

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-30>

УДК 004.94:655

КУДРЯШОВА Альона

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-0496-1381>

e-mail: [alona.v.kudriashova@lpnu.ua](mailto:alona.v.kudriashova@lpnu.ua)

ПІХ Ірина

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-9909-8444>

e-mail: [iryna.v.pikh@lpnu.ua](mailto:iryna.v.pikh@lpnu.ua)

ЛИТОВЧЕНКО Олег

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-5637-6934>

e-mail: [oleh.v.lytovchenko@lpnu.ua](mailto:oleh.v.lytovchenko@lpnu.ua)

ПЕТРИК Володимир

Національний університет «Львівська політехніка»

e-mail: [petrikvolodja0@gmail.com](mailto:petrikvolodja0@gmail.com)

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОГНОСТИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПІСЛЯДРУКАРСЬКИХ ПРОЦЕСІВ

Наведено методологію прогностичного оцінювання якості виконання післядрукарських процесів на основі методів та засобів нечіткої логіки. Розроблено нечітку систему формування якості досліджуваного технологічного процесу, яка складається з двох основних компонентів: фазифікації та дефазифікації. Фазифікація перетворює чіткі величини на нечіткі змінні. Етапами фазифікації є формування часткових показників якості, виокремлення універсальної множини значень та відповідних терм-множин, розроблення моделі нечіткого логічного виведення, опрацювання функцій належності лінгвістичних змінних, формування баз знань, матриць знань та нечітких логічних рівнянь. Дефазифікація перетворює нечіткі результати на рішення, придатні для застосування в реальних умовах. Дефазифікація передбачає формування таблиць значень функцій належності, обчислення нечітких логічних рівнянь, отримання конкретного значення інтегрального показника якості післядрукарського опрацювання книжкових видань.

Сформовано алгоритм імітаційної моделі прогностичного оцінювання якості післядрукарських процесів на основі нечіткої системи. Розроблено програмний продукт *Post Press Forecast*, який визначає прогнозований інтегральний показник якості на основі вказаних користувачем значень універсальних множин лінгвістичних змінних. Зворотнє виконання завдання полягає у виборі очікуваного значення інтегрального показника та заданні меж допустимих відхилень. У результаті відображається таблиця можливих комбінацій параметрів факторів. Таким чином, можливо обирати оптимальні параметри, що забезпечують досягнення очікуваного результату, значно знижуючи кількість примірників неналежної якості та скорочуючи терміни виходу книжкових видань. Це підвищує рентабельність виробництва, а також якість і конкурентоспроможність готової продукції.

Ключові слова: нечітка логіка, нечітка система, імітаційна модель, післядрукарські процеси, прогностичне оцінювання якості.

KUDRIASHOVA Alona, PIKH Iryna, LYTOVCHENKO Oleh, PETRYK Volodymyr

Lviv Polytechnic National University

## SIMULATION MODEL FOR PREDICTIVE EVALUATION OF POST-PRINTING PROCESS QUALITY

The methodology for predictive evaluation of the quality of post-press processes has been developed using fuzzy logic methods and tools. A fuzzy system for assessing the quality of the investigated technological process has been created, consisting of two main components: fuzzification and defuzzification. Fuzzification converts crisp values into fuzzy variables. The stages of fuzzification include generating partial quality indicators, defining a universal set of values and corresponding term sets, developing a fuzzy inference model, processing membership functions of linguistic variables, creating knowledge bases, knowledge matrices, and fuzzy logic equations. Defuzzification converts fuzzy results into solutions applicable in real-world conditions. This process involves creating tables of membership function values, calculating fuzzy logic equations, and obtaining a specific integral quality indicator for post-press processing of book publications.

An algorithm for a simulation model for predictive evaluation of post-press process quality has been developed based on the fuzzy system. The software product *Post Press Forecast* was created to determine the predicted integral quality indicator based on user-defined values of universal sets of linguistic variables. The reverse operation involves selecting the desired integral indicator value and setting acceptable deviation limits, resulting in a table of possible parameter combinations for factors. This enables the selection of optimal parameters to achieve the expected result, significantly reducing the number of substandard copies and shortening the time-to-market for book publications. As a result, production profitability, quality, and competitiveness of the final product are enhanced.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy system, simulation model, post-press processes, predictive quality evaluation.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Складність і варіативність післядрукарських процесів у виробництві книжкових видань створюють суттєві труднощі для забезпечення стабільної якості. Традиційні математичні методи часто не здатні врахувати невизначеності, притаманні цим процесам, де діють численні фактори та суб'єктивні оцінки. Нечітка логіка, яка дозволяє працювати з неповними та варіативними даними, є перспективним інструментом для моделювання й оцінювання якості в межах таких складних систем.

Прогностичне оцінювання якості післядрукарських процесів є важливим не лише для підвищення ефективності виробничих процесів, а й для підвищення конкурентоспроможності кінцевої продукції. Інтеграція методу, заснованого на нечіткій логіці, дозволяє вирішити ключові наукові та практичні завдання, пов'язані з адаптацією процесів під час високої невизначеності та оптимізацією виробничих параметрів для досягнення заданого рівня якості.

## АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Значний внесок у розвиток нечіткої логіки як ефективного інструмента для розв'язання завдань з невизначеністю внесли роботи Л. Заде [1], який запропонував теорію нечітких множин, та його послідовників, які розвинули цей метод у напрямі прикладних досліджень [2, 3]. На основі нечіткої логіки було створено численні методи прогнозування та прийняття рішень, що застосовуються у складних виробничих процесах, включаючи поліграфію [4, 5].

Сучасні дослідження зосереджені на удосконаленні методів фазифікації та дефазифікації даних, які дозволяють перевести точні величини у нечіткий формат та навпаки. У роботах провідних науковців представлено алгоритми для обробки лінгвістичних змінних, які є ключовими при моделюванні складних технологічних процесів [6, 7]. Зокрема, методи лінгвістичного оцінювання та нечітких множин активно використовуються для аналізу якості книжкових видань, що підтверджується публікаціями [8, 9] у профільних журналах.

Практичне значення розробок у галузі моделювання якості післядрукарських процесів засвідчують результати, представлені у наукових публікаціях з проблем управління якістю продукції [10, 11]. Дослідники наголошують на важливості впровадження нечітких моделей для оцінювання процесів обробки книжкових блоків, брошурування, покривних і палітурних операцій, що забезпечує підвищення точності й стабільності якості кінцевого продукту.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Прогностичне оцінювання якості післядрукарських процесів здійснено на основі теорії нечітких множин. Нечітка логіка є ефективним інструментом для моделювання складних систем, які важко описати традиційними математичними методами. Основна ідея нечіткої логіки полягає у використанні нечітких множин, які дозволяють оперувати неточними або невизначеними даними. На відміну від класичної двозначної логіки, де елементи можуть належати лише до однієї з двох множин («так» або «ні»), нечітка логіка вводить поняття ступеня належності, яке варіюється в межах [0, 1].

Фазифікація, один із ключових процесів нечіткої логіки, перетворює чіткі величини на нечіткі змінні. Лінгвістичні змінні використовуються для моделювання понять, які важко точно кількісно визначити. Наприклад, лінгвістичні терми типу «простий», «складний» або «дуже складний» можуть бути описані через функції належності, що визначають їх ступінь істинності. Це дозволяє опрацьовувати нечіткі дані в тих випадках, коли традиційні методи не є ефективними. Ще однією важливою особливістю нечіткої логіки є можливість виконувати логічні операції над нечіткими множинами через правила «якщо – тоді» (IF – THEN), що застосовуються в багатьох експертних системах. Це дозволяє моделювати післядрукарські процеси за умов невизначеності та суб'єктивної оцінки.

Дефазифікація, фінальний етап обробки даних в нечіткій логіці, перетворює нечіткі результати на конкретні числові значення. Це особливо корисно для керування складними процесами, такими як післядрукарське опрацювання книжкових видань [1–3].

Нехай універсальна множина  $D$  охоплює всю область досліджуваної проблеми. Таким чином, нечітку підмножину  $Y$  множини  $D$  визначено за допомогою шкали  $D$  та функції належності  $\mu_Y(d)$ ,  $0 \leq \mu_Y(d) \leq 1$ :

$$Y = \{(\mu_Y(d), d), d \in D\}. \quad (1)$$

При цьому, тобто функція належності визначає міру належності елементів нечіткої множини універсальній множині значень. При дискретності та скінченності базової шкали нечітка множина матиме вид:

Таким чином, функція належності встановлює рівень належності елементів нечіткої множини до універсальної множини значень, тобто  $Y \in D$ . Якщо базова шкала є дискретною та скінченною, нечітка підмножина набуває такого вигляду:

$$Y = (\mu_Y(d_1)/d_1, \mu_Y(d_2)/d_2, \dots, \mu_Y(d_n)/d_n) = \sum_{i=1}^n \mu_Y(d_i)/d_i. \quad (2)$$

Функції належності  $\mu(d)$  корелюють з множиною значень змінної  $d$ , слугуючи ідентифікаторами вихідних значень лінгвістичних змінних у нечіткому форматі.

Припустимо, що виконання післядрукарських процесів описане як функція  $H$ , де аргументами цієї функції виступають визначені фактори  $h_{1_m}, h_{2_m}, \dots, h_{n_m}$ . Тоді можна записати наступне:

$$H = F(h_{1_m}, h_{2_m}, \dots, h_{n_m}), \quad (3)$$

де  $n_m$  — кількість факторів впливу на якість післядрукарських процесів.

Аналізований процес представляє собою процедуру, що включає безліч початкових змінних  $h_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) та одну кінцеву змінну  $H$ .

Залежність якості виконання післядрукарських процесів доцільно представити через якість часткових показників  $H = F_H(B, P)$ , де:  $B$  — якість підготовчих та брошурувальних процесів,  $P$  — якість палітурних процесів. Тоді  $B = F_B(b_1, b_2, b_3, b_4)$ , де:  $b_1$  — виготовлення зошитів;  $b_2$  — скріплення;  $b_3$  — комплектування;  $b_4$  — покривний матеріал і  $P = F_P(p_1, p_2, p_3, p_4)$ ,  $p_1$  — оброблення книжкових блоків;  $p_2$  — оздоблення;  $p_3$  — кінцеве опрацювання;  $p_4$  — проект [12].

База нечітких знань може бути представлена у формі матриці знань, яка встановлює зв'язок між факторами впливу на якість післядрукарських процесів і результатом виконання процесу. Наступним кроком є розробка системи нечітких логічних рівнянь на основі матриці знань, яка дозволяє визначити кількісні значення функцій належності та інтегрального показника прогнозу якості досліджуваного процесу [4]. Для двох значень функцій належності  $\mu_1$  та  $\mu_2$  комбінація отриманих результатів матиме наступний вигляд:

$$\mu_1 \vee \mu_2 = \max(\mu_1, \mu_2) = \begin{cases} \mu_1, \text{ якщо } \mu_1 \geq \mu_2, \\ \mu_2, \text{ якщо } \mu_1 < \mu_2. \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_1 \wedge \mu_2 = \min(\mu_1, \mu_2) = \begin{cases} \mu_1, \text{ якщо } \mu_1 \leq \mu_2, \\ \mu_2, \text{ якщо } \mu_1 > \mu_2. \end{cases} \quad (5)$$

Враховуючи вище наведені твердження, представимо основні етапи побудови нечіткої системи прогностичного оцінювання якості післядрукарських процесів (рис. 1).

На основі розробленої нечіткої системи сформовано алгоритм імітаційної моделі для визначення інтегрального показника якості післядрукарських процесів (рис. 2). Для оцінювання інтегрального показника якості проектування післядрукарських процесів виконується ряд процедур. Здійснюється введення лінгвістичних змінних, універсальної множини значень та відповідних термів. Далі вводяться матриці знань для лінгвістичної змінної найвищого рівня та часткових показників якості. Формуються масиви і матриці функцій належності терм-множин у п'яти токах поділу. Визначається інтегральний показник якості післядрукарських процесів і проводиться аналіз отриманих результатів. За необхідності можуть бути обрані інші значення універсальної множини для покращення прогнозованої якості.

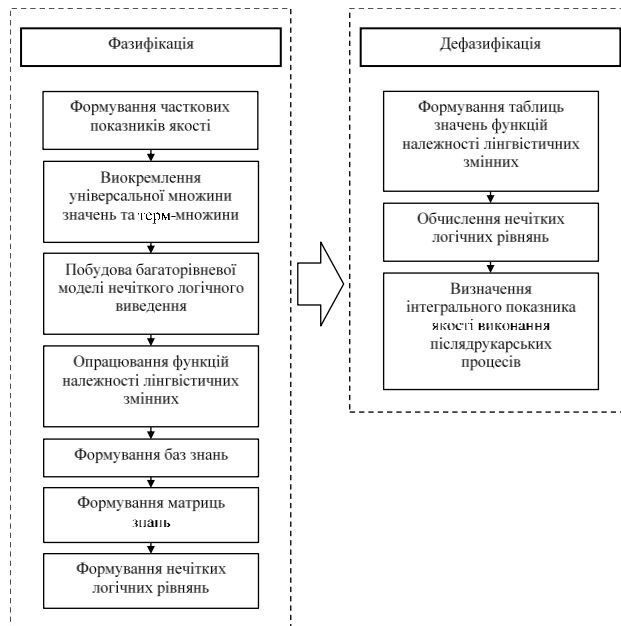


Рис. 1. Нечітка система формування та прогностичного оцінювання якості виконання післядрукарських процесів

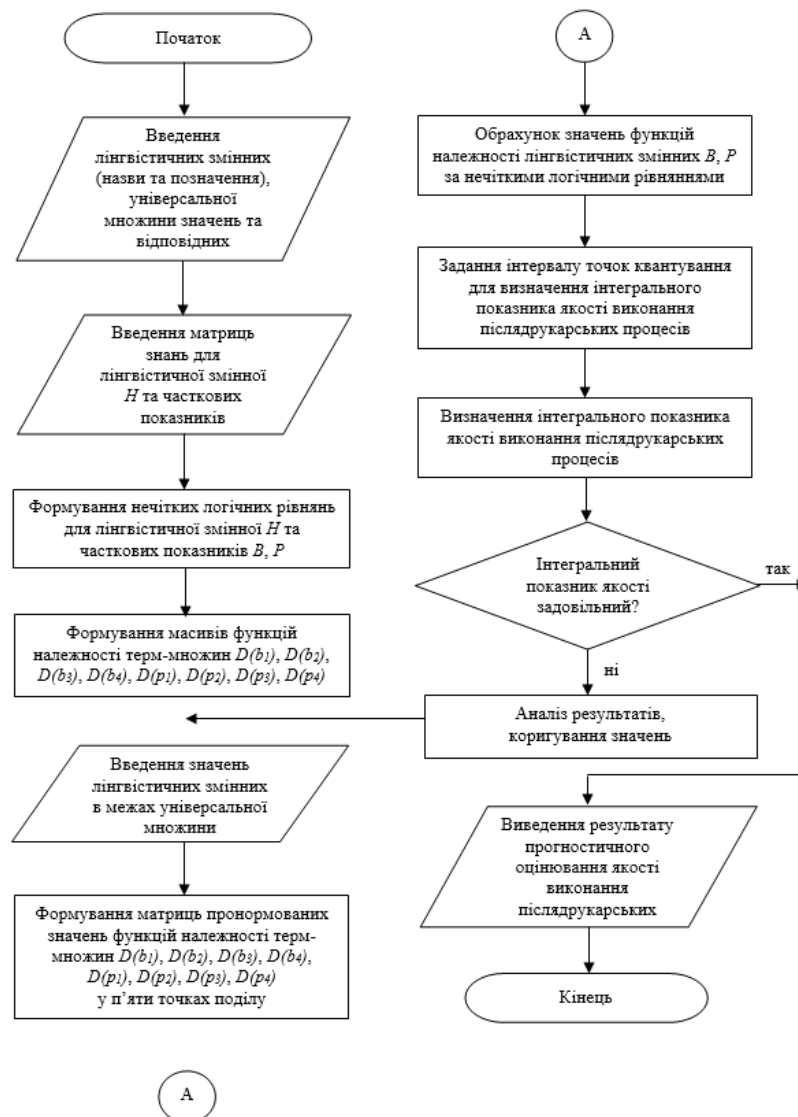


Рис. 2. Блок-схема алгоритму визначення інтегрального показника якості виконання післядрукарських процесів

Відповідно до поданого алгоритму розроблена програма, яка дозволяє визначити інтегральний показник якості післядрукарського опрацювання книжкових видань (рис. 3). Можливе також зворотне вирішення завдання, що полягає у встановленні запланованого показника якості та допустимого відхилення для визначення оптимальних значень вхідних параметрів.

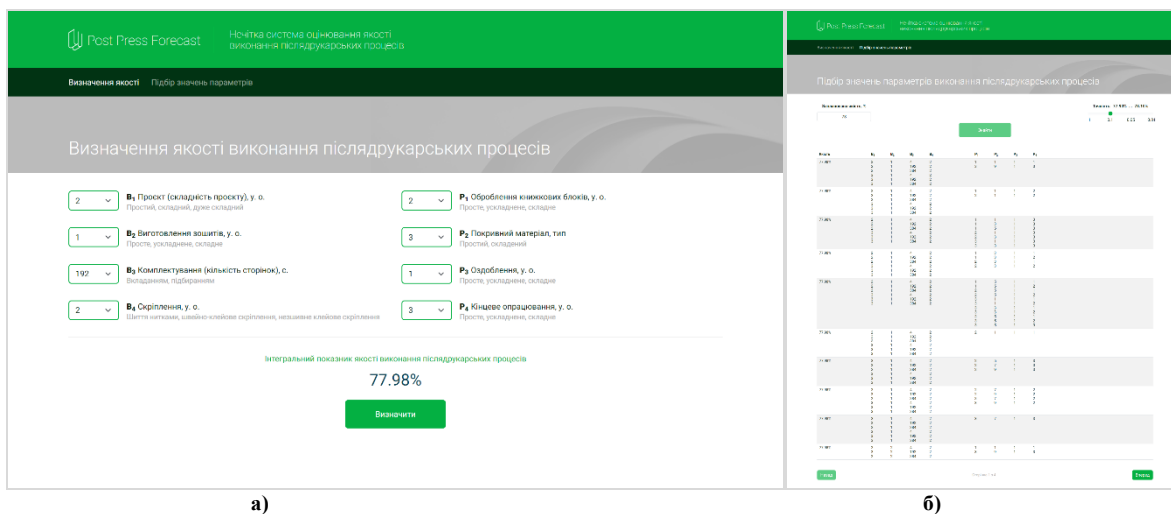


Рис. 3. Інтерфейс програми Post Press Forecast:  
а) – визначення інтегрального показника якості виконання післядрукарських процесів;  
б) – підбір значень параметрів

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У проведеному дослідженні розроблено алгоритм імітаційної моделі визначення інтегрального показника якості післядрукарського опрацювання книжкових видань на основі компонентів сформованої нечіткої системи, таких як фазифікація та дефазифікація. Розроблено програмний застосунок для визначення інтегрального показника якості досліджуваного технологічного процесу. Оцінювання здійснюється на основі значень універсальної множини, встановлених користувачем для кожної лінгвістичної змінної. Програма також надає можливість обирати оптимальні значення лінгвістичних змінних у межах універсальної множини відповідно до заданого рівня очікуваної якості виконання післядрукарських процесів.

Перспективи подальшого розвитку полягають у доповненні розробленої інформаційної системи модулями прогностичного оцінювання якості додрукарського опрацювання книжкової продукції та друкування накладу.

#### Література

1. Zadeh L. A. Fuzzy logic. Granular, Fuzzy, and Soft Computing. New York, NY: Springer US, 2023. p. 19–49.
2. Kosko B. Uniform Convergence of Probability Mixtures that Represent Combined Fuzzy Systems. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. IEEE, 2022. Pp. 1–8.
3. Dubois D., Prade H. Possibility theory. *Granular, Fuzzy, and Soft Computing*. New York, NY: Springer US, 2023. Pp. 859–876.
4. Durnyak B., Hileta I., Pikh I., Kudriashova A., Petiak Y. Designing a Fuzzy Controller for Prediction of Tactile Product Quality. *1st International Workshop on Digital Content & Smart Multimedia, DCSMart 2019, Lviv, Ukraine, December 23–25, 2019*. Pp. 70–81.
5. Senkivskyy V., Babichev S., Pikh I., Kudriashova A., Senkivska N., Kalynii I. Forecasting the Reader's Demand Level Based on Factors of Interest in the Book. *CIT-Risk'2021: 2nd International Workshop on Computational & Information Technologies for Risk-Informed Systems*, September 16–17, 2021, Kherson, Ukraine. Pp. 176–191.
6. Bernabe B., Michel D. D. E., Marie C. A., Fabrice M. T. S. Comparing Machine Learning Algorithms for Improving the Maintenance of LTE Networks Based on Alarms Analysis. *Journal of Computer and Communications*, 2022, 10.12. Pp. 125–137.
7. Khakifirooz M., Fathi M., Dolgui A., Pardalos P. M. Scheduling in Industrial environment toward future: insights from Jean-Marie Proth. *International Journal of Production Research*, 2024, 62 (1–2). Pp. 291–317.

8. Сеньківський В. М., Піх І. В., Сеньківська Н. Є., Калиній І. В. Інформаційна концепція формування та оцінювання якості книжкових видань. *Поліграфія і видавнича справа*. Львів, 2020. № 1 (79). С. 20–29.
9. Кудряшова А. В. Опрацювання функцій належності лінгвістичних змінних проектування післядрукарських процесів (частина 1. Створення матриць попарних порівнянь). *Наукові записки [Українська академія друкарства]*. 2020. № 1 (60). С. 26–32.
10. Senkivskiy V., Kudriashova A., Pikh I., Hileta I., Lytovchenko O. Models of Postpress Processes Designing. *1st International Workshop on Digital Content & Smart Multimedia*, DCSSmart 2019, Lviv, Ukraine, December 23–25, 2019. Pp. 259–270.
11. Кудряшова А. В. Модель пріоритетного впливу факторів на якість післядрукарських процесів. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2023. № 1. С. 187–192.
12. Маїк В. З. Технологія брошурувально-палітурних процесів : підр. / За заг. ред. д-ра. техн. наук, проф. Лазаренка Е. Т. Львів: УАД, 2011. 488 с.

### References

1. Zadeh L. A. Fuzzy logic. *Granular, Fuzzy, and Soft Computing*. New York, NY: Springer US, 2023. p. 19–49.
2. Kosko B. Uniform Convergence of Probability Mixtures that Represent Combined Fuzzy Systems. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. IEEE, 2022. Pp. 1–8.
3. Dubois D., Prade H. Possibility theory. *Granular, Fuzzy, and Soft Computing*. New York, NY: Springer US, 2023. Pp. 859–876.
4. Durnyak B., Hileta I., Pikh I., Kudriashova A., Petiak Y. Designing a Fuzzy Controller for Prediction of Tactile Product Quality. *1st International Workshop on Digital Content & Smart Multimedia*, DCSSmart 2019, Lviv, Ukraine, December 23–25, 2019. Pp. 70–81.
5. Senkivskyy V., Babichev S., Pikh I., Kudriashova A., Senkivska N., Kalynii I. Forecasting the Reader's Demand Level Based on Factors of Interest in the Book. *CIT-Risk'2021: 2nd International Workshop on Computational & Information Technologies for Risk-Informed Systems*, September 16–17, 2021, Kherson, Ukraine. Pp. 176–191.
6. Bernabe B., Michel D. D. E., Marie C. A., Fabrice M. T. S. Comparing Machine Learning Algorithms for Improving the Maintenance of LTE Networks Based on Alarms Analysis. *Journal of Computer and Communications*, 2022, 10.12. Pp. 125–137.
7. Khakifirooz M., Fathi M., Dolgui A., Pardalos P. M. Scheduling in Industrial environment toward future: insights from Jean-Marie Proth. *International Journal of Production Research*, 2024, 62 (1–2). Pp. 291–317.
8. Senkivskiy V. M., Pikh I. V., Senkivska N. Ye., Kalynii I. V. Information Concept for the Formation and Evaluation of Book Edition Quality. *Printing and Publishing*. Lviv, 2020. № 1 (79). Pp. 20–29.
9. Kudriashova A. V. Processing of Membership Functions of Linguistic Variables in Post-Printing Process Design (Part 1. Creation of Pairwise Comparison Matrices). *Scientific Notes [Ukrainian Academy of Printing]*. 2020. № 1 (60). Pp. 26–32.
10. Senkivskiy V., Kudriashova A., Pikh I., Hileta I., Lytovchenko O. Models of Postpress Processes Designing. *1st International Workshop on Digital Content & Smart Multimedia*, DCSSmart 2019, Lviv, Ukraine, December 23–25, 2019. Pp. 259–270.
11. Kudriashova A. V. Model of Priority Influence of Factors on the Quality of Post-Printing Processes. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2023. № 1. С. 187–192.
12. Maik V. Z. Technology of Binding and Bookbinding Processes: Textbook, ed. by Dr. Tech. Sc., Prof. Lazarenko E. T. Lviv: Ukrainian Academy of Printing, 2011. 488 p.