

Невизначеність оцінювання втрати вологості готової продукції

Побудова сучасного виробництва неможлива без використання інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), які дозволяють оптимізувати виробничі процеси, підвищити продуктивність підприємства та покращити якість готової продукції завдяки контролю сукупності характерних параметрів. Розглядається питання оцінювання вологості виготовленої продукції – характерного параметра, що є визначальним для якості готових продуктів у багатьох сферах промисловості. Не порушуючи загальності висновків, проводяться дослідження на основі технологічних процесів з випаровуванням. При їх реалізації виконуються визначальні вимірювання, сутність яких полягає в проведенні процесу градування на основі тестових зразків з метою створення градувальних таблиць, та контрольні вимірювання, які виконуються безпосередньо під час виробничого процесу з метою корегування, відповідно до створених таблиць, керованих параметрів, що впливають на значення характерної величини. Описано методика отримання відносної градувальної характеристики для процесів, що прямо чи опосередковано відповідають модельному рівнянню віднімання. Наведено структурну організацію при градуванні значень характеристичного параметра готового продукту від розміру впливових чинників. Проаналізовано невизначеність оцінювання вологості за результатами контрольного вимірювання. Встановлено, що присутність інструментальної кореляції під час виконання операції віднімання призводить до підвищення точності оцінювання, причому зі збільшенням різниці між вхідними параметрами, росте і точність оцінювання вологості готової продукції.

Ключові слова: втрата вологості; випаровування; градування; визначальні вимірювання; систематичне зміщення; інструментальна кореляція; промислові умови.

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку технологій особливо актуальним стає використання автоматизованих інформаційно-вимірювальних систем для контролю та управління виробничими процесами. Це дозволяє не лише підтримувати високу якість продукції, а й оптимізувати виробничі процеси, знижуючи витрати та підвищуючи продуктивність. Такі системи використовуються для визначення та контролю сукупності характерних параметрів, які визначають якість продукції. На практиці достатньо часто зустрічається ряд задач, коли величина, що нас цікавить, визначається за функціональною залежністю від вхідних величин. Ця залежність називається модельним рівнянням, згідно з яким проводиться експеримент, який включає безпосереднє (пряме) вимірювання інформативних (вхідних) величин з подальшим обчисленням шуканої вихідної величини. Метою дослідження може бути параметр об'єкта або характерна величина, значення якої використовують під час оцінювання якості технологічного процесу.

Зі зростанням складності сучасних систем, нагромаджується і кількість та розмір обчислювальних операцій, що виконуються ІВС, а тому зростає і сукупний вклад специфічної складової невизначеності, що обумовлена цими операціями. Актуальним завданням є дослідження цієї невизначеності на прикладі базових математичних операцій, що лежать в основі кожної складної математичної моделі. Сфера застосування отриманих результатів є широкою і може мати місце у багатьох автоматизованих системах та виробництвах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Під час знаходження параметрів об'єкта над результатами вимірювання його інформативних величин можуть здійснюватися операції множення / ділення. Типовим прикладом може слугувати визначення потужності та опору за результатами вимірювання напруги та сили струму, що розглядається у роботах [1, 2]. Для операції знаходження суми прикладом може слугувати визначення характерного параметра суміші, отриманої змішуванням двох компонент [3]. Натомість дослідження процесу втрати вологості готової продукції дозволить дослідити невизначеність оцінювання процесів, що відповідають операції віднімання.

Інформативні величини переважно є однорідними фізичними величинами. Здебільшого характеристика вимірювального перетворення цих величин, особливо у промислових умовах, може бути зміщеною, а тому для підвищення точності вимірювального перетворення застосовується той же вимірювальний канал (ВК). При цьому невизначеність результатів залежить від впливових випадкових величин [4]. Значення, що отримані під час вимірювального перетворення, в подальшому використовуються для обчислення параметра об'єкта або характерної величини технологічного процесу.

Як відомо з математичної статистики [5], між двома випадковими величинами виникає стохастичний зв'язок, коли мають місце спільні випадкові фактори. Візьмемо до уваги, що інформаційні величини можуть приймати будь-яке з можливих значень, а на результат їх вимірювального перетворення впливає спільна величина – можливе значення Δ зміщення характеристики перетворення. Тоді, як було показано у [1, 3], внаслідок проведення обчислювальних операцій над результатами перетворення виникає специфічна складова у невизначеності обчисленого результату, обумовлена наявністю так званої інструментальної кореляції. В [6], виходячи з загальних позицій оцінювання невизначеності, розглядається логічна кореляція, і зовсім не враховуються операції, які передують появі складової, що обумовлює інструментальну кореляцію – безпосереднє вимірювальне перетворення, над результатами якого проводяться математичні операції. Як було встановлено, ця складова неоднаково впливає на точність результату і, залежно від виду модельного рівняння, змінюється її вклад у сумарну стандартну невизначеність [7].

Метою статті є дослідження впливу інструментальної кореляції на точність оцінювання характерної величини – вологості, яка змінюється при реалізації технологічного процесу, що відповідає модельному рівнянню віднімання.

Викладення основного матеріалу. В таких галузях промисловості, як харчова, кондитерська, будівельна, під час реалізації технологічного процесу стикаються з контрольованою або неконтрольованою зміною вологості в оборотних матеріалах, що використовуються у виробничому процесі [8, 9]. Причому в одному випадку це може бути поглинання, а в іншому – випаровування рідини. Це може як покращувати якість продукції, так і погіршувати її. Надалі процес зміни вмісту рідини як в бік збільшення, так і зменшення, будемо називати вологозміною. В подальшому, не порушуючи загальності висновків, будемо розглядати технологічні процеси з випаровуванням (сушінням). Такі ж чинники технологічного процесу, як температура та час, визначатимуть швидкість, з якою відбувається процес зміни вологи.

Під час реалізації технологічного процесу зазвичай проводяться «визначальні» та контрольні вимірювання характерного параметра до дії певних значень вказаних чинників та після їх дії. Сутність визначальних вимірювань витікає з наступного. Для того, щоб встановити відповідність між параметрами, які вимірюються, та характеристичними параметрами об'єкта, що визначаються, перед запуском основного виробництва, використовуючи тестові партії, проводять градуювання, яке показує залежність значень характеристичного параметра готового продукту від розміру наведених впливових чинників.

За своєю сутністю вологість готової продукції, що отримується шляхом проходження напівфабрикатом процесу випаровування (випікання, сушіння) – це різниця між масами напівфабрикату (заготівки) та готового продукту. Втрата маси у вологості одночасно є втратою маси напівфабрикату порівняно з масою готової продукції. Рівняння втрати маси у вологи має вигляд:

$$y = x_1 - x_2, \quad (1)$$

де x_1 – маса напівфабрикату;

x_2 – маса готового продукту.

Подамо масу втраченої вологи у відносному вигляді, що визначається, згідно з [9], як:

$$W = \frac{m_{нф} - m_{гн}}{m_{нф}}, \quad (2)$$

де $m_{нф}$ – маса напівфабрикату, яку в подальшому будемо позначати x_1 ;

$m_{гн}$ – маса готового продукту, яку будемо позначати x_2 .

При заданні сталої температури $T = \text{const}$, а також забезпеченні сталої маси x_1 вхідної вологи в напівфабрикаті, єдиним параметром, що визначає масу кінцевого продукту, є час витримування t при певному температурному режимі, що дозволяє скласти градуювальну таблицю залежності маси втраченої вологості у від часу витримки t .

Структурна організація процесу градуювання, в якій мінімізується вплив систематичного зміщення Δ характеристики перетворення ВК, зображена на рисунку 1.

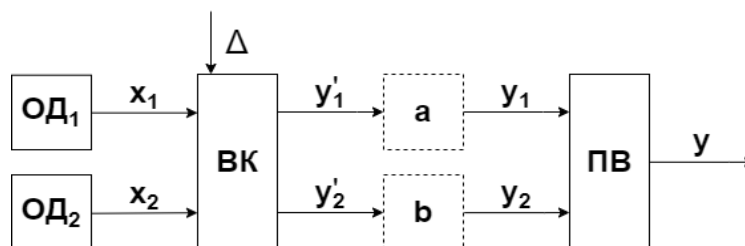


Рис. 1. Структурна організація при градуюванні: ОД₁ – об'єкт дослідження до вологозміни; ОД₂ – об'єкт дослідження після вологозміни; ВК – вимірювальний канал; Δ – зміщення характеристики перетворення ВК; ПВ – пристрій віднімання

Для формування відносної шкали необхідно, щоб x_1 була постійним. Тоді значення y буде відповідати масовій відносній вологості W . Факторами, що впливають на цю величину, є вхідна маса вологи, яку можна вимірювати, та час витримки напівфабрикату при заданій температурі $T = \text{const}$. Таким чином, дотримання цих вимог дозволяє скласти градувальну таблицю залежності маси втраченої вологості y від часу випікання t . Будемо вважати масу $m_{\text{нф}}$ напівфабрикату, і тим самим його вологості, за номінальне значення. Вологість відповідає ідеальній рецептурі і має визначене, згідно з нормативною документацією, значення. Вираз (2), при введених позначеннях, можна записати як:

$$W = (1 - d), \quad (3)$$

де $d = x_2 / x_1$ – відносне значення рідини, що випарувалася при витримці напівфабрикату при заданому температурному режимі протягом певного часу.

У випадку випаровування $d < 1$. Тоді результат вимірювання буде:

$$y = (x_{10} + \Delta) - (x_{20} + \Delta), \quad (4)$$

де x_{10} – маса тестового напівфабрикату при градуванні;

x_{20} – маса тестового готового продукту, отриманого при градуванні;

Δ – зміщення характеристики перетворення.

Враховуючи, що $x_{20} = dx_{10}$, у разі наявної інструментальної кореляції, маємо:

$$y = x_{10}(1 - d). \quad (5)$$

Таким чином, чим менше d , тим більше при заданому режимі випаровується рідини.

Змінюючи час витримки в заданому температурному режимі, можна отримати градувальну характеристику $W = f(t)$. Причому зміщення характеристики перетворення ВК не впливає на отримані результати. Це обумовлено тим, що зміщення характеристики перетворення ВК входить з однаковим коефіцієнтом в рівняння безпосереднього вимірювання, і тим самим коефіцієнт інструментальної кореляції дорівнює 1 [3].

Отримана градувальна таблиця використовується для коригування, за необхідності, технологічного процесу в реальних умовах. Прикладом цього може бути зміна вологості вхідних компонент, що використовуються для приготування напівфабрикату, залежно від їх умов зберігання, коли може відбуватися висихання чи підмочування оборотних матеріалів. У зв'язку з цим, під час виробництва необхідно проводити контрольні вимірювання. Найбільшу точність при цьому забезпечує компенсаційний (нульовий) метод [10].

Для проведення контрольного вимірювання беруть навіску з «робочого» напівфабрикату тою ж масою x_1 , яку витримують в тому ж температурному режимі протягом часу t_1 , який відповідає значенню, записаному у нормативній документації на технологічний процес. Результат вимірювального перетворення (зважування готової продукції) подається на входи пристрою віднімання (ПВ). Результат вимірювання напівфабрикату попередньо масштабується з врахуванням значень, наведених у градувальній таблиці. Процедура масштабування застосовується для забезпечення на вході ПВ значення, що, згідно з процедурою градування, має відповідати нормованому значенню вологості y_{10} готової продукції. Тим самим фізично моделюється процес випаровування при нормальній ситуації. На другий вхід вимірювального перетворювача надходить y_{21} , пропорційна реальній вологості, яка, згідно з нормативною документацією, має відповідати готовій продукції при заданій часовій витримці в певній температурі.

На рисунку 1 вибираються коефіцієнти масштабування модулів, позначених пунктирними лініями, де a відповідає d_0 , яке було визначено при градуванні, та $b = 1$.

Різниця y на виході ПВ має дорівнювати 0. Відхилення від нуля може бути у позитивний або негативний бік і свідчить про відмінність вологості готового продукту від норми. На підставі абсолютного значення відхилення, що може бути більше допустимого, та його знаку, приймається рішення про збільшення / зменшення часу витримки напівфабрикату в заданому температурному режимі. Для зміни часу витримки використовується градувальна таблиця.

Таким чином маємо:

$$y = d_0(x_{10} + \Delta) - (x_2 + \Delta). \quad (6)$$

Взявши до уваги, що у загальному випадку $x_2 = d_0x_{10}$, вираз (6) можна записати як:

$$y = x_{10}(d_0 - d) - \Delta(1 - d_0). \quad (7)$$

Оскільки аналізується вплив зміщення характеристики перетворення Δ , яке може приймати, в допустимих межах, одне з можливих значень, то квадрат невизначеності результату контрольного вимірювання запишеться як [11]:

$$u^2(y) = u^2(\Delta)(1 - 2d_0 + d_0^2). \quad (8)$$

З виразу (8) випливає, що, на відміну від операції підсумовування [3], під час виконання операції віднімання, наявність інструментальної кореляції (доданок $2d_0$ у дужках) підвищує точність оцінювання. Причому чим більша різниця $(1 - d_0)$, тим більшою буде точність оцінювання.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Описано методику отримання відносної градуовальної таблиці для процесів, які прямо чи опосередковано відповідають модельному рівнянню віднімання. Завдяки отриманій градуовальній характеристиці та виконанню контрольних вимірювань встановлено можливість контролю характерного параметра з метою забезпечення цільових показників якості готового продукту.

Представлена структурна організація процесу градування, де результат на виході ПВ має становити нуль. Різниця від 0 у позитивному або негативному напрямку свідчить про відхилення вологості готового продукту від норми. Залежно від знаку та значення отриманого результату, а також за допомогою складеної градуовальної таблиці, ухвалюється рішення про зміну набору значень ключових параметрів, які безпосередньо впливають на значення характерного параметра.

Проаналізовано невизначеність оцінювання вологості на основі контрольного вимірювання, згідно з чим відзначено підвищення точності оцінювання за наявності інструментальної кореляції, причому така точність росте зі збільшенням різниці між вхідними параметрами ПВ.

Подальшим етапом розвитку результатів цього дослідження можуть бути дослідження, пов'язані з розробкою нових методів та інформаційно-вимірювальних систем, що застосовують зменшення невизначеності результатів вимірювань внаслідок наявності інструментальної кореляції, а також які самі матимуть можливість призводити до такого зменшення. Актуальним є аналіз впливу кожної зі складових, що входять в сумарну стандартну невизначеність вологості готової продукції, та вивчення можливості складання градуовальних таблиць для кожної з них.

Список використаної літератури:

1. Volodarsky E. Influence of the correlation of the results of direct measurements on the uncertainty of parameters observed indirectly / E.Volodarsky, D.Lushchik, Z.Warsza // *Pomiary automatyka robotyka*. – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 37–42. DOI: 10.14313/par_245/37.
2. Instrumental covariance and its impact on the uncertainty of tested parameters of industrial objects / Z.L. Warsza *ma in.* // *Advances in intelligent systems and computing*. – 2022. – С. 370–379. DOI: 10.1007/978-3-031-03502-9_36.
3. Володарський Є.Т. Невизначеність оцінки характеристичної величини двокомпонентної суміші / Є.Т.Володарський, Д.Луцик // *Український метрологічний журнал*. – 2023. – № 4. – С. 26–30. DOI: 10.24027/2306-7039.4.2023.298648.
4. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement : JCGM 100:2008, GUM 2008 with minor corrections. – France : BIPM.
5. Володарський Є.Т. Теорія та практика експериментальних досліджень : навч. посіб. / Є.Т.Володарський, Л.Косієва. – Вінниця : Барановська Т.П., 2023. – 298 с.
6. Zakharov I.P. Estimating measurement uncertainty on the basis of observed and logical / I.P. Zakharov // *Measurement techniques*. – 2007. – Vol. 50, № 8. – P. 808–816. DOI: 10.1007/s11018-007-0154-8.
7. Володарський Є.Т. Інформаційно-вимірювальні системи та невизначеність / Є.Т. Володарський, М.В.Добролюбова, Л.О.Косієва // *Український метрологічний журнал*. – 2020. – № 3А. – С. 30–35. DOI: 10.24027/2306-7039.3a.2020.217653.
8. Дробот В.І. Технологія хлібопекарського виробництва : підручник / В.І. Дробот. – К. : Логос, 2002. – 365 с.
9. Вироби кондитерські. Методи визначення масових часток вологи та сухих речовин : ДСТУ 4910:2008. – На заміну ГОСТ 5900-73 ; чинний від 2009-01-01. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 14 с.
10. Метрологія. Терміни та визначення : ДСТУ 2681-94. – Чинний від 1995-01-01. – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДІССІ», 1994. – 72 с.
11. Невизначеність вимірювань. Частина 3. Настанова щодо подання невизначеності у вимірюванні : ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018. – Чинний від 2020-01-01. – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 123 с.

References:

1. Volodarsky, E., Lushchik, D. and Warsza, Z. (2022), «Influence of the correlation of the results of direct measurements on the uncertainty of parameters observed indirectly», *Pomiary automatyka robotyka*, Vol. 26, No. 3, pp. 37–42, doi: 10.14313/par_245/37.
2. Warsza, Z.L. et al. (2022), «Instrumental covariance and its impact on the uncertainty of tested parameters of industrial objects», *Advances in intelligent systems and computing*, pp. 370–379, doi: 10.1007/978-3-031-03502-9_36.
3. Volodarskyi, Ye.T. and Lushchik, D. (2023), «Nevyznachenist otsinky kharakterystychnoi velychyny dvokomponentnoi sumishi», *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, No. 4, pp. 26–30, doi: 10.24027/2306-7039.4.2023.298648.
4. *JCGM 100:2008. GUM 2008 with minor corrections. Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (2008), BIPM, France.
5. Volodarskyi, Ye.T. and Kosheva, L. (2023), *Teoriia ta praktyka eksperymentalnykh doslidzhen*, navch. posib., Baranovska, T.P., Vinnytsia, 298 p.
6. Zakharov, I.P. (2007), «Estimating measurement uncertainty on the basis of observed and logical correlation», *Measurement techniques*, Vol. 50, No. 8, pp. 808–816, doi: 10.1007/s11018-007-0154-8.

7. Volodarskyi, Ye.T., Dobroliubova, M.V. and Kosheva, L.O. (2020), «Informatsiino-vymiriuvalni systemy ta nevyznachenist», *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal*, No. 3A, pp. 30–35, doi: 10.24027/2306-7039.3a.2020.217653.
8. Drobot, V.I. (2002), *Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva*, pidruchnyk, Lohos, Kyiv, 365 p.
9. DSTU 4910:2008. *Vyroby kondyterski. Metody vyznachennia masovykh chastok volohy ta sukhykh rehovyn* (2008), Na zaminu HOST 5900-73, chynnyi vid 2009-01-01, Vyd. ofits, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, Kyiv, 14 p.
10. DSTU 2681-94. *Metrolohiia. Terminy ta vyznachennia* (1994), Chynnyi vid 1995-01-01, Vyd. ofits, DP «UkrNDISSI», Kyiv, 72 p.
11. DSTU ISO/IEC Guide 98-3:2018. *Nevyznachenist vymiriuvan. Chastyna 3. Nastanova shchodo podannia nevyznachenosti u vymiriuvanni* (2018), Chynnyi vid 2020-01-01, Vyd. ofits, DP «UkrNDNTs», Kyiv, 123 p.

Володарський Євген Тимофійович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0003-2573-6543>.

Наукові інтереси:

- структурно-алгоритмічні методи підвищення точності вимірювань та вірогідності контролю;
- застосування статистичних методів при експериментальних дослідженнях;
- метрологічне забезпечення систем і комплексів.

E-mail: vet-1@ukr.net.

Лущик Дмитро Вікторович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-2689-604X>.

Наукові інтереси:

- інформаційно-вимірювальні системи;
- комп'ютеризовані дослідження та моделювання;
- автоматизація виробничих процесів.

E-mail: lushchyk.dv@gmail.com.

Volodarskyi Ye.T., Lushchyk D.V.

Uncertainty in estimating moisture loss of finished products

The creation of modern production is impossible without the use of information measuring systems that allow optimizing production processes, increasing enterprise productivity and improving the quality of finished products by controlling a set of characteristic parameters. The study considered the issue of assessing the moisture content of manufactured products, which is a characteristic parameter that is decisive for the quality of finished products in many areas of industry. Without violating the generality of conclusions, the research is conducted on the basis of technological processes with evaporation. During its implementation, determining measurements are performed, the purpose of which is to carry out the calibration process based on test samples in order to create calibration tables, and control measurements carried out directly during the production process in order to adjust (according to the created tables) the influential controlled parameters to the value of the characteristic parameter. The study described the methodology of obtaining a relative grading characteristic for processes that directly or indirectly correspond to the subtraction model equation. The structural organization is given for grading the values of the characteristic parameter of the finished product depending on the size of the influential factors. The uncertainty of moisture estimation based on the results of the control measurement is analyzed. The study established that the presence of instrumental correlation leads to an increase in the estimation accuracy when using the subtraction operation. Moreover, with the increase in the difference between the input parameters, the accuracy of estimating the moisture content of the finished product also increases.

Keywords: moisture loss; evaporation; grading; determining measurements; systematic bias; instrumental correlation; industrial conditions.

Стаття надійшла до редакції 23.04.2024.