

УДК 621.314: 612.317

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2025.72.047>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ СТРУМУ ВИТОКУ ІЗОЛЯТОРІВ МАРКИ ШФ-20 У РІЗНИХ ТЕХНІЧНИХ СТАНАХ

Р.О. Буйний*, канд. техн. наук, А.Ю. Строгий**

Національний університет «Чернігівська політехніка»,

вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна

e-mail: buinyiroman@gmail.com

У роботі представлено результати експериментального дослідження впливу пошкоджень штирових ізоляторів типу ШФ-20 за різних ступенів зволоженості на величини струмів витоку та ємність системи «провід–ізолятор–штир». Експериментально виміряні струми витоку через ізолятори на постійному і змінному струмах та у сухому, помірно зволоженому та вологому їхніх станах. На підставі цих струмів розраховано ємність системи «штир–ізолятор–провід» та виконано порівняння із результатами комп'ютерного моделювання. Встановлено, що значення розрахованої ємності співвідносяться з результатами комп'ютерного моделювання. Також встановлено, що механічні дефекти ізоляторів не впливають на величину їхньої ємності, проте активна складова струму витоку може бути використана як діагностичний показник ступеня забруднення ізолятора за його сухого стану та індикатор початкової стадії його деградації. Бібл. 9, рис. 7, табл. 9.

Ключові слова: замикання на землю, ізолятор, ємність, повітряна лінія, ізольована нейтраль, діагностика ізоляції.

Вступ. В Україні електричні мережі середньої напруги 6–10 кВ зазвичай виконуються з ізолюваною нейтраллю. Такий режим роботи дозволяє забезпечувати безперервне електропостачання споживачів навіть під час однофазних замикань на землю (ОЗЗ). Наймасовішим елементом таких мереж є повітряні лінії електропередавання, одним із найбільш уразливих елементів яких є штирова ізоляція [1]. Її дефекти часто стають причиною виникнення ОЗЗ та подальших відключень пошкоджених фідерів, що негативно впливає на показники надійності електропостачання.

Традиційно пошук місця пошкодження в таких мережах здійснюється оперативно-виїзними бригадами шляхом аналізу електромагнітного поля вздовж траси ПЛ, що є трудомістким та часозатратним процесом [2]. У роботах [3, 4] розглядаються системи ідентифікації місця виникнення ОЗЗ, які дозволяють визначати точку пошкодження з високою точністю задля підвищення надійності живлення споживачів [5]. Іншим підходом підвищення надійності є секціонування електричних мереж [6, 7], яке сприяє покращенню показників надійності SAIDI, SAIFI та ENS. Однак системи ідентифікації та секціонування мережі спрямовані на ліквідацію наслідків пошкодження, а не на запобігання його виникненню.

Мета статті. Дослідження впливу наявності механічних пошкоджень у штирових ізоляторів на величину струму витоку через них.

Основні матеріали дослідження. Сучасним та більш перспективним напрямом є моніторинг технічного стану ізоляції повітряних ліній і виявлення дефектів на ранній стадії. Одним з показників пошкодження ізолятора може бути струм його витоку, величина якого зростає внаслідок зволоження, забруднення чи часткових розрядів на поверхні. Дослідження закономірностей зміни струмів витоку може дозволити не лише діагностувати стан ізоляції, але й прогнозувати момент переходу її дефекту в аварійне пошкодження.

У роботах [8, 9] розглядається модель, яка дозволяє визначити ємність системи «провід–ізолятор–штир». Така ємність, від якої буде залежати реактивний опір системи, знаходиться у діапазоні 7,94...10,14 пФ. Вона обумовлена формою ізолятора, площею проводу та штиря траверси, діелектричною провідністю фарфору тощо.

Для підтвердження результатів моделювання було проведено експеримент. Для експерименту взято 6 ізоляторів марки ШФ-20 з різними ступенями пошкодження і забруднення (рис. 1–6), які експлуатувалися тривалий час на повітряних лініях 10 кВ АТ «Чернігівобленерго» і були замінені з причини наявності візуальних дефектів. Судячи із зовнішнього вигляду



та заводського маркування можна стверджувати, що ізолятори були виготовлені на різних заводах або ж належать до різних партій та років виготовлення.



Рис. 1. Фото ізолятора №1

Ізолятор №1, зображений на рис. 1, має незначні пошкодження хвиль і юбки у вигляді сколів. Візуально цілий, тріщини відсутні. Має забруднення пилом і слідами від рук під час монтажу, а також сліди поверхневих розрядів.



Рис. 2. Фото ізолятора №2

Ізолятор №2, зображений на рис. 2, цілий, тріщини та сколи відсутні. Має забруднення пилом і сліди від рук під час монтажу, а також сліди поверхневих розрядів.



Рис. 3. Фото ізолятора №3

Ізолятор №3, зображений на рис. 3, пошкоджений. Наявні сколи на юбці на верхній хвилі, а також глибинна забруднена тріщина. Має забруднення пилом і сліди від рук під час монтажу, а також сліди поверхневих розрядів.



Рис. 4. Фото ізолятора №4

Ізолятор №4, зображений на рис. 4, пошкоджений. Має множинні сколи на юбці та на бортику головки, тріщин відсутні. Забруднений пилом і слідами від рук під час монтажу, має сліди поверхневих розрядів.

Ізолятор №5, зображений на рис. 5, непошкоджений. Сколи та тріщини відсутні. Має забруднення пилом, сажею. Наявні сліди від рук під час монтаж та сліди поверхневих розрядів.

Ізолятор №6, зображений на рис. 6, пошкоджений. Відсутня половина нижньої юбки. Має забруднення пилом і слідами від рук під час монтажу. Наявні сліди поверхневих розрядів.



Рис. 5. Фото ізолятора №5



Рис. 6. Фото ізолятора №6

Експериментальна установка, показана на рис. 7, складається з регульованого джерела живлення (пробійна універсальна установка УПУ-10), яка дозволяє змінювати напругу в діапазоні 0...10 кВ, та мікроамперметра, за який використано цифровий мультиметр марки SEM DT-989.

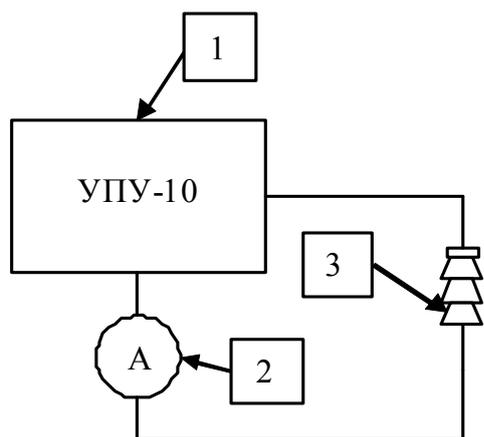


Рис. 7. Структурна схема пристроїв, залучених у експеримент визначення струму витоку через ізолятор: 1 – установка для пробую ізоляції УПУ-10; 2 – мікроамперметр; 3 – ізолятор

Виміри струму витоку проводилися:

- на постійному та змінному струмах;
- за в'язки проводу на шийку ізолятора;
- за умов сухої (витримка часу 24 год за RH 30% та температури +35°C) та помірно зволоженої погоди (витримка часу 24 год за RH 82% та температури +20°C);
- за максимально зволоженої ізоляції (витримка під водою 40 хв, підсушка поверхні 1 год 15 хв);
- за умов, наближених до експлуатаційного положення ізолятора – вертикально на штирі, який розташований на діелектричній підкладці та на значній віддаленості від елементів, що можуть впливати на результати експерименту.

Оскільки ізолятори, які брали участь у експерименті, були зняті з експлуатації з причини наявних візуальних пошкоджень, то вони можуть мати внутрішні дефекти. Тому вимірювання струму витоку за різних ступенів вологості (від RH 30 % до RH 100 %) дозволить визначити наявність залежності зміни струму витоку від наявності дефектів.

Конфігурація в'язки проводу вибрана аналогічно тій, що була змодельована у роботі [9]. Також під час експериментів проводилися виміри опору ізоляції мегомметром Ф4102/1 на напрузі 1000 В. Вимірювання струму витоку на постійній та змінній напругах проводилося задля визначення активної та реактивної складової опору ізолятора.

Результати вимірів струму витоку для сухого стану ізоляторів на постійному та змінному струмі зведені до табл. 1–2 відповідно.

Таблиця 1

Результати вимірів струму витоку для сухого стану ізоляторів на постійному струмі

Номер ізолятора	Значення струму витоку, мкА за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	0	0	0	0	0	0	0
№2	0	0	0	0	0	0	0
№3	0	0	0	0	0	0	0
№4	0	0	0	0	0	0	0
№5	0	0	0	0	0	0	0
№6	0	0	0	0	0	0	0

Таблиця 2

Результати вимірів струму витоку для сухого стану ізоляторів на змінному струмі

Номер ізолятора	Значення струму витоку, мкА за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	4,41	8,26	12,22	16,15	20,03	24,14	28,3
№2	4,05	7,63	11,13	14,37	18,04	21,82	25,62
№3	4,29	7,64	11,02	14,49	17,4	20,87	24,93
№4	3,04	5,69	8,41	11,36	14,03	16,86	19,71
№5	2,47	4,71	7,22	9,76	11,98	14,44	17
№6	2,29	4,27	6,65	8,84	10,86	13,07	15,53

З табл. 1 видно, що значення струму витоку за вимірювання на постійному струмі лежить за межами чутливості вимірювального приладу і прийняті рівними 0 мкА.

Результати вимірів струму витоку для помірно зволоженого стану ізоляторів на постійному та змінному струмі зведені до табл. 3–4 відповідно.

Таблиця 3

Результати вимірів струму витоку для помірно зволоженого стану ізоляторів на постійному струмі

Номер ізолятора	Значення струму витоку, мкА за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	2,14	3,52	5,08	6,43	7,89	9,27	10,54
№2	1,45	2,58	3,84	5,05	6,30	7,63	8,72
№3	2,7	4,61	6,45	7,89	9,16	10,5	11,93
№4	2,41	4,19	6,13	7,83	9,63	11,14	12,94
№5	0,34	0,61	0,90	1,16	1,45	1,68	1,93
№6	1,22	2,18	3,24	4,42	5,57	7,00	8,43

Таблиця 4

Результати вимірів струму витоку для помірно зволоженого стану ізоляторів на змінному струмі

Номер ізолятора	Значення струму витоку, мкА за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	9,38	17,50	25,80	33,88	42,20	49,85	57,69
№2	8,27	14,97	22,73	30,18	36,73	43,90	50,70
№3	7,62	14,8	27,92	29,14	34,97	41,71	47,78
№4	6,31	11,85	17,23	22,86	28,75	33,49	39,12
№5	4,40	8,84	12,70	16,79	21,12	25,06	29,23
№6	7,08	12,85	18,24	23,11	29,00	37,24	43,05

Результати вимірів для вологого стану ізоляторів на постійному та змінному струмі зведені до табл. 5, 6 відповідно.

Таблиця 5

Результати вимірів струму витоку для вологого стану ізоляторів на постійному струмі

Номер ізолятора	Значення струму витоку, мкА за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	0,23	–	–	0,77	–	–	1,41
№2	0,16	–	–	0,58	–	–	1,03
№3	0,10	–	–	0,38	–	–	0,63
№4	0,07	–	–	0,24	–	–	0,43
№5	0,11	–	–	0,42	–	–	0,71
№6	0,01	–	–	0,37	–	–	0,65

Дані вимірювань струму витоку у табл. 5 для напруг 2, 3, 5 та 6 кВ відсутні через їхню малу величину відносно абсолютної похибки мікроамперметра та мізерний вклад у загальний опір системи «провід-ізолятор-штир».

Таблиця 6

Результати вимірів струму витоку для вологого стану ізоляторів на змінному струмі

Номер ізолятора	Значення струму витоку, мкА за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	5,96	11,25	15,76	21,00	26,12	31,40	36,75
№2	6,41	11,74	17,62	22,74	28,71	34,95	40,33
№3	5,55	9,97	14,78	20,12	24,78	29,63	34,21
№4	5,36	9,76	14,09	18,45	23,46	27,45	31,82
№5	5,13	9,60	13,74	18,82	23,22	27,20	31,92
№6	5,72	11,01	15,54	20,74	25,47	30,63	35,66

Аналізуючи дані у табл. 1–6 можна зробити наступні висновки:

- за сухого стану ізоляції має значення лише ємнісний опір ізолятора;
- за зволоженого стану є як активна так і ємнісна складова опору ізолятора;
- за вологого стану (з краплями на поверхні) відбувається кратне збільшення струму витоку ізолятора (більше 10 мА), що призводить до спрацювання захисту джерела живлення випробувальної установки. Якщо на поверхні ізолятора краплі відсутні

(поверхня ізолятора підсушена) активна складова струму витоку майже дорівнює нулю. Ємнісна складова струму майже незмінна за всіх умов, що свідчить про гарну гідрофобну властивість фарфору (вода не просочується навіть у тріщини і пори).

За результатами експерименту ємність ізоляторів може бути розрахована за формулою:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{AC}}{I_{AC}}\right)^2 - \left(\frac{U_{DC}}{I_{DC}}\right)^2}}, \quad (1)$$

де f – частота змінного струму; U_{AC} , I_{AC} – напруга та струм, виміряні на змінному струмі; U_{DC} , I_{DC} – напруга та струм, виміряні на постійному струмі.

Результати розрахунку ємності ізоляторів для сухого, помірно зволоженого та вологого станів зведені до табл. 7–9.

Таблиця 7

Значення ємності ізоляторів у сухому стані

Номер ізолятора	Значення ємності, пФ за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	14,04	13,15	12,97	12,86	12,76	12,81	12,88
№2	12,9	12,15	11,82	11,44	11,49	11,58	11,66
№3	13,66	12,17	11,7	11,54	11,08	11,08	11,34
№4	9,68	9,06	8,93	9,04	8,94	8,95	8,97
№5	7,87	7,5	7,66	7,77	7,63	7,66	7,73
№6	7,29	6,8	7,06	7,04	6,92	6,94	7,07

З табл. 7–9 видно, що за сухого стану ізоляторів струм витоку має ємнісний характер і обумовлюється ємністю системи «провід-ізолятор-штир». При цьому наявність поверхневих забруднень не має впливати на струм витоку. Також розраховані значення на базі даних експерименту збігаються з даними моделювання [9], що свідчить про правильність методики проведення експерименту.

Таблиця 8

Значення ємності ізоляторів у помірно зволоженому стані

Номер ізолятора	Значення ємності, пФ за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	29,08	27,3	26,85	26,48	26,41	26	25,8
№2	25,93	23,48	23,78	23,69	23,05	22,95	22,72
№3	22,69	22,39	28,84	22,33	21,5	21,43	21,05
№4	18,57	17,65	17,09	17,1	17,25	16,76	16,8
№5	13,97	14,04	13,45	13,34	13,42	13,27	13,27
№6	22,21	20,17	19,06	18,06	18,13	19,41	19,21

Таблиця 9

Значення ємності ізоляторів у вологому стані

Номер ізолятора	Значення ємності, пФ за напруги, кВ						
	1	2	3	4	5	6	7
№1	18,98	17,91	16,73	16,72	16,64	16,67	16,72
№2	20,41	18,69	18,7	18,11	18,29	18,55	18,35
№3	17,68	15,88	15,69	16,02	15,78	15,73	15,56
№4	17,07	15,54	14,96	14,69	14,94	14,57	14,48
№5	16,34	15,29	14,59	14,98	14,79	14,44	14,52
№6	18,22	17,53	16,5	16,51	16,22	16,26	16,22

За помірно зволоженого ізолятора з'являється активна складова струму витоку, яка обумовлена наявністю вологи та зволжених забруднень на поверхні ізолятора. При цьому спостерігається збільшення ємності в середньому на 49% відносно сухого стану ізолятора.

Дане збільшення можна пояснити зміною конфігурації електричного поля навколо системи «провід-ізолятор-штир», при цьому наявність пошкоджень і забруднень не співвідноситься зі зміною розрахункової ємності.

За повністю вологого ізолятора активну складову струму витоку виміряти не вдалося оскільки наявність крапель вологи на поверхні ізолятора створює умови до його пробною і спрацювання захисту джерела живлення. За умов підсушування верхньої частини поверхні ізолятора активна складова повністю відсутня. Проте волога на нижніх частинах юбки ізолятора під дією електричного поля іонізується і змінює його конфігурацію. Через це відбувається зміна ємності в середньому на 38% відносно сухого стану ізолятора, яка не співвідноситься з пошкодженнями ізолятора.

Підсумовуючи вищесказане можна констатувати, що взаємозв'язку між зміною ємності та фізичними пошкодженнями не існує, і такий параметр ізолятора як ємнісний струм витоку не може бути використаний в якості міри якості стану. Проте активний струм витоку можна використати для визначення ступеню забрудненості ізолятора.

1. Ткач В.І. Вплив однофазних замикань на землю на експлуатаційні показники надійності повітряних ліній 6-10 кВ ПАТ «Чернігівобленерго». *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. № 1. С. 120–126. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.01.14>
2. Xun J., Yue Zh., Wenlong M., Jianzhong W. Feasible operation region of an electricity distribution network. *Applied Energy*. 2023. Vol. 331:120419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120419>
3. Безручко В. та ін. Використання GSM технологій при ідентифікації місць однофазних замикань на землю в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю зі штирьовою ізоляцією. *Технічна електродинаміка*, 2018. № 5. С. 96–99. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.096>
4. Bezruchko V. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing SmartGrid Systems. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart System*. Kyiv, Ukraine, 2019. Pp. 84–87. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>
5. Bezruchko V. Installation of Sectionalizers in a Radial Distribution Networks to Create an Emergency Islanded Network Powered by Distributed Generators During Outages. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System*. Kremenchuk, Ukraine, 2023, Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402548>
6. Bezruchko V., Dikhtyaruk I., Sereda A. The calculation of the Sectionalizer location in Medium Voltage Distribution Systems to reduction the Expected Energy Not-Supplied to consumer. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology*. Kharkiv, Ukraine, 2023, Pp. 1–4, DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312921>
7. Li Z., Wu W., Tai X., Zhang B. Optimization Model-Based Reliability Assessment for Distribution Networks Considering Detailed Placement of Circuit Breakers and Switches. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(5), Pp. 3991–4004, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2981508>
8. Strohii A. et al. The assessment of the leakage current through pin-type insulators with defect or contaminated of medium voltage overhead power lines. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology*. Kharkiv, Ukraine, 2023, Pp. 1–4, DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312882>
9. Буйний Р.О., Безручко В.М., Строгий А.Ю. Визначення величини ємності системи провід-ізолятор-штир в повітряних лініях напругою 6-10 кВ для оцінки можливості ранньої діагностики стану ізоляції. *Технічна електродинаміка*, 2024. №6. С. 77–80. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.06.077>

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE LEAKAGE CURRENT OF INSULATORS OF MODEL SHF-20 IN VARIOUS TECHNICAL CONDITIONS

R.O. Buinyi, A.Yu. Strogii

Chernihiv Politechnic National University,
str. Shevchenka, 95, Chernihiv, 14035, Ukraine
e-mail: buinyroman@gmail.com

The paper presents the results of an experimental study on the effect of damage to pin-type insulators of the ShF-20 type under different degrees of moisture on the leakage currents and the capacitance of the "conductor-insulator-pin" system. Leakage currents through the insulators were experimentally measured under direct and alternating current, as well as in dry, moderately moist, and wet conditions. Based on these currents, the capacitance of the "pin-insulator-conductor" system was calculated and compared with the results of computer modeling. It was found that the calculated capacitance values consistent with the computer modeling results. It was also established that mechanical defects in the insulators do not affect their capacitance value; however, the active component of the leakage current can be used as a diagnostic indicator of the degree of insulator contamination in its dry state and as an indicator of the initial stage of its degradation. Ref. 9, fig. 7, tables 9.

Key words: phase-to-ground fault, insulator, capacitance, overhead line, isolated neutral, insulation diagnostics.

1. Tkach V. The effect of single-phase-to-ground faults on the operational reliability indicators of overhead lines 6-10 kV PJSC «Chernigivoblenreg». *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019. No 1. Pp. 120–126. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.01.14> (Ukr)
2. Xun J., Yue Zh., Wenlong M., Jianzhong W. Feasible operation region of an electricity distribution network. *Applied Energy*. 2023. Vol. 331:120419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120419>
3. Bezruchko V. et al. Using GSM technologies to identify locations of single-phase ground faults in power networks with an isolated neutral with pin-type insulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2018. No5. Pp. 96–99. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.05.096> (Ukr)
4. Bezruchko V. Integration of New Single-Phase-to-Ground Faults Detection Devices into Existing Smart-Grid Systems. *IEEE 6th International Conference on Energy Smart System*. Kyiv, Ukraine, 2019. Pp. 84–87. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764237>
5. Bezruchko V. Installation of Sectionalizers in a Radial Distribution Networks to Create an Emergency Isolated Network Powered by Distributed Generators During Outages. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System*. Kremenchuk, Ukraine, 2023. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402548>
6. Bezruchko V., Dikhtyaruk I., Sereda A. The calculation of the Sectionalizer location in Medium Voltage Distribution Systems to reduction the Expected Energy Not-Supplied to consumer. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology*. Kharkiv, Ukraine, 2023. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312921>
7. Li Z., Wu W., Tai X., Zhang B. Optimization Model-Based Reliability Assessment for Distribution Networks Considering Detailed Placement of Circuit Breakers and Switches. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020. 35(5). Pp. 3991–4004. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2981508>
8. Strohii A. et al. The assessment of the leakage current through pin-type insulators with defect or contaminated of medium voltage overhead power lines. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology*. Kharkiv, Ukraine, 2023. Pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312882>
9. Buinyi R., Bezruchko V., Strohii A. Determination of the capacitance value of the conductor-insulator-pin system in 6-10 kV overhead power lines to assess the feasibility of early diagnostics of the insulation condition. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2024. No 6. Pp. 77–80. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.06.077> (Ukr)

Надійшла: 25.11.2025
Прийнята: 04.12.2025

Submitted: 25.11.2025
Accepted: 04.12.2025