

**В. А. ПОНОМАРЬОВ****ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ГІДРАВЛІЧНИХ КЛАПАНІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ**

Розглянуто цифрові гідравлічні клапани, які є інноваційною альтернативою традиційним пропорційним аналоговим клапанам. Цифрова гідравліка використовує комбінацію простих, надійних і недорогих клапанів типу ON/OFF, що забезпечують високу точність управління потоком і тиском за допомогою програмованих логічних контролерів. Основна перевага таких систем полягає в зниженні енергоспоживання, оскільки вони усувають необхідність у постійній роботі насоса та не мають внутрішніх перетікань. Показано економічні переваги цифрових клапанів, включаючи зменшення початкових інвестицій завдяки їх нижчій вартості порівняно з пропорційними аналогами. Важливо, що у випадку виходу з ладу одного клапана, система залишається працездатною, оскільки відмова окремих елементів не має критичного впливу на загальну продуктивність. Особлива увага приділяється схемам кодування та методам керування, зокрема бінарному кодуванню та модуляції числа імпульсів. Бінарне кодування дозволяє значно підвищити точність регулювання при мінімальній кількості клапанів, а також забезпечує відмовостійкість системи. Використання паралельно з'єднаних клапанів, що мають широкий діапазон станів, дозволяє досягти точного керування потоками і тиском без необхідності перемикання після встановлення бажаних положень. Крім того, цифрові гідравлічні системи забезпечують високу швидкість регулювання та точність керування, що робить їх ефективними для різних промислових застосувань. Подальші дослідження в цій галузі можуть призвести до впровадження нових технологічних рішень і розширення їх застосування у промисловості. Висвітлюються також технічні аспекти таких систем, зокрема широтно-імпульсна модуляція, яка є найбільш поширеним підходом до управління двоходовими клапанами. Широтно-імпульсна модуляція дозволяє досягти високої точності регулювання завдяки частотній модуляції, хоча низька частота перемикання може призвести до пульсації тиску, яку необхідно компенсувати за допомогою спеціального проєктування системи або демпферних пристроїв. Отже, цифрові гідравлічні клапани представляють собою перспективне рішення для підвищення ефективності та надійності гідравлічних систем у сучасній промисловості, з можливістю суттєвого зниження енергоспоживання та вартості експлуатації.

**Ключові слова:** цифрові гідравлічні клапани, гідророзподільники, бінарне кодування, широтно-імпульсна модуляція, пульсація тиску, енергоспоживання, промислові застосування, модуляція числа імпульсів, відмовостійкість, пропорційні клапани.

**V. PONOMAROV****ABOUT THE USE OF DIGITAL HYDRAULIC VALVES IN INDUSTRY**

The article discusses digital hydraulic valves, which are an innovative alternative to traditional proportional analog valves. Digital hydraulics utilize a combination of simple, reliable, and inexpensive ON/OFF type valves, offering high precision in flow and pressure control through programmable logic controllers. The main advantage of such systems is the reduction in energy consumption, as they eliminate the need for constant pump operation and have no internal leakage. The article highlights the economic benefits of digital valves, including lower initial investments due to their lower cost compared to proportional counterparts. Importantly, if one valve fails, the system remains operational, as the failure of individual components does not critically affect overall performance. Special attention is given to coding schemes and control methods, particularly binary coding and pulse number modulation. Binary coding allows for significantly improved regulation accuracy with a minimal number of valves and ensures system fault tolerance. The use of parallel-connected valves, which offer a wide range of states, allows precise control of flows and pressures without the need for switching after the desired positions are set. Additionally, digital hydraulic systems provide fast response times and precise control, making them effective for various industrial applications. Further research in this area could lead to the development of new technological solutions and broader implementation in the industry. The article also covers the technical aspects of such systems, particularly pulse-width modulation, the most common approach to controlling two-way valves. PWM achieves high regulation accuracy through frequency modulation, although low switching frequencies may cause pressure pulsations, which must be compensated through specialized system design or damping devices. In conclusion, digital hydraulic valves represent a promising solution for increasing the efficiency and reliability of hydraulic systems in modern industries, with the potential for significant reductions in energy consumption and operational costs.

**Keywords:** digital hydraulic valves, binary coding, pulse-width modulation, pressure pulsation, energy consumption, industrial applications, pulse number modulation, fault tolerance, proportional valves.

**Вступ.** З кожним роком схеми автоматизації, що реалізуються, із застосуванням гідравліки, стають все складніше і складніше [1; 2]. Цифрова гідравліка замінює стандартні пропорційні клапани на паралельні групи простих, швидкодіючих, бінарних клапанів з можливістю вмикання та вимикання. Оскільки тарілчасті клапани не мають внутрішніх перетікань, немає потреби в постійній роботі насоса. Це значно зменшує споживання енергії. Замість використання великої гідравлічної станції можна використовувати невелику гідростанцію і акумулятор [3–5].

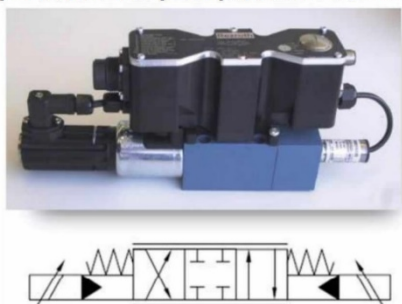
Цифрові клапани масового виробництва – міцні, малі та відносно дешевші порівняно з пропорційними клапанами (рис. 1), що сприяє меншим початковим інвестиціям. Якщо один цифровий клапан виходить з ладу, то це незначно впливає на продуктивність, у порівнянні з несправністю пропорційного клапана, яка істотно впливає на роботу гідросистеми.

**Основна частина** Завдяки цифровій гідравліці

комбінація простих, надійних і недорогих ON/OFF клапанів виконує ту саму мету, що й один пропорційний клапан. Програмований логічний контролер автоматично вмикає та вимикає клапани, щоб забезпечити високоточний потік і тиск [3; 6; 7].

На рис. 2, а представлено реалізацію двоходового клапана з комутаційним керуванням. Він керує середньою площею потоку за допомогою високочастотної модуляції, а широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) є найпоширенішим підходом. Теоретично, середня площа потоку може мати будь-яке значення, але кінцева динаміка клапана обмежує найменший і найбільший можливий коефіцієнт витрати. Регульованість залежить також від частоти перемикання. Низька частота покращує регулювання середньої площі потоку, але збільшує пульсацію тиску. Для зменшення пульсації зазвичай потрібне ретельне проєктування системи та/або демпферні пристрої [4].

Традиційний пропорційний клапан



Цифровий гідравлічний клапан

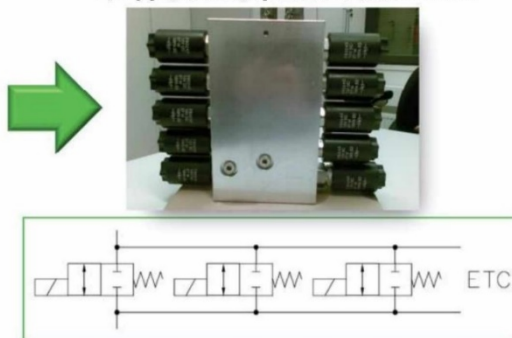


Рис. 1. Аналоговий пропорційний клапан і схема (ліворуч) у порівнянні з цифровим гідравлічним клапаном і схемою (праворуч)

На рис. 2, б показано паралельно з'єднаний двоходовий клапан. Отвори використовуються для регулювання пропускної здатності клапанів [8]. Для такого типу клапанів використовується назва DFCU (Digital Flow Control Unit – цифровий блок управління потоком) [8; 9], а спрощене креслення показано на рис. 2, в.

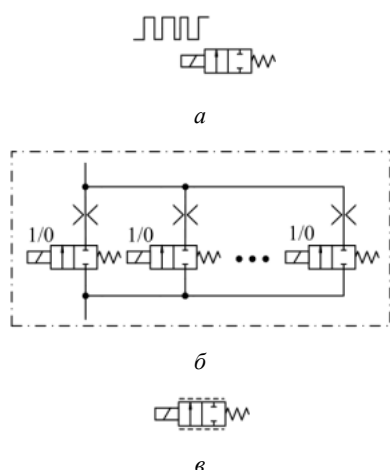


Рис. 2. Клапан вмикання/вимикання: а – керований ШІМ; б – цифровий блок керування потоком DFCU; в – спрощене позначення DFCU

Пропускна здатність DFCU – це сума пропускних здатностей відкритих клапанів. Два фактори визначають стаціонарні характеристики: кількість паралельно з'єднаних клапанів  $N$  та відносна пропускна здатність клапанів, або кодування клапанів. Бінарне кодування є найпоширенішим методом, і пропускна здатність знаходиться у співвідношенні 1:2:4:8 і т.д. Незалежно від кодування, DFCU має  $2^N$  комбінацій відкриття, які називаються станами DFCU. Кожен стан має різну площу потоку в двійковому кодуванні, тоді як в інших методах кодування існує різний ступінь надлишковості [10].

На рис. 3 показано, як реалізувати цифровий гідравлічний 4-х лінійний клапан. Підхід такий самий, як і в аналогових розподільників: кожним елементом контуру можна керувати незалежно, на відміну від традиційних чотирьохходових золотникових розподільників [11]. Однак за рахунок цифрової

гідравліки легше реалізувати швидкі, герметичні та двонаправлені клапани.

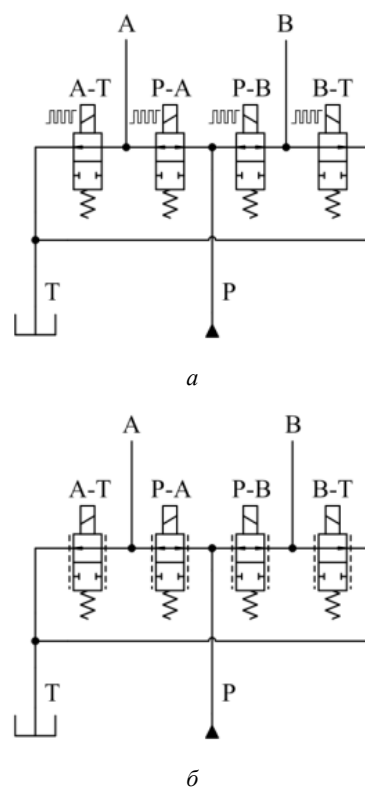


Рис. 3. Цифровий гідравлічний 4-х лінійний клапан: а – керований ШІМ; б – цифровий блок керування потоком DFCU

Фундаментальною характеристикою паралельно з'єднаних систем є те, що вихід квантується. Якщо система складається з  $N$  паралельно з'єднаних компонентів, кожен з яких має два положення, то загальна кількість комбінацій положень дорівнює  $2^N$ . Кожна з комбінацій положень може давати різну вихідну величину (наприклад, витрату) і, таким чином, максимальна кількість вихідних величин дорівнює кількості комбінацій положень. Фактична кількість вихідних значень залежить від методу кодування або відносного розміру компонентів. Найменша кількість вихідних значень досягається при використанні компонентів однакового розміру, і

кількість вихідних значень дорівнює  $N + 1$ . Цей метод відомий як модуляція числа імпульсів (PNM-кодування). Іншою крайністю є двійкове кодування, в якому кожна комбінація станів дає різні вихідні значення [10].

Важливою особливістю паралельно з'єднаних систем є те, що для підтримки будь-якого з дискретних вихідних значень не потрібне перемикання. Після вибору комбінації положень і досягнення регулюючими клапанами своїх позицій вихідна величина залишається постійною без будь-яких подальших дій. На рис. 4 показано відносну продуктивність в залежності від кількості клапанів для різної кількості клапанів, а також для двійкового та PNM-кодування. Роздільна здатність покращується експоненціально, коли використовується бінарне кодування, що теоретично дозволяє дуже точно керування з відносно невеликою кількістю клапанів.

Відмовостійкість є невід'ємною та унікальною властивістю паралельно з'єднаних систем. У більшості випадків система може працювати з незначним зниженням продуктивності, навіть якщо один з компонентів не працює. Це вимагає виявлення несправностей та їх програмної компенсації [12]. Відмовостійкість сильно залежить від методу кодування. Бінарне кодування є найбільш вразливим, в той час як система з кодуванням PNM з достатньою кількістю компонентів може працювати майже бездоганно, навіть якщо несправність не буде виявлена. На рис. 5 показано відмовостійкість 5-бітного бінарного коду DFCU та 31-бітного PNM коду DFCU до несправності коли клапан не відкривається. Ситуація клапан не закривається є більш складною, але також може бути компенсована до певної міри [13; 14].

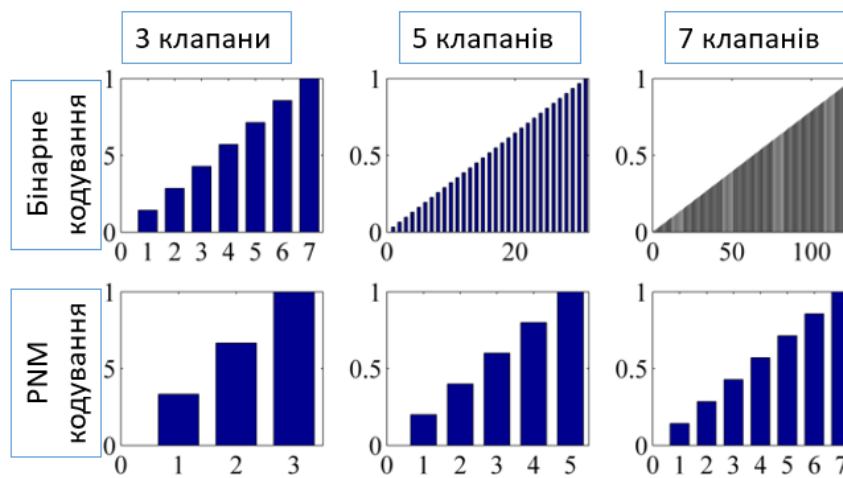


Рис. 4. Відносний вихід цифрового блоку керування потоком з бінарним кодуванням та PNM-кодуванням для 3, 5 і 7 клапанів [13]

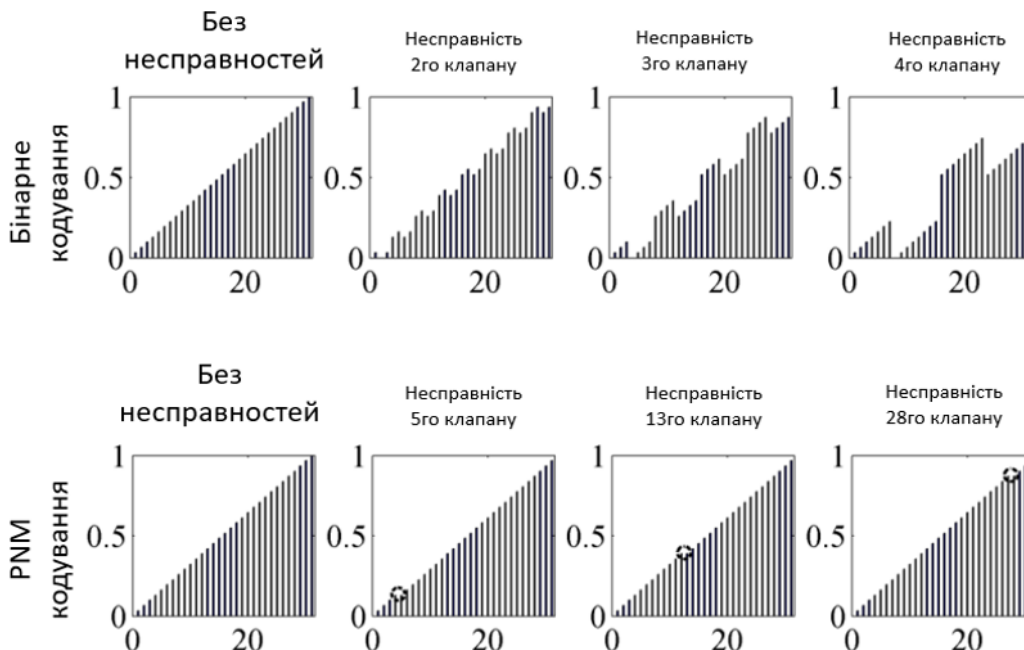


Рис. 5. Вплив деяких несправностей клапанів на 5-бітний бінарний код DFCU та 31-бітному PNM-кодованому DFCU [13]

**Висновки.** Основні переваги цифрової гідравліки порівняно зі звичайними аналоговими пропорційними клапанами полягають у зменшенні споживання енергії та надійності. Додаткові переваги включають вищу продуктивність, нижчу закупівельну ціну, знижену вартість запчастин, економію місця, термостійкість, швидкість і точність керування.

Цифрові гідроприводи мають значний потенціал у підвищенні ефективності та точності гідравлічних і пневматичних систем. Подальші дослідження і розробки в цій галузі обіцяють нові технологічні рішення і широке застосування в різних галузях промисловості.

#### Список літератури

1. Fatieieva N., Fatyeyev O., Ponomarov V. Advantages of using hydraulic equipment of modular mounting in the modernization of machine hydrosystems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 1. P. 33–41. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.05
2. Черпаков М. І. Аналітичний огляд шляху та методів синтезу схем гідропневмоагрегатів. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 78–81. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.13
3. Valmet. *Digital hydraulics.* URL: [https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/process-improvements-and-parts/wpp\\_digihydraulics.pdf](https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/process-improvements-and-parts/wpp_digihydraulics.pdf) (дата звернення: 10.09.2024).
4. Zhang Q., Kong X., Yu B., Ba K., Jin Z., Kang Y. Review and development trend of digital hydraulic technology. *Applied Sciences.* 2020. Vol. 10, no. 2. P. 579. doi: 10.3390/app10020579
5. Sciatti F., Tamburrano P., Distaso E., Amirante R.. Digital hydraulic valves: Advancements in research. *Heliyon.* 2024. Vol. 10, issue 5. P. 1-31. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27264
6. Schepers I, Weiler D, Weber J. Optimized Pulse Modulation: A Novel Idea of a Digital Control Method for On/Off Valves. *Proc. of the ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control. Vol. 2 (31 October–2 November 2011, Arlington, Virginia, USA).* ASME Publ., 2011. P. 363-366. doi: 10.1115/DSCC2011-6007
7. Schepers I., Schmitz D., Weiler D., Cochoy O., Neumann U. A novel model for optimized development and application of switching valves in closed loop control. *International Journal of Fluid Power.* 2011. Vol. 12, issue 3. P. 31–40. doi: 10.1080/14399776.2011.10781035
8. Linjama M. On the numerical solution of steady-state equations of digital hydraulic valve-actuator system. *The Eight Workshop on Digital Fluid Power (24-25 May 2016, Tampere, Finland).* 2016. P. 141–155.
9. Laamanen A., Siivonen L., Linjama M., Vilenius M. Digital flow control unit-an alternative for a proportional valve? *Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control (PTMC 2004).* 2004. P. 297–308.
10. Flugge-Lotz I., Taylor C., Synthesis of a nonlinear control system. *IRE Transactions Automatic Control.* 1956. Vol. 1, issue 1. P. 3–9. doi: 10.1109/TAC.1956.1100823
11. Tamburrano P., Sciatti F., Distaso E., Amirante R. Comprehensive numerical analysis of a four-way two-position (4/2) high-frequency switching digital hydraulic valve driven by a ring stack actuator. *Energies.* 2023. Vol. 16, issue 21. P. 7355. doi: 10.3390/en16217355
12. Fatyeyev O., Fatieieva N., Poliakov V., Shyian A., Radchenko O. Design Specifics of a Built-in Diagnostic System for Hydraulic Machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 2. P. 78–84. doi: 10.20998/2411-3441.2023.2.12
13. Linjama M. Digital fluid power-state of the art. *The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power (18–20 May 2011, Tampere, Finland).*

- Scandinavian International Conference on Fluid Power (18–20 May 2011, Tampere, Finland).*
14. Linjama M. Fundamentals of digital microhydraulic. *Proc. of the 8th International Fluid Power Conf. Vol. 1 (26–28 March 2012, Dresden).* Dresden: Technische Universität Dresden, Institute of Fluid Power, 2012. P. 385–396.

#### References (transliterated)

1. Fatieieva N., Fatyeyev O., Ponomarov V. Advantages of using hydraulic equipment of modular mounting in the modernization of machine hydrosystems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1, pp. 33–41. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.05
2. Cherpakov M. I. Analitichnyy ohlyad shlyakhu ta metodiv syntezy skhem hidropnevmoahrehativ [Analytical review of the way and methods of synthesis of hydropneumatic units schemes]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 78–81. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.13
3. Valmet. *Digital hydraulics.* Available at: [https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/process-improvements-and-parts/wpp\\_digihydraulics.pdf](https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/process-improvements-and-parts/wpp_digihydraulics.pdf) (accessed 10.09.2024).
4. Zhang Q., Kong X., Yu B., Ba K., Jin Z., Kang Y. Review and development trend of digital hydraulic technology. *Applied Sciences.* 2020, vol. 10, no. 2, p. 579. doi: 10.3390/app10020579
5. Sciatti F., Tamburrano P., Distaso E., Amirante R.. Digital hydraulic valves: Advancements in research. *Heliyon.* 2024, vol. 10, issue 5, pp. 1-31. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27264
6. Schepers I, Weiler D, Weber J. Optimized Pulse Modulation: A Novel Idea of a Digital Control Method for On/Off Valves. *Proc. of the ASME 2011 Dynamic Systems and Control Conference and Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control. Vol. 2 (31 October–2 November 2011, Arlington, Virginia, USA).* ASME Publ., 2011, pp. 363-366. doi: 10.1115/DSCC2011-6007
7. Schepers I., Schmitz D., Weiler D., Cochoy O., Neumann U. A novel model for optimized development and application of switching valves in closed loop control. *International Journal of Fluid Power.* 2011, vol. 12, issue 3, pp. 31–40. doi: 10.1080/14399776.2011.10781035
8. Linjama M. On the numerical solution of steady-state equations of digital hydraulic valve-actuator system. *The Eight Workshop on Digital Fluid Power (24-25 May 2016, Tampere, Finland).* 2016, pp. 141–155.
9. Laamanen A., Siivonen L., Linjama M., Vilenius M. Digital flow control unit-an alternative for a proportional valve? *Bath Workshop on Power Transmission and Motion Control (PTMC 2004).* 2004, pp. 297–308.
10. Flugge-Lotz I., Taylor C., Synthesis of a nonlinear control system. *IRE Transactions Automatic Control.* 1956, vol. 1, issue 1, pp. 3–9. doi: 10.1109/TAC.1956.1100823
11. Tamburrano P., Sciatti F., Distaso E., Amirante R. Comprehensive numerical analysis of a four-way two-position (4/2) high-frequency switching digital hydraulic valve driven by a ring stack actuator. *Energies.* 2023, vol. 16, issue 21, p. 7355. doi: 10.3390/en16217355
12. Fatyeyev O., Fatieieva N., Poliakov V., Shyian A., Radchenko O. Design Specifics of a Built-in Diagnostic System for Hydraulic Machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 2, pp. 78–84. doi: 10.20998/2411-3441.2023.2.12
13. Linjama M. Digital fluid power-state of the art. *The Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power (18–20 May 2011, Tampere, Finland).*
14. Linjama M. Fundamentals of digital microhydraulic. *Proc. of the 8th International Fluid Power Conf. Vol. 1 (26–28 March 2012, Dresden).* Dresden, Technische Universität Dresden, Institute of Fluid Power, 2012, pp. 385–396.

Надійшло (received) 15.10.2024

#### Відомості про автора / About the Author

**Пономарьов Владислав Анатолійович (Ponomarov Vladyslav)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8742-5615>; e-mail: [ponomaridze1@gmail.com](mailto:ponomaridze1@gmail.com)