

КРУЕ ЯК ТЕХНІЧНЕ РІШЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПІДСТАНЦІЙ В УМОВАХ ВОЄННИХ РИЗИКІВ ТА МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано підхід до оцінювання доцільності застосування комплектних розподільних установок з елегазовою ізоляцією як елемента підвищення стійкості підстанцій в умовах пошкодження енергетичної інфраструктури, дефіциту площі та необхідності захищеного компонування обладнання. Показано, що цінність КРУЕ визначається не лише компактністю, а й можливістю реалізації модульної, секціонованої та фізично захищеної архітектури розподільного пристрою. Обґрунтовано, що під час реконструкції підстанцій вибір КРУЕ має здійснюватися з урахуванням надійності, ремонтпридатності, живучості, екологічних обмежень щодо SF6 та перспектив переходу до альтернативних газових середовищ.

Ключові слова: КРУЕ, GIS, елегазова ізоляція, підстанція, фізична стійкість, воєнні ризики, підземне компонування, SF6, non-SF6 технології.

Abstract

An approach to assessing the feasibility of applying gas-insulated switchgear as an element for improving substation resilience under conditions of energy infrastructure damage, limited land availability, and the need for protected equipment arrangement is proposed. It is shown that the value of GIS is determined not only by compactness, but also by the possibility of implementing a modular, sectionalized, and physically protected switchgear architecture. It is substantiated that during substation reconstruction the selection of GIS should consider reliability, maintainability, survivability, environmental restrictions on SF6, and the prospects for transition to alternative gas-insulated technologies.

Keywords: gas-insulated switchgear, GIS, gas insulation, substation, physical resilience, wartime risks, underground arrangement, SF6, non-SF6 technologies.

Сучасна реконструкція підстанцій в Україні повинна розглядатися не лише як заміна морально застарілого обладнання, а як формування нової архітектури енергетичної інфраструктури, здатної зберігати працездатність в умовах підвищених фізичних загроз. У звітах International Energy Agency зазначено, що енергетична інфраструктура України залишається об'єктом системних атак, а ризики порушення електро- та теплопостачання суттєво зросли після ескалації ударів по енергетичних об'єктах у 2024 році [1]. За таких умов класичне порівняння відкритих розподільних пристроїв і КРУЕ лише за вартістю або займаною площею є недостатнім.

Науково-практична проблема полягає у визначенні таких конструктивних рішень розподільних пристроїв, які одночасно забезпечують електричну надійність, фізичну захищеність, ремонтпридатність і можливість швидкого відновлення після пошкоджень. У цьому контексті КРУЕ слід розглядати як інженерну платформу для створення компактних, закритих і секціонованих вузлів підстанцій, придатних для розміщення в будівлях, захищених приміщеннях або підземних спорудах.

Ключова перевага КРУЕ полягає не тільки в зменшенні габаритів. Вона полягає у зміні самої просторово-функціональної моделі підстанції. У відкритому розподільному пристрої ізоляційні проміжки формуються повітрям, а струмопровідні частини значною мірою відкриті для атмосферних, механічних і зовнішніх фізичних впливів. У КРУЕ основні елементи комутації та збірні шини розміщуються в

металевих герметичних оболонках, що знижує залежність роботи обладнання від опадів, забруднення, ожеледі, пилу та частково від зовнішніх механічних факторів.

Для умов відбудови підстанцій це створює важливий системний ефект. Компактність КРУЕ дає змогу розміщувати розподільний пристрій у капітальних будівлях або спеціально захищених приміщеннях, а за відповідного проєктного обґрунтування — застосовувати заглиблене чи підземне компонування. Такий підхід не усуває всіх ризиків пошкодження, але змінює характер вразливості об'єкта: найбільш критичні струмопровідні та комутаційні вузли можуть бути винесені з відкритого простору, що підвищує фізичну стійкість підстанції порівняно з традиційним відкритим розподільним пристроєм.

Технічна реалізація такого підходу повинна спиратися на вимоги до високовольтних розподільних пристроїв з газовою ізоляцією. Для КРУЕ у металевій оболонці на номінальну напругу понад 52 кВ базовим нормативним документом є ДСТУ EN IEC 62271-203:2024 [2]. Цей стандарт важливий не лише як перелік вимог до апаратів, а як основа для оцінювання цілісності системи: електричної міцності ізоляції, комутаційної здатності, механічної надійності, газощільності, секціонування відсіків і випробувань.

З позицій живучості підстанції особливе значення має поділ КРУЕ на окремі газові відсіки. Така структура дає змогу локалізувати дефект, обмежити обсяг втрати ізоляційного середовища, скоротити зону ремонту та зменшити час відновлення працездатності приєднання. У відкритих розподільних пристроях пошкодження одного елемента часто супроводжується значним обсягом огляду, очищення, перевірок ізоляції та відновлення просторових ізоляційних проміжків. У КРУЕ дефектна зона конструктивно обмежена, що підвищує керованість післяаварійного відновлення.

Разом з тим КРУЕ не слід сприймати як універсально безальтернативне рішення. Його застосування потребує вищої культури проєктування, монтажу та експлуатації. Критичними є контроль густини газу, герметичність фланцевих з'єднань, якість ущільнень, стан приводів, наявність систем моніторингу, а також дотримання процедур поводження з газовим середовищем. IEC 62271-4:2022 визначає процедури поводження з газами для ізоляції та/або комутації під час монтажу, введення в експлуатацію, ремонту, нормальної й ненормальної роботи та утилізації обладнання після завершення строку служби [3].

Окремим обмеженням є екологічний чинник. SF₆ має високі ізоляційні й дугогасні властивості, однак належить до фторованих парникових газів. Regulation (EU) 2024/573, що застосовується в Європейському Союзі з 2024 року, посилює вимоги до таких газів і обладнання, яке їх містить або функціонування якого залежить від них [4]. Для України, яка орієнтується на європейську інтеграцію енергетичних ринків і технічних правил, цей фактор має враховуватися вже на стадії вибору обладнання для нових і реконструйованих підстанцій.

Звідси випливає важливий проєктний висновок: під час відбудови підстанцій доцільно застосовувати не просту альтернативу «відкритий розподільний пристрій — КРУЕ», а багатокритеріальну оцінку. До критеріїв мають входити клас напруги, кількість приєднань, дефіцит території, можливість захищеного або підземного розміщення, час будівництва, ремонтпридатність, очікувані експлуатаційні витрати, рівень фізичних загроз, екологічні ризики SF₆ та доступність альтернативних технологій.

Перспективним напрямом є поступовий перехід до non-SF₆ рішень. За матеріалами CIGRE Technical Brochure 802, застосування альтернативних газів і газових сумішей у розподільних пристроях середньої та високої напруги потребує не механічної заміни SF₆, а перегляду ізоляційних відстаней, тиску, конструкції відсіків, теплового режиму, методів випробувань і правил експлуатації [5]. Тому для України доцільною є поетапна стратегія: безпечна експлуатація наявного SF₆-обладнання, суворий контроль витоків, підготовка персоналу, а для нових об'єктів — оцінка можливості застосування SF₆-free технологій.

Таким чином, КРУЕ в умовах України слід розглядати не тільки як компактне високовольтне обладнання, а як елемент підвищення стійкості підстанцій. Його найбільший ефект проявляється там, де одночасно діють декілька факторів: дефіцит площі, висока вартість землі або неможливість розширення майданчика, потреба у швидкому монтажі, складні кліматичні умови, високі вимоги до надійності та необхідність фізично захищеного компонування.

Висновки

КРУЕ є перспективним технічним рішенням для реконструкції та відбудови підстанцій в Україні, особливо в умовах воєнних ризиків і потреби у фізично захищеній інфраструктурі. Його науково-технічна цінність полягає не лише у компактності, а у можливості створення модульної, секціонованої та потенційно захищеної архітектури розподільного пристрою. Розміщення КРУЕ в приміщеннях або підземних спорудах може підвищувати стійкість підстанцій до зовнішніх впливів і скорочувати час післяаварійного відновлення. Водночас використання елегазового обладнання потребує суворого контролю герметичності, дотримання процедур поводження з SF₆ та врахування європейських екологічних обмежень. Оптимальною для України є стратегія поєднання перевірених GIS-рішень із поступовою підготовкою до впровадження non-SF₆ технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ukraine's energy system under attack. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter/ukraines-energy-system-under-attack>.
2. ДСТУ EN IEC 62271-203:2024. Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 203. Розподільчі пристрої з газовою ізоляцією в металевій оболонці на номінальну напругу понад 52 кВ (EN IEC 62271-203:2022, IDT; IEC 62271-203:2022, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.
3. IEC 62271-4:2022. High-voltage switchgear and controlgear. Part 4: Handling procedures for gases for insulation and/or switching. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2022.
4. Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014. Official Journal of the European Union. 2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202400573.
5. Application of non-SF₆ gases or gas-mixtures in medium voltage and high voltage gas-insulated switchgear. CIGRE Technical Brochure 802. Paris : CIGRE, 2020. URL: <https://www.e-cigre.org/publications/detail/802-application-of-non-sf6-gases-or-gas-mixtures-in-medium-and-high-voltage-gas-insulated-switchgear.html>.

Котець Станіслав Миколайович — студент групи ІЕС-226 факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Вишневецький Святослав Янович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. . e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com

Kotets Stanislav M. — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Svyatoslav Ya. Vyshnevskiy — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. . e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com