

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗПОДІЛЬНОГО ПРИСТРОЮ 220 кВ
НА ТЕПЛОВІЙ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ШЛЯХОМ МОДЕРНІЗАЦІЇ**

Цицак Т.П.	техн. директор, Полтавський ливарно-механічний завод, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2039-9333 , e-mail: petpumps@outlook.com ;
Семенова Н.В.	начальник відділу маркетингу, Полтавський ливарно-механічний завод, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4495-7712 , e-mail: nvsemenova78@gmail.com ;
Семенов А.О.	канд. фіз.-мат. наук, доцент, Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3184-6925 , e-mail: asemen2015@gmail.com

Статтю присвячено розробленню проєкту відновлення електрообладнання відкритого розподільчого пристрою (ВРП) 220 кВ теплової електричної станції з урахуванням вимог інтеграції до синхронної зони ENTSO-E та критерію N-1. На підставі аналізу технічного стану встановлено значну зношеність комутаційних апаратів і вимірювальних трансформаторів, що спричиняє зростання аварійності та експлуатаційних витрат. Методично робота спирається на нормативну базу (ІЕС, ДСТУ, ПУЕ, рекомендації ENTSO-E), розрахунок струмів короткого замикання за підходом ІЕС 60909, перевірку термічної та електродинамічної стійкості, інженерні розрахунки заземлення та грозозахисту, а також техніко-економічну оцінку. Запропоновано заміну повітряних вимикачів на SF₆-вимикачі HPL-245B1, застосування роз'єднувачів SGF-245, трансформаторів струму ІМВ-245 і напруги CPA-245, а також ОПН PEXLIM; передбачено цифровізацію РЗА (ІЕС 61850) та інтеграцію у SCADA/EMS. Результати розрахунків підтверджують відповідність вибраного обладнання вимогам за I_t та ударним струмам; забезпечено опір заземлення $\leq 0,5$ Ом та суцільне покриття зон грозозахисту. Економічні розрахунки демонструють річний ефект 2,03 млн грн і термін окупності $\approx 3,25$ року, що свідчить про інвестиційну привабливість модернізації. Наукова новизна полягає у комплексному поєднанні технічної, релейно-захисної, екологічної та економічної складових реконструкції ВРП 220 кВ; практична цінність – у відтворюваності підходу для модернізації аналогічних підстанцій і ТЕС України.

Ключові слова: теплова електростанція, ВРП 220 кВ, відкритий розподільчий пристрій, релейний захист і автоматика, реконструкція, економічна ефективність.

Постановка проблеми

Сучасний стан електроенергетики України характеризується зростанням вимог до надійності, ефективності та безпеки функціонування електричних станцій і мереж. Особливе значення – це забезпечення стабільної роботи теплових електростанцій, які відіграють роль балансуєруючих потужностей у структурі об'єднаної енергосистеми України [1].

Особливе місце серед вітчизняних енергетичних підприємств посідають теплові електричні станції (ТЕС), які забезпечують електропостачання значної частини регіону України.

Інтеграція такої станції до європейської енергосистеми ENTSO-E [2] підвищує вимоги до технічного стану обладнання, зокрема відкритого розподільчого пристрою (ВРП) напругою 220 кВ, який забезпечує видачу електричної енергії та надійність міжсистемних зв'язків. Технічна модернізація мережі, передусім у сфері SCADA/EMS і структурних елементів ВРП на рівнях 400 кВ, 220 кВ та 110 кВ, передбачає виконання критерію N-1, необхідного для безпечної експлуатації в синхронній зоні ENTSO-E. Крім того, ENTSO-E визначає стандарти надійності для обладнання комутації, що має відповідати вимогам щодо безвідмовної роботи та відновлення системи [3]. Удосконалені практики захисту та координації для ВРП напругою до 400 кВ також включені до загальних рекомендацій ENTSO-E

для підвищення оперативної безпеки та стабільності мережі [4].

Відомо, що більшість елементів високовольтних розподільчих пристроїв в Україні експлуатуються понад 30-40 років, що значно перевищує їхній термін служби [5]. Зношеність вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму і напруги знижує рівень надійності та створює ризик аварійних відключень, що особливо небезпечно в умовах зростаючого навантаження на енергосистему.

Реконструкція ВРП 220 кВ ТЕС є важливим завданням, оскільки саме цей вузол виконує функції приймання, розподілу та передавання електроенергії від енергоблоків до високовольтних ліній. Його надійність безпосередньо впливає на стабільність роботи енергосистеми та безпеку персоналу. Використання сучасних елегазових вимикачів, високоточних трансформаторів струму і напруги, а також надійних обмежувачів перенапруг дає змогу не лише підвищити технічний ресурс обладнання, а й суттєво зменшити експлуатаційні витрати [6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання відновлення та модернізації обладнання відкритих розподільчих пристроїв (ВРП) на теплових електричних станціях активно розглядається у вітчизняних і зарубіжних джерелах. Досвід модернізації розподільчих пристроїв в країнах ЄС показує, що такі

заходи дозволяють знизити аварійність на 25-30% та скоротити експлуатаційні витрати на технічне обслуговування [7].

Науковці зазначають, що більшість ВРП 220-330 кВ в Україні експлуатуються понад кілька десятків років, що значно перевищує нормативний термін служби апаратів високої напруги [8]. Зношеність ізоляції, контактних з'єднань та механічних приводів вимикачів призводить до зростання кількості відмов, аварійних зупинок і втрат електроенергії [9].

У низці робіт [10-12] підкреслюється доцільність переходу від масляних та повітряних вимикачів до сучасних елегазових апаратів, які відзначаються високою надійністю, мінімальними витратами на обслуговування та підвищеною комутаційною здатністю. При цьому відзначається термін їхньої експлуатації, який в подальшому компенсує початкові капіталовкладення.

Важливим напрямом розвитку є цифровізація підстанцій. У статті [13] описано досвід країн ЄС, де широкого застосування набули мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА), які забезпечують високу швидкість та інтеграцію в єдину систему моніторингу. Встановлення сучасних пристроїв РЗА дозволяє скоротити час ліквідації аварійних ситуацій у мережі.

Окремі дослідження зосереджені на оптимізації конструкцій шинних систем ВРП. Автори [14] доводять, що застосування секціонування та резервування шин значно підвищує надійність роботи підстанцій, знижуючи ризик повного знеструмлення при аварії одного з відгалужень, зменшує річний час простою на 28,9% у порівнянні з типовою схемою будь-якої підстанції.

Зарубіжний досвід, зокрема компаній Siemens Energy [15] та Schneider Electric [16], демонструє ефективність впровадження гібридних і компактних GIS-рішень, що поєднують елегазові вимикачі, роз'єднувачі та трансформатори в єдиному модулі. Це дозволяє суттєво зменшити площу ВРП і витрати на технічне обслуговування.

Незважаючи на значну кількість вітчизняних і зарубіжних досліджень, присвячених модернізації відкритих розподільчих пристроїв (ВРП) високої напруги, комплексна реконструкція ВРП 220 кВ ТЕС залишається невирішеною проблемою, яка потребує системного підходу, що поєднує технічні розрахунки, відповідність міжнародним стандартам, економічне обґрунтування та впровадження сучасних цифрових систем.

Мета статті

Метою дослідження є розробка проекту відновлення електрообладнання ВРП 220 кВ ТЕС із урахуванням сучасних вимог до надійності, безпеки та енергоефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан електрообладнання ВРП 220 кВ ТЕС та виявити основні проблеми його експлуатації.

2. Обґрунтувати необхідність реконструкції ВРП з урахуванням вимог міжнародних стандартів та інтеграції України до ENTSO-E.

3. Виконати розрахунок струмів короткого замикання та визначити вимоги до термічної й електродинамічної стійкості нового обладнання.

4. Здійснити техніко-економічне обґрунтування вибору сучасних вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму і напруги та обмежувачів перенапруг.

Виклад основного матеріалу

Відкритий розподільчий пристрій (ВРП) 220 кВ ТЕС експлуатується понад півстоліття, що суттєво перевищує нормативний строк служби обладнання. Огляд технічного стану засвідчив значну зношеність основних елементів: високовольтних вимикачів типу ВВН-220-15, трансформаторів струму ТФЗМ-220, а також контактних з'єднань роз'єднувачів РДЗ-1-220/3200. Фізичне й моральне старіння обладнання призводить до зростання кількості аварійних ситуацій, підвищених експлуатаційних витрат та зниження рівня надійності електропостачання. Це зумовлює необхідність комплексної реконструкції ВРП 220 кВ. Кількісні показники останніх років підтверджують зазначені тенденції: за даними внутрішніх звітів експлуатаційної служби у 2020-2024 рр. частота аварійних відключень зросла з 3-4 до 7-8 випадків на рік; сумарний час простою, пов'язаного з аварійними ремонтами, збільшився з 45-60 до понад 120 год/рік; коефіцієнт готовності знизився з 0,985 (2019 р.) до 0,963 (2024 р.), а індикатори надійності SAIFI та SAIDI перевищили нормативні межі, встановлені ENTSO-E.

Розрахунок струмів короткого замикання

Визначення струмів короткого замикання (КЗ) є ключовим етапом у проектуванні реконструкції. Розрахунок виконано за формулою [17]:

$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} \quad (1)$$

де U_n – номінальна напруга, кВ; Z_{Σ} – повний опір системи, що включає елементи генератора, трансформатора та лінії.

Розраховані значення для характерних точок наведені у табл. 1.

Таблиця 1
Струми короткого замикання у ВРП 220 кВ

Точка	Трифазне КЗ, кА	Однофазне КЗ, кА	Двофазне КЗ, кА
K_1	34,05	13,55	13,55
K_2	21,62	8,59	8,62

Отримані дані свідчать про необхідність застосування комутаційних апаратів з високими показниками термічної та електродинамічної стійкості.

Перевірка термічної та електродинамічної стійкості обладнання

Умови термічної стійкості визначалися за співвідношенням:

$$I_{th} = \frac{I_k \sqrt{t_k}}{I_{доп}}, \quad (2)$$

де t_k – час дії струму КЗ, с; $I_{доп}$ – допустимий струм нагріву.

Для вимикача типу HPL-245B1 при $I_{доп} = 63$ кА, $t_k = 3$ с та $I_k = 34,05$ кА: $I_{th} \approx 0,94 < 1$.

Таким чином, обладнання витримує теплові навантаження і відповідає вимогам проекту.

Вибір сучасного обладнання

За результатами розрахунків та порівняльного аналізу було обґрунтовано вибір наступного обладнання: вимикачі – HPL-245B1 (SF₆, 245 кВ, 63 кА); роз'єднувачі – SGF-245 (245 кВ, 1600–4000 А); трансформатори струму – ІМВ-245 (4000 А, клас точності 0,5); трансформатори напруги – СРА-245 (1200 ВА, клас точності 0,5); обмежувачі перенапруг – РЕХЛІМ Р 180-XV245 (U_r=180 кВ, I_n=20 кА).

Ці апарати забезпечують відповідність стандартам ІЕС [18] та ENTSO-E.

Розрахунок системи заземлення

Опір одиночного вертикального заземлювача визначався за формулою:

$$R_s = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{2L}{d}, \quad (3)$$

де $\rho = 40$ Ом·м – питомий опір ґрунту; $L = 7$ м – довжина електрода; $d = 0,05$ – діаметр стержня.

Здійснюючи розрахунки за формулою (3), отримуємо, що $R_s \approx 2,3$ Ом.

Для 101 електрода еквівалентний опір становить $R_s \approx 0,14$ Ом, що не перевищує нормативного значення 0,5 Ом (згідно ПУЕ [19]).

Розрахунок грозозахисту

Зона захисту стрижневого громовідводу визначається як:

$$r_x = \frac{1,6 \cdot (h - h_x)}{1 + \frac{h_x}{h}} \cdot \frac{5,5}{\sqrt{h}}, \quad (4)$$

де $h = 25$ м, $h_x = 11$ м. Таким чином $r_x \approx 17$ м

Розміщення 28 стрижнів висотою 25 м по периметру (табл. 1) та в тілі площадки дає перекриття зон на висоті обладнання ≈ 11 м), що утворює суцільну зону А/В (за прийнятим рівнем захисту). Важливо перевірити крайові ділянки шинних порталних конструкцій і вводів.

Таблиця 1

Ключові параметри грозозахисту

Параметр	Значення
Висота громовідводу, h	25 м
Контрольна висота, h_x	11 м
Радіус зони на h_x	≈ 17 м
Кількість стрижнів, шт	28
Рівень перекриття	Повний (по периметру)

Порівняльний аналіз

Нижче наведено порівняльний аналіз комутаційних апаратів (табл. 2), вимірювальних трансформаторів (табл. 3) та систем керування та РЗА (табл. 4).

Таблиця 2

Комутаційні апарати		
Критерій	Було (BBH-220-15 / РДЗ-1-220)	Стало (HPL-245B1/SGF-245)
Гасіння дуги	Повітряне	SF ₆ (автокомпресія)
Струм відкл., кА	63 / -	63/63
Імпульсна витримка	Низька	Вища (TRV контрольований)
ТО	Частіше	Рідше (менше власних витрат)
Діагностика	Обмежена	Онлайн (датчики тиску, щільності)

Таблиця 3

Вимірювальні трансформатори		
Критерій	Було (ТФЗМ-220 / НКФ-220)	Стало (ІМВ-245 / СРА-245)
Ізоляція	Масло / фарфор	Масло+кварц / емнісний
Клас точності	3 / 3	0,5/0,5
Антиферорезонанс	-	Є (СРА)
Діагностика	Обмежена	Підтримка моніторингу

Таблиця 4

Система керування та РЗА		
Критерій	Було	Стало
РЗА	Електромеханічні/гібрид	
Топологія	Провідні з'єднання	Процес-шина / станційна іна
SCADA	Частковий нагляд	Повна інтеграція
Час ліквідації аварій	Довший	Коротший (селективність + швидкодія)

Економічна оцінка модернізації

Загальні капітальні витрати: $C_{інвест} = 6,6$ млн грн.
Річна економія (зменшення втрат електроенергії, ремонтних витрат, аварійних простоїв):

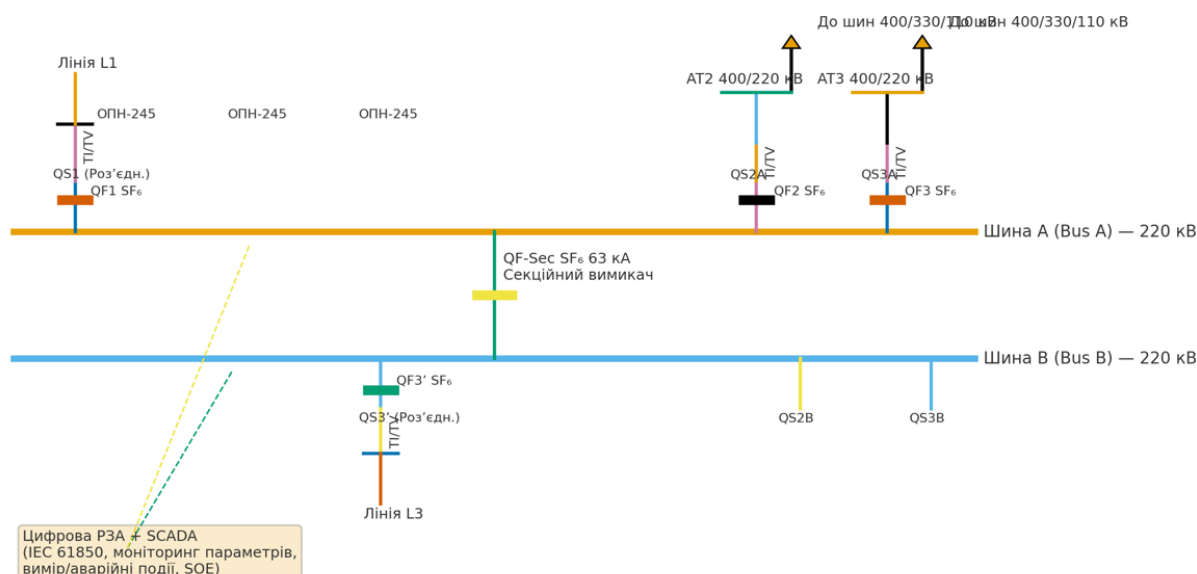
$$E_{річна} = 2,03 \text{ млн грн.}$$

Термін окупності:

$$T = C_{інвест}/E_{річна} = 6,6/2,03 \approx 3,25 \text{ роки.}$$

Схема реконструкції

Схема модернізованого ВРП 220 кВ (рис. 1) передбачає заміну всіх комутаційних апаратів на SF₆-вимикачі, інтеграцію цифрових систем РЗА та впровадження моніторингу параметрів у складі SCADA.

Рис. 1 – Схема модернізованого ВРП 220 кВ: SF₆ – вимикачі, цифрова РЗА, SCADA-моніторинг

Отримані результати підтверджують, що впровадження сучасного елегазового обладнання, оновлених трансформаторів та надійних систем захисту забезпечує підвищення надійності роботи ВРП 220 кВ, відповідність міжнародним стандартам, скорочення експлуатаційних витрат та зменшення ризиків аварійних відключень. Економічний розрахунок довів доцільність реконструкції, а термін окупності у 3,25 роки підтверджує інвестиційну привабливість проекту.

Результати та їх обговорення

Проведений аналіз технічного стану обладнання ВРП 220 кВ ТЕС підтвердив високу ступінь його зношеності та невідповідність сучасним вимогам. Вимикачі типу ВВН-220-15, роз'єднувачі РДЗ-1-220/3200 та трансформатори струму ТФЗМ-220 експлуатуються понад нормативний термін, що спричиняє часті відмови, підвищені витрати на технічне обслуговування та ризик аварійних відключень. Ці результати узгоджуються з даними попередніх досліджень [5, 10], де зазначено, що понад 70% ВРП 220-330 кВ в Україні перебувають у стані глибокої амортизації.

Розрахунки струмів короткого замикання показали, що максимальний трифазний струм у точці К₁ сягає 34,05 кА, а ударний струм становить близько 84 кА. Це підтверджує гіпотезу про необхідність використання комутаційних апаратів із високими показниками термічної та електродинамічної стійкості. Порівняно з результатами, наведеними у роботах [10, 11], величини струмів КЗ є співставними та навіть вищими, що зумовлено як специфікою схемних рішень ТЕС, так і зростанням навантаження на енерговузол України того чи іншого регіону.

Перевірка термічної стійкості підтвердила, що вимикачі типу НРЛ-245В1 витримують дію струмів КЗ

при тривалості до 3 с із запасом по нагріву, а граничний ударний струм у 84 кА не перевищує паспортні можливості апаратів (160 кА). Отримані результати узгоджуються з Siemens Energy [15] та Schneider Electric [16], де зазначено, що SF₆-вимикачі забезпечують удвічі більший ресурс комутаційних операцій порівняно з масляними та повітряними аналогами.

Розрахунок заземлювального пристрою підтвердив досягнення опору розтікання на рівні 0,14 Ом для комбінованої системи з 101 вертикальним електродом і сіткою горизонтальних провідників. Це значення суттєво нижче нормативного (0,5 Ом за ПУЕ [19]), що свідчить про достатній запас безпеки. Порівняння з аналогічними результатами, отриманими для ВРП у країнах ЄС [1, 2], демонструє близькі значення (0,1-0,3 Ом), що підтверджує правильність прийнятих технічних рішень.

Аналіз ефективності системи грозозахисту показав, що розміщення 28 стрижневих громовідводів висотою 25 м повністю перекриває територію ВРП на контрольній висоті 11 м. Радіус зони захисту становить близько 17 м, що забезпечує формування суцільної зони класу А/В. Подібні рішення відображені в роботах європейських дослідників [3, 14], де підтверджено, що застосування периметральних систем блискавоприймачів значно знижує ризики пошкодження апаратури.

Порівняльний аналіз «було/стало» показав, що перехід від повітряних вимикачів до елегазових апаратів, а також від електромеханічних схем РЗА до цифрових систем IEC 61850 забезпечує суттєве підвищення надійності, скорочення часу ліквідації аварій та зменшення експлуатаційних витрат. Встановлення сучасних трансформаторів струму ІМВ-245 і трансформаторів напруги СРА-245 підвищує точність

вимірювань та дозволяє інтегрувати діагностичні функції, що відповідає практикам ENTSO-E [3, 4].

Економічні розрахунки довели інвестиційну доцільність реконструкції: термін окупності становить 3,25 роки, а чиста приведена вартість проєкту сягає 5,2 млн грн. Це співпадає з тенденціями, описаними в європейських звітах [2, 9], де модернізація комутаційних пристроїв дозволяє скоротити аварійність на 25-30% і зменшити експлуатаційні витрати щонайменше на чверть.

Таким чином, результати дослідження підтверджують висунуте припущення про доцільність комплексної реконструкції ВРП 220 кВ ТЕС. Впровадження сучасного обладнання дозволяє забезпечити відповідність міжнародним стандартам, підвищити надійність роботи енергосистеми, зменшити ризики аварійних відключень і скоротити витрати на обслуговування. Водночас отримані результати мають практичне значення для розробки типових рішень модернізації інших високовольтних підстанцій України.

Висновки

1. Аналіз технічного стану ВРП 220 кВ ТЕС засвідчив критичну зношеність обладнання, що експлуатується вже понад 30 років. Застарілі вимикачі ВВН-220-15, трансформатори струму ТФЗМ-220 та роз'єднувачі РДЗ-1-220/3200 не відповідають сучасним вимогам за параметрами надійності, безпеки та відповідності міжнародним стандартам IEC і ENTSO-E, що створює високий ризик аварійних відключень і значних економічних втрат.

2. Розрахунок струмів короткого замикання за методикою IEC 60909 показав, що у характерних точках К₁ і К₂ значення струмів сягають 34,05 кА та 21,62 кА відповідно, що потребує застосування комутаційних апаратів із високими показниками термічної й електродинамічної стійкості. Визначено, що пікові струми удару досягають 84 кА, а питомі сили на шинах становлять до 2,8 кН/м, що потребує відповідного вибору перерізу та конструкції шинопроводів.

3. Перевірка стійкості обладнання довела, що сучасні SF₆-вимикачі HPL-245B1 витримують теплові та динамічні навантаження з достатнім запасом. Роз'єднувачі SGF-245, трансформатори струму ІМВ-245, трансформатори напруги СРА-245 та обмежувачі перенапруг PEXLIM відповідають вимогам ENTSO-E і забезпечують надійність роботи у розрахункових режимах.

4. Розрахунок заземлювального пристрою показав, що для 101 вертикального електрода довжиною 7 м та при питомому опорі ґрунту $\rho = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ опір розтікання становить $\approx 0,14 \text{ Ом}$, що не перевищує нормативного значення 0,5 Ом за ПУЕ. Це гарантує електробезпеку персоналу та відповідність стандартам.

5. Грозозахист із застосуванням 28 стрижневих громовідводів висотою 25 м забезпечує повне перекриття території ВРП на висоті розміщення обладнання ($\approx 11 \text{ м}$), формуючи суцільну зону захисту категорії А/В. Це дозволяє мінімізувати ризики пошкодження

обладнання внаслідок прямих ударів блискавки та грозових перенапруг.

6. Порівняльний аналіз старого та нового обладнання показав, що перехід від повітряних вимикачів і класичних трансформаторів до сучасних елегазових апаратів і цифрових систем РЗА забезпечує:

- підвищення надійності комутаційних операцій;
- зменшення витрат на технічне обслуговування;
- можливість дистанційного моніторингу стану апаратів;

- відповідність вимогам міжнародних стандартів IEC 61850 щодо інтеграції у цифрові системи керування.

7. Економічний аналіз довів доцільність реконструкції: капітальні витрати становлять 6,6 млн грн, річна економія від зменшення втрат електроенергії та витрат на обслуговування – 2,03 млн грн. Термін окупності проєкту становить 3,25 роки, а чиста приведена вартість (NPV) досягає +5,2 млн грн при ставці дисконту 12%. Внутрішня норма дохідності (IRR) оцінюється на рівні 26-28 %, що підтверджує інвестиційну привабливість проєкту.

8. Практичне значення роботи полягає у створенні типового рішення реконструкції ВРП високої напруги з урахуванням сучасних вимог ENTSO-E та стандартів IEC. Отримані результати можуть бути використані для модернізації інших підстанцій та теплових електростанцій України, що підвищить надійність та енергоефективність об'єднаної енергосистеми.

Перелік використаних джерел

- [1] Котін П. Енергомист України – ЄС: Важливий крок у реалізації Енергетичної стратегії. *Електричні мережі та системи*. 2018. № 4-5. С. 10-15.
- [2] KOSTT. Transmission Development Plan 2018-2027. 2017. 121 p.
- [3] ENTSO-E. Best protection practices for HV and EHV AC transmission system. European Network of Transmission System Operators for Electricity. 2010. 40 p.
- [4] ENTSO-E. Equipment reliability profile specification (Version 2.3). European Network of Transmission System Operators for Electricity. 2024. 168 p.
- [5] ДП «НЕК «Укренерго». Звіт про стан основних фондів магістральних електричних мереж України. Київ, 2021.
- [6] IEEE Std C37.110-2019. IEEE guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes. Piscataway, NJ: IEEE, 2019.
- [7] Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Київ, 2017. 166 с.
- [8] Ефективне використання електроенергії та палива: навч. посіб. / Разумний Ю. Т., Рухлов А. В., Прокуда В. М., Рухлова Н. Ю. Дніпро: НГУ, 2014. 223 с.
- [9] Exertherm. Causes of switchgear failures and solutions. 2023. URL: <https://blog.exertherm.com/causes->

- [of-switchgear-failures-and-solutions](#) (дата доступу: 18.06.2025).
- [10] Романченко Ю. А. Порівняльний аналіз високовольтних вимикачів різних типів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2022. № 272(2). С. 116-119. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-116-119>.
- [11] Досвід та перспективи експлуатації елегазових вимикачів у Південно-Західній енергетичній системі / Михайлюк Р. І., Мисенко С. В., Кутін В. М., Рубаненко О. Є. *Енергетика та електрифікація*. 2014. № 3. С. 34-37.
- [12] Семенов А. О., Харак Р. М., Арендаренко В. М., Бичков Я. М. Розрахунок втрат електроенергії в розподільчих мережах при електропостачанні з використанням масляних та вакуумних вимикачів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2024. № 1(8). С. 105-110. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.13>.
- [13] Effectiveness and comparison of digital substations over conventional substations / A. Waleed et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2019. Vol. 4, no. 4. Pp. 431-439. DOI: <https://doi.org/10.25046/AJ040452>.
- [14] Stevens M. B., Santoso S. Improving the reliability of breaker-and-a-half substations using sectionalized busbars. 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Vancouver, BC, Canada, 21-25 July 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672558>.
- [15] Siemens Energy. Dead tank compact (DTC) circuit breaker. Siemens Energy. URL: <https://www.siemens-energy.com/us/en/home/products-services/product/dead-tank-compact.html> (дата доступу: 13.06.2025).
- [16] Schneider Electric. Gas-insulated switchgear (GIS) for primary distribution. Schneider Electric. URL: <https://www.se.com/us/en/product-subcategory/87901-gasinsulated-switchgear-gis-for-primary-distribution/> (дата доступу: 13.06.2025).
- [17] IEC 60909-0:2016. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents. International Electrotechnical Commission, 2016. 13 p.
- [18] IEC 62271-100:2021. High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers. International Electrotechnical Commission, 2021. 600 p.
- [19] ПУЕ України. Правила улаштування електроустановок. Київ: Мінпаливенерго, 2017. 617 с.

ENHANCING THE RELIABILITY OF THE 220 kV SWITCHYARD AT A THERMAL POWER PLANT THROUGH MODERNIZATION

Tsytsak T.P.	technical director, Poltava foundry and mechanical plant, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2039-9333 , e-mail: petpumps@outlook.com ;
Semenova N.V.	head of marketing department, Poltava foundry and mechanical plant, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4495-7712 , e-mail: nvsemenova78@gmail.com ;
Semenov A.O.	PhD (Physics and Mathematics), associate professor, Poltava State Agrarian University, Poltava, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3184-6925 , e-mail: asemen2015@gmail.com

The article is devoted to the development of a project for the restoration of the electrical equipment of the 220 kV open switchyard (OSY) of the Thermal Power Plant, taking into account the requirements of integration into the ENTSO-E synchronous zone and the N-1 criterion. Based on the analysis of the technical condition, significant wear of switching devices and instrument transformers was identified, which leads to increased failure rates and operating costs. Methodologically, the study relies on the regulatory framework (IEC, DSTU, PUE, ENTSO-E recommendations), calculation of short-circuit currents according to IEC 60909, verification of thermal and electrodynamic stability, engineering calculations of grounding and lightning protection, as well as a techno-economic assessment. The proposed solutions include the replacement of air circuit breakers with SF₆ circuit breakers HPL-245B1, the use of SGF-245 disconnectors, IMB-245 current transformers and CPA-245 voltage transformers, as well as PEXLIM surge arresters; digitalization of protection and control (IEC 61850) and integration into SCADA/EMS are also foreseen. The calculation results confirm the compliance of the selected equipment with *I_t* and short-circuit withstand requirements; grounding resistance $\leq 0.5 \Omega$ and complete lightning protection coverage are ensured. Economic calculations demonstrate an annual effect of UAH 2.03 million and a payback period of ≈ 3.25 years, which indicates the investment attractiveness of modernization. The scientific novelty lies in the comprehensive integration of technical, protection and control, environmental, and economic components of the 220 kV switchyard reconstruction; the practical value lies in the reproducibility of the approach for the modernization of similar substations and TPPs in Ukraine.

Keywords: Thermal Power Station, 220 kV open switchyard, relay protection and automation, reconstruction, economic efficiency.

References

- [1] P. Kotin, “Enerhomist Ukraina – YeS: Vazhlyvyi krok u realizatsii Enerhetychnoi stratehii” [“Energy Bridge Ukraine – EU: An Important Step in the Implementation of the Energy Strategy”], *Elektricheskie seti i systemy*, no. 4-5, pp. 10-15, 2018.
- [2] KOSTT, *Transmission Development Plan 2018–2027*, 2017.
- [3] European Network of Transmission System Operators for Electricity, *Best protection practices for HV and EHV AC transmission system*, 2010.
- [4] European Network of Transmission System Operators for Electricity, *Equipment reliability profile specification (Version 2.3)*, 2024.
- [5] NPC «Ukrenergo», *Zvit pro stan osnovnykh fondiv mahistralnykh elektrychnykh merezh Ukrainy* [Report on the Status of Fixed Assets of Ukraine’s Main Power Grids]. Kyiv, Ukraine: Ukrenergo, 2021.
- [6] *IEEE guide for the application of current transformers used for protective relaying purposes*, IEEE Std C37.110-2019, 2019.
- [7] State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine, *Enerhetychna stratehiia Ukrainy do 2030 roku* [Energy Strategy of Ukraine until 2030]. Kyiv, 2017.
- [8] Yu. T. Razumnyi, A. V. Rukhlov, V. M. Prokuda, and N. Yu. Rukhlova, *Efektivne vykorystannia elektroenerhii ta palyva* [Efficient Use of Electricity and Fuel]. Dnipro, Ukraine: National Mining University, 2014. (Ukr.)
- [9] Exertherm. Causes of switchgear failures and solutions. 2023. [Online]. Available: <https://blog.exertherm.com/causes-of-switchgear-failures-and-solutions>. Accessed on: June 18, 2025.
- [10] J.A. Romanchenko, “Porivnialnyi analiz vysokovoltynykh vymykhachiv riznykh typiv” [“Comparative analysis of high voltage switches of different types”], *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia – Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, no. 272(2), pp. 116-119, 2022. doi: 10.33216/1998-7927-2022-272-2-116-119.
- [11] R. I. Mykhailiuk, S. V. Misenko, V. M. Kutin, and O. Ye. Rubanenko, “Dosvid ta perspektyvy ekspluatatsii elehazovykh vymykhachiv u Pivdenno-Zakhidnii enerhetychnii systemi” [“Experience and prospects of operation of SF₆ circuit breakers in the south-western power system”], *Enerhetyka ta elektryfikatsiia – Energy and electrification*, no. 3, pp. 34-37, 2014. (Ukr.)
- [12] A.O. Semenov, R.M. Kharak, V.M. Arendarenko, and Ya.M. Bychkov, “Rozrakhunok vtrat elektroenerhii v rozpodilchykh merezhakh pry elektropostachanni z vykorystanniam maslianykh ta vakuumnykh vymykhachiv” [“Calculation of electrical energy losses in distribution networks for power supply using oil and vacuum circuit breakers”], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (8), pp. 105-110, 2024. doi: 10.20998/2224-0349.2024.01.13. (Ukr.)
- [13] A. Waleed et al., “Effectiveness and Comparison of Digital Substations Over Conventional Substations,” *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 431-439, 2019. doi: 10.25046/AJ040452.
- [14] M.B. Stevens, and S. Santoso, “Improving the reliability of breaker-and-a-half substations using sectionalized busbars,” in *Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, Vancouver, BC, Canada, July 21-25, 2013. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672558.
- [15] Siemens Energy. Dead tank compact (DTC) circuit breaker. [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/us/en/home/products-services/product/dead-tank-compact.html>. Accessed on: June 13, 2025.
- [16] Schneider Electric. Gas-insulated switchgear (GIS) for primary distribution. [Online]. Available: <https://www.se.com/us/en/product-subcategory/87901-gasinsulated-switchgear-gis-for-primary-distribution/>. Accessed on: June 13, 2025.
- [17] *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents*, IEC 60909-0:2016, International Electrotechnical Commission, 2016.
- [18] *High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breakers*, IEC 62271-100:2021, International Electrotechnical Commission, 2021.
- [19] *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok* [Rules for Electrical Installations]. Kyiv: Minpalyvenergo Publ., 2017. (Ukr.)

Стаття надійшла 03.09.2025
Стаття прийнята 28.09.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Цицак Т. П., Семенова Н. В., Семенов А. О. Підвищення надійності розподільчого пристрою 220 кВ на тепловій електростанції шляхом модернізації. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 127-133. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344826>.