

Олексій Разживін¹, Анастасія Люта², Олег Марков³, Герман Єрмакін⁴

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: avrazzhivin75@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1371-2651>. **Scopus Author ID:** [57672166200](https://orcid.org/0000-0002-1371-2651)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: asyalyutaya@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9606-875X>. **Scopus Author ID:** [57205585546](https://orcid.org/0000-0002-9606-875X)

³доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: oleg.markov.umd@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

ResearcherID: [L-6561-2018](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866). **Scopus Author ID:** [55648046800](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

⁴магістр кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ, Україна)

E-mail: german20124422@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-4461-6120>

**СИНТЕЗ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРИ
ПАСТЕРИЗАЦІЇ МОЛОКА**

У статті вирішено актуальне науково-технічне завдання зниження енергоємності пастеризації молока в апараті ПОУ5 шляхом дослідження та розробки автоматизованої системи керування температурним режимом пастеризації. Проведено дослідження особливостей функціонування апарата. За результатами досліджень визначено параметри процесу керування; здійснено удосконалення математичної моделі й алгоритму регулювання параметрів пастеризації молока; створено автоматизовану систему керування температурою пастеризації молока в установці ПОУ5. Проведено синтез нечіткого регулятора температури пастеризації молока. Побудована поверхня відгуку зміни температури молока залежно від витрати молока на пастеризацію і температури гарячої води теплообмінника.

Ключові слова: нечіткий регулятор; пастеризація молока; автоматизована система; математична модель.

Рис.: 5. Бібл.: 9.

Актуальність теми дослідження. У процесі аналізу принципів побудови адаптивних систем автоматичного управління (САУ) виявлено труднощі, що виникають при вирішенні завдань синтезу таких систем [1]. Однією з них є вибір методу налаштування параметрів керуючих пристроїв. Вона може бути здійснена за допомогою наявних методів тільки в окремих випадках. Наявність блоку ідентифікації динаміки об'єкта управління та оцінка змінних стану ускладнюють структуру САУ. Крім того, похибка ідентифікації погіршує якість управління, а в деяких випадках призводить до нестійкого режиму роботи САУ. Вирішення вищенаведених труднощів можливо шляхом застосування апарата нечіткої логіки для побудови адаптивних систем. Використання апарата нечіткої логіки пов'язано з формалізацією неточних, розмитих у смисловому плані суджень і узагальнених категорій, які задають класифікацію вихідних понять на рівні нечітких множин, що дуже важливо при управлінні об'єктами, опис яких відомо неточно. Це дає можливість створювати адаптивні системи з оптимальним керуванням для апроксимації вихідної змінної нечіткого регулятора [1, 2].

Постановка проблеми. Сучасне молочне виробництво – це масштабне виробництво, яке має у своєму складі, у багатьох випадках, кілька десятків пастеризаторів. При традиційних системах управління з децентралізованим контролем обслуговування такої кількості установок потрібен великий штат оперативного персоналу. При керуванні пастеризаційною установкою необхідно із заданою точністю підтримувати температуру в секції пастеризації. Проте контролювати тільки температуру виявляється недостатньо, тому що на більшості підприємств підігрів йде за допомогою пари від парогенераторів, а величина його тиску не постійна, що вносить додаткове обурення. До того ж інерційність процесу різна для різних видів продукту (вершки, молоко та ін.), а отже, після налаштування системи управління на один продукт виникне потреба в її переналаштуванні на інший [1].

У таких умовах виникає потреба в побудові системи управління установки для пастеризації молока, що забезпечує виготовлення кінцевого продукту із заданими якісними показниками за різних умов реальної роботи.

У зв'язку з викладеними особливостями процесу пастеризації молока, дослідження спрямоване на розробку нових методів підтримки заданого значення температури пастеризації з метою підвищення якості питного молока та є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] проведено дослідження ефективності методів управління споживанням теплової енергії, авторами визначено, що підвищення якості пастеризації з використанням теплообмінних апаратів можливе тільки за наявності математичних моделей об'єктів керування. Авторами роботи зазначено, що для теплообмінників, які нині широко використовуються в системах пастеризації молока, застосовна модель «витіснення – витіснення».

У роботі [4] зазначено, що впровадження сучасних засобів автоматизації сприяє оптимізації витрат на споживану теплову енергію, а також витрат на експлуатацію систем теплообміну. Подача тепла і його споживання – це місткі й інформативні параметри, що лежать в основі теплотехнічних і економічних розрахунків.

Авторами [5] визначено, що з урахуванням реальних умов роботи, усі істотні фактори, що впливають на процес теплообміну, поділяються на такі групи:

1. Збурення, які можна виміряти, але неможливо або неприпустимо стабілізувати (витрата живлення, що безпосередньо подається до апарату; температура навколишнього середовища тощо). Для досліджуваного процесу такими збуреннями є: температура теплоносія, а також температура та витрата потоку молока на вході в апарат.

2. Збурення, які неможливо або недоцільно вимірювати безпосередньо (падіння активності каталізатора, зміна коефіцієнтів тепло- та масопередачі тощо). У ролі таких у такому об'єкті може виступати накип, що утворюється на поверхні трубок всередині теплообмінника, а також тиск теплоносія в рекуператорі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З метою підвищення якості пастеризації молока доцільно обирати тільки регульовані координати. При побудові замкнених систем регулювання треба обрати технологічні параметри, зміна яких свідчить про порушення матеріального або теплового балансу в апараті. До них належать температури теплоносіїв. При побудові САР температурою пастеризації молока необхідно враховувати керуючі змінні – вхідні сигнали об'єкта управління, за допомогою яких можна впливати на режим роботи об'єкта. Такими параметрами є витрата молока на пастеризацію і температура гарячої води теплообмінника. Відповідно до вищевикладеного, потрібно побудувати математичну модель, яка дозволить досліджувати можливості застосування регулятора, що забезпечить автоматичне керування температурою пастеризації відповідно до температурного графіка.

Мета дослідження полягає в покращенні якості управління процесом пастеризації молока шляхом розробки синтезу нечіткого регулятора температури для реалізації алгоритму функціонування контуру пастеризації, яка включає розробку моделі управління об'єктом і структури регулятора для цього об'єкта.

Виклад основного матеріалу. Імітаційна модель управління об'єктом, формалізована у вигляді правил, які мають опис:

- якщо зменшити подачу теплоносія в теплообмінник, тоді температура пастеризації (T_2) буде зменшуватися;

- якщо збільшити подачу теплоносія в теплообмінник, тоді T_2 буде зростати.

Регулювання пастеризації молока реалізуємо на базі алгоритму нечіткого управління Мамдані. На підставі експериментальних даних і експертних оцінок отримано такі лінгвістичні змінні (параметри) об'єкта управління:

1. Абсолютне значення температури $T_2(t)$ у момент часу t , яке характеризується набором лінгвістичних змінних: «висока», «нормальна», «низька»; функції належності $\mu(T_2)$ нечітким множинам «висока», «нормальна», «низька», описується лінійними рівняннями виду $y = kx + b$:

$$\mu(T_2) = \sup_{x_1, \dots, x_n \in x} \{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i) \mu_{A_i^k}(x_i) \}. \quad (1)$$

2. Відносна зміна температури ΔT_2 за час t_0 (такт алгоритму розрахунку) визначається набором лінгвістичних змінних: "збільшується", "зменшується".

Процес фазифікації полягає у встановленні відповідності між значеннями, що вимірюються $T_2(t)$, $\Delta T_2(t)$ та нечіткими множинами $\mu(T_2)$, $\mu(\Delta T_2)$, тобто в обчисленні відповідних коефіцієнтів функції приналежності.

Для управління $U(t)$ в момент часу t обчислюються лінгвістичні змінні «відкрити», «закрити». Набір основних правил роботи нечіткого регулятора наведено на рис. 1.

	Входи		Вихід
Правило 1			
Правило 2			
Правило 3			
Правило 4			

Рис. 1. Набір правил роботи нечіткого регулятора температурою пастеризації

Процес нечіткого вводу полягає у встановленні відповідних нечітких множин для управління $U(t)$ (коефіцієнтів приналежності) при відомих значеннях функції приналежності $\mu(T_2)$, $\mu(\Delta T_2)$. Алгоритм управління формалізується у вигляді такого набору правил:

- якщо T_2 – «низка», тоді U1 – «відкрити»;
- T_2 – «висока», тоді U1 – «зачинити»;
- ΔT_2 – «збільшується», тоді U2 – «закрити»;
- ΔT_2 – «зменшується», тоді U2 – «відкрити».

Параметром регулювання є температура пастеризації молока $T_2 = 76$ °С. Допустимий діапазон зміни температури T_2 становить від 72 до 78 °С.

Опишемо блок фазифікації. Застосуємо операцію типу Синглетон [6; 7]:

$$A(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x = \bar{x}, \\ 0, & \text{якщо } x \neq \bar{x}. \end{cases} \quad (2)$$

Зауважимо, що супремум у формулі (1) досягається тільки в тому випадку, коли $x = \bar{x}$, тобто для $\mu_{A_i}(x) = 1$. При цьому вираз (1) набирає вигляду:

$$\mu(T_2) = \{ \mu_{B^k}(y) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(\bar{x}_i) \}. \quad (3)$$

Опишемо блок дефазифікації за методом center average defuzzification [1,8]:

$$U(t) = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \mu_{B^{-k}}(y^{-k})}{\sum_{k=1}^N \mu_{B^{-k}}(y^{-k})}. \tag{4}$$

У наведеній формулі $U(t)$ – це центр (center) нечіткої множини T_2 , тобто точка, у якій $\mu(T_2)$ досягає максимального значення

$$\mu(T_2^{-k}) = \max_y \{ \mu(\cdot) \}. \tag{5}$$

При підстановці виразу (3) в формулу (4) отримуємо рівняння:

$$U(t) = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \left(\mu(T_2) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\mu(T_2) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}. \tag{6}$$

Якщо врахувати, що максимальне значення, яке можна отримати в точці y^{-k} , дорівнює 1, тобто. $\mu(T_2) = 1$, то формула (6) приймає вид

$$U(t) = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^k}(x_i) \right)}. \tag{7}$$

Процес проектування модуля нечіткого управління завершується визначенням форми подання нечітких множин A_i^k , $i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, N$. Як форма нечітких множин застосована функція Гаусса:

$$\mu_{A_i^k}(x_i) = \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right], \tag{8}$$

де \bar{x}_i^k та σ_i^k – параметри, які мають фізичну інтерпретацію; \bar{x}_i^k – центр; σ_i^k – ширина кривою Гаусса.

Математичний опис проектного модуля нечіткого управління може бути отримано шляхом об'єднання методу дефазифікації (7), функції належності (1) і блоку фазифікації з операцією типу Синглетон (2), а також з гауссівською функцією приналежності (8). Тоді модуль нечіткого управління набуває остаточного вигляду:

$$U(t) = \frac{\sum_{k=1}^N y^{-k} \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=1}^n \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^k}{\sigma_i^k} \right)^2 \right] \right)}. \tag{9}$$

Необхідно відзначити, що процеси, які відбуваються в математичній моделі теплообмінного апарата, мають розподілений характер, а реалізоване зосереджене нечітке управління дає можливість оптимізувати роботу системи управління. З використанням математичного опису модуля нечіткого управління в додатку Anfis MatLab FuzzyLogicToolbox [9; 10] розроблено структурну схему реалізації модуля нечіткого управління теплообмінного апарата, яка зображена на рисунку 2.

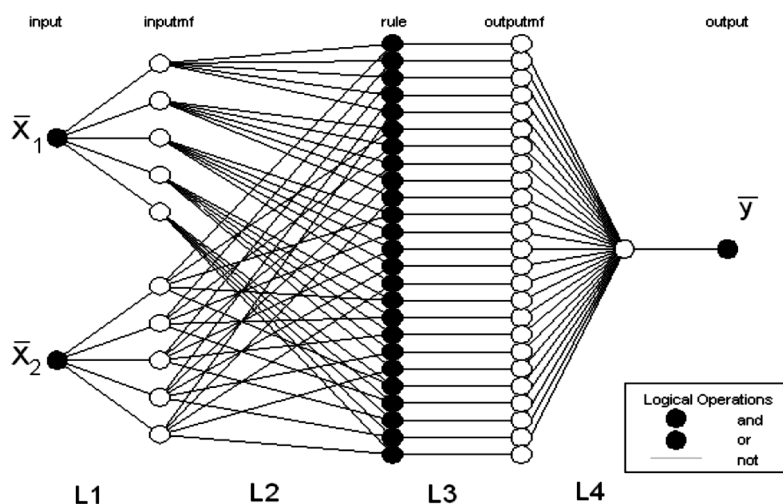


Рис. 2. Структурна схема модуля нечіткого управління

На рисунку 2 наведено модуль управління з двома входами ($n = 2$). Шари позначені символами від L1 до L4. Елементи шару L1 реалізують функцію Гаусса з параметрами \bar{X}_i^k та σ_i^k . У поданій структурі виділено чотири шари.

Подана структура нечіткої нейронної мережі (див. рис. 2) є багатшаровою мережею. У зв'язку з цим доцільно для навчання цієї мережі застосувати алгоритм зворотного поширення помилки. Для цього використана навчальна вибірка у вигляді пар (\bar{x}, d) , де $\bar{x} = [\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n]$ – це вхідний вектор, а d – еталонний сигнал. Завдання навчання полягає в такій модифікації (корекції) параметрів модуля нечіткого управління, описаного виразом (9), щоб міра похибки, що задається виразом [6-9] була мінімальною:

$$e = \frac{1}{2} [\bar{y}(\bar{x}) - d]^2. \tag{10}$$

Після навчання модуля нечіткого управління відповідно до розробленого алгоритму навчання проведено його моделювання засобами MatLab [1; 2]. Метою моделювання було визначення здатності модуля до навчання при зміні технологічних параметрів пастеризації (об'ємної витрати та швидкості нагріву). Результатами моделювання є поверхні зміни керуючого сигналу на витрату молока на виході з насоса, температури теплоносія та молока (див. рис. 3).

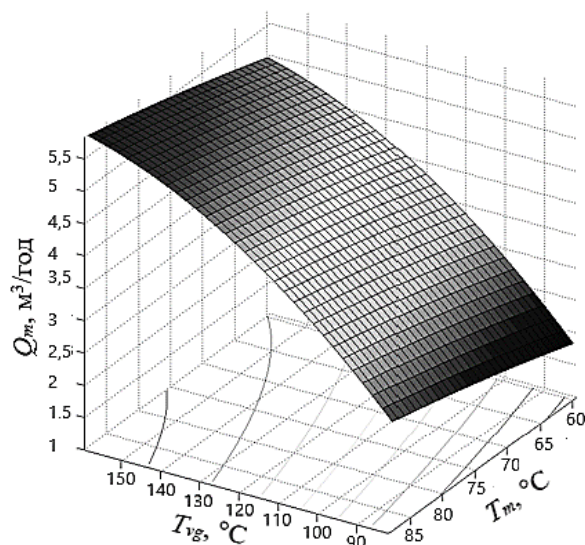


Рис. 3. Поверхня відгуку зміни температури молока залежно від витрати молока на пастеризацію і температури гарячої води теплообмінника

Модель теплообмінного апарату, реалізована в програмі MatLAB, була використана в процесі моделювання контурів стабілізації температури пастеризації молока з урахуванням паралельно працюючих теплообмінників з гарячою водою. Модель контуру стабілізації (див. рис. 4) була побудована таким чином, щоб забезпечити подачу молока без втрат. Управління температурою пастеризації молока в контурі теплообміну здійснюється за допомогою нечіткого регулятора (НР), результати роботи якого представлені на рис. 5.

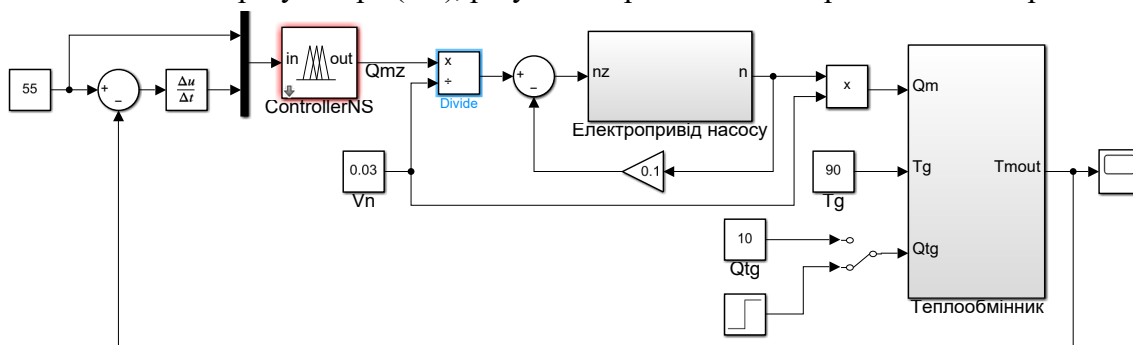


Рис. 4. Математична модель контуру управління температурою пастеризації молока

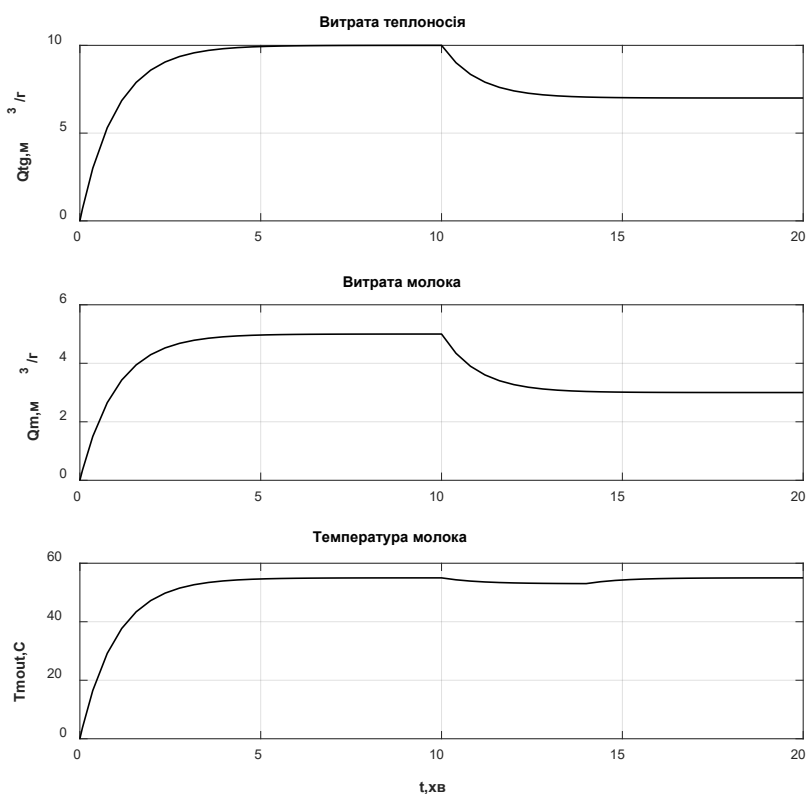


Рис. 5. Графік перехідних процесів за витратою теплоносія, молока та зміни температури в контурі пастеризації при НР

При математичному моделюванні проведена імітація виробничого випадку, коли до рекуператорів пастеризатора зменшується подача теплоносія Q_{tg} . Для компенсації даного збурення НР формує керуючий сигнал на зниження витрати молока Q_m до контуру пастеризації з метою компенсації зменшення температури пастеризації молока T_{mout} . Згідно з модельними графіками перехідного процесу за температурою пастеризації (див. рис. 5) час відпрацювання зовнішнього збурення дорівнює 5 хв, а перепад температури – менше ніж $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Модельний перепад стабілізації температурного режиму відповідає технологічним вимогам процесу пастеризації, і, як наслідок, дозволяє покращити якість та термін зберігання кінцевого продукту.

Висновки. Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що розроблена математична модель САУ може застосовуватися в контурах регулювання температури пастеризацією молока, а також при виконанні дослідних і проєктних робіт із реконструкції систем пастеризації.

Створена структурна схема пастеризатора молока, а також розроблені ефективні способи керування температурою і параметричними схемами секцій (рекуперації, пастеризації і охолодження пластинчастого пастеризатора молока), що дозволяють покращити точність управління технологічним процесом.

У результаті проведення теоретичних досліджень отримана динамічна характеристика секції пастеризації за каналом «витрата гарячої води - температура пастеризованого молока». Зазначена модель дозволить розробити алгоритми керування температурним режимом для збільшення продуктивності пастеризатора.

Список використаних джерел

1. Kim P. *MATLAB Deep Learning With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence* / Phil Kim. – Seoul, Soul-t`ukpyolsi, Korea (Republic of), 2017. – 149 p.
2. Gilat, A. *MATLAB An Introduction with Applications [Electronic resource]* / A. Gilat. – Wiley, 2016. – 416 p. – Access mode: <https://www.perlego.com/book/3866166/matlab-an-introduction-with-applications-pdf>.
3. Єресько Г. О. Технологічне обладнання молочних виробництв / Г. О. Єресько, М. М. Шинкарик, В. Я. Ворошук – Київ : Фірма „ІНКОС”, Центр навчальної літератури, 2007. – 344 с.
4. Інтенсифікація та моделювання технологічних об'єктів / В. Лисенко, Є. Чернишенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць, І. Цигульов. – Київ : АграрМедіаГруп, 2016. – 476 с.
5. Rutkowska D. *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne I systemy rozmyte* / D. Rutkowska, M. Pilinski, L. Rutkowska. – Warszawa : Wydawnicywo Naukowe PWN, 1997. – 452 с.
6. Yager R. Ranking fuzzy numbers using α -weighted valuations / R. Yager, M. Detyniecki // *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems*. – 2000. – № 8. – Pp. 573-591.
7. Wang X. Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I), (II) / X. Wang, E. E. Kerre // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2001. – № 122. – Pp. 375-385, 387-405.
8. Ohnishi T. A self-learning fuzzy control system for an urban refuse incineration plant / T. Ohnishi // *Japanese Journal of Fuzzy Theory an Systems*. – 1991. – Vol. 3, № 2. – Pp. 187-200.
9. Ivanets S. A. Fuzzy Logic Custom Instruction Set for NIOS II Processor / S. A. Ivanets, A. P. Fesenko, O. M. Fesiuk // *II International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA)*. – Kharkiv, 2020. – Pp. 36-38. DOI: 10.35598/mcfpga.2020.011.

References

1. Phil Kim. (2017). *MATLAB Deep Learning With Machine Learning, Neural Networks and Artificial Intelligence*. Seoul, Soul-t`ukpyolsi, Korea (Republic of).
2. Gilat, A. (2016). *MATLAB (6th ed.)*. Wiley. <https://www.perlego.com/book/3866166/matlab-an-introduction-with-applications-pdf> (Original work published 2016).
3. Yeresko, G.O., Shinkaryk, M.M., & Voroshchuk, V.Ya. (2007). *Technological equipment of dairy production*. INKOS» firm, educational literature center.
4. Lysenko, V., Chernyshenko, E., Reshetyuk, V., Miroshnyk, V., Zayets, N., & Tsygulyov, I. (2016). *Intensification and modeling of technological objects*. AgrarMediaGroup.
5. Rutkowska, D., Pilinski, M., & Rutkowska, L. (1997). *Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne I systemy rozmyte*. Wydawnicywo Naukowe PWN.
6. Yager, R., & Detyniecki, M. (2000). Ranking fuzzy numbers using α -weighted valuations. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems*, 8, 573-591.
7. Wang, X., & Kerre, E.E. (2001). Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I), (II). *Fuzzy Sets and Systems*, 122, 375-385, 387-405.
8. Ohnishi, T. (1991). A self-learning fuzzy control system for an urban refuse incineration plant. *Japanese Journal of Fuzzy Theory an Systems*, 3(2), 187-200.
9. Ivanets, S.A., Fesenko, A.P., & Fesiuk, O.M. (2020). Fuzzy Logic Custom Instruction Set for NIOS II Processor. *II International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA)* (pp. 36-38). 10.35598/mcfpga.2020.011.

Отримано 12.06.23

Oleksii Razzhyvin¹, Anastasiia Liuta², Oleg Markov³, German Yermakin⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: avrazhivin75@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1371-2651>. **Scopus Author ID:** [57672166200](https://orcid.org/0000-0002-1371-2651)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: asyalyutaya@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9606-875X>. **Scopus Author ID:** [57205585546](https://orcid.org/0000-0002-9606-875X)

³Doctor of Technical Science, Professor of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: oleg.markov.ond@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9377-9866>

ResearcherID: [L-6561-2018](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866). **Scopus Author ID:** [55648046800](https://orcid.org/0000-0001-9377-9866)

⁴master of the Automation of Industrial Processes Department
Donbass State Engineering Academy (Kramatorsk, Ukraine)

E-mail: german20124422@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-4461-6120>

SYNTHESIS OF FUZZY-REGULATOR OF MILK PASTEURIZATION TEMPERATURE

The article solves the actual scientific and technical task of reducing the energy intensity of pasteurization of milk in the POU5 apparatus by means of research and development of an automated system for controlling the pasteurization temperature regime. A study of the features of the device's functioning, setting the parameters of the control process was carried out; the improvement of the mathematical model and the algorithm for regulating milk pasteurization parameters was carried out; an automated system for controlling the temperature of milk pasteurization in the POU5 installation was created. The synthesis of a fuzzy regulator of milk pasteurization temperature was carried out. Constructed response surface of milk temperature changes depending on the consumption of milk for pasteurization and the temperature of the hot water of the heat exchanger. The application of the fuzzy logic apparatus for building an adaptive system makes it possible to create adaptive systems with optimal control for the purpose of approximating the output variable of the fuzzy controller.

A structural scheme of the milk pasteurizer was created, as well as effective methods of temperature control and parametric schemes of sections (recovery, pasteurization and cooling of the plate milk pasteurizer) were developed, which allow improving the accuracy of technological process control.

As a result of conducting theoretical research, a dynamic characteristic of the pasteurization section was obtained according to the channel «hot water consumption - temperature of pasteurized milk». The specified model will allow to develop temperature control algorithms to increase pasteurizer productivity/

Key words: fuzzy controller; pasteurization of milk; automated system; mathematical model.

Fig.: 5. References: 9.