

**КОВАЛЬ ВАДИМ**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
<https://orcid.org/0000-0002-7427-6507>  
e-mail: [kovalvp1982@gmail.com](mailto:kovalvp1982@gmail.com)**ОРОБЧУК БОГДАН**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
<https://orcid.org/0000-0002-6375-2440>  
e-mail: [orobchuk@tu.edu.te.ua](mailto:orobchuk@tu.edu.te.ua)**БУНЯК ОЛЕГ**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
<https://orcid.org/0000-0001-9304-8254>  
e-mail: [buniak0203@gmail.com](mailto:buniak0203@gmail.com)**ГЕТМАНЮК ВОЛОДИМИР**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
<https://orcid.org/0000-0001-5794-624>  
e-mail: [getmanyuk76@gmail.com](mailto:getmanyuk76@gmail.com)

## РОБОТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ІНВЕРТОРА З РІЗНОЮ ЄМНІСТЮ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В роботі описано розроблену та виготовлену фотоелектричну станцію для дослідження роботи системи накопичення електроенергії на основі Li-іон акумуляторів. Система накопичення електроенергії напругою 48 В і виконана в двох варіантах із ємністю 125 А·год та 426 А·год. Отримано графіки генерації, накопичення та споживання електроенергії від фотоелектричної енергоустановки. Досліджено вплив ємності на ефективність використання електроенергії від фотоелектричних панелей. Оцінено вплив ємності системи накопичення електроенергії на ефективність фотоелектричної енергоустановки в цілому.

Ключові слова: фотоелектрична станція, система накопичення електроенергії, електроенергія, електроспоживання.

KOVAL VADYM, OROBCHUK BOGDAN,  
BUNIAK OLEH, HETMANIUK VOLODYMYR  
Ternopil National Ivan Puluj Technical University

## OPERATION OF A PHOTOVOLTAIC POWER PLANT BASED ON A HYBRID INVERTER WITH DIFFERENT CAPACITIES OF THE ENERGY STORAGE SYSTEM

The paper describes the designed and constructed photovoltaic power plant for investigating the operation of an electric energy storage system based on the MUST PV18-5248 PRO hybrid inverter with an installed power of 2320 W of photovoltaic panels. The energy storage system has a voltage of 48 V and is made in two versions with a capacity of 125 Ah and 426 Ah. The effect of capacity on the efficiency of using electricity from photovoltaic panels was investigated. The experimental studies lasted for a year. Graphs of generation and electricity consumption in sunny, moderately cloudy, and cloudy weather were obtained. The results of practical tests indicate that in this case, the battery capacity of 5.55 kWh in the electric energy storage system is not sufficient to accumulate surplus electricity from photovoltaic panels or to supply consumers at night. After analyzing the test results with a storage system with a capacity equal to half of the daily energy consumption, it was found that on sunny days during daylight hours, the electricity generated by the PV plant is sufficient to power the house. However, in the evening, when powered by a solar power plant with a 125 Ah (5.55 kWh) battery, with a consumption of 11 kWh per day, the accumulated electricity is sufficient only up to 21...23 hours. As practical tests show, in the evening in a private house the energy consumption is the highest and this should be taken into account when choosing the capacity of the electric energy storage system. The use of a battery capacity in the electric energy storage system greater than equal to the average daily electricity consumption will provide guaranteed power supply in the evening during sunny days from April to October. To ensure reliable power supply in cloudy weather in summer and winter in the absence of the grid, an additional power source will be required.

Keywords: photovoltaic power plant, electric energy storage system, electricity, electricity consumption.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Руйнування енергосистеми України, підвищення цін на електроенергію та недостатня кількість електроенергії на деяких ділянках електромережі стали суттєвими аргументами пошуку резервних джерел живлення. Саме тому розподілені фотоелектричні системи набувають усе ширшого застосування як для промислового так і для житлового сектору. Фотоелектричні станції, які функціонували до війни лише для продажу електроенергії в мережу відступають на задній план. Усе частіше будуються фотоелектричні станції, які генерують електроенергію для власних потреб. У зв'язку із нерівномірністю поступлення сонячної енергії та споживання електроенергії обов'язково використовувати акумулятори електроенергії. Незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених проектуванню ємності та стратегіям управління системою акумулявання за різних умов роботи [1], мало хто з них приділяє увагу впливу ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції в реальних умовах експлуатації.

### Аналіз досліджень та публікацій

Відповідно до [2], до 2050 року електроенергія може стати основним енергоносієм, збільшившись з 20% до 50%. Аналіз [3] вже показав, що до 2050 року можна ліквідувати майже всі викиди CO<sub>2</sub> і частково замінити вичерпане паливо в транспорті та при опаленні приміщень. Однак, потужні відновлювані джерела енергії можуть створювати перешкоди для роботи енергосистеми [4]. Так як вони є мінливими та переривчастими і залежать від природних ресурсів, то не можуть забезпечити надійність електропостачання у час коли енергія потрібна, а лише тоді, коли є достатньо ресурсів, тобто вони не є диспетчеризованими. Тому стає все більш важливим, щоб виробництво відновлюваної енергії сприяло підтримці надійності та стабільності енергосистеми.

Стійкість є характеристикою керованих технологій виробництва електроенергії, таких як ядерна енергетика, вугілля або газ, які мають коефіцієнти стійкості, що перевищують 95% [5]. А у електростанцій на основі відновлюваних джерел енергії без накопичувачів, особливо вітрової та фотоелектричної енергетики, коефіцієнти стійкості для вітрової становить 9% тоді як для фотоелектричної сонячної енергії (без накопичувачів) цей показник становить 0%.

Завдяки поєднанню фотоелектричних установок з системами зберігання, фотоелектричні установки можуть мати вищу стійкість, що забезпечує кращу інтеграцію в електричні мережі. Виробництво електроенергії в гібридних фотоелектричних системах зі сховищами є більш передбачуваним, контрольованим і диспетчеризованим [6]. Інтеграція акумуляторних систем накопичення електроенергії (СНЕ) у фотоелектричні станції підвищує надійність і збільшує доступність для підтримки постійного електропостачання протягом певного періоду часу.

Існуючі дослідження енергетичних систем в основному зосереджені на фотоелектричних, регуляторах заряду/інверторах та сонячних домашніх системах. Проте Alsema EA. [7] дійшов висновку, що СНЕ в сонячних домашніх системах позитивно впливають на енергоефективність споживання електроенергії та зменшують термін окупності системи. Це пов'язане з тим, що зберігаючи надлишок електроенергії, можна використовувати сонячну енергію навіть тоді, коли сонце не світить, або під час пікових навантажень, що робить систему відновлюваної енергетики більш надійною та ефективною [8]. Також використання накопиченої електроенергії в періоди високого попиту на електроенергію може заощадити гроші, уникнувши пікових тарифів на комунальні послуги.

СНЕ фотоелектричної станції може допомогти забезпечити резервне живлення під час перебоїв в електромережі та блекаутів, підтримуючи безперебійну роботу приватного будинку або бізнесу [9].

Однією з добре відомих технологій систем накопичення електроенергії є літій-іонні акумулятори. У їх вдосконаленні досягнуто значного прогресу, а ціни на них знизилися на 80-90% в період з 2010 по 2024 рік. Таке зниження вартості було зумовлене насамперед зусиллями автомобільної промисловості, спрямованими на розробку менших, доступніших і потужніших акумуляторів для електромобілів. Вони мають ряд переваг: тривалий термін служби, низький рівень саморозряду, легка конструкція та висока енергоефективність.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** дослідити вплив величини ємності акумулятора в СНЕ на енергоефективність використання електроенергії, яка генерується фотоелектричними панелями з падаючого сонячного випромінювання.

### Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень побудовано фотоелектричну станцію на основі гібридного інвертора MUST PV18-5248 PRO із встановленою потужністю фотоелектричних панелей 2320 Вт (рис.1) [10]. Встановлена потужність вибрана з міркувань генерації достатньої кількості електроенергії в сонячні дні від березня по жовтень відповідно до середньодобової кількості поступлення сонячного випромінювання на земну поверхню у м. Тернопіль.



Рис. 1. Фотоелектричні панелі на даху будинку

В її склад входять 8 фотоелектричних панелей потужністю по 290 Вт, гібридний інвертор, захисна апаратура від короткого замикання, перенавантаження, ураження блискавкою та СНЕ на основі Li-ion акумуляторної батареї напругою 48 В та системи керування акумуляторною батареєю (BMS).

У фотоелектричній станції використано гібридний інвертор MUST PV18-5248 PRO (рис.2) – це пристрій який функціонує із трьома джерелами енергії: мережа, сонце і СНЕ. При наявності будь-якого з них живить споживача електроенергією. При цьому має функцію підмішування. Вона полягає в подачі електроенергії від декількох джерел одночасно, змінюючи відсотковий вміст кожного в залежності від заданої програми. Наприклад, інвертор налаштовано, щоб живити споживача спочатку від фотоелектричних панелей, потім від СНЕ, а при недостатній кількості електроенергії від першого і другого – від мережі. У цьому випадку, якщо енергії сонця не достатньо тоді живлення споживача буде здійснюватися з двох чи навіть трьох джерел одночасно. При цьому з фотоелектричних панелей відбирається максимум, решту із СНЕ, а піки (при вмиканні двигунів, компресорів і.т.д) з мережі. Ще однією важливою функцією обраного інвертора є дистанційне керування та система моніторингу, яка дозволяє отримати звіти про потоки енергії у фотоелектричній станції.



а) зовнішній вигляд



б) блок захисту електростанції з боку фотоелектричних панелей

Рис.2. Експериментальна фотоелектрична станція на основі гібридного інвертора MUST PV18-5248 PRO

Для першого етапу експерименту у СНЕ використано дві Li-ion акумуляторні батареї 6S2p ємністю 125 А·год, з'єднаних послідовно, що дозволило отримати сумарно ємність 5,55 кВт·год (рис.3). Для захисту акумуляторів та їх балансування використано JK BMS 150A V1A24S15P. Вибір ємності виконано з тих міркувань, що СНЕ повинна забезпечити живлення будинку у темну пору доби, а сонячна енергія у день. Саме тому її ємність обрана як половина тієї, що споживає будинок за добу. Середнє споживання будинку в середньому до 11 кВт·год в літній та до 14 кВт·год в зимовий періоди.

В результаті дана система успішно працювала в продовж року. На рис. 4 наведено графіки електроспоживання та зарядки СНЕ, отримані експериментальним шляхом для деяких днів року в сонячну (рис. 4 а,б) і помірно хмарну погоду (рис. 4, в). На рисунках зеленим кольором позначено електроспоживання побутовими приладами, синім кольором електроенергія, яка споживається з мережі і жовтим кольором енергія, яка запасається в СНЕ. У програмі гібридного інвертора встановлено пріоритет живлення сонце-СНЕ-мережа. Тобто першочергово споживається енергії із фотоелектричних панелей, а коли її недостатньо підмішується з СНЕ. Коли енергії в акумуляторі СНЕ недостатньо тоді споживається електроенергія з мережі.



Рис. 3. Дві акумуляторні Li-іон батареї 6S2p смістю 125 А·год (5,55 кВт·год)



Рис. 4. Графіки енергоспоживання та зарядки СНЕ отримані експериментальним шляхом

Розроблена фотоелектрична система електропостачання постійно під'єднана до мережі. В гібридному інверторі програмно встановлюється режим споживання електроенергії з мережі. Варто відзначити, що при скачкоподібному рості навантаження (з 17 до 24 год на рис. 4, а), що відбувається при вмиканні потужних споживачів в перший момент гібридний інвертор MUST PV18-5248 PRO бере електроенергію з мережі а потім

поступово підмішує від фотоелектричних панелей та СНЕ. Цей процес покликаний першочергово продовжити термін експлуатації акумуляторів у СНЕ, обмеживши пікові струми.

Як свідчать результати експериментів, у вечірній час, при живленні від СНЕ з акумуляторною батареєю ємністю 125 А·год (5,55 кВт·год), накопиченої електроенергії як правило достатньо лише до 21...23 години (залежно від пори року). Через це гібридний інвертор перемикає навантаження на мережу. Цей процес добре видно на рис. 4, б, де з 0 до 8 год. ранку до сходу сонця. Це приводить до додаткових фінансових витрат на купівлю електроенергії з мережі, що збільшує термін окупності системи. Як свідчать графіки електрогенерації фотоелектричних панелей від квітня до жовтня (рис. 5), акумуляторна батарея в СНЕ заряджається повністю до 12-13 години. Далі надлишки електроенергії, які не спожили електричні пристрої в будинку, втрачаються. А у похмурий і дощовий день, коли електрогенерація становить 4-7 % від встановленої потужності практично уся електроенергія береться з мережі (рис. 4, г).

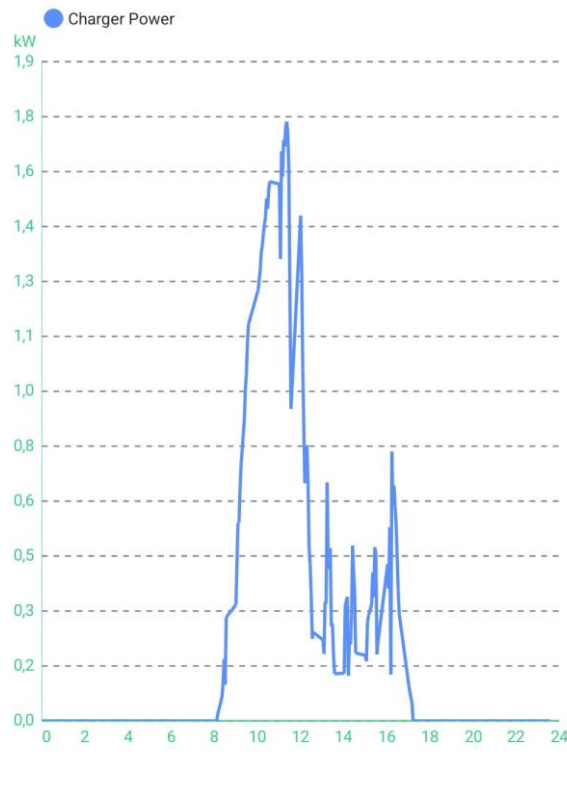


Рис. 5. Графік електрогенерації фотоелектричними панелями

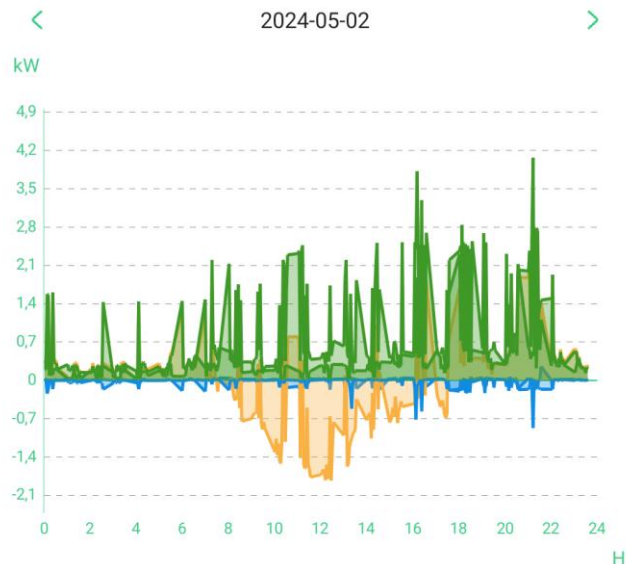
Результати практичних випробувань свідчать про те, що в даному випадку ємність акумуляторної батареї в 5,55 кВт·год в СНЕ недостатня ні для накопичення надлишків усієї електроенергії від фотоелектричних панелей ні для живлення споживачів у темну пору доби. Тому прийнято рішення збільшити ємність до рівня середньодобового споживання будинком. Також враховано наступні вимоги щодо експлуатації акумуляторної батареї: залишкова ємність розрядженої акумуляторної батареї не повинна бути меншою 20 % від максимальної, а ємність повністю зарядженої на 10 % менше максимальної. Дотримання цих вимог збільшать термін експлуатації СНЕ та забезпечать певний резерв по ємності.

Тому для другого етапу експерименту для СНЕ використано Li-ion акумуляторні комірки ємністю 71 А·год, які з'єднані у схемі 13S6p (рис. 6, а). Тобто паралельно з'єднано шість комірок і отримано ємність 426 А·год, а послідовно 13 і отримали робочу напругу 48,1 В, а максимальну - 54,6 В. Максимальну кількість енергії, яку можна накопичити у такому акумуляторі рівна 20,49 кВт·год. Враховуючи попередньо сформульовані вимоги, робоча ємність становитиме 14,3 кВт·год, що рівно середньодобовому споживанню будинку в зимовий період.

В результаті експлуатації впродовж 10 днів фотоелектрична система показала відмінний результат із ефективності роботи. Оскільки уся електроенергія вироблена панелями або споживалась навантаженням, або накопичувалася в акумуляторній батареї (рис. 6,б). Саме тому ємність акумуляторної батареї повинна бути не меншою ніж добове електроспоживання.



а) SHE з акумуляторною батареєю ємністю 426 А·год з робочою напругою 48 В (20,49 кВт·год)



б) електрогенерація повністю покриває потреби в електроенергії

Рис. 6. Акумуляторна Li-ion батарея ємністю 426 А·год (а) і результат її використання (б)

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Проаналізувавши отримані результати випробувань з SHE ємністю рівною половині добового енергоспоживання зроблено наступні висновки:

- в сонячні дні у світлу пору доби електроенергії, генерованої фотоелектричною станцією достатньо для живлення будинку;
- у вечірній час, при живленні від SHE з акумуляторною батареєю ємністю 125 А·год (5,55 кВт·год), накопиченої електроенергії достатньо лише до 21...23 години (залежно від пори року);
- розряджена SHE заряджається повністю наступного дня до полудня (недостатня ємність), а після цього надлишки електроенергії, які не спожили побутові електроприймачі, втрачалися;
- попередньо зроблене припущення, що ємність акумулятора повинна бути такою, щоб забезпечити половину добового навантаження була помилковою. Як свідчать практичні випробування, у вечірній час в приватному будинку енергоспоживання є найбільшим і це слід враховувати при виборі ємності SHE.

2. Використання ємності акумулятора в SHE рівній та більшій за середньодобове споживання електроенергії забезпечить гарантоване живлення у вечірню пору впродовж сонячних днів від квітня до жовтня.

3. Для забезпечення надійного електропостачання при похмурій погоді та при відсутності мережі виникне необхідність додаткового джерела живлення. Це може бути бензиновий електрогенератор або вітроенергетична установка. Саме на дослідження комбінування електропостачання від двох відновлювальних джерел енергії, а саме сонячної та енергії вітру, буде спрямована подальша робота у даному напрямі.

### Література

1. Priyanka Singh. Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell/ Singh Priyanka // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2008. – Vol. 92. – P. 1611–
2. Gielen, D., Gorini, R., Wagner, N., Leme, R., Gutierrez, L., Prakash, G., ... & Renner, M. Global energy transformation: a roadmap to 2050, 2019
3. Commissie, E. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. *Europese Commissie, Brussel*. [https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-12/2050\\_roadmap\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-12/2050_roadmap_en.pdf).
4. PALMINTIER, B., et al. Emerging Issues and Challenges in Integrating Solar with the Distribution System. *NREL: Golden, CO, USA*, 2016.
5. Statista Research Department. Capacity factor of nuclear power plants in the United States from 1975 to 2023 . <https://www.statista.com/statistics/191201/capacity-factor-of-nuclear-power-plants-in-the-us-since-1975/>
6. Bayod-Rujula, A. A., Haro-Larrode, M. E., & Martínez-Gracia, A. (2013). Sizing criteria of hybrid photovoltaic–wind systems with battery storage and self-consumption considering interaction with the grid. *Solar Energy*, 98, P. 582-591.
7. Alsema, E. A. *Environmental life cycle assessment of solar home systems*. Utrecht, The Netherlands: Department of Science Technology and Society, Utrecht University. 2000. P. 89.

8. Лежнюк П.Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, В.В. Кулик - Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.
9. Керей Ю. Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі / Ю. Б. Керей, В. П. Коваль // XI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 7-8 грудня 2022 року. — Т. : ТНТУ, 2022. — С. 68. — (Електротехніка та енергозбереження)
10. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 85-86.

### References

1. Priyanka Singh. Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell/ Singh Priyanka // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2008. – Vol. 92. – P. 1611–
2. Gielen, D., Gorini, R., Wagner, N., Leme, R., Gutierrez, L., Prakash, G., ... & Renner, M. Global energy transformation: a roadmap to 2050, 2019
3. Commissie, E. A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. *Europese Commissie, Brussel*. [https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-12/2050\\_roadmap\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-12/2050_roadmap_en.pdf).
4. PALMINTIER, B., et al. Emerging Issues and Challenges in Integrating Solar with the Distribution System. *NREL: Golden, CO, USA*, 2016.
5. Statista Research Department. Capacity factor of nuclear power plants in the United States from 1975 to 2023 . <https://www.statista.com/statistics/191201/capacity-factor-of-nuclear-power-plants-in-the-us-since-1975/>
6. Bayod-Rujula, A. A., Haro-Larrode, M. E., & Martinez-Gracia, A. (2013). Sizing criteria of hybrid photovoltaic–wind systems with battery storage and self-consumption considering interaction with the grid. *Solar Energy*, 98, P. 582-591.
7. Alsema, E. A. *Environmental life cycle assessment of solar home systems*. Utrecht, The Netherlands: Department of Science Technology and Society, Utrecht University. 2000. P. 89.
8. Lezhniuk P.D. Vidnovliuvani dzherela enerhii v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh: monohrafiia / P.D. Lezhniuk, O.A. Kovalchuk, O.V. Nikitorovych, V.V. Kulyk - Vinnytsia: VNTU, 2014. – 204 s.
9. Kereia Yu. B. Rol systemy nakopychennia enerhii u elektroenerhetychnii systemi / Yu. B. Kereia, V. P. Koval // XI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia molodykh uchenykh ta studentiv „Aktualni zadachi suchasnykh tekhnolohii“, 7-8 hrudnia 2022 roku. — Т. : ТНТУ, 2022. — С. 68. — (Електротехніка та енергозбереження)
10. Koval V.P. Fotoelektrychna stantsiia dlia zabezpechennia vlasnykh potreb // V.P. Koval, D.F.Palovtsi, Abul Kalam Azad / Svitlotekhnika y elektroenerhetyka: istoriia, problemy, perspektyvy: materialy VII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, (Ternopil, 29-31 travnia 2024) / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Tern. natsion. tekhn. un-t im. I. Puliua [ta in.]. – Ternopil: FOP Palianytsia V. A., 2024. – S 85-86.