

Грабко Володимир Віталійович, д.т.н., професор кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(097)602-48-20, vgrabko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4666-1758

*Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021*

Грабко Валентин Володимирович, к.т.н., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(067)262-04-02, gvv.1982@gmail.com

*Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021*

Козаченко Богдан Віталійович, аспірант кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, +38(063)779-65-39, b.kozachenko23@gmail.com

*Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021*

МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОБОЧОГО РЕСУРСУ ПРИСТРОЮ РЕГУЛЮВАННЯ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

Анотація. В роботі зроблено акцент на використання силових трансформаторів в пристроях регулювання під навантаженням (РПН) для регулювання напруги в електричних мережах. Підкреслено факт зношення контактної системи в процесі роботи пристрою РПН. По кожному відгалуженню механічний та комутаційний ресурси пристрою РПН витрачаються нерівномірно. І якщо механічний ресурс залежить лише від кількості перемикачів, то комутаційний ресурс визначається значеннями струмів, що протікають в момент перемикачів пристрою РПН. Незважаючи на наявну апаратну реалізацію засобу для оцінки роботоздатності пристрою РПН, в роботі запропоновано мікропроцесорну реалізацію такого засобу. Викладена структура, алгоритм роботи засобу з поясненнями. Зроблено висновок про доцільність поєднання запропонованого засобу з іншими системами моніторингу стану силового електрообладнання.

Ключові слова: силовий трансформатор, пристрій регулювання під навантаженням, механічний та комутаційний ресурси, мікропроцесорний засіб, алгоритм роботи.

Grabko Volodymyr, Dr Sc. (Eng.), Professor of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(097)602-48-20, vgrabko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4666-1758

*Vinnitsia National Technical University
95, Khmelnytske shose, Vinnitsia, 21021*

Grabko Valentyn, PhD, Docent of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(067)262-04-02, gvv.1982@gmail.com

*Vinnitsia National Technical University
95, Khmelnytske shose, Vinnitsia, 21021*

Kozachenko Bohdan, Postgraduate Student of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes, +38(063)779-65-39, b.kozachenko23@gmail.com

Vinnitsia National Technical University

MICROPROCESSOR DEVICE FOR ESTIMATING THE WORKING RESOURCE OF A REGULATION DEVICE UNDER LOAD

Abstract. The paper focuses on the use of power transformers with on-load tap-changer (OTP) devices for voltage regulation in electrical networks. The fact of wear of the contact system during the operation of the on-load tap-changer is emphasized. For each branch, the mechanical and switching resources of the on-load tap-changer are consumed unevenly. And if the mechanical resource depends only on the number of switching operations, then the switching resource is determined by the values of the currents flowing at the moment of switching of the tap-changer device. Despite the existing hardware implementation of the tool for assessing the operability of the tap-changer device, the paper proposes a microprocessor implementation of such a tool. The structure and algorithm of the tool are presented with explanations. A conclusion is made about the feasibility of combining the proposed tool with other systems for monitoring the condition of power electrical equipment.

Keywords: power transformer, on-load regulating device, mechanical and switching resources, microprocessor device, work algorithm.

Вступ. Відомо, що силові трансформатори з пристроями регулювання під навантаженням (РПН) в поєднанні з автоматичними регуляторами напруги широко застосовуються в розподільних електричних мережах для регулювання напруги споживачів електроенергії [1, 2]. Такі трансформатори з РПН у обмотці високої напруги мають відгалуження, що виконуються з інтервалом – 1,0-1,5 %, при загальній зоні регулювання напруги $\pm(10-20) \%$ [3]. Особливістю РПН є те, що перехід з одного відгалуження на інше відбувається без розриву процесу електропостачання, тобто в момент перемикання під'єднуються два відгалуження.

Постановка проблеми. Очевидним є той факт, що в процесі перемикання пристрою РПН його механічна частина та контакти зношуються, що може призвести до відмови у роботі останнього. Причому, робочий ресурс пристрою РПН зношується нерівномірно. Це обумовлено тим, що при перемиканні відгалужень пристрою РПН в діапазоні, який несуттєво виходить за межі зони допустимих значень напруги, до процесу перемикання залучаються контакти пристрою РПН, які комутують відгалуження обмоток силового трансформатора, що знаходяться ближче до середнього відгалуження обмотки, що відповідає номінальному коефіцієнту трансформації. Зауважимо також, що робочий ресурс пристрою РПН поділяється на механічний, який витрачається незалежно від процесів комутацій відгалужень трансформатора, та електричний, витрачання

якого здійснюється нерівномірно по кожному відгалуженню в залежності від значень комутованого струму в момент перемикання відгалужень. Вихід з ладу пристрою РПН, а, отже, і всього силового трансформатора може призвести до непередбачуваної аварійної ситуації [4].

Відомий ряд засобів, які дозволяють оцінювати роботоздатність пристрою РПН та силового трансформатора в цілому, однак вони застосовуються в міжремонтні періоди при виведенні трансформатора з експлуатації. Системи моніторингу технічного стану силового електрообладнання є дорого вартісними, що обмежує в певній мірі їх застосування.

В роботі [5] запропонована математична модель та варіант реалізації засобу для оцінювання залишкового комутаційного та механічного ресурсів пристрою РПН окремо. Процес витрачання залишкового робочого ресурсу по кожному L -му відгалуженню описується формулами виду:

по оцінюванню відпрацьованого комутаційного ресурсу

$$RK_L = RK_L + K_L \leq RK_{L\text{доп}};$$

по оцінюванню відпрацьованого механічного ресурсу

$$RM_L = RM_L + 1 \leq RM_{L\text{доп}},$$

де RK_L – значення відпрацьованого комутаційного ресурсу для L -го відгалуження; K_L – поточне значення відпрацьованого комутаційного ресурсу; RM_L – значення відпрацьованого механічного ресурсу для L -го відгалуження; $RK_{L\text{доп}}$ та $RM_{L\text{доп}}$ – допустимі значення відпрацьованого комутаційного та механічного ресурсів для L -го відгалуження.

В роботі [6] опублікована розширена структура пристрою для оцінювання залишкового робочого ресурсу пристрою РПН. Незважаючи на те, що ця реалізація засобу для оцінювання залишкового ресурсу пристрою РПН хоч і є повнофункціональною, але відповідно до вимог часу не є оптимальною, оскільки в ній застосовується порівняно велика кількість цифрових дискретних елементів, що в цілому знижує надійність роботи засобу на фоні підвищеного споживання

електроенергії та невисокої гнучкості у разі налаштування засобу на роботу з іншим типом пристрою РПН.

Стало доброю практикою те, що в теперішній час реалізація різноманітних технічних засобів контролю, керування або діагностування здійснюється на базі мікроконтролерів, які позбавлені обмежень, зазначених вище.

Метою роботи є розробка мікропроцесорного засобу для оцінювання комутаційного та механічного залишкових ресурсів пристрою РПН в процесі його експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Враховуючи порівняно невисоку складність задачі в оцінюванні залишкового робочого ресурсу пристрою РПН для розв'язання поставленої задачі можливо використати звичайний 8-розрядний мікроконтролер з достатньою кількістю портів, наприклад AT90S8535 або ATmega328 [7].

Очевидно, що застосування мікроконтролера повинно забезпечувати можливість оперативного контролю функціонування або коригування певних даних. Для цього потрібно застосувати, принаймні, декілька кнопок введення бінарних сигналів або клавіатуру, та індикатор для виведення символної або графічної інформації.

Крім того, очевидно, що такий вузол моніторингу стану пристрою РПН має передавати поточну або накопичену за певний період інформацію оперативному персоналу, тобто для цього логічним є застосування інтерфейсного блока перетворення сигналів мікроконтролера в сигнали для передачі по каналу зв'язку з сервером або комп'ютером оперативного персоналу.

І, зрозуміло, до мікроконтролера необхідно під'єднати сенсори сигналів, які відображають зміну технічного стану пристрою РПН. До таких сенсорів відносяться сенсор струму, який дозволяє враховувати значення комутованого струму при перемиканні пристрою РПН, а також сенсори, що відображають команди перемикання відгалужень силового трансформатора «Вверх» або «Вниз», які формуються регулятором напруги. Очевидно, що в даному випадку в мікроконтролер подаються бінарні сигнали, а, отже, можливо скористатись,

наприклад, дільником напруги (перетворювачем напруги до відповідного рівня) з оптичною розв'язкою сигналів для підвищення завадостійкості.

У якості сенсора струму можливо використати, наприклад, трансформатор струму [3].

До повідомлень, які необхідно виводити оперативному персоналу, слід віднести механічний та комутаційний залишкові ресурси по кожному відгалуженню, номер поточного відгалуження, максимальний відпрацьований механічний та комутаційний ресурси та номери їх відгалужень, загальна кількість перемикачів, поточне витрачання комутаційного ресурсу на відповідному відгалуженні, кількість комутацій по кожному відгалуженню.

Зауважимо, що номер відгалуження з найбільшою кількістю комутацій може не співпадати з номером відгалуження, по якому є найбільше спрацювання комутаційного ресурсу в процесі роботи пристрою РПН.

З врахуванням наведених міркувань структура мікропроцесорного засобу наведена на рис. 1. На схемі: 1 – сенсор струму; 2 – перетворювач струму в постійну напругу; 3 – нормуючий перетворювач в каналі вимірювання струму; 4 – сенсор перемикачів відгалуження «Вверх»; 5 – сенсор перемикачів відгалуження «Вниз»; 6, 7 – нормуючі перетворювачі бінарних сигналів; 8 – клавіатура; 9 – мікроконтролер; 10 – дисплей; 11 – блок індикації; 12 – блок узгодження сигналів для передачі їх оперативному персоналу.

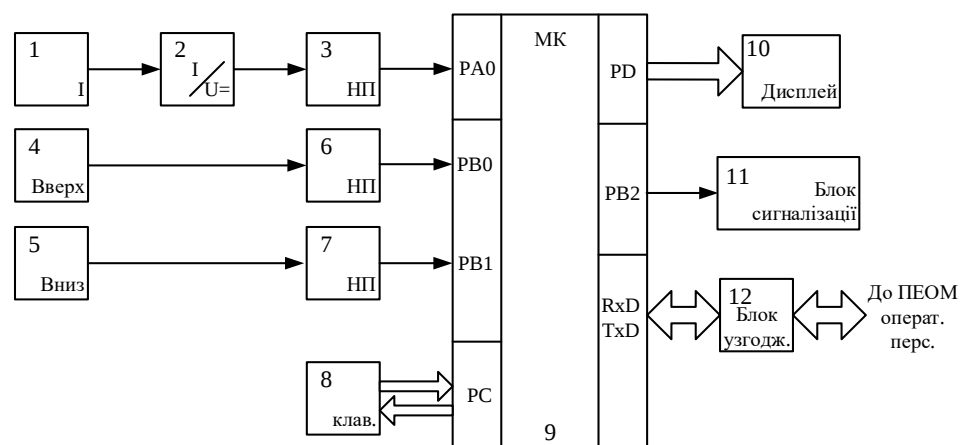


Рисунок 1 – Структурна схема мікропроцесорного засобу для оцінювання залишкового робочого ресурсу пристрою РПН

У відповідності до структурної схеми мікропроцесорного засобу розроблено укрупнений алгоритм його функціонування, який наведено на рис. 2. Для пояснення роботи в алгоритмі введені такі позначення: L – поточний номер відгалуження; N – загальна кількість відгалужень; N_{max} та N_{min} – крайні відгалуження обмотки силового трансформатора при їх перемиканні від середнього положення «Вверх» або «Вниз»; K_L – вичерпаний комутаційний ресурс при поточній комутації пристроєм РПН.

Відповідно до розробленого алгоритму процес оцінювання залишкового робочого ресурсу пристрою РПН здійснюється таким чином:

- в блоках 1-3 здійснюється ініціалізація та налаштування пристрою;
- в блоках 4-7, 9,10 відбувається опитування під'єднаних сенсорів та за сформованими умовами обирається подальший напрям виконання операцій;
- в блоках 8, 11 відбувається визначення номера відгалуження в процесі перемикання «Вверх» або «Вниз»;
- в блоці 12 обчислюється використаний механічний ресурс;
- в блоках 13, 15 обчислюється використаний комутаційний ресурс;
- в блоці 14 виводиться інформація щодо некоректної роботи пристрою РПН;
- в блоках 16, 19 відбувається перевірка залишку комутаційного та механічного ресурсів по L -му відгалуженню;
- в блоках 17, 18 виводиться інформація про стан комутаційного ресурсу по L -му відгалуженню;
- в блоках 20, 21 виводиться інформація про стан механічного ресурсу по L -му відгалуженню;
- в блоці 22 забезпечується збереження та виведення даних;
- блоки 23, 24 описують завершення роботи.

Зазначимо, що в процесі виконання інших задач, пов'язаних з регулюванням напруги за допомогою силового трансформатора з пристроєм РПН, доцільно функції контролю роботоздатності пристрою РПН поєднати з іншими задачами, наприклад, регулювання напруги, діагностування

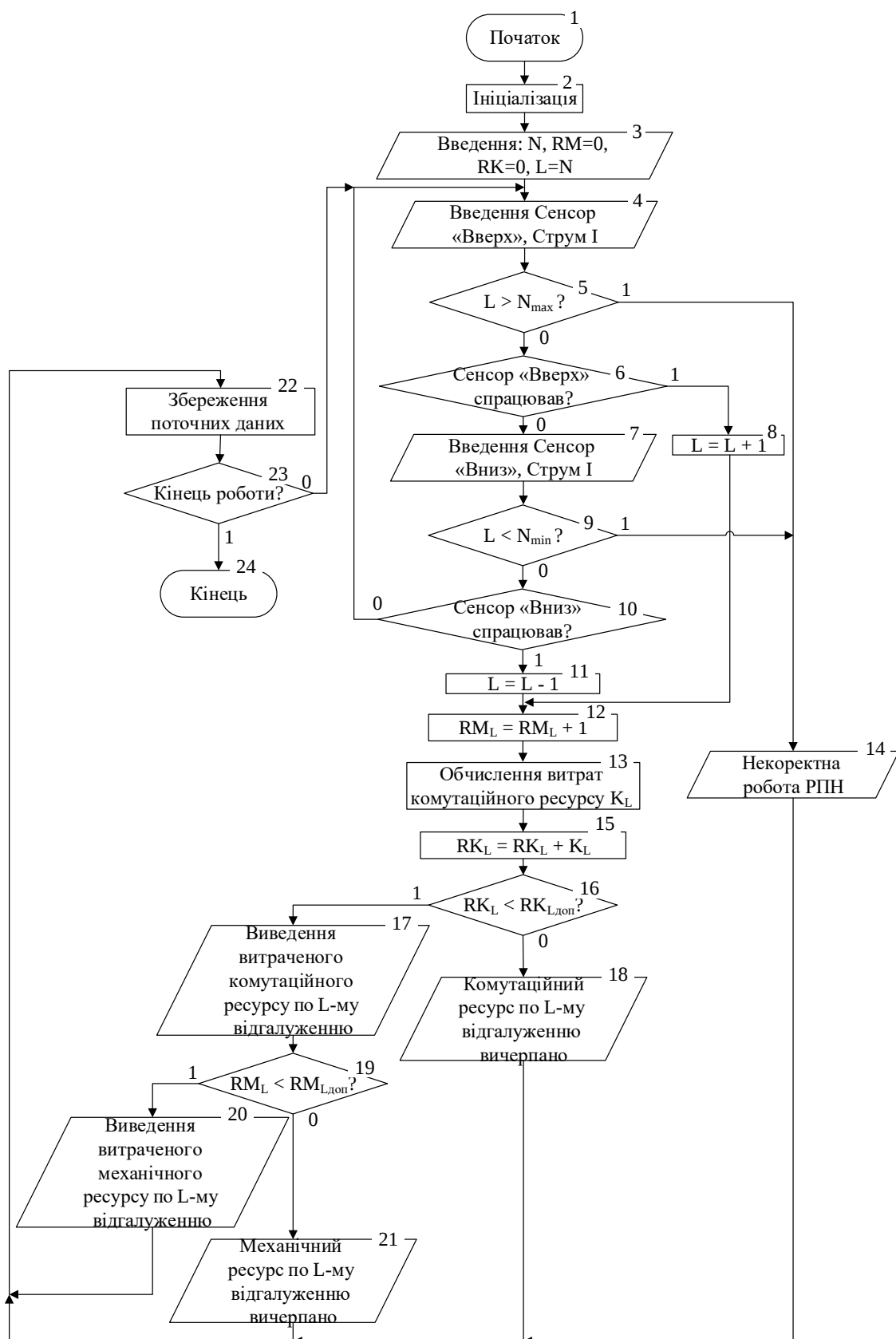


Рисунок 2 – Укрупнений алгоритм роботи мікропроцесорного засобу для оцінювання залишкового робочого ресурсу пристрою РПН

високовольтних введів або силового трансформатора в цілому в одному мікроконтролері, який, очевидно, матиме більшу потужність та більшу кількість портів і функціональних можливостей в порівнянні із заявленим.

Для таких задач можливо використання, наприклад, мікроконтролера із серії STM32 [8] або промислового логічного контролера, наприклад, компанії Siemens [9].

Висновки. Здійснена мікропроцесорна реалізація засобу для оцінювання залишкового робочого механічного та комутаційного ресурсів пристрою РПН. Зроблено висновок про доцільність поєднання вказаної задачі з іншими задачами моніторингу технічного стану електрообладнання розподільного пристрою електростанції або підстанції.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Сегеда М. С. *Електричні мережі та системи : підручник*. Нац. ун-т «Львів. політехніка», 3-тє вид., перероб. та доп. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2015. 540 с.
2. Кирик В. В. *Електричні мережі та системи : підручник* / В. В. Кирик. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 324 с.
3. *Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання* / [Орлович А.Ю., Плешков П.Г., Козловський О.А., Співак О.В., Котиш А.І., Величко Т.В.]; М-во освіти і науки України, Центральнуокр. нац. техн. ун-т. Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2019. 272 с.
4. Інтелектуальні електричні мережі: досвід і перспективи України / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, А.В. Праховник, С.П. Денисюк // *Праці ІЕД НАН України*, 2011. Спец. вип. С. 5–19.
5. Грабко В.В., Грабко В.В., Козаченко Б.В. «Синтез структури пристрою для оцінювання робочого ресурсу пристрою регулювання під навантаженням» *Енергетика. Енергозбереження. Енергоаудит*. №2 (205), 2025. С. 4–14.
6. Пат. 157981 UA, G01R 31/00. Пристрій для контролю роботи пристрою регулювання під навантаженням силового трансформатора / В. В. Грабко, В. В. Грабко, Б. В. Козаченко (Україна). № u 202402552 ; заявл. 13.05.2024; опубл. 18.12.2024, Бюл. № 51, 10 с.
7. ATMEGA328 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Atmega328> (Accessed: June 15, 2025).
8. STM32-E407 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/609366/ETC2/STM32-E407/1569/15/STM32-E407.html> (Accessed: June 15, 2025).
9. Siemens Ukraine [Electronic resource] Available at: <https://www.siemens.com/ua/uk.html> (Accessed: June 15, 2025).

REFERENCES:

1. Segeda M. S. *Electrical networks and systems: a textbook*, National university «Lvivska politechnika», 3rd edition revised and supplemented. Lviv : Lvivska politechnika, 2015. 540 p.
2. Kyryk V. V. *Electrical networks and systems: textbook*, Kyiv : KPI named after Igor Sikorsky. Polytechnic, 2021. 324 p.

3. Orlovych A.Y., Pleshkov P.G., Kozlovsky O.A. et. al. *Electrical equipment of power supply system substations*, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi: Lysenko V.F., 2019. 272 p.
4. Stogniy B.S., Kyrylenko O.V., Prahovnyk A.V., Denysiuk S.P. «Intelligent electricity networks: experience and prospects of Ukraine» [«Intelektual'ni elektrychni merezhi: dosvid i perspektyvy Ukrainy»]. Pratsi IE NASU, spec. issue, 2011. pp. 5–19.
5. Grabko V. V., Grabko V. V., Kozachenko B.V. «Synthesis of the structure of the device for evaluating the operating life of the regulation device under load» [Syntez struktury prystroyu dlya otsinyuvannya robochoho resursu prystroyu rehulyuvannya pid navantazhenniam]. *Energy. Energy saving. Energy audit*, 2025. №2(205). pp. 4–14.
6. Patent 157981 UA, G01R 31/00. «Device for monitoring the operation of the on-load regulating device of a power transformer» [«Prystriy dlya kontrolyu roboty prystroyu rehulyuvannya pid navantazhenniam sylovoho transformatora»] / V. V. Grabko, V. V. Grabko, B. V. Kozachenko B.V. (Ukraine). № u 202402552 ; stated 13.05.2024; published 18.12.2024, Bulletin № 51, 10 p.
7. ATMEGA328 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Atmega328> (Accessed: June 15, 2025).
8. STM32-E407 Datasheet [Electronic resource] Available at: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/609366/ETC2/STM32-E407/1569/15/STM32-E407.html> (Accessed: June 15, 2025).
9. Siemens Ukraine [Electronic resource] Available at: <https://www.siemens.com/ua/uk.html> (Accessed: June 15, 2025).

Надійшла до редакції 19.05.2025р.