

УДК 681.518.22

doi:10.20998/2413-4295.2022.04.04

РОЗРОБЛЕННЯ СИТУАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ З НЕЧІТКОЮ ЛОГІКОЮ ДЛЯ ДРУГОГО РІВНЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

С. І. КОНДРАШОВ, І. В. ГРИГОРЕНКО*, О. С. ОПРИШКІН

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: grigmaestro@gmail.com

АНОТАЦІЯ На сьогодні при виробництві і у побуті стає питання підвищення якості та ефективності систем помелу. Це можуть бути як цементні і поробляючи зерно заводи, так і кав'ярні, що використовують машини для помелу кави. Ефективне управління процесом помелу має велике значення для збільшення продуктивності і якості кінцевого продукту. Управління процесом помелу є складною задачею внаслідок того, що на процес впливають багато чинників. Крім чинників треба враховувати при аналізі ще ступень зносу ріжучих поверхонь, люфт у механічних передачах, що збільшує відстань між жорновами і матеріал, з якого вони вироблені. Математичні моделі, що описують процес помелу не можуть бути повністю досконалими, бо містять обмежену кількість чинників, які впливають на процес і всі вони визначаються у різних фізичних величинах. Також при розробці математичної моделі практично неможливо врахувати динамічні зміни у об'єкті контролю, які можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Всі ці особливості складного об'єкту контролю роблять необхідним перехід до створення ситуаційної системи з нечіткою логікою, яка надасть можливість врахувати усі особливості і складності, що виникають при створенні «образу» об'єкта контролю. Для розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою обрано найбільш прийнятний для задач метрологічного забезпечення метод побудови нечіткого висновку ситуаційного типу Мамдані. За допомогою графічного інтерфейсу користувача вдалося побудувати ситуаційну систему з нечіткою логікою, яка надала можливість встановити для другого рівня інформаційно-вимірювальної системи, де формується технологічний і метрологічний «образ» об'єкта контролю з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, необхідні технологічні режими, що позитивно вплинуть на однорідність помелу.

Ключові слова: нечітка логіка; евристичний аналізатор; метрологічний образ; однорідність помелу; вимірювання

DEVELOPMENT OF A SITUATION SYSTEM WITH FUZZY LOGIC FOR THE SECOND LEVEL OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM

S. KONDRASHOV, I. HRYHORENKO*, O. OPRYSHKIN

Department of information and measuring technologies and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Nowadays, in production and in everyday life, there is a question of improving the quality and efficiency of grinding systems. These can be both cement and grain factories, as well as coffee shops that use machines for grinding coffee. Effective management of the grinding process is of great importance for increasing the productivity and quality of the final product. Management of the grinding process is a complex task because many factors affect the process. In addition to the factors, the degree of wear of the cutting surfaces, the backlash in mechanical transmissions, which increases the distance between the grinders, and the material from which they are made, must also be taken into account during the analysis. Mathematical models describing the grinding process cannot be completely perfect, because they contain a limited number of factors that affect the process and all of them are defined in different physical quantities. Also, when developing a mathematical model, it is practically impossible to take into account dynamic changes in the object of control, which can be both linear and non-linear. All these features of a complex object of control make it necessary to move to the creation of a situational system with fuzzy logic, which will provide an opportunity to take into account all the features and complexities that arise when creating an «image» of the object of control. For the development of a situational system with fuzzy logic, the method of constructing a fuzzy conclusion of the Mamdani situational type, most suitable for the tasks of metrological support, was chosen. With the help of a graphical user interface, it was possible to build the situational system with fuzzy logic, which made it possible to establish the second level of the information and measurement system, where the technological and metrological «image» of the control object is formed, taking into account the influence of external and internal factors, the necessary technological regimes that will positively affect the uniformity of grinding.

Keywords: fuzzy logic; heuristic analyzer; metrological image; homogeneity of grinding; measurement

Вступ

На сьогодні при виробництві і у побуті стає питання підвищення якості та ефективності систем помелу. Це можуть бути як цементні і поробляючи зерно заводи, так і кав'ярні, що використовують машини для помелу кави. Зупинимося докладніше на останніх [1]. Ефективне управління процесом помелу

має велике значення для збільшення продуктивності і якості кінцевого продукту. Управління процесом помелу є складною задачею внаслідок того, що на процес впливають багато чинників. Існують два основні види кавомолок – жорнові і ударної дії. Жорнові кавомолки технологічно складніші за удані і в них зерна кави перемелюються двома жорнами, один з них обертається, а інший – нерухомий. На

відміну від ударних кавомолок, жорнові кавомолки дають більш якісний помел кави і дозволяють регулювати ступінь помелу. Далі будимо розглядати саме жорнові кавомолки.

Чинники, що впливають на однорідність помелу пов'язані як із кліматичними умовами та і з параметрами сировини. Наприклад, це і сорт кави, ступінь її обсмаження, вологість зерна, матеріал з якого зроблені жорнова (сталь або кераміка) та швидкість їх обертання, а також вологість і температура у приміщенні. Однак крім вказаних чинників треба враховувати при аналізі ще ступінь зносу ріжучих поверхонь, люфт у механічних передачах, що збільшує відстань між жорновими і матеріал, з якого вони вироблені.

Отже, математичні моделі, що описують процес помелу не можуть бути повністю досконалими, бо містять обмежену кількість чинників, які впливають на процес і всі вони визначаються у різних фізичних величинах. Також при розробці математичної моделі практично неможливо врахувати динамічні зміни у об'єкті контролю, які можуть бути як лінійними, так і нелінійними. Всі ці особливості складного об'єкту контролю роблять необхідним перехід до створення ситуаційної системою з нечіткою логікою, яка надасть можливість врахувати усі особливості і складності, що виникають при створенні «образу» об'єкта контролю.

Об'єкт дослідження – ситуаційна система з нечіткою логікою.

Предмет дослідження – фактори, що впливають на однорідність процесу помелу зерна кави.

Мета роботи

Для того, щоб отримати інформацію про зміни у стані об'єкта контролю необхідно використовувати первинні вимірювальні перетворювачі (ПВП), що входять до складу вимірювальних каналів, а також вимірювально-обчислювальні комплекси, які будуть здатні обробляти отриману інформацію, необхідну для прийняття рішення про метрологічний стан об'єкту контролю. Система вимірювальних перетворювачів (ВП) із блоком управління і координації метрологічного стану можна розглядати як «складну систему», у якій значну частину інформації, необхідної для здійснення задач метрологічної координації [2], надано у вигляді рекомендацій спеціалістів-технологів і метрологів.

Такий погляд на систему дозволяє поєднати теорії статистичних методів оцінки стану об'єкта контролю із теорією нечітких множин (fuzzy-logic), які не розглядалися спеціалістами метрологами як об'єкти метрологічного забезпечення.

Використання системи fuzzy-logic обумовлено тим, що вона дає змогу для формалізації нечітких понять з точки зору їх семантики і забезпечує ефективну обробку якісної експертної інформації

поряд з чіткою статистичною кількісною інформацією. Більше того, використання нечіткої логіки при оцінці складних ситуацій і побудові моделей метрологічної координації полегшує задачу «спілкування» експерта-метролога із ситуаційною системою з нечіткою логікою мовою науки «Метрологія» [2,3].

Проведений аналіз існуючих автоматичних та автоматизованих систем управління технологічними процесами помелу [4-6] дає можливість стверджувати, що задача метрологічного контролю таких систем на цей час ще далека від свого вирішення і потребує використання нових нестандартних підходів для оцінки метрологічної надійності подібних систем.

Отже стає задача – підвищення ефективності та якості управління системами помелу завдяки використанню ситуаційної системи з нечіткою логікою.

Рішення задачі зводиться до побудови експертної системи з нечіткою логікою, що буде корисна для експерта-метролога, який приймає рішення про оцінку стану об'єкта контролю. Задачі, що вирішує експертна система можна розділити на два рівні. На першому рівні інформаційно-вимірювальна система призначає відповідні допуски для кожного із параметрів, що контролюються, що дає змогу визначити необхідні засоби вимірювань і значення їх граничних похибок, які необхідно контролювати у робочих режимах. Також можливо вирішувати задачу прогнозування стану кожного перетворювача.

На другому рівні формується технологічний і метрологічний «образ» об'єкта контролю з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів. Метрологічний образ об'єкта є комплексним і багатовимірним. Разом із цим згідно з прийнятою моделлю ситуаційної системи з нечіткою логікою (ССНЛ) для кожного ВП визначається оптимальна робоча точка, яка зміщується в полі допуску похибки ВП.

Мета роботи – розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для підвищення ефективності та якості управління системами помелу зерна кави із визначенням такого співвідношення між параметрами, що забезпечить максимальну однорідність помелу.

Основна частина

У роботі [7] досліджено конструкцію жорнової кавомолки, що входить до складу кавової машини, встановлено основні фактори, що впливають на якість помелу кавового зерна в кавомолках автоматичних кавомашин, а також проведені експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів кавомолки та параметрів процесу перемелювання на ступінь однорідності помелу кавового зерна. Авторами розроблено рекомендації по вибору

оптимальних параметрів процесу перемелювання кави у кавомолках автоматичних кавомашин. Отримані у роботі [7] результати стали у нагоді при визначенні меж зміни основних параметрів, що впливають на якість помелу зерна кави при створенні ситуаційної системи з нечіткою логікою.

У реальних системах помелу, у яких знаходження робочої точки у межах встановленого допуску пропонується визначати тестовими методами у робочих режимах при дії зовнішніх впливів, можна говорити лише про сукупність можливих значень випадкових складових сумарної похибки ВП, що мають різні ймовірності [8].

Алгоритм роботи системи нечіткої логіки складається з послідовного виконання трьох операцій: фазифікації, обчислення правил і дефазифікації, або приведення до чіткості [9]. Для формування систематики нечітких понять використовуються лінгвістичні зміни як особлива форма організації експертної інформації. Етап фазифікації статистичних даних метрологічного експерименту полягає у визначенні ступені істинності, тобто значення функцій приналежності для кожного правила (передумов). Іншими словами – відбувається перехід від чітких значень у формі чисел до лінгвістичних терм, що характеризують діапазон зміни вхідних числових даних. Статистична інформація про похибки ВП відображується у нечіткі множини відповідно до предметної шкали сформованої групою або одним експертом-метрологом.

Формалізований опис нечіткої поточної ситуації поступає у блок прийняття рішень. Отримана інформація ідентифікується з однією з типових ситуацій шляхом пошуку останньої на основі співставлення ситуацій. Цей етап відноситься до обчислення правил, тобто формування нечіткого висновку. Саме блок прийняття рішень формує вихідний дефазифікований сигнал у зручному для експерта-метролога вигляді. Операція дефазифікації полягає у зворотному переході від лінгвістичних терм з якими складались правила до чітких висновків у числовій формі.

Для формування висновків необхідно використовувати апарат нечіткого висновку. У даний час існує багато алгоритмів нечіткої логіки. Найбільш часто використовуються такі: алгоритми Мамдані [10], Цукамото [11], Сугено [12,13], Ларсена [14]. У роботі [15] було обрано моделі для лінгвістичних змінних у нечіткому логічному виведенні Мамдані та доведено його перевагу над іншими методами в оцінці якості. Найбільш прийнятними для задач метрологічного забезпечення є методи побудови нечіткого висновку ситуаційного типу Мамдані. Для них не потрібні великі об'єми оперативної пам'яті і вони використовують достатньо прості алгоритми, які можуть бути реалізовані без використання спецпроцесорів на звичайних ЕОМ у програмі MatLab.

Прийняття рішення виконується блоком прийняття рішень і полягає у співставленні поточного стану ВП з усіма еталонними ситуаціями, визначенні еталонної ситуації, найбільш близької до поточної, і формуванні керуючого рішення. Це рішення пропонується експерту-метрологу, який і приймає остаточне рішення.

Структурна схема нечіткої моделі управління для задачі контролю якості помелу наведена на рис. 1.



Рис. 1 – Структурна схема нечіткої моделі управління для задачі контролю якості помелу

Представлена структура працює наступним чином: для отримання інформації щодо відповідності метрологічних характеристик системи помелу встановленим значенням блок формування тестових впливів формує адитивний, мультиплікативний або комбінований тести для системи; інформація про реакцію системи на тестовий вплив надходить до контролеру метрологічної ситуації; БАМС формує формалізований опис метрологічної ситуації, яка виникла на об'єкті (система помелу зерна кави) для вимірювальної підсистеми інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) і блоку прийняття рішень управління-координації на підставі результатів контролю ВП. Алгоритм роботи системи нечіткої логіки складається з послідовного виконання трьох операцій: фазифікації, обчислення правил і дефазифікації, або приведення до чіткості.

Для формування систематики нечітких понять використовуються лінгвістичні зміни як особлива форма організації експертної інформації. Етап фазифікації статистичних даних метрологічного експерименту полягає у визначенні ступені істинності, тобто значення функцій приналежності для кожного правила (передумов). Іншими словами – відбувається перехід від чітких значень у формі чисел до лінгвістичних терм, що характеризують діапазон зміни вхідних числових даних. Статистична

інформація про похибки ВП відображується у нечіткі множини відповідно до предметної шкали сформованої групою або одним експертом-метрологом.

Формалізований опис нечіткої поточної ситуації поступає у блок прийняття рішень. Отримана інформація ідентифікується з однією з типових ситуацій шляхом пошуку останньої на основі співставлення ситуацій. Цей етап відноситься до обчислення правил, тобто формування нечіткого висновку. Саме блок прийняття рішень формує вихідний дефазифікований сигнал у зручному для експерта-метролога вигляді. Операція дефазифікації полягає у зворотному переході від лінгвістичних терм з якими складались правила до чітких висновків у числовій формі.

Розглянемо варіант побудови ССНЛ для другого рівня ІВС, де формується технологічний і метрологічний «образ» об'єкта контролю з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, що впливають на однорідність помелу зерна кави. Для побудови ситуаційної системи з нечіткою логікою слід визначити, які параметри об'єкта контролю будуть вхідними, а який параметр буде вихідним. У якості вхідних параметрів, що змінюють свої значення у певному діапазоні фізичних величин обираємо: вологість зерна (% RH), відстань між жорновими (мм), швидкість обертання жорнову (об/хв), час помелу (сек). Вихідна величина це – відсоток однорідності помелу з партії.

Однорідність помелу кавового зерна впливає на час екстракції смакових речовин. При дрібному помелі процес екстракції відбувається швидше, напій набуває зайвої гіркоти, крім того, через дуже дрібний помел вода у кавомашині проходить повільніше або взагалі не проходить. При крупному помелі – екстракція смакових речовин із кави не відбувається у належній мірі. Рекомендується обирати помел в межах середніх значень, які дозволяють каві розкрити свої найкращі смакові якості. Отже ступінь помелу зерна кави і його однорідність визначаються рядом факторів і суттєво впливають на смакові якості. Розмір фракцій повинен бути рівномірним, для того, щоб смак кави вийшов відмінним. Перш ніж експортувати каву, всі кавові зерна висушують до рівня вологості в них 10 – 12 %. Тільки в цьому випадку зерно вважається якісним, бо нічого не зіпсується і не постаріє.

Розглянемо основні аналітичні співвідношення нечіткого логічного висновку за алгоритмом Mamdani. Цей алгоритм на зараз одержав найбільше практичне застосування у задачах нечіткого моделювання. Алгоритмом Mamdani відрізняє від інших алгоритмів те, що його правила логічного висновку у правій частині містять нечіткі значення (функції належності). При використанні максимуму як оператора агрегації й мінімуму як оператора імплікації процедура одержання нечіткого значення виходу є композицією *max-min* [8,9].

Нечіткий логічний висновок за цим алгоритмом виконується за нечіткою базою знань:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{ijp} \text{ з вагою } \omega_{jp} \right) \rightarrow y = T_j, j = \overline{1, m},$$

де значення вхідних і вихідних змінних задані нечіткими множинами.

Треба ввести наступні позначення: $\mu_{jp}(x_i)$ – функція належності входу x_i нечіткому терму a_{ijp} , тобто

$$a_{ijp} = \int_{x_{-i}}^{x_i} \frac{\mu_{jp}(x_i)}{x_i}, x_i \in |x_{-i}, \bar{x}_i|;$$

$\mu_{T_j}(y)$ – функція належності виходу нечіткому терму T_j , а саме

$$T_j = \int_{y_-}^{\bar{y}} \frac{\mu_{T_j}(y)}{y}, y \in |y_-, \bar{y}|.$$

Ступені належності вхідного вектору $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, нечітким термам T_j з бази знань можуть бути розраховані:

$$\mu_{T_j}(X^*) = \bigvee_{p=1, k_j} \omega_{jp} \bigwedge_{i=1, n} \left[\mu_{jp}(x_i^*) \right] j = \overline{1, m},$$

де $\vee(\wedge)$ – операція з s -норми (t -норми), тобто з множини реалізацій логічних операцій АБО (І). Найбільш часто використовуються наступні реалізації: для операції АБО – знаходження максимуму і для операції І – знаходження мінімуму [8,9]. В результаті можна отримати наступну нечітку множину \tilde{y} , відповідну вхідному вектору X^* :

$$\tilde{y} = \frac{\mu_{T_1}(X^*)}{T_1} + \frac{\mu_{T_2}(X^*)}{T_2} + \dots + \frac{\mu_{T_m}(X^*)}{T_m}.$$

Особливістю цієї нечіткої множини є те, що для неї є універсальною терм-множина вихідної змінної у [8,9]. Щоб перейти від нечіткої множини, заданої на універсальній множині нечітких термів $\{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ до нечіткої множини на інтервалі $|y_-, \bar{y}|$ необхідно:

«зрізати» функції належності $\mu_{T_j}(y)$ на рівні $\mu_{T_j}(X^*)$; далі, агрегувати отримані нечіткі множини:

$$\tilde{y} = \text{agg}_{j=\overline{1, m}} \left(\int_{y_-}^y \frac{\min(\mu_{T_j}(X^*), \mu_{T_j}(y))}{y} \right).$$

Чітке значення виходу y , яке відповідне вхідному вектору X^* визначається у результаті дефазифікації нечіткої множини \tilde{y} [8,9].

Формування бази правил системи нечіткого висновку здійснюється у вигляді упорядкованого узгодженого списку нечітких правил у вигляді «IF A THEN B», де антецеденти ядр правил нечіткої продукції побудовані за допомогою логічних зв'язків «I», а консеквенти ядр правил нечіткої логіки не складні. Фазифікація вхідних змінних здійснюється описаним вище способом, так само, як і у загальному випадку при побудові системи нечіткого висновку. Агрегування правил нечіткої логіки здійснюється за допомогою класичної нечіткої логічної операції «I» двох елементарних висловлювань A, B:

$$T(A \cap B) = \min\{T(A); T(B)\},$$

а активізація правил нечіткої логіки здійснюється методом *min*-активізації $\mu(y) = \min\{c; \mu(x)\}$, де $\mu(x)$ і c – відповідно функції належності термів лінгвістичних змінних і ступеня істинності нечітких висловлювань, що утворюють відповідні консеквенти ядр нечітких продукційних правил. Акумуляція правил нечіткої логіки проводиться за допомогою класичного для нечіткої логіки *max* – об'єднання функцій належності $\forall x \in X \mu ABx = \max\{\mu Ax; \mu Bx\}$ [8,9].

Дефазифікація проводиться методом центру ваги або центру площі:

$$y = \frac{y_- \int_{y_-}^{\bar{y}} y \cdot \mu_{\bar{y}}(y) dy}{\int_{y_-}^{\bar{y}} \mu_{\bar{y}}(y) dy}.$$

Найбільш часто вживається метод дефазифікації, що має назву – центр ваги. Але, застосовуючи цей метод необхідно пам'ятати, що діапазон чітких значень вихідних змінних буде завжди вужче інтервалу, на якому вона визначена. Цього недоліку позбавлений другий за частотою використання метод дефазифікації – центр максимумів. При використанні методу центру

максимумів слід враховувати те, що результат дефазифікації не чутливий до вкладу правил, ступені виконання яких малі, і залежить лише від правил, ступені виконання яких максимальні [8,9].

Для побудови ситуаційної системи з нечіткою логікою використаємо інтерфейс користувача системи fuzzy-logic програми MatLab. Зафіксуємо значення відстані між жорновами на рівні 0,5 мм. Тоді у моделі залишимо три входи і один вихід. У якості першого входу будемо використовувати показник – оберти валу двигуна, на якому закріплена рухома частина жорнову. Другий вхід – час, у продовж якого здійснюється помел. Третій вхід – вологість кавового зерна. Вихідним параметром буде – відсоток однорідності помелу зерна (рис. 2).

Задаємо функції належності для обраної вхідної змінної – оберти валу двигуна. У пункті Range встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 500 до 1200 об/хв). Задаємо тип функції належності для трьох функцій належності, а саме мінімальної (*min*), середньої (*norm*) та максимальної (*max*). Обираємо розподіл за нормальним законом для усіх трьох функцій (рис. 3).

Задаємо функції належності для другої вхідної величини – час, у продовж якого здійснюється помел. Встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 15 до 18 секунд) (рис. 4).

Задаємо функції належності для третьої вхідної величини – вологість кавового зерна. Встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 9 до 14 % RH.) (рис. 5).

Задаємо функції належності для обраної вихідної змінної – відсоток однорідності помелу зерна. Встановимо діапазон у якому змінюється функція (від 70 до 100 %). Задаємо тип функції належності для трьох функцій належності, а саме погано – (*bad*), задовільно – (*average*) та відмінно – (*good*). Обираємо розподіл (*trimf*) трикутний закон розподілу (рис. 6).

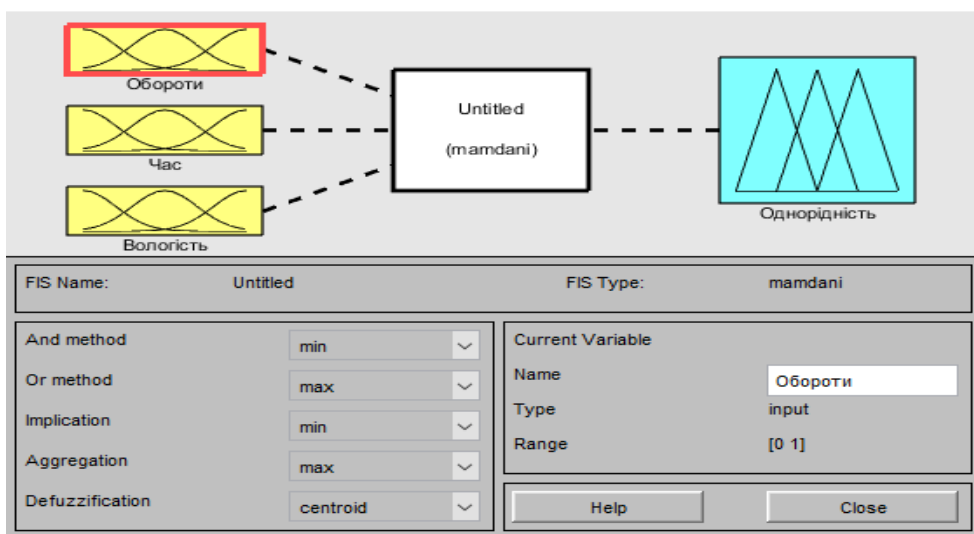


Рис. 2 – Вікно завдання вхідних та вихідних параметрів

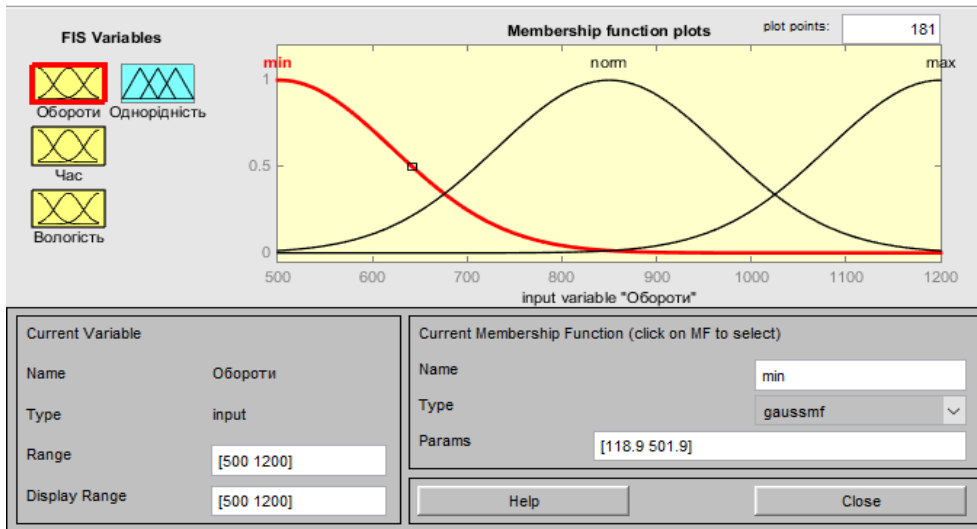


Рис. 3 – Вікно завдання обертів валу двигуна

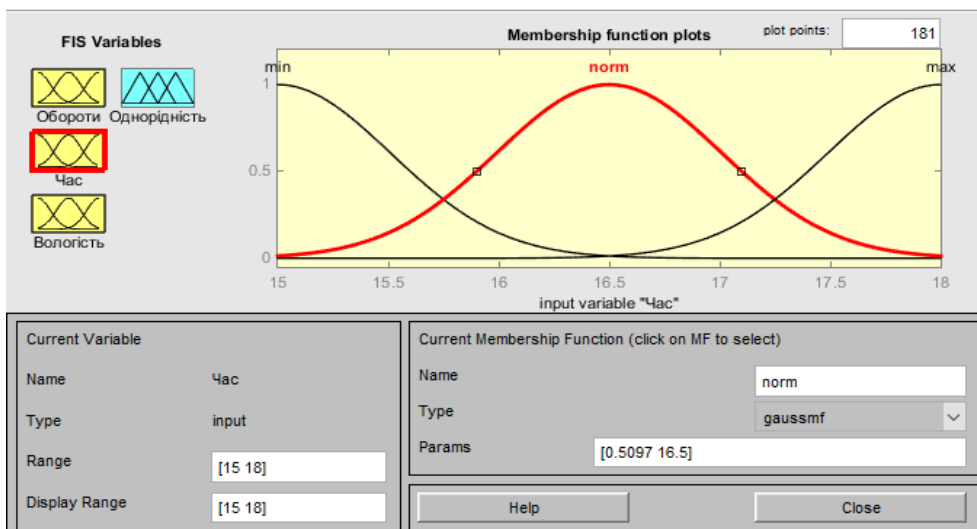


Рис. 4 – Вікно завдання часу, у продовж якого здійснюється помел

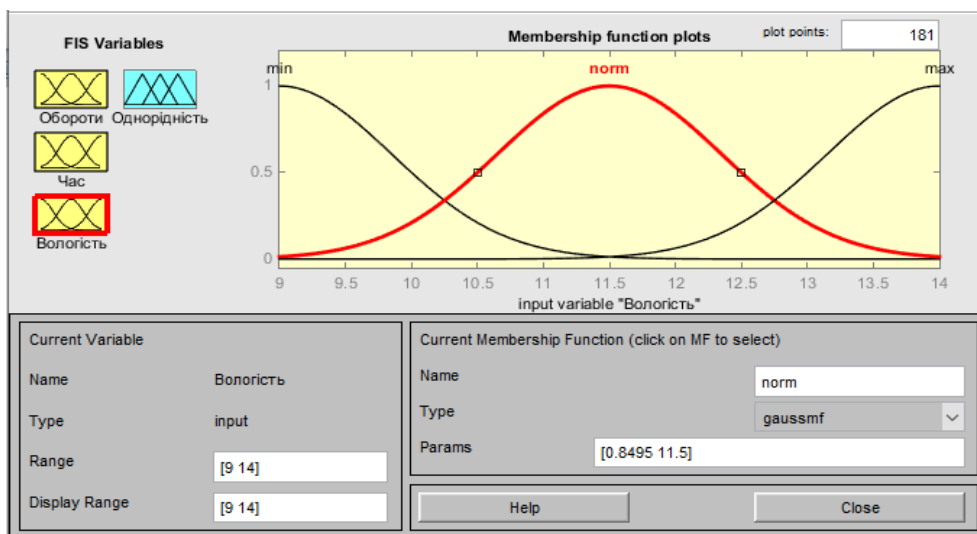


Рис. 5 – Вікно завдання зміни вологості кавового зерна

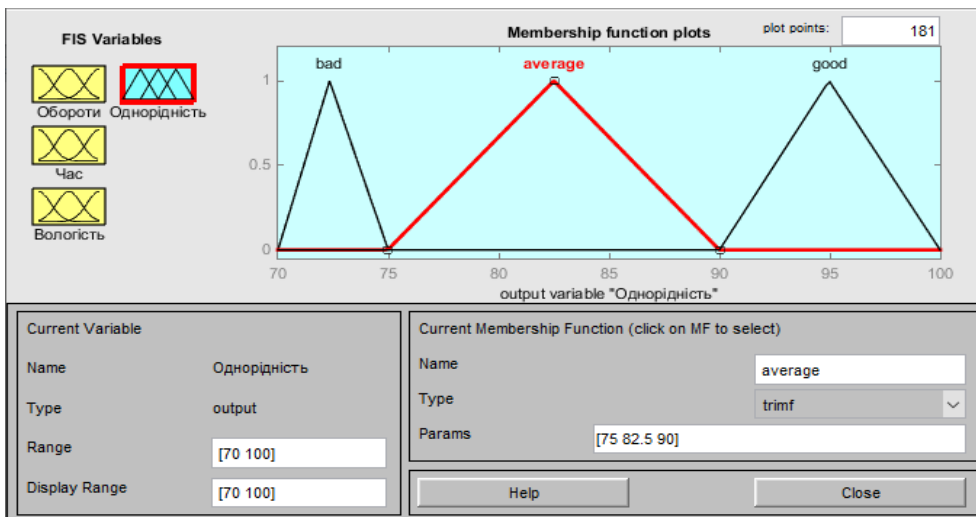


Рис. 6 – Вікно завдання вихідного параметру – відсоток однорідності помелу зерна

Оскільки система має три входи, тому максимум вихідних станів $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ різних вихідних комбінацій. Графічне зображення дії правил представлено на рис. 7, рис. 8, рис. 9, рис. 10.

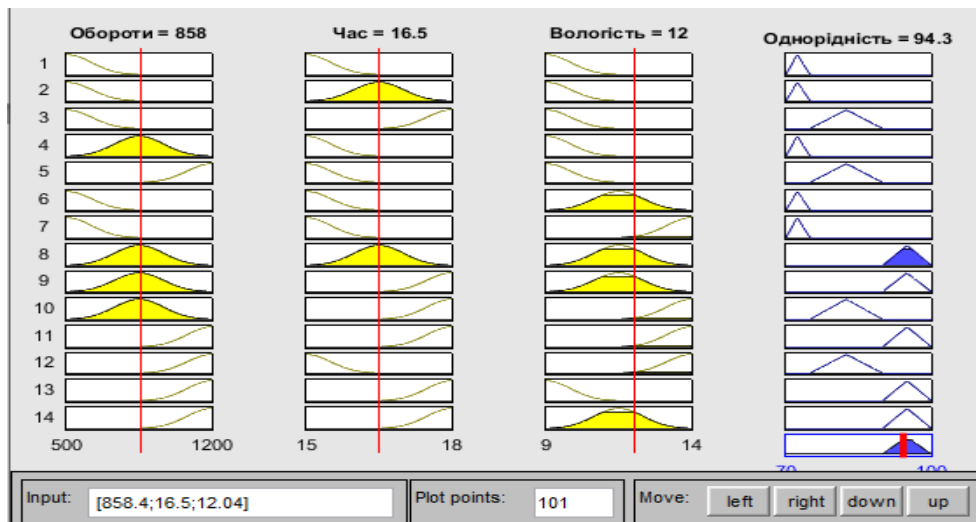


Рис. 7 – Графічне зображення дії правил, що демонструє отримання максимальної однорідності помелу

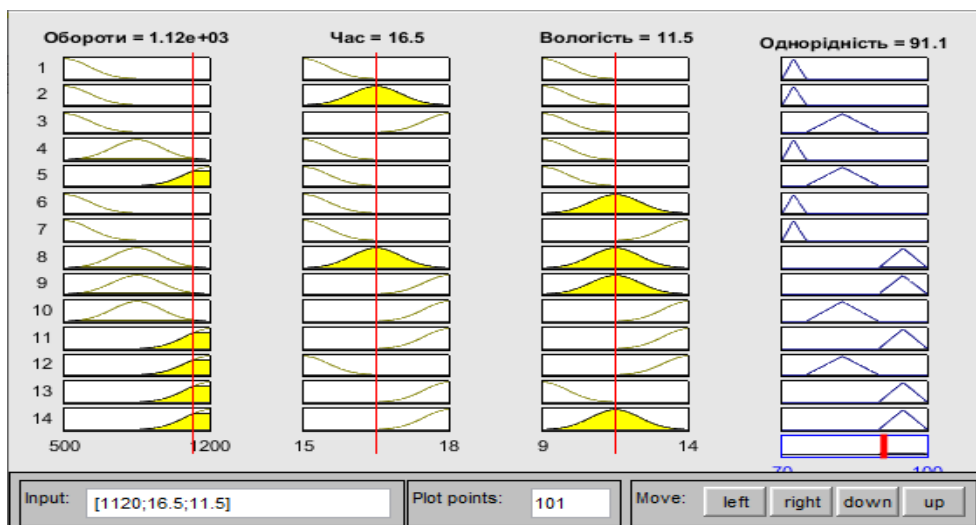


Рис. 8 – Графічне зображення дії правил, що демонструє, як змінюється однорідність помелу при збільшенні обертів валу двигуна

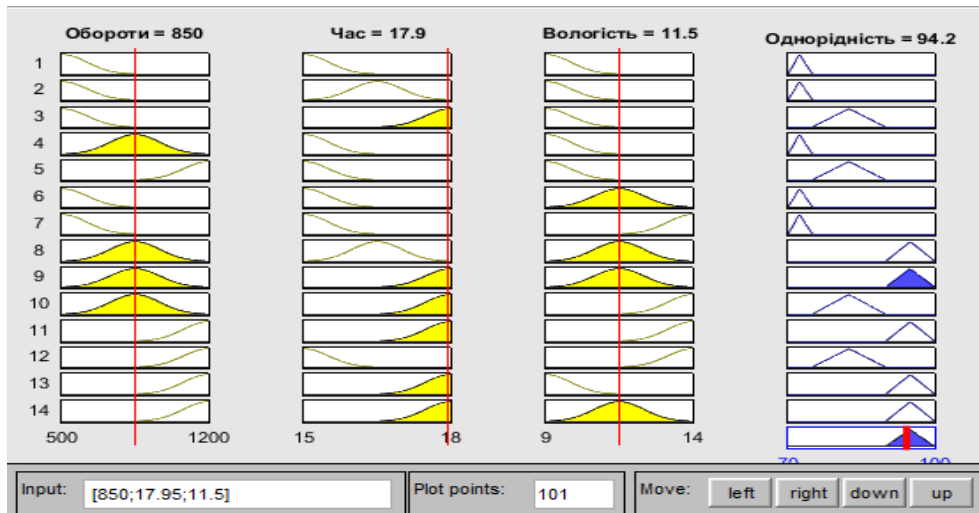


Рис. 9 – Графічне зображення дії правил, що демонструє, як змінюється однорідність помелу при збільшенні часу помелу

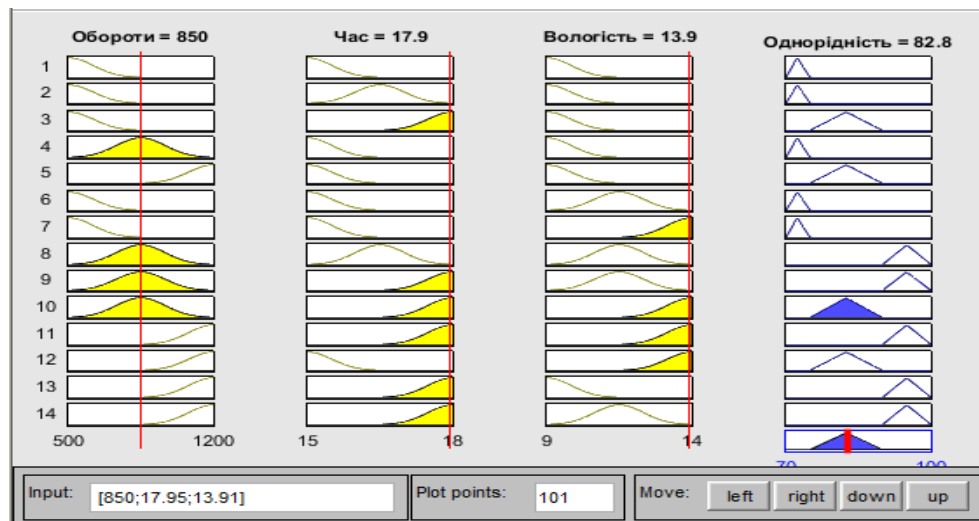


Рис. 10 – Графічне зображення дії правил, що демонструє, як змінюється однорідність помелу при збільшенні вологості зерна кави

Поверхні відгуку при трьох можливих однорідність помелу представлено на рис. 11, рис. 12, сполученнях параметрів, що впливають на рис. 13.

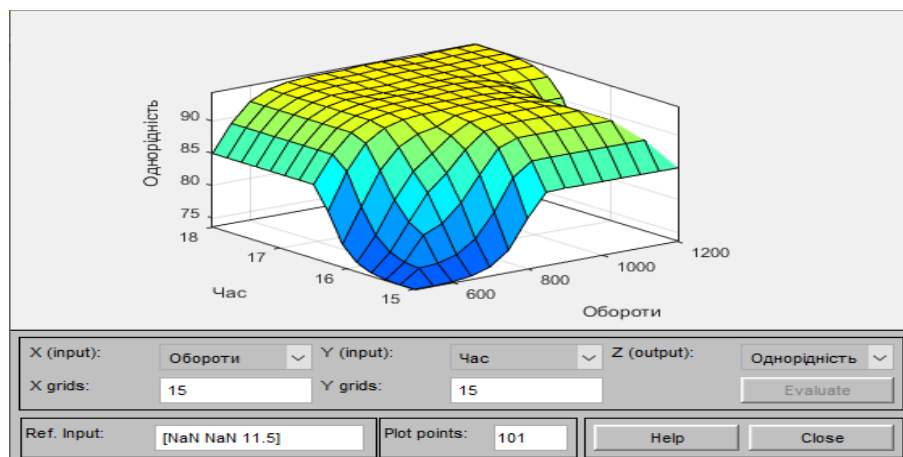


Рис. 11 – Поверхня відгуку значень часу помелу та обертів двигуна, що впливають на однорідність помелу

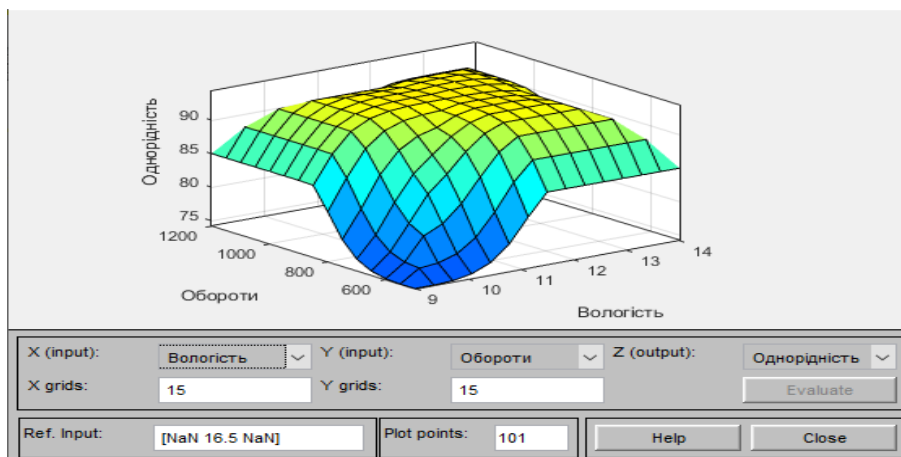


Рис. 12 – Поверхня відгуку значень вологості зерна кави та обертів валу двигуна, що впливають на однорідність помелу

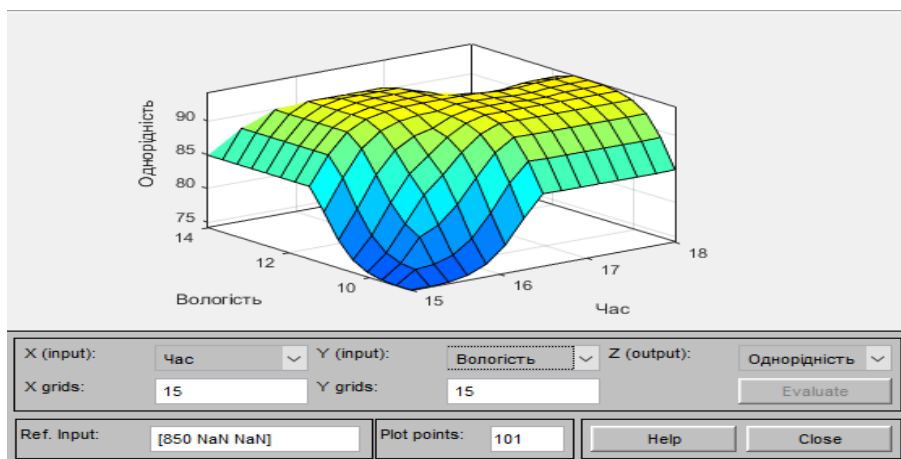


Рис. 13 – Поверхня відгуку значень вологості зерна кави і часу помелу, що впливають на однорідність помелу

Результати

На підставі проведеного комп’ютерного моделювання з використанням інтерфейсу користувача системи fuzzy-logic, отримані наступні результати:

1) встановлено, що максимальну однорідність помелу кави (94,3 %) можна отримати при тривалості помелу не менш 16,5 секунд, при обертах валу двигуна 858 об/хв, і вологості зерна кави не більше ніж 12 % (рис. 7).

2) доведено, що збільшення обертів валу двигуна до 1200 об/хв (рис. 8) не призводить до різкого підвищення однорідності помелу, а лише збільшує енергозатрати на процес помелу, що підтверджує результати, отримані у [7].

3) встановлено, що підвищення часу помелу до 18 секунд не призводить до зростання однорідності помелу (рис. 9).

4) Із результату, що демонструє рис. 10 стає очевидним, що збільшення вологості зерна кави до рівня 14 % призводить до погіршення якості помелу.

У результаті досліджень, що представлені у роботі [7] встановлено оптимальне значення частоти

обертання жорен кавомолки на рівні 850 об/хв, яке забезпечує максимальну якість мелених кавового зерна 82,85 % від загальної маси, у той час, як при стандартній швидкості жорен 500 об/хв однорідність помелу складала 77,7 %. Ці результати цілком збігаються з результатами, що отримані авторами завдяки використанню ССНЛ: 858 об/хв дає 94,3 % однорідності помелу від загальної маси зерна кави. Однак при цьому необхідно щоб час помелу був не менший за 16,5 секунд (у роботі [7] приблизно 18 секунд) і вологість зерна не більше ніж 12 % RH. Практично, отримані результати дають змогу сформулювати для підприємств, що займаються помелом зерна кави і виробників жорнових кавомольних машин такі значення швидкості обертання жорен, часу помелу, вологості сировини, які забезпечать максимальну однорідність помелу при встановленій відстані між жорновими.

Висновки

Розглянуто задачу розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для підвищення

ефективності та якості управління системами помелу зерна кави. Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

– вперше запропоновано використання ситуаційної системи з нечіткою логікою для визначення найкращого співвідношення між кількістю обертів валу двигуна, часом помелу, вологістю зерна кави для отримання найвищої однорідності помелу;

– отримала подальшого розвитку ситуаційна система з нечіткою логікою для вирішення нового кола задач контролю якості кінцевої продукції;

– вперше запропоновано структурну схему нечіткої моделі управління для задачі контролю якості помелу з урахування можливості проведення тестового контролю на першому рівні ІВС.

Практична цінність полягає у визначенні таких режимів роботи системи помелу зерна кави, що дозволяє отримати максимальну однорідність помелу. За допомогою графічного інтерфейсу користувача вдалося побудувати ССНЛ, яка надала можливість встановити для другого рівня ІВС, де формується технологічний і метрологічний «образ» об'єкта контролю з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, необхідні технологічні режими, що позитивно вплинуть на однорідність помелу.

Перспективи подальших досліджень полягають у створенні ССНЛ для першого рівня ІВС, яка надасть можливість визначити параметри, що забезпечать мінімальне значення динамічної похибки системи помелу при відпрацюванні дії адитивних і мультиплікативних тестових впливів.

Список літератури

1. Напої нерозчинні на основі кави, цикорію та злакових. Загальні технічні умови: ДСТУ 4118-2002. [Чинний від 01.01.2002].
2. Кондрашов С. І. *Методи підвищення точності систем тестових випробувань електричних вимірювальних перетворювачів у робочих режимах*: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2004. 224 с.
3. Григоренко І. В., Кондрашов С. І., Григоренко С. М. *Вступ в теорію систем*. Харків: Факт, 2021. 202 с.
4. Місяць В. П., Рубанка М. М., Демішонкова С. А. Система адаптивного керування приводом автоматичних кавових машин. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2021. №1. 293. С. 151–159. doi: 10.31891/2307-5732-2021-293-1-151-159.
5. Автоматизація процесів помелу. URL: <https://budtehnika.pp.ua/707-avtomatizatsiya-procesv-pomelu.html> (дата звернення: 01.08.2022).
6. Виробництво та виробничий процес. URL: <https://dcb.com.ua/uk/production> (дата звернення: 29.08.2022).
7. Чагін А. Д., Кулік Т. І., Гладчук О. З. Дослідження роботи двигуна жорнової кавомолки автоматичної кавомашини. *Технології та дизайн: Мехатроніка, комп'ютерна інженерія та метрологія*. 2019. № 2. 31. С. 1–10.
8. Кондрашов С. І. Підвищення точності вимірювальних перетворювачів з формуванням у реальних умовах

тестових впливів: дис. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: 05.11.05. Харків, 2004. 412 с.

9. Hrihorenko I., Tverytnykova E., Hrihorenko S., Drozdova T. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services. *Advanced information system, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. 2019. Vol. 3, № 4. P. 118-125. doi: 10.20998/2522-9052.2019.4.18.
10. Sankar Ganesh S., Bhargav Reddy N., Arulmozhivarman P. Forecasting air quality index based on Mamdani fuzzy inference system. *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*. 2017. Tirunelveli, India. doi: 10.1109/ICOEI.2017.8300944.
11. Mochammad Iswan Perangin-Angin, Andre Hasudungan Lubis, Imelda Sri Dumayanti, Raheliya Br. Ginting, Andysah Putera Utama Siahaan. Implementation of Fuzzy Tsukamoto Algorithm in Determining Work Feasibility. *Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*. 2017. Vol. 19, Issue 4. Ver. IV. P. 52-55. doi: 10.9790/0661-1904045255.
12. Michio Sugeno, Tomohiro Takagi. Multidimensional fuzzy reasoning. *Fuzzy Sets and Systems*. 1983. Vol. 9(1). P. 313-325. doi: 10.1016/S0165-0114(83)80030-X.
13. Kozhukhivskiy A. D., Kozhukhivska O. A. Developing a Fuzzy Risk Assessment Model for ERP – Systems (Tekst). *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2022. No. 1. P. 106–119. doi: 10.15588/1607-3274-2022-1-12.
14. Larsen H. L., Yager R. R. A framework for fuzzy recognition technology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2000. Vol. 30, Issue 1. P. 65–76. doi: 10.1109/5326.827455.
15. Wu H., Mendel J. M. On Choosing Models for Linguistic Connector Words for Mamdani Fuzzy Logic Systems. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*. 2004. Vol. 12. P. 29-44. doi: 10.1109/TFUZZ.2003.822675.

References (transliterated)

1. Napoyi nerozchynni na osnovi kavy, tsykoriyu ta zlakovykh. Zahalni tekhnichni umovy: DSTU 4118-2002. [Chynnyy vid 01.01.2002].
2. Kondrashov S. I. *Metody pidvyshchennya tochnosti system testovykh vyprobuvan elektrychnykh vymiryvalnykh peretvoryuvachiv u robochykh rezhymakh*: monohrafiya. Kharkiv. NTU «KHPi», 2004. 224 p.
3. Hryhorenko I. V., Kondrashov S. I., Hryhorenko S. M. *Vstup v teoriyu system*. Kharkiv. Fakt, 2021. 202 p.
4. Misyats V. P., Rubanka M. M., Demishonkova S. A. Systema adaptivnoho keruvannya pryvodom avtomatychnykh kavovykh mashyn. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, 2021, 1, 293, pp. 151–159, doi: 10.31891/2307-5732-2021-293-1-151-159.
5. Avtomatyzatsiya protsesiv pomelu. Available at: <https://budtehnika.pp.ua/707-avtomatizatsiya-procesv-pomelu.html> (accessed 01.08.2022).
6. Vyrobnystvo ta vyrobnychy protses. Available at: <https://dcb.com.ua/uk/production> (accessed 29.08.2022).
7. Chahin A. D., Kulik T. I., Hladchuk O. Z. Doslidzhennya roboty dvyhuna zhornovoyi kavomolky avtomatychnoyi kavomashyny. *Tekhnolohiyi ta dyzayn: Mekhatronika, kompyuterna inzheneriya ta metrolohiya*, 2019, 2 (31), pp. 1–10.
8. Kondrashov S. I. Pidvyshchennya tochnosti vymiryvalnykh peretvoryuvachiv z formuvannyam u realnykh umovakh testovykh vplyviv: dys. na zdobuttya naukovoho stupenya

- dok-tora tekhnichnykh nauk: 05.11.05. Kharkiv, 2004. 412 p.
9. Hrihorenko I., Tverytnykova E., Hrihorenko S., Drozdova T. Application of user interface Fuzzy Logic Toolbox for quality control of products and services. *Advanced information system, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*, 2019, Vol. 3, 4, pp. 118-125, doi: 10.20998/2522-9052.2019.4.18.
 10. Sankar Ganesh S., Bhargav Reddy N., Arulmozhivarman P. Forecasting air quality index based on Mamdani fuzzy inference system. *2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)*, 2017, Tirunelveli, India, doi: 10.1109/ICOEI.2017.8300944.
 11. Mochammad Iswan Perangin-Angin, Andre Hasudungan Lubis, Imelda Sri Dumayanti, Raheliya Br. Ginting, Andysah Putera Utama Siahaan. Implementation of Fuzzy Tsukamoto Algorithm in Determining Work Feasibility. *Journal of Computer Engineering (IOSR-JCE)*, 2017, vol. 19, Issue 4, Ver. IV, pp. 52-55, doi: 10.9790/0661-1904045255.
 12. Michio Sugeno, Tomohiro Takagi. Multidimensional fuzzy reasoning. *Fuzzy Sets and Systems*, 1983, vol. 9(1), pp. 313-325, doi: 10.1016/S0165-0114(83)80030-X.
 13. Kozhukhivskiy A. D., Kozhukhivska O. A. Developing a Fuzzy Risk Assessment Model for ERP – Systems (Tekst). *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022, No. 1, pp. 106–119, doi: 10.15588/1607-3274-2022-1-12.
 14. Larsen H. L., Yager R. R. A framework for fuzzy recognition technology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 2000, vol. 30, Issue 1, pp. 65–76, doi: 10.1109/5326.827455.
 15. Wu H., Mendel J. M. On Choosing Models for Linguistic Connector Words for Mamdani Fuzzy Logic Systems. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, 2004, vol. 12, pp. 29-44, doi: 10.1109/TFUZZ.2003.822675.

Відомості про авторів (About authors)

Сергій Іванович Кондрашов – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0002-5191-8562. e-mail: Serhii.Kondrashov@khp.edu.ua

Serhii Kondrashov – Doctor of Sciences, Professor, Department of Information and Measuring Technologies and Systems National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» Kharkiv, Ukraine. ORCID: 0000-0002-5191-8562. e-mail: Serhii.Kondrashov@khp.edu.ua

Ігор Володимирович Григоренко – кандидат технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. ORCID: 0000-0002-4905-3053. e-mail: grigmaestro@gmail.com

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

Олександр Сергійович Опришкін – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна. e-mail: Aleksandr.Opryshkin@cit.khp.edu.ua

Aleksandr Opryshkin – Postgraduate student, Department of Information and Measuring Technologies and Systems National, Kharkiv, Ukraine. e-mail: Aleksandr.Opryshkin@cit.khp.edu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кондрашов С. І., Григоренко І. В., Опришкін О. С. Розроблення ситуаційної системи з нечіткою логікою для другого рівня інформаційно-вимірювальної системи. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2022. № 4 (14). С. 24-34. doi:10.20998/2413-4295.2022.04.04.

Please cite this article as:

Kondrashov S., Hryhorenko I., Opryshkin O. Development of a situation system with fuzzy logic for the second level of the information and measurement system. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022, no. 4 (14), pp. 24–34, doi:10.20998/2413-4295.2022.04.04.

Надійшла (received) 03.12.2022