

Невизначеність оцінки характеристичної величини двокомпонентної суміші

Є.Т. Володарський, Д.В. Луцкич

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
пр-т Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна
vet-1@ukr.net; lushchik.dv@gmail.com

Анотація

Розглядаються питання оцінювання якості двокомпонентних сумішей, яка визначається на підставі характеристичної величини, значення якої визначаються за результатами вимірювань параметрів компонентів із подальшим обчисленням за модельним рівнянням.

Через те що оцінювання здійснюється в так званих промислових умовах, обрано паралельно-послідовну організацію процедури вимірювання, при якій використовується спільний вимірювальний канал (ВК). При такій організації точність вимірювання визначається, в основному, зміщенням характеристики перетворення ВК. Проведення обчислювальних операцій над результатами вимірювання призводить до інструментальної кореляції, яка робить певний внесок у стандартну сумарну невизначеність при оцінюванні характеристичної величини, якою, наприклад, у кондитерській промисловості та будівництві, виступає вологість.

Проведено дослідження точності відтворення двокомпонентної суміші.

Для зменшення впливу відхилення вологості компонент проводиться калібрування, сутність якого полягає у співставленні обчисленого значення характерної величини з модельним значенням.

Проаналізовано невизначеність оцінювання характерної величини при проведенні контрольних вимірювань під час моніторингу стабільності технологічного процесу. Встановлено, що наявність інструментальної кореляції збільшує невизначеність оцінювання характерної величини в 2 рази. Для підвищення точності оцінювання запропоновано метод та його структурну реалізацію, що дозволяє суттєво зменшити сумарну стандартну невизначеність оцінювання.

Ключові слова: двокомпонентна суміш; інструментальна кореляція; зміщення характеристики; невизначеність результату обчислення; контрольні вимірювання.

Отримано: 11.12.2023

Відредаговано: 25.12.2023

Схвалено до друку: 28.12.2023

Вступ

Відповідність продукції заданим нормам більшою мірою залежить від якості технології виробничого процесу. Для забезпечення якості необхідно перевіряти сукупність характерних параметрів. Ці параметри, у більшості випадків, визначаються за результатами *безпосередніх вимірювань* із подальшим обчисленням за модельним рівнянням значення характерної величини, яка визначає якість продукції.

Технологічний процес багатьох виробництв включає до себе приготування багатокомпонентних сумішей. Прикладами є кондитерське виробництво та будівництво [1]. Хоча характерною величиною, за якою визначається якість продукції, у багатьох випадках є вологість, але реалізація технологічного процесу здійснюється шляхом дозування складових за масою. Через те що якість виробів кондитерського та будівельного виробництва, в основному, визначається вологістю, то допустиме

відхилення її від нормованого значення задається на цей показник значно меншим, ніж на маси компонентів.

Найпростішим випадком є двокомпонентні суміші, які будемо надалі розглядати. Як правило, для цих сумішей співвідношення компонентів нормують за масою m . За такої умови модельне рівняння має вигляд

$$y(m) = a_0 x_1(m) + b_0 x_2(m).$$

Характерною особливістю проведення контрольних вимірювань у промислових умовах є вплив завод різних видів, переважно адитивного характеру. Тому безпосереднє вимірювання вологості здійснюється за паралельно-послідовною структурною організацією [2]. Ідентичність ВК забезпечується рознесенням процедури вимірювання компонент у часі. Залишається тільки вплив зміщення Δ характеристики перетворення

ВК, яке буде однаковим при вимірюванні компонент.

Вхідні величини є незалежними і можуть мати будь-які значення у допустимому/заданому діапазоні. Проте виконання відповідно до модельного рівняння наступних математичних операцій над результатами безпосереднього вимірювання та наявності загальної впливової величини (характеристичного зсуву) призводить до появи стохастичного зв'язку (кореляції), який ми надалі будемо називати *інструментальним*.

Між двома змінними X і Y існує стохастичний зв'язок, коли є спільні випадкові величини, що впливають на них однаково. Припустимо, X_1 є функцією зовнішніх випадкових величин (Z_1, Z_2, \dots, Z_m), та “внутрішніх” впливових величин (U_1, U_2, \dots, U_k), тобто:

$$X_1 = F_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_m; U_1, U_2, \dots, U_k).$$

Друга величина X_2 є функцією тих самих випадкових величин (Z_1, Z_2, \dots, Z_m), а також існує вплив інших випадкових величин (V_1, V_2, \dots, V_j), тобто:

$$X_2 = F_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_m; V_1, V_2, \dots, V_j).$$

Таким чином, величини мають спільну впливову величину, а отже, між ними існує стохастичний зв'язок [3]. Самі ж вхідні величини та результати їх прямих вимірювань зазвичай незалежні.

При паралельно-послідовній структурній організації на вхід ВК подаються можливі значення величин x_1 та x_2 , на результат перетворення яких впливає одне з можливих значень зміщення Δ характеристики ВК, і тим самим виникає ситуація, що була описана вище.

Інструментальна кореляція, залежно від модельного рівняння, різною мірою впливає на невизначеність оцінки характерної величини.

Тому постає необхідність дослідження впливу цієї кореляції.

Основна частина

Залежно від задачі, яка вирішується при приготуванні та виробництві суміші, модельне рівняння може реалізовуватися шляхом цифрового або аналогового введення коефіцієнтів a та b , які показують пропорційний склад суміші.

Компоненти можуть надходити від різних постачальників і, отже, можуть мати різні значення вологості. Тому перед початком виробництва суміші з обраних (наявних) компонентів необхідно провести *калібрування результату* $y(h)$ визначення вологості характеристичної величини суміші $y(h)$, отриманої на підставі прямих вимірювань вологості компонент із наступним обчисленням, із *модельним значенням* $y_0(h)$. За результатами калібрування, у допустимих границях регулюють a до b , тобто змінюють співвідношення між складовими суміші й, у такий спосіб, забезпечують виробництво суміші з нормованим значенням вологості, а саме $y(h) = y_0(h)$.

Через те що характеристична величина (вологість) “прив’язана” до певної суміші, то цю процедуру необхідно здійснювати при однакових масах компонент:

$$y(m) = ax_1(m) + bx_2(m),$$

де a, b – реальні значення коефіцієнтів, отриманих на етапі калібрування.

Результати прямих вимірювань $y_1(h)$ та $y_2(h)$ множать на a і b відповідно. Як уже зазначалося, у виробничих умовах для зменшення впливу похибок на результати вимірювань використовують паралельно-послідовну структурну організацію процесу вимірювання, тобто використовують один ВК.

Структурну схему організації процедури калібрування наведено на рис. 1.

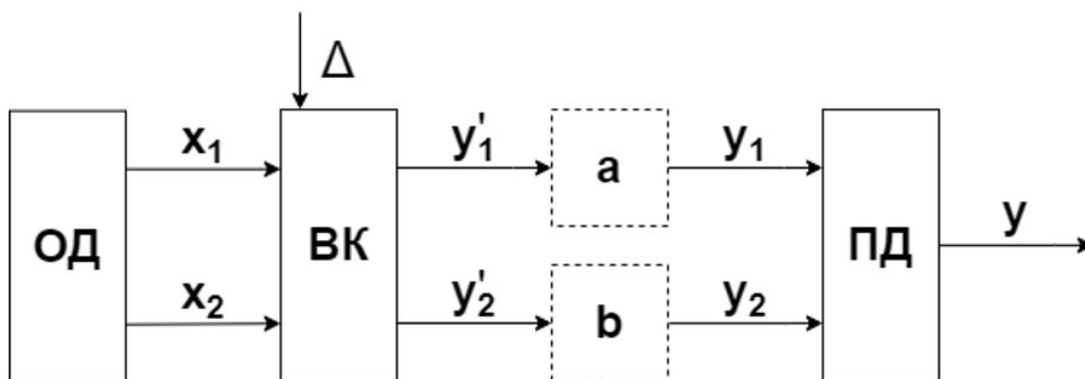


Рис. 1. Структурна організація при калібруванні: ОД – об’єкт дослідження; ВК – вимірювальний канал; ПД – пристрій додавання; Δ – зміщення характеристики перетворення ВК

Вплив співвідношення m на значення інструментальної кореляції

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
η	1	0,8	0,6	0,47	0,38	0,32	0,28	0,25	0,22	0,2

Маємо результати вимірювального перетворення вологості компонент:

$$y_1 = ay'_1 = a(x_1 + \Delta),$$

$$y_2 = by'_2 = b(x_2 + \Delta).$$

Тоді результат опосередкованого вимірювання вологості суміші буде:

$$y = y_1 + y_2 = a(x_1 + \Delta) + b(x_2 + \Delta) \text{ або}$$

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

де третя складова обумовлена зміщенням характеристики ВК, звідки випливає, що абсолютне відхилення результату визначення вологості суміші буде $\Delta y = \Delta(a + b)$.

Через те що зміщення характеристики перетворення Δ може приймати одне з можливих значень у нормованих границях, то квадрат сумарної стандартної невизначеності $u^2(\Delta)$ типу В [4] результату оцінювання характерного параметру суміші визначається з виразу:

$$u^2(y) = u^2(\Delta)(a^2 + b^2 + 2ab),$$

де $2abu^2(\Delta)$ – доданок, обумовлений інструментальною кореляцією;

$u^2(\Delta)$ – відповідає дисперсії $D(\Delta)$ можливих значень Δ зміщення характеристики перетворення ВК.

Вимірювання виконується за допомогою одного типу паралельних каналів для кожної вхідної величини. Додаткова складова сумарної стандартної невизначеності, яка є результатом інструментальної кореляції, пов'язаної з невизначеністю паралельного вимірювання

інформаційних параметрів вхідних величин, буде:

$$\eta = \frac{2ab}{a^2 + b^2} \text{ або}$$

$$\eta = \frac{2ma^2}{a^2 + (ma)^2} = \frac{2m}{1 + m^2},$$

де m – співвідношення між вхідними величинами, що дорівнює:

$$m = \frac{b}{a}.$$

Результати розрахунку впливу співвідношення m на значення інструментальної кореляції зведено до табл. 1.

Як впливає з наведених даних, внесок інструментальної кореляції в невизначеність оцінювання вологості суміші буде суттєвим при $m = (1-5)$. Так, при $m = 10$ відносний внесок становить $\eta = 0,2$.

При виробництві суміші перевіряють стабільність технологічного процесу шляхом проведення через певні інтервали часу контрольних вимірювань, наприклад за картами Шухарта [5]. Структурну схему організації проведення контрольних вимірювань при виробництві суміші зображено на рис. 2.

Значення a та b були встановлені при проведенні калібрування.

Така структурна організація дозволяє контролювати не тільки якість виробництва, але і, за наявності відхилення характерної величини від норми, виявити причину відхилення. Для цього використовуються проміжні результати y'_1 та y'_2 .

Вираз для оцінювання точності виробництва (відтворення) вологості суміші буде мати вигляд:

$$y + \Delta y = ax_1 + bx_2 + \Delta(1 + 1).$$

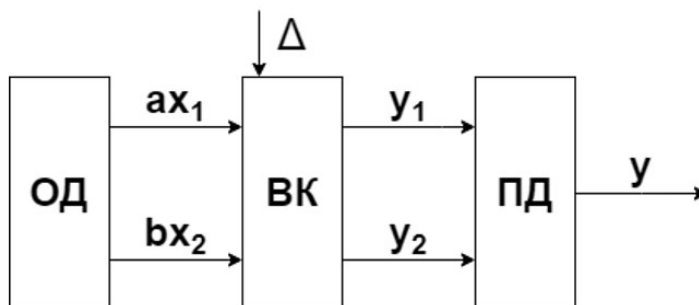


Рис. 2. Структурна організація проведення контрольних вимірювань при виробництві суміші

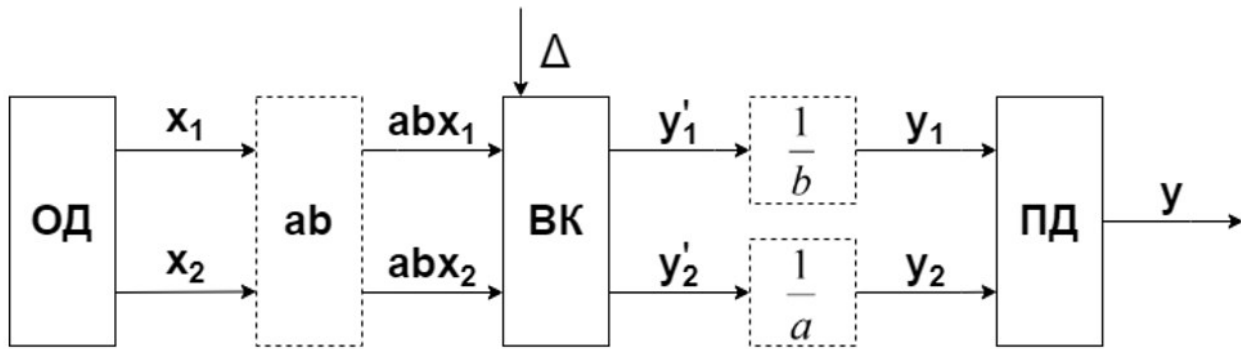


Рис. 3. Модифікована структурна організація контрольного оцінювання вологості суміші

Квадрат невизначеності відтворення вологості суміші буде:

$$u^2(y) = u^2(\Delta)[1 + 2 + 1] = 4u^2(\Delta).$$

Середній доданок у квадратних дужках відповідає 100% інструментальній кореляції. Таким чином, наявність інструментальної кореляції удвічі збільшує невизначеність відтворення.

Але однаковий вплив зміщення Δ характеристики ВК на результат прямого вимірювання вхідних величин буде у випадку, коли інформативні параметри цих величин будуть однакові. Відповідно до цього, при проведенні моніторингу якості технологічного процесу шляхом контролю вологості суміші необхідно відтворювати першу компоненту як $ax_1 \times b$, а другу компоненту як $bx_2 \times a$. Результати їх безпосереднього вимірювання y'_1 та y'_2 , за рахунок зворотного масштабування на $\frac{1}{b}$ та $\frac{1}{a}$, приводять вихідну величину відповідно до модельного рівняння.

Таким чином, завдяки введенню нових операцій виникає нова модифікована організація контрольного оцінювання вологості суміші, структурну схему якої зображено на рис. 3.

Перші проміжні значення, отримані після вимірювального перетворення вхідних вимірюваних величин, які були промасштабовані, будуть дорівнювати:

$$y'_1 = abx_1 + \Delta,$$

$$y'_2 = abx_2 + \Delta.$$

Водночас другі проміжні значення, які отримуються завдяки масштабуванню перших проміжних значень оберненим коефіцієнтом при іншій вхідній величині, будуть мати вигляд:

$$y_1 = \frac{y'_1}{b} = ax_1 + \frac{\Delta}{b},$$

$$y_2 = \frac{y'_2}{a} = bx_2 + \frac{\Delta}{a}.$$

Результат контрольного вимірювання вологості суміші на етапі виробництва запишеться як:

$$(y + \Delta y') = \left(ax_1 + \frac{\Delta}{b}\right) + \left(bx_2 + \frac{\Delta}{a}\right) = ax_1 + bx_2 + \frac{\Delta}{b} + \frac{\Delta}{a},$$

де $\Delta y'$ – абсолютне відхилення скоригованого результату.

Таким чином, невизначеність контрольного оцінювання значення характерної величини при виробництві суміші за моделлю $y = ax_1 + bx_2$ була:

$$u^2(y) = 4u^2(\Delta).$$

Після застосування методу підвищення точності оцінювання дозування стала:

$$u^2(y) = u^2(\Delta) \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{2}{ab} \right).$$

Результати оцінювання використовуються, за необхідності, для управління технологічним процесом. Через те що a та b більше 1, ефективність методу зростає зі збільшенням значень a та b . Вона дорівнює одиниці тільки при $a = b$.

Висновки

Виробничий процес великої кількості галузей промисловості включає виготовлення багатоконпонентних сумішей. Здебільшого, при їх виготовленні співвідношення компонент нормується за масою, а характерним параметром є відносний вміст вологи, що має знаходитись у визначених межах. Водночас у суміші допустиме відхилення вологи від нормованого значення є значно меншим, ніж допустиме відхилення маси складових.

Через те що вологість компонент суміші може відрізнятись від номінальних значень, запропоновано проводити попереднє калібрування значення вологості, отриманої експериментально, відповідно до значення за модельним рівнянням. Це здійснюється коригуванням коефіцієнтів a та b , які пропорційні частці компоненти у суміші.

Запропоновано метод зменшення впливу зміщення характеристики перетворення ВК на результат безпосереднього вимірювання вологості

компонент при проведенні контрольного оцінювання якості виробничого процесу.

Теоретично обґрунтовано зменшення сумарної стандартної невизначеності контрольного

оцінювання значення характерної величини при виробництві суміші завдяки застосуванню запропонованого методу підвищення точності оцінювання дозування.

Uncertainty of estimating the characteristic parameter of the two-component mixture

Ye. Volodarskyi, D. Lushchuk

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy Ave., 37, 03056, Kyiv, Ukraine
vet-1@ukr.net; lushchuk.dv@gmail.com

Abstract

The issues of estimating the quality of two-component mixtures, which is determined on the basis of a characteristic parameter, are considered. The value of the characteristic parameter is determined based on the measurement results of component parameters, followed by the calculation according to the model equation.

Since the estimation is carried out in so-called industrial conditions, a parallel-serial organization of the measurement procedure was chosen, in which a common measurement channel (MC) is used. With such an organization, the accuracy of the measurement is mainly determined by the characteristic bias of the conversion characteristic of the MC. Performing computational operations on the measurement results leads to instrumental correlation, which makes a certain contribution to the combined standard uncertainty when estimating a characteristic quantity, which, for example, in the confectionery industry and construction, is moisture.

Research of the reproduction accuracy of a two-component mixture was carried out.

To reduce the influence of moisture deviation of the components, the calibration was carried out to compare the calculated value of the characteristic quantity with the model one.

The uncertainty of estimating the characteristic parameter during the control measurements when monitoring the stability of the technological process is analyzed. It was established that the presence of instrumental correlation increases the uncertainty of estimating the characteristic value by two times. To increase the accuracy of the estimation, a method and its structural implementation are proposed, which allows significant reducing the combined standard uncertainty.

Keywords: two-component mixture; instrumental correlation; characteristic bias; uncertainty of the calculation result; control measurements.

Список літератури

1. Заніздра В. Технохімічний контроль виробництва. URL: <http://baker-group.net/component/k2/4269-technochemical-production-control.html>
2. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Володарський Є.Т., Грабко В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2012. 522 с.
3. Володарський Є.Т., Кошева Л.О. Теорія та практика експериментальних досліджень: навчальний посібник. Київ, 2023. 298 с.
4. JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM, 2008. 134 p.
5. Volodarsky E., Warsha Z., Kosheva L., Klevtsova M. Control stability of indicators product quality. *Proceedings of 27th International scientific symposium "Metrology and metrology assurance 2017"*. Sozopol, Bulgaria, September 8–12, 2017, pp. 332–336.

References

1. Zanizdra V. Tekhnokhimichniy kontrol vyrobnytstva [Technochemical production control]. Available at: <http://baker-group.net/component/k2/4269-technochemical-production-control.html>
2. Kukharchuk V.V., Kucheruk V.Yu., Volodarskyi Ye.T., Hrabko V.V. Osnovy metrolohii ta elektrychnykh vymiriuvan [Basics of metrology and electrical measurements]. Vinnytsia, 2012. 522p. (in Ukrainian).
3. Volodarskyi Ye.T., Kosheva L.O. Teoriia ta praktyka eksperymentalnykh doslidzhen: navchalnyi posibnyk [Theory and practice of experimental research: tutorial]. Kyiv, 2023. 298p. (in Ukrainian).
4. JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM, 2008. 134p.
5. Volodarsky E., Warsha Z., Kosheva L., Klevtsova M. Control stability of indicators product quality. *Proceedings of 27th International scientific symposium "Metrology and metrology assurance 2017"*. Sozopol, Bulgaria, September 8–12, 2017, pp. 332–336.