповідно до модельного рівняння над результатами вимірювань математичних операцій з метою визначення параметру, призводить до виникнення, так званої, «інструментальної кореляції». Це обумовлено тим, що кожен з отриманих результатів містить загальну складову, обумовлену неточністю вимірювання. Хоча характеристики неточності не відомі, але вони ті ж самі при отриманні результатів x_1 і x_2 .

Розглянемо невизначеність параметру, яка обчислюється з використанням найпростіших арифметичних операцій над результатами вимірювань x_1 і x_2 .

Почнемо з операції додавання. Модельне рівняння для цього випадку має вигляд

$$y = ax_1 + bx_2.$$

Тут x_1 і x_2 відповідають фізичним величинам, які характеризують об'єкт дослідження.

a і b – коефіцієнти, які можуть приймати будь-які значення, відмінні від нуля.

Для аналізу невизначеності отриманого результату будемо виходити з рівняння вимірювання

$$(y + \Delta y) = a(x_1 + \Delta) + b(x_2 + \Delta). \quad (1)$$

де Δy – відхилення результату – зміщення Δ характеристики ВК, який нам не відомо, але протягом процедури вимірювання залишається постійним.

Перепишемо вираз (1) як

$$(y + \Delta y) = (ax_1 + bx_2) + \Delta(a + b).$$

Тут другий доданок в правій частині відповідає зміні результату Δy , зумовленій наявністю зміщення характеристики, тобто

$$\Delta y = \Delta(a + b).$$

Оскільки зміщення Δ ВК є одним з можливих значень, обумовлених впливом сукупності випадкових величин при виробництві, то дисперсія можливих значень параметру запишеться у вигляді

$$D(\Delta y) = D(\Delta)(a + b)^2.$$

або згідно GUM [1] цей вираз можна представити як невизначеність вимірювань за типом В

$$u_B(y) = \left[u_B^2(\Delta)(a + b)^2 \right]^{1/2}.$$

Наявність зміщення характеристики ВК призводить до збільшення невизначеності на $2abu_B^2(\Delta)$. Ця складова обумовлена наявністю «інструментальної коваріації», вона відображає стохастичний зв'язок між вхідними величинами x_1 і x_2 .

Виконавши аналогічні викладки для базових процедур віднімання, множення і ділення, дістанемо вирази для невизначеності отриманого результату, що враховує наявність стохастичного зв'язку (Таблиця 1).

Невизначеність результату вимірювання для чотирьох арифметичних операцій при зміщенні характеристики ВК

Модельне рівняння	Сумарна стандартна невизначеність $u_c(y)$
$y = ax_1 + bx_2$	$\left[(a^2 + b^2)u^2(\Delta) + 2abu^2(\Delta) \right]^{1/2}$
$y = ax_1 - bx_2$	$\left[(a^2 + b^2)u^2(\Delta) - 2abu^2(\Delta) \right]^{1/2}$
$y = (ax_1) \cdot (bx_2)$	$\left[(a^2 + b^2)u^2(\Delta) + 2abu^2(\Delta) \right]^{1/2}$
$y = ax_1/bx_2$	$\frac{a}{b} \cdot \frac{1}{x_2^2} \left[(x_1^2 + x_2^2)u^2(\Delta) - 2x_1x_2u^2(\Delta) \right]^{1/2}$

Слід зазначити, що при виконанні операції віднімання невизначеність результату залежить не тільки від невизначеності зміщення ВК $u(\Delta)$, а й від співвідношення між значеннями a і b . Так в разі, коли $a = b$, невизначеність взагалі відсутня, оскільки і перший, і другий доданки в правій частині виразу для сумарної стандартної невизначеності $u_c(y)$ будуть дорівнювати $2a^2$. У разі, коли один з коефіцієнтів менше одиниці, наявність кореляції практично не буде позначатися на значенні $u_c(y)$. Коли ж $a > 1$ і $b > 1$, то сумарна стандартна невизначеність буде

$$u_c(y) = |(a-b)|u(\Delta).$$

Таким чином, при будь-яких співвідношеннях між a і b (крім $a = b$) і наявності інструментальної коваріації / кореляції невизначеність результату буде менше, ніж без неї.

При виконанні операції додавання наявність стохастичного зв'язку завжди призводить до збільшення невизначеності результату.

Проведений аналіз дозволяє дещо інакше поглянути на деякі експериментальні процедури з використанням статистичної обробки даних.

Проаналізуємо стандартну невизначеність $u_c(y)$ операцій множення і ділення. Якщо стандартна невизначеність множення повністю збігається з виразом для операції додавання, то невизначеність $u_c(y)$ для ділення істотно відрізняється від інших виразів. Стандартна невизначеність $u_c(y)$ результату в цьому випадку залежить від значення вхідних величин. Тільки в одному випадку можна говорити про однакові властивості з невизначеністю віднімання, а саме: при $x_1 = x_2$ інструментальна стандартна невизначеність буде відсутня.

У разі, коли має місце, наприклад, $x_1 = mx_2$ (m – ціле число), то вираз в квадратних дужках набуде вигляду

$$\left[(m-1)(x_1^2)u^2(\Delta) \right].$$

Таким чином, чим більше «перекіс» у вхідних величинах, тим менше позитивний ефект від інструментальної кореляції. На закінчення слід зазначити, що крім співвідношення між вхідними величинами слід врахувати пов'язані з ними значення коефіцієнтів a і b .

Невизначеність результату при виконанні операції ділення буде дорівнювати нулю при $x_1 = x_2$ і не залежить від співвідношення між a і b .

Крім зміщення Δ характеристики ВК, яке не залежить від значення вхідної величини, реальна характеристика перетворення, в загальному випадку, відрізняється від номінальної характеристики $y = x$ і чутливістю, тобто $\tilde{y} = xk$. Проаналізуємо невизначеність результату вимірювання при функціональному перетворенні $y = f(X)$, де X – вектор вхідних величин. Будемо розглядати, як у попередньому випадку, дві вхідні величини x_1 і x_2 . Через відмінності реальної характеристики перетворення від номінальної, функціональне перетворення здійснюється над величинами $\tilde{x}_1 = x_1(1+\gamma)$ і $\tilde{x}_2 = x_2(1+\gamma)$. Оскільки для номінальних характеристик перетворення тангенс кута нахилу дорівнює 1, то γ відповідає відхиленню кута нахилу реальної характеристики від кута номінальної. Невизначеності такого відхилення характеризується $u(\gamma)$.

В Таблиці 2 наведена невизначеність результату вимірювання для чотирьох арифметичних операцій.

Таблиця 2

Невизначеність результату вимірювання для чотирьох арифметичних операцій при зміні чутливості ВК

Модельне рівняння	Сумарна стандартна невизначеність $u_c(y)$
1	2
$y = ax_1 + bx_2$	$\left[(a^2x_1^2 + b^2x_2^2)u^2(\gamma) + 2abx_1x_2u^2(\gamma) \right]^{1/2}$

1	2
$y = ax_1 - bx_2$	$u(\gamma) [a^2 x_1^2 + b^2 x_2^2 - 2abx_1 x_2]^{1/2}$
$y = (ax_1) \cdot (bx_2)$	$u(\gamma)(2abx_1 x_2)$
$y = ax_1 / bx_2$	відсутня

Як випливає з виразів, представлених в Таблиці 2, при виконанні операцій додавання і віднімання присутній, як і при аддитивному зміщенні, доданок, який обумовлений стохастичним зв'язком. Однак складові невизначеності результатів залежать не тільки від значення коефіцієнтів a і b , а й від значення вхідних функціонально перетворююмих величин x_1 і x_2 . Для операції віднімання, щоб невизначеність не впливала на результат обчислення параметра, повинні виконуватися не тільки умови $a = b$, але й $x_1 = x_2$. Додатковою умовою, коли відсутній вплив інструментальної невизначеності на результат, є $ax_1 = bx_2$.

При виконанні операції множення вплив стохастичного зв'язку явно виділити неможливо. Дійсно, якщо припустити, що даний зв'язок відсутній, то відповідно до [2] невизначеність результату буде знаходитись з виразу

$$u^2(y) = c^2(x_1)u^2(x_1) + c^2(x_2)u^2(x_2),$$

що для операції множення буде відповідати

$$u_1^2(y) = a^2 x_2^2 u^2(\gamma) + b^2 x_1^2 u^2(\gamma),$$

або

$$u_1(y) = u(\gamma)(b^2 x_1^2 + a^2 x_2^2)^{1/2}.$$

Виходячи із сумарної стандартної невизначеності результату множення

$$u_c(y) = u(\gamma)(2abx_1 x_2)$$

в припущенні наявності стохастичного зв'язку (загальний ВК) і при використанні окремих ВК для кожної вхідної величини (стохастичний зв'язок відсутній)

$$u_1(y) = u(\gamma)(b^2 x_1^2 + a^2 x_2^2),$$

можна визначити інструментальну стохастичну складову

$$u_{12}(y) = u(y) - u_1(y).$$

$$u_{12}(y) = u(\gamma) \left[(2abx_1 x_2)^2 - (b^2 x_1^2 + a^2 x_2^2) \right]^{1/2}. \quad (2)$$

З виразу (2) випливає, що наявність стохастичного зв'язку збільшує невизначеність результату, отриманого при виконанні операції множення.

Аналіз невизначеності результату обчислення параметра при виконанні операції ділення показав, що

невизначеність в даному випадку взагалі не залежить від відхилення чутливості ВК від номінальної.

Висновки

Оцінено вплив на сумарну стандартну невизначеність стохастичного зв'язку між вхідними величинами при обчисленні значення параметру досліджуваного об'єкта для ІВС з послідовно-паралельною структурною організацією. Запропоновано цей вплив називати «інструментальною кореляцією».

Проаналізовано вплив стохастичного зв'язку при проведенні чотирьох базових операцій над вхідними величинами і наявність зміщення характеристики вимірювального каналу. Встановлено, що для операцій додавання та множення наявність стохастичного зв'язку завжди призводить до збільшення невизначеності результату вимірювання. При виконанні операції віднімання та ділення сумарна стандартна невизначеність завжди буде зменшуватися. Проаналізовано, як змінюється інструментальна коваріація при різних співвідношеннях коефіцієнтів модельного рівняння та вхідних величин; встановлені умови, при яких сумарна стандартна невизначеність буде дорівнювати нулю.

Проведено аналіз сумарної стандартної невизначеності обчислення при реалізації чотирьох базових операцій над вхідними величинами і наявності зміни чутливості характеристики вимірювального каналу. Встановлено, що при виконанні операцій додавання та множення, наявність інструментальної кореляції також призводить до збільшення сумарної невизначеності, але ще додатково необхідно враховувати співвідношення між вхідними величинами. Для оцінювання невизначеності віднімання необхідно також враховувати співвідношення між вхідними величинами. При виконанні операції ділення сумарна стандартна невизначеність, обумовлена зміною характеристики вимірювального каналу, буде зовсім відсутня.

Отримані результати можуть бути корисними для наукових метрологічних центрів, державних підприємств, метрологічних служб, підприємств та організацій, органів з оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки тощо.

Abstract

Information and measuring systems (IMS) occupy a special place among the means of measuring equipment. IMS are a set of functionally integrated measuring, computing and other auxiliary technical means for obtaining, converting and processing measuring information in order to provide it in the required form. Depending on the problem to be solved, a parallel or series-parallel structural organization of a multi-channel IMS is used. Serial-parallel structural organization is used most often. If the results of the measurement conversion of individual physical quantities are further used for functional processing, then a stochastic relationship appears between the output quantities of the measuring channel (MC), which are spaced in time. That is, the inaccuracy of MC is a

common influencing quantity in the formation of the result. The imperfection of the MC can be characterized by a bias of the characteristic of the conversion and a change of its sensitivity (the angle of the characteristic). The contribution of the correlation of two functionally related input values to the uncertainty of the result of the conversion in the presence of additive and multiplicative components of the real conversion characteristics of the MC is estimated. Addition, subtraction, multiplication and division are considered as basic functional conversions. The influence of the ratio between the input values on the additional component of the uncertainty of the functional conversion is analyzed, generalizations are made and recommendations are given.

Key words: information and measuring system; measuring channel; real characteristic; additive and multiplicative components; measurement uncertainty; functional transformation; instrumental correlation component.

Аннотация

Информационно-измерительные системы (ИИС) занимают особое место среди средств измерительной техники и представляют собой совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее преобразования и обработки с целью предоставления в требуемом виде. В зависимости от решаемой задачи используется параллельная или последовательно-параллельная структурная организация многоканальной ИИС. Чаще всего применяют последовательно-параллельную структурную организацию. Если результаты измерительного преобразования отдельных физических величин в дальнейшем используются для функциональной обработки, то появляется стохастический связь между исходными величинами измерительного канала (ИК), разнесенными во времени, поскольку унифицированные выходные величины измеряются одним и тем же ИК, то есть неточность ИК является общей влияющей величиной при формировании результата. Неидеальность ИК может характеризоваться смещением характеристики преобразования и изменением ее чувствительности (угла наклона характеристики). Оценивается вклад корреляции двух функционально связанных входных величин в неопределенность результата преобразования при наличии аддитивной и мультипликативной составляющих реальной характеристики преобразования ИК. В качестве базовых функциональных преобразований рассматриваются сложение, вычитание, умножение и деление. Анализируется влияние соотношения между входными величинами на дополнительную составляющую неопределенности функционального преобразования, делаются обобщения и даются рекомендации.

Ключевые слова: информационно-измерительная система; измерительный канал; реальная характеристика; аддитивная и мультипликативная составляющие; неопределенность измерения; функциональное преобразование; корреляция.

Список літератури

1. JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement / Bureau International des Poids et Mesures, France. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf – Назва з екрана.
2. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement / International Organization for Standardization, Switzerland. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/4230450/8389141/ISO_IEC_Guide_98%2D3_2008%28E%29_%2D_Uncertainty_of_measurement_%2D%2D_Part_3%2C_Guide_to_the_expression_of_uncertainty_in_measurement_%28GUM%2C1995%29.pdf?nodeid=8389142&vernum=-2 – Назва з екрана.
3. Zakharov I.P. Estimating measurement uncertainty on the basis of observed and logical correlation // Measurement Techniques, Vol. 50, No. 8, 2007, p. 808-816.
4. Warsza, Z. L., Puchalski, J.: Estimation of vector uncertainties of multivariable indirect instrumental measurement systems on the star circuit example. XXII World Congress IMEKO 2018 Belfast. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1065 (2018) 052026, doi:10.1088/1742-6596/1065/5/052026.
5. РМГ 29-99 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 46 с.

References

1. JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement / Bureau International des Poids et Mesures, France. [Electronic resource] – Access mode: https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf – Title from the screen.
2. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement / International Organization for Standardization, Switzerland. [Electronic resource] – Access mode: https://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/4230450/8389141/ISO_IEC_Guide_98%2D3_2008%28E%29_%2D_Uncertainty_of_measurement_%2D%2D_Part_3%2C_Guide_to_the_expression_of_uncertainty_in_measurement_%28GUM%2C1995%29.pdf?nodeid=8389142&vernum=-2 – Title from the screen.
3. Zakharov I.P. Estimating measurement uncertainty on the basis of observed and logical correlation // Measurement Techniques, Vol. 50, No. 8, 2007, p. 808-816.
4. Warsza, Z. L., Puchalski, J.: Estimation of vector uncertainties of multivariable indirect instrumental measurement systems on the star circuit example. XXII World Congress IMEKO 2018 Belfast. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1065 (2018) 052026, doi:10.1088/1742-6596/1065/5/052026.
5. ISR 29-99 State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. [Text]. – М.: Publishing House of Standards, 2000. – 46 p.