

МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОЛОЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

І.В. Григоренко, С.М. Григоренко, С.В. Лиска, Д.В. Хроль

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інституту», м. Харків, Україна

Анотація

Для забезпечення контролю параметрів технологічних процесів у молочній промисловості необхідно використовувати вимірювальні системи, що дасть можливість проводити вимірювання всіх основних технологічних параметрів, накопичувати статистичну інформацію, аналізувати отримані данні з метою підтримки високої якості продукції, що виготовляється. У роботі розроблено структурну схему вимірювальної системи, що здатна контролювати технологію виробництва твердого сиру на основних етапах: «Резервування та дозрівання молока», «Постерилізація та охолодження молока», «Формування сиру», «Пресування сиру», «Посол сиру», «Дозрівання сиру». Завдяки впровадженню розробленої вимірювальної системи одержані результати вимірювань температури на шести етапах технологічного процесу виготовлення твердого сиру. Завдяки проведенню дисперсійного аналізу виконано перевірку метрологічної надійності датчиків температури. Складено бюджет невизначеності та встановлені межі довірчих інтервалів для випадкової похибки вимірювань.

Ключові слова: вимірювальна система, датчик, температура, дисперсійний аналіз, невизначеність.

1. Вступ

Проблеми, що пов'язані із виробництвом і контролем якості твердого сиру, як одного з основних виробів молочної промисловості, цікавлять провідних вчених усього світу. У роботі [1] оцінено склад, біохімічні, текстурні та органолептичні показники сирів у процесі дозрівання та зберігання. У дослідженні [2] проведено: «вивчення здатності різних штамів *Lactobacillus*, що виступають як захисні допоміжні культури проти зростання грибків». У роботі [3] розглянуто: «Як саме *Penicillium commune* впливає на текстурні властивості та розподіл води у твердих та напівтвердих сирах». У дослідженні [4] стверджується, що: «Сир – молочний продукт, що має потенційну користь для здоров'я. Споживання сиру зросло завдяки значній різноманітності сортів, різноманітності форм випуску та змінам способу життя споживачів». У [5] проведено: «Огляд консервації твердих та напівтвердих сирів: якість та безпека» з метою «обговорити найефективніші методи забезпечення безпеки та органолептичних якостей дозрілих сирів». У цій дослідницькій роботі [5] зазначено: «першорядною метою сироваріння було збереження основних компонентів молока, і сьогодні завдяки високому вмісту білка та енергії сир є збалансованим харчовим раціоном навіть для невегетаріанців. У світі виробляється близько 3000 сортів сиру, які класифікуються як тверді, дуже тверді, м'які, напівм'які, напівтверді, залежно від вмісту вологи в сирі. В останні роки світовий ринок сиру став свідком значного зростання, що визначається різними факторами, включаючи зміну переваг споживачів на користь багатих на білок, зручних варіантів їжі».

Спираючись на дослідження світової науки є можливість стверджувати, що задача забезпечення якості твердого сиру є актуальною і потребує подальшого розвитку у напрямку визначення засобів

контролю якості при виробництві сиру.

Мета роботи. Розробка вимірювальної системи (ВС) для технологічного процесу виготовлення твердого сиру та обробка результатів вимірювань температури на основних етапах технологічного процесу для перевірки метрологічної надійності використаних датчиків.

2. Розробка структурної схеми ВС для виробництва твердого сиру

Розробка будь якої ВС завжди починається з аналізу технологічного процесу на предмет виявлення ділянок контролю і рівнів параметрів, що треба контролювати. Структурна схема ВС охоплює саме ті ділянки виробництва, які потребують автоматичного контролю. Оскільки весь технологічний процес (ТП) складається із п'ятнадцяти основних етапів, але ж тільки сім із них потребують автоматизації контролю для забезпечення підтримки точної технології виробництва. Отже виділено основні етапи, що підлягають контролю:

1. Етап «Резервування та дозрівання молока» потребує вимірювання температури, яке здійснюється за допомогою первинного вимірювального перетворювача (ПВП) ПВП 1;
2. «Постерилізація та охолодження молока» вимірювання температури виконується ПВП 2;
3. «Згортання молока» вимірювання температури виконується за допомогою ПВП 3, що вимірює температури як при згортанні так і при повторному нагріві молока;
4. «Формування сиру» вимірювання температури здійснює ПВП 4.
5. «Пресування сиру» вимірювання температури здійснює ПВП 5, а вимірювання рівня рН виконує ПВП 6.
6. «Посол сиру» вимірювання температури проводиться за допомогою ПВП 7.

7. «Дозрівання сиру» вимірювання температури у приміщенні складу виконує ПВП 8, який являє собою серію із п'яти датчиків, що розміщені по кутах приміщення та у його центрі. Вимірювання рівня вологості повітря у приміщенні здійснює ПВП 9 (рис. 1). У структуру входить також мікроконтролер, який необхідний для обробки інформації та забезпечення обміну даними з центральним комп'ютером (ЕОМ). Для стабільної роботи мікроконтролера додано

генератор синхронізуючих імпульсів, що формує необхідні для роботи синхроімпульси. Завдяки пульту управління виконується початкове налаштування мікроконтролера, та забезпечується можливість його скидання. Послідовний інтерфейс використовується для обміну даними мікропроцесора з ЕОМ. Цифровий відліковий пристрій (ЦВП) здійснює відображення поточної інформації виміряних параметрів.

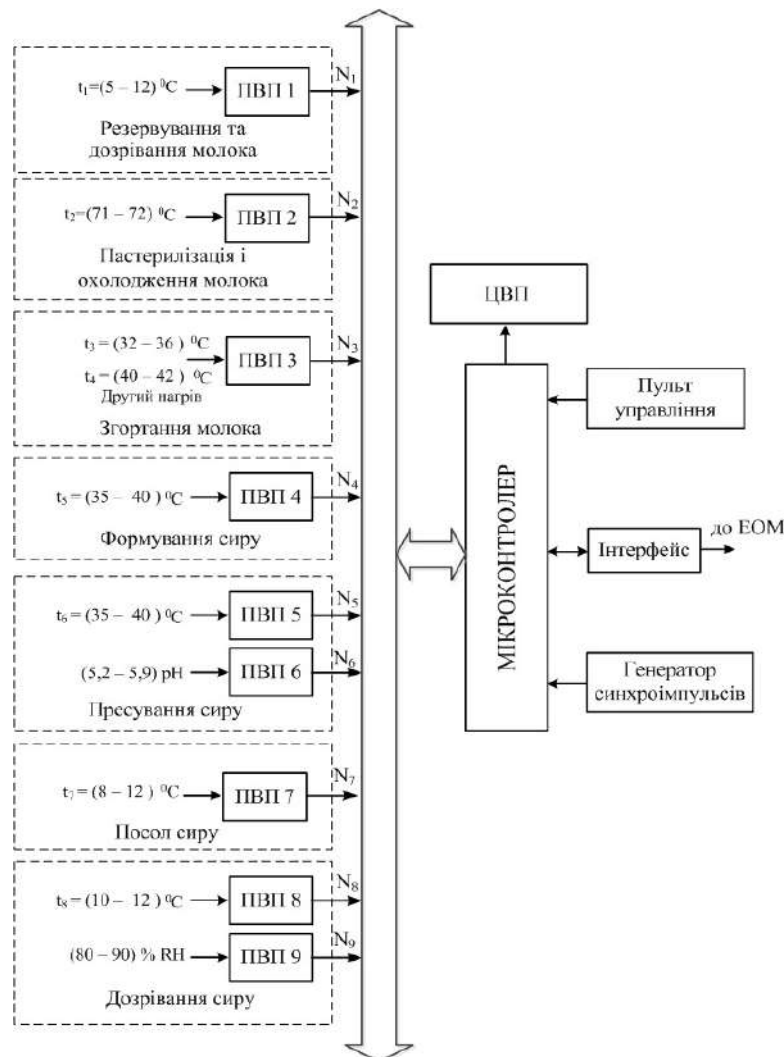


Рис. 1. Структурна схема вимірювальної системи для виробництва твердого сиру

3. Дисперсійний аналіз даних від каналів вимірювання температури ТП виготовлення твердого сиру

Виробництво твердого сиру складається із декількох етапів, на яких потрібно контролювати температуру, а саме:

1. Етап «Резервування та дозрівання молока» потребує вимірювання температури у діапазоні (+5 ... +12) °C;

2. «Пастеризація та охолодження молока» потребує вимірювання температури у діапазоні (+71 ... +72) °C;

3. «Згортання молока» потребує вимірювання температури у діапазоні (+32 ... +36) °C, а при повторному нагріві молока це діапазон (+40 ... +42) °C;

4. «Формування сиру» вимірювання температури здійснює у діапазоні (+35 ... +40) °C;

5. «Пресування сиру» потребує вимірювання температури у діапазоні $(+35 \dots +40) ^\circ\text{C}$;

6. «Посол сиру» потребує вимірювання температури у діапазоні $(+8 \dots +12) ^\circ\text{C}$.

На всіх цих етапах виробництва використовується багатозонні датчики 1-3ФТ. Оскільки вимірювання температури здійснюється у практично однакових умовах і використовуються датчиками одного типу, то виникає задача перевірки метрологічної надійності датчиків 1-3ФТ. Поставлену у роботі задачу доцільно вирішувати використанням методу дисперсійного аналізу, який дає можливість проводити порівняння дисперсій з подальшим виділенням більшої дисперсії із багатьох. Зазвичай, для перевірки однорідності дисперсій трьох і більше вибірок найчастіше застосовується тест Кохрена, який вимагає однакової кількості експериментів у кожній вибірці. Він використовується: в експериментальних дослідженнях для перевірки однорідності, у технічному контролі якості, у статистичному моделюванні для виявлення нестабільних груп, в аналізі варіацій (ANOVA).

Задача полягає у тому, щоб з'ясувати, можливо чи ні вважати відмінність більшої з отриманих дисперсій від інших випадковим явищем, або цю відмінність слід вважати суттєвою (значущою).

Для вирішення поставленої задачі виконано кожним із $m = 6$ датчиків 1-3ФТ однакова кількість вимірювань ($n = 30$). Далі, за умовами тесту Кохрена виконуються розрахунки емпіричних дисперсій $D_1 \dots D_6$ та порівнюємо найбільшу з отриманих дисперсій із сумою усіх дисперсій за формулою

$$G = \frac{D_{\max}}{D_1 + D_2 + D_3 + D_4 + D_5 + D_6}. \quad (1)$$

У випадку, якщо значення у формулі (1) виявиться більшим за критичне значення, що отримано із таблиць тест-критерія Кохрена, відповідно до встановленого рівня значущості α , тоді відмінність максимальної за величиною дисперсії від інших є суттєвим і датчик вважається метрологічно ненадійним і його потрібно замінити.

4. Результати натурних вимірювань температури на етапах ТП

Графік спостережень за зміною температури $(10,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ на етапі «Резервування та дозрівання молока» представлено на рис. 2.

Графік спостережень за зміною температури $(+71 \dots +72) ^\circ\text{C}$ на етапі «Пастеризація та охолодження молока» представлено на рис. 3.

Графічне зображення спостережень за зміною температури у діапазоні $(+33 \dots +35) ^\circ\text{C}$ на етапі «Згортання молока» представлено на рис. 4.

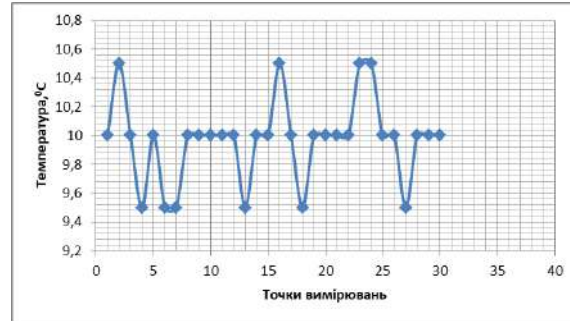


Рис. 2. Графік вимірювання температури $10,0 \pm 0,5 ^\circ\text{C}$ на етапі «Резервування та дозрівання молока»

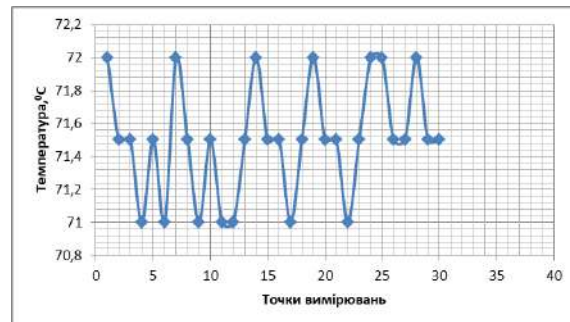


Рис. 3. Графік зміни температури у діапазоні $(+71 \dots +72) ^\circ\text{C}$ на етапі «Пастеризація та охолодження молока»

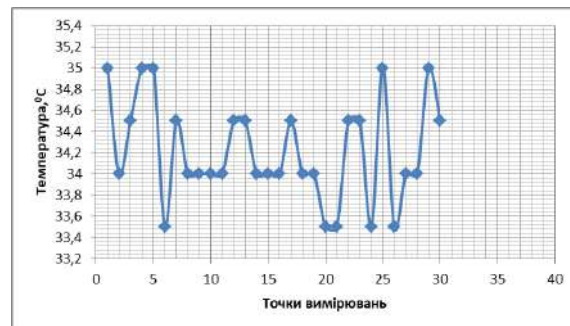


Рис. 4. Графік вимірювання температури на етапі «Згортання молока»

Графічне зображення спостережень за зміною температури у діапазоні $(+35 \dots +40) ^\circ\text{C}$ на етапі «Формування сиру» представлено на рис. 5.

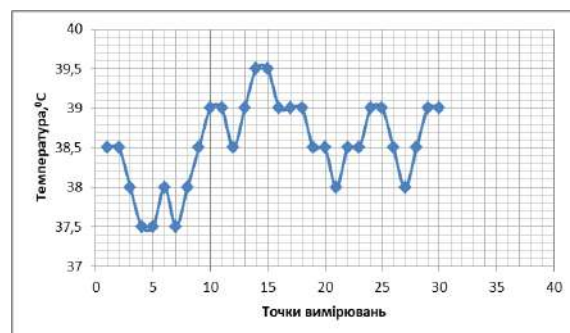


Рис. 5. Графік вимірювання температури у діапазоні $(+35 \dots +40) ^\circ\text{C}$ на етапі «Формування сиру»

Графічне зображення спостережень за зміною температури у діапазоні $(+38 \dots +40)^\circ\text{C}$ на етапі «Пресування сиру» представлено на рис. 6.

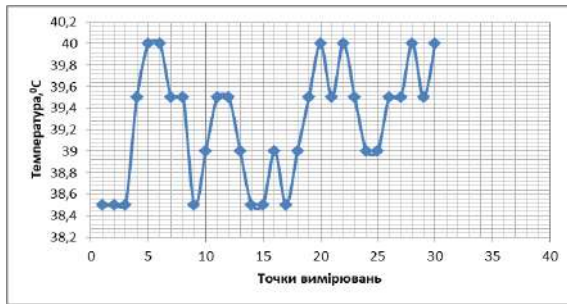


Рис. 6. Графік вимірювання температури у діапазоні $(+38 \dots +40)^\circ\text{C}$ на етапі «Пресування сиру»

Графічне зображення спостережень за зміною температури у діапазоні $(+8 \dots +11)^\circ\text{C}$ на етапі «Посол сиру» представлено на рис. 7.

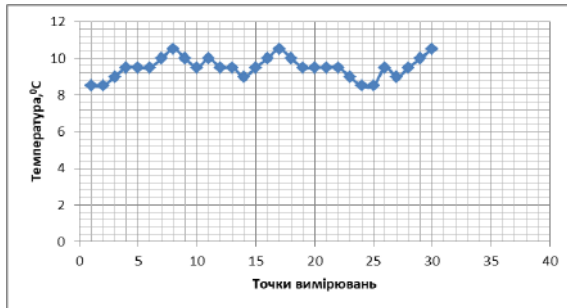


Рис. 7. Графік вимірювання температури у діапазоні $(+8 \dots +11)^\circ\text{C}$ на етапі «Посол сиру»

5. Дисперсійний аналіз за тестом Кохрена

Незміщену оцінку дисперсії результатів багаторазових вимірювань температури на основних етапах технологічного процесу виготовлення твердого сиру визначено за формулою

$$D_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (t_{ij} - \bar{t}_i)^2. \quad (2)$$

1. «Резервування та дозрівання молока» $D_1 = 0,085 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$;
2. «Пастеризація та охолодження молока» $D_2 = 0,12 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$;
3. «Згортання молока» $D_3 = 0,24 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$;
4. «Формування сиру» $D_4 = 0,3 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$;
5. «Пресування сиру» $D_5 = 0,29 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$;
6. «Посол сиру» $D_6 = 0,33 \text{ (}^\circ\text{C)}^2$.

Відповідно до формули (1) значення суми всіх дисперсій дорівнює

$$G = \frac{0,33}{0,085 + 0,12 + 0,24 + 0,3 + 0,29 + 0,33} = 0,242.$$

Критичне значення відхилення G при довірчій імовірності 0,95, числу ступенів вільності $m_1 = n - 1 = 6 - 1 = 5$ та об'єму вибірки $m_2 = k = 6$, визначено за таблицею G -розподілу Кохрена $G_{кр} = 0,4447$.

$$G_{кр} = 0,4447 > G = 0,242.$$

Отримане значення G є меншим за критичне значення $G_{кр}$, відповідно до встановленого рівня значущості $\alpha = 0,05$, отже відмінність максимальної дисперсії $D_6 = 0,33$ від інших є несуттєвою і датчик вважається метрологічно надійним.

6. Бюджет невизначеності для температурних каналів

На даному ТП відсутня кореляція між величинами [6], тому сумарна стандартна невизначеність, яка враховує наявність невизначеності за типами А та В вхідної величини визначається відповідно до алгоритму GUM за формулою [7]:

$$u_c(t) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(t)} = \sqrt{u_A^2(t) + u_B^2(t)}. \quad (3)$$

Стандартна невизначеність результатів вимірювань за типом А вхідної величини t_i розраховується за формулою [8]

$$u_A(\bar{t}_i) = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (t_{iq} - \bar{t}_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}, \quad (4)$$

де n_i – кількість спостережень проведених при вимірюванні t_i .

Стандартна невизначеність за типом В вхідної величини залежить від апріорної інформації про мінливість вхідної величини і визначається за формулою [8]:

$$u_B(t) = \frac{b-a}{\alpha_i}, \quad (5)$$

де α_i – коефіцієнт, що відповідає прийнятому закону розподілу у середині меж невиключеної систематичної похибки $\pm(b-a)$.

Бюджет невизначеності результатів вимірювань температури по етапам технологічного процесу виготовлення твердого сиру представлено у табл. 1.

Границі довірчого інтервалу Δ_d випадкової похибки обчислюють за формулою [10]

$$\Delta_d = \pm k_P \cdot \sigma_{\Delta}, \quad (6)$$

де k_P – квантильний коефіцієнт довіри.

Для довірчої ймовірності $P = 0,9973$, або 99,73 % [10] формула (6) приймає вигляд

$$\Delta_{0,9973} = \pm 3 \cdot \hat{\sigma}_t. \quad (7)$$

Таблиця 1 – Бюджет невизначеності вимірювань температури

Вимірювана величина, °C	Виміряне значення, °C	Невизначеність за типом A , °C	Невизначеність за типом B , °C	Сумарна стандартна невизначеність, °C	Розширена невизначеність, °C
t_1	9,97	$u_A(t_1)=0,053$	$u_B(t)=0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$u_c(t_1)=0,255$	$U(t_1)=0,51$
t_2	71,50	$u_A(t_2)=0,063$		$u_c(t_2)=0,260$	$U(t_2)=0,52$
t_3	34,22	$u_A(t_3)=0,089$		$u_c(t_3)=0,265$	$U(t_3)=0,53$
t_4	38,55	$u_A(t_4)=0,099$		$u_c(t_4)=0,268$	$U(t_4)=0,536$
t_5	39,27	$u_A(t_5)=0,098$		$u_c(t_5)=0,268$	$U(t_5)=0,536$
t_6	9,50	$u_A(t_6)=0,1$		$u_c(t_6)=0,269$	$U(t_6)=0,538$
Ефективне число степенів вільності		$\nu_{eff} \rightarrow \infty$			
Коефіцієнт охоплення		$k = 2$			

Дослідження встановили, що датчики температури на усіх етапах технологічного процесу виготовлення твердого сиру є метрологічно надійними, тобто випадкові похибки вимірювання не перевищують встановлене значення $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}^0$ із імовірністю $P = 0,9973$.

7. Висновки

Розроблена структурна схема вимірювальної системи для виробництва твердого сиру. Опрацьовано результати вимірювань температури

на основних етапах ТП виготовлення твердого сиру, що дозволило провести дисперсійний аналіз за тестом Кохрена серій спостережень, який довів, виконання умов не перевищення критичного значення за вказаним тестом. Отриманий результат підтверджує, що датчики температури типу 1-3ФТ, які використані на шести ділянках ТП, є метрологічно надійними. Складено бюджет невизначеності за каналами вимірювання температури. Випадкові похибки вимірювання по температурним каналам не перевищують встановлене значення із імовірністю $P = 0,9973$.

Список літератури

1. Pappa, EC, E Kondyli, A-M Vlachou, and E Malamou. 2025. «Characteristics of a Hard Cheese Manufactured Using High Heat-Treated Sheep or Mixed Sheep-Goat Milk». *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society* 76 (2):9363-74. <https://doi.org/10.12681/jhvms.39401>.
2. Asmaa H.M. Moneeb, Taha Mehany, Mohammed A. Abd-Elmonem, Adel A. Tammam, Abdel-Naser A. Zohri, Wahid I. El-Desoki, Tuba Esatbeyoglu, Probiotic Lactobacillus strains as protective adjunct cultures against fungal growth and toxin production in Hard cheese, *LWT*, Vol. 213, 2024, 117057, ISSN 0023-6438, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117057>.
3. Jurado M, Vicente CJ. Penicillium commune affects textural properties and water distribution of hard and extra-hard cheeses. *Journal of Dairy Research*. 2020;87(1):117-122. doi:10.1017/S0022029919000906.
4. Nájera AI, Nieto S, Barron LJR, Albisu M. A Review of the Preservation of Hard and Semi-Hard Cheeses: Quality and Safety. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(18):9789. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189789>.
5. Mansha Rafiq, S., Rafiq, S.I., Gayas, B. (2025). History and Culture of Cheese Making. In: Mansha Rafiq, S. (eds) Technological Advances and Trends in Cheese Making. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94476-5_1.
6. Ihor Hryhorenko, Svitlana Hryhorenko, Oleksandr Zhuk. The use of correlation analysis in assessing the uncertainty of the influence of external factors on the result of thermal control of biological objects. *Advanced Information Systems*. Kharkiv: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 2023. Vol. 7, No. 1. P. 66–70. (A)
7. JCGM (2008) Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. JCGM100:2008, BIPM, Sèvres, France.
8. Zakharov I., Nyezhamkov P., Botsiura O. Expanded Uncertainty Evaluation Taking into Account the Correlation Between Estimates of Input Quantities. *Ukrainian Metrological Journal*. 2021. No 1. P. 4–8.
9. I. Hryhorenko. Method for monitoring the functioning of information and measuring systems during operation. *Український метрологічний журнал*. – Харків, 2025. – № 2. С. 38 – 46. DOI: 10.24027/2306-7039.2.2025.333842.
10. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки. Харків: НТУ «ХПІ», 2005. 524 с.

Надійшла (Received) 12.10.2025
Прийнята до друку (accepted for publication) 05.11.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ/ABOUT THE AUTHORS

Ігор Володимирович Григоренко – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: grigmaestro@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4905-3053.

Ihor Hryhorenko – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Information and measuring technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: grigmaestro@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4905-3053.

Світлана Миколаївна Григоренко – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: sngloba@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0150-4844.

Svitlana Hryhorenko – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of technological systems and ecology monitoring, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: sngloba@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0150-4844.

Лиска Сергій Вікторович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Serhii.Lyska@infiz.khpi.edu.ua. ORCID: 0009-0002-9749-3210.

Serhii.Lyska – postgraduate of the Department of Information and measuring technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: Serhii.Lyska@infiz.khpi.edu.ua. ORCID: 0009-0002-9749-3210.

Хроль Давід Владиславович – магістр кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: David.Khrol@cit.khpi.edu.ua. ORCID: 0009-0000-3964-9876.

David.Khrol – magistr of the Department of Information and measuring technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: David.Khrol@cit.khpi.edu.ua. ORCID: 0009-0000-3964-9876.

METROLOGICAL RESEARCH OF THE MEASURING SYSTEM FOR THE DAIRY INDUSTRY

I.V. Hryhorenko, S.M. Hryhorenko, S.V. Lyska, D.V. Khrol

Abstract

To ensure control of technological process parameters in the dairy industry, it is necessary to use measuring systems that will make it possible to measure all the main technological parameters, accumulate statistical information, and analyze the data obtained in order to maintain high quality of the products being manufactured. The work has developed a structural diagram of a measuring system that is able to control the technology of hard cheese production at the main stages: «Milk storage and ripening», «Milk sterilization and cooling», «Cheese formation», «Cheese pressing», «Cheese transfer», «Cheese ripening». Thanks to the implementation of the developed measuring system, the results of temperature measurements at six stages of the technological process of hard cheese production were obtained. Thanks to the analysis of variance, the metrological reliability of temperature sensors was checked. An uncertainty budget was compiled and confidence intervals for random measurement error were established.

Key words: measuring system, sensor, temperature, variance analysis, uncertainty.