

**СЕМЕНОВ АНАТОЛІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>; e-mail: [asemen2015@gmail.com](mailto:asemen2015@gmail.com).

**АРЕНДАРЕНКО ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри будівництва та професійної освіти, Полтавський державний аграрний університет; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0701-7983>; e-mail: [volodymyr.arendarenko@pdau.edu.ua](mailto:volodymyr.arendarenko@pdau.edu.ua).

**ХАРАК РУСЛАН МИКОЛАЙОВИЧ** ✉ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6131-8501>; e-mail: [ruslan.kharak@pdau.edu.ua](mailto:ruslan.kharak@pdau.edu.ua).

**ВОВК ВЯЧЕСЛАВ ОЛЕКСІЙОВИЧ** – аспірант кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5530-1115>; e-mail: [viacheslav.vovk@pdau.edu.ua](mailto:viacheslav.vovk@pdau.edu.ua).

## СУЧАСНИЙ СТАН ІНТЕГРАЦІЇ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ І СИСТЕМ КОНТРОЛЮ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ ТА ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Стаття має оглядово-аналітичний характер і присвячена систематизації сучасних підходів до інтеграції вакуумних вимикачів із системами контролю, моніторингу та діагностики в електричних мережах середньої та високої напруги. Основну увагу приділено мережам 6–35 кВ, де вакуумні вимикачі набули найбільшого практичного поширення, а також перспективам їх застосування у високовольтних електроустановках 110–220 кВ у складі цифрових підстанцій Smart Grid. Проведено аналітичний та порівняльний огляд комутаційних апаратів (масляних, повітряних, елегазових, вакуумних), узагальнено електрофізичні механізми дугогасіння у вакуумі, вплив контактних матеріалів (CuCr, AgWC) і рівня вакууму на відновлення діелектричної міцності проміжку. Оцінено архітектури систем моніторингу, сумісних із IEC 61850, включно з датчиками електричних і теплових параметрів, мікропроцесорними контролерами та інтеграцією на рівні системи диспетчерського керування і збору даних або автоматизованої системи керування технологічним процесом. Результати показують, що вакуумні вимикачі забезпечують короткий час гасіння дуги і швидке відновлення діелектричної міцності, мають високий ресурс комутацій та не потребують періодичного обслуговування; інтеграція з цифровими системами контролю скорочує час виявлення відмов та кількість аварійних вимкнень, а також підвищує коефіцієнт готовності обладнання. Запропоновано структурну схему інтегрованої системи «вакуумний вимикач – система контролю» та наведено практичні рекомендації щодо її впровадження у промислових і агропромислових мережах 6–35 кВ з урахуванням перспектив застосування на рівнях 110–220 кВ. Отримані результати формують цілісне уявлення про сучасний стан і напрями розвитку інтегрованих комутаційно-діагностичних систем для цифрових підстанцій.

**Ключові слова:** техніка високих напруг; вакуумний вимикач; дугогасіння; контактні матеріали; система моніторингу; діагностика; SCADA; цифрова підстанція.

**Вступ.** Сучасна енергетика перебуває на етапі глибокої трансформації, пов'язаної з переходом до інтелектуальних енергетичних систем (Smart Grid), зростанням обсягів електроспоживання та широким впровадженням відновлюваних джерел енергії – сонячних, вітрових і біоенергетичних установок [1, 2]. Такі процеси спричиняють ускладнення режимів роботи енергосистем, зокрема появу нерівномірних навантажень, перенапруг, флуктуацій частоти та струмів короткого замикання [3, 4]. Це, у свою чергу, підвищує вимоги до надійності, швидкодії та безпечності комутаційних апаратів, особливо у системах середньої та високої напруги [5].

У роботі розглянуті електричні мережі середньої та високої напруги з урахуванням практики застосування вакуумних вимикачів у розподільчих і підстанційних електроустановках. Основний акцент зроблено на мережах 6–35 кВ, де вакуумні вимикачі набули найбільшого поширення завдяки високому комутаційному ресурсу, екологічній безпечності та низьким експлуатаційним витратам. Окремо розглянуто перспективи їх застосування на рівнях 110–220 кВ у складі цифрових підстанцій та

інтелектуальних систем керування, що відповідає сучасним тенденціям розвитку високовольтної комутаційної техніки.

Одним із ключових завдань техніки високих напруг є забезпечення стабільної та безпечної роботи обладнання під час комутації великих струмів і мінімізація наслідків аварійних режимів [6]. Високовольтні комутаційні апарати – вимикачі, роз'єднувачі, контактори – відіграють вирішальну роль у функціонуванні електричних мереж, адже визначають здатність системи оперативно реагувати на зміни режиму роботи та запобігати пошкодженню устаткування при коротких замиканнях.

Під час комутації високих напруг відбуваються складні електрофізичні процеси – утворення та розвиток електричної дуги, іонізація газового середовища, нагрів і ерозія контактів. Ефективне гасіння дуги та швидке відновлення діелектричної міцності проміжку після розмикання контактів є вирішальними факторами надійності апаратів. Традиційні типи вимикачів (масляні, повітряні, елегазові) характеризуються рядом обмежень – великою масою, потребою у періодичному

© С. А. Семенов, В. М. Арендаренко, Р. М. Харак, В. О. Вовк, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*  
**Конфлікт інтересів:** Автори заявили про відсутність конфлікту

обслуговуванні та ризиками, пов'язаними з використанням вибухо- або пожежонебезпечних середовищ [7, 8].

Для усунення вище вказаних недоліків використовуються вакуумні вимикачі. Вони мають високу комутаційну здатність, екологічну безпечність, надійність і довговічність [9, 10]. Використання вакууму як дугогасильного середовища забезпечує практично миттєве згасання дуги та відновлення ізоляційних властивостей після проходження нульового струму [11]. Крім того, вакуумні вимикачі не потребують технічного обслуговування протягом усього строку експлуатації, що особливо актуально для розподільчих пристроїв середньої напруги (6–35 кВ) у промислових і агропромислових комплексах [12].

У вакуумному вимикачі розрив кола відбувається у середовищі глибокого вакууму ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$  мм рт. ст.). При розмиканні контактів виникає короткочасна дуга, що складається з парів матеріалу контактів (частіше CuCr, AgWC). Через малу концентрацію частинок дуга має високу температуру, але коротку тривалість (5–10 мкс). Після проходження нуля струму дуга самостійно гасне, а проміжок швидко відновлює діелектричну міцність.

Паралельно з розвитком апаратури комутації зростає роль цифрових систем контролю та діагностики, які дають змогу у реальному часі оцінювати стан апаратів, контролювати параметри напруги, струму, температури, тиску, а також виконувати прогнозування ресурсу та попередження відмов [13, 14]. Об'єднання вакуумних вимикачів [15] із такими системами на основі стандартів IEC 61850 відкриває шлях до побудови цифрових підстанцій нового покоління [16].

Сучасні системи контролю виконують функції реєстрації електричних параметрів, діагностики стану ізоляції, контролю механічних характеристик, прогнозування ресурсу та інтеграції у системи диспетчерського керування і збору даних (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) й автоматизовані системи керування технологічним процесом (АСКТП). Типова архітектура включає польовий рівень датчиків, контролери збору даних та верхній рівень SCADA.

Таким чином, актуальна науково-технічна проблема полягає у розробці та впровадженні інтегрованих систем керування високовольтними комутаційними апаратами, що поєднують вакуумні вимикачі та інтелектуальні засоби контролю, здатні забезпечити підвищену надійність, енергоефективність і безпечність експлуатації електроустановок [17].

**Метою роботи** є систематизація та узагальнення сучасного стану досліджень і технічних рішень щодо інтеграції вакуумних вимикачів із системами контролю, моніторингу та діагностики в електричних мережах середньої та високої напруги, а також визначення перспектив їх застосування у цифрових підстанціях і Smart Grid-системах.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- систематизовано сучасні підходи до інтеграції вакуумних вимикачів із цифровими системами контролю та діагностики в мережах 6–35 кВ і перспективних високовольтних електроустановках 110–220 кВ;

- узагальнено взаємозв'язок між електрофізичними процесами дугогасіння у вакуумі, конструкційними параметрами вимикачів, контактними матеріалами та можливостями цифрового моніторингу технічного стану;

- запропоновано узагальнену структурно-функціональну модель інтегрованої системи «вакуумний вимикач – система контролю – SCADA/IEC 61850», яка поєднує вимірювання, діагностику, прогнозування ресурсу та автоматизоване керування;

- уточнено практичні напрями впровадження таких систем у промислових та агропромислових електричних мережах з урахуванням вимог надійності, енергоефективності та цифровізації енергетики.

Огляд спрямовано на аналіз електрофізичних процесів комутації у вакуумному середовищі, конструкційних та експлуатаційних параметрів вакуумних вимикачів, а також можливостей їх інтеграції в інтелектуальні системи керування типу Smart Grid.

Реалізація поставленої мети передбачає розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо впровадження комплексів «вакуумний вимикач – система контролю» на базі стандартів IEC 61850, що забезпечують автоматизацію процесів керування і діагностики високовольтного обладнання.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішуються наступні завдання:

- проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку комутаційних апаратів, які застосовуються у системах середньої та високої напруги;

- розкрити фізичні принципи роботи вакуумних вимикачів, включаючи утворення, розвиток і гасіння електричної дуги у вакуумному середовищі, вплив матеріалів контактів та рівня тиску на процес комутації;

- провести порівняльний аналіз вакуумних вимикачів із традиційними типами (масляними, повітряними, елегазовими) за основними техніко-експлуатаційними показниками: комутаційна здатність, надійність, тривалість ресурсу, вимоги до обслуговування та екологічна безпека;

- оцінити переваги використання стандарту IEC 61850 для уніфікації інформаційного обміну між вимикачами, сенсорами, контролерами та верхнім рівнем керування SCADA;

- запропонувати структурну схему інтегрованої системи керування вакуумними вимикачами з урахуванням функцій вимірювання, діагностики, прогнозування ресурсу та автоматичного керування;

- сформулювати практичні рекомендації щодо впровадження вакуумних вимикачів і систем контролю у промислових та агропромислових електричних мережах 6–35 кВ з урахуванням перспектив їх застосування у високовольтних електроустановках 110–220 кВ.

**Стан досліджуваного питання.** Аналіз наукових публікацій і технічних джерел свідчить, що розвиток високовольтної комутаційної техніки відбувається у трьох основних напрямках. Перший напрям пов'язаний із підвищенням комутаційного ресурсу та зменшенням потреби в технічному обслуговуванні апаратів. У цьому аспекті вакуумні вимикачі мають переваги порівняно з масляними, повітряними та елегазовими вимикачами завдяки відсутності робочих середовищ, що потребують періодичної заміни або контролю.

Другий напрям стосується екологічної безпечності комутаційного обладнання. Застосування вакууму як дугогасильного середовища дозволяє зменшити екологічні ризики, характерні для масляних вимикачів, а також уникнути використання елегазу SF<sub>6</sub>, який має суттєві обмеження з погляду впливу на довкілля.

Третій напрям пов'язаний із цифровізацією підстанцій та інтеграцією комутаційних апаратів у системи моніторингу, діагностики і керування на базі IEC 61850. Саме поєднання вакуумного вимикача з цифровими засобами контролю формує новий підхід до експлуатації електрообладнання, за якого технічний стан апарата оцінюється не лише під час планового обслуговування, а в режимі реального часу.

Разом з тим у науково-технічній літературі недостатньо узагальнено питання комплексної інтеграції вакуумних вимикачів, діагностичних сенсорів, мікропроцесорних контролерів і SCADA/IEC 61850-рівня в єдину структурно-функціональну систему. Саме це визначає актуальність оглядово-аналітичного узагальнення, виконаного в цій роботі.

**Виклад основного матеріалу.** У роботі використана наступна нормативно-технічна документація [17–21]:

1. Нормативно-технічна база, що регламентує вимоги до високовольтних комутаційних апаратів і систем керування: IEC 62271-100 (ДСТУ EN 62271-100:2022) [18], IEC 61850 (ДСТУ EN 61850-3:2022) [19] Правила улаштування електроустановок [20] та Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [21]. Зазначені документи визначають вимоги до улаштування та технічної експлуатації електроустановок.

2. Технічна документація та каталоги виробників вакуумних вимикачів, зокрема Schneider Electric, Siemens, ABB, що містять типові характеристики апаратів серій 6–35 кВ та 110 кВ.

Методологічну основу роботи становлять систематизація наукових джерел, аналіз нормативно-технічної документації, порівняння техніко-експлуатаційних характеристик різних типів

високовольтних вимикачів, а також узагальнення сучасних підходів до цифрового моніторингу та діагностики комутаційного обладнання.

Аналіз розвитку комутаційної техніки показав, що перехід від масляних і повітряних вимикачів до вакуумних є закономірним етапом удосконалення апаратури середньої та високої напруги [1, 4].

Основними чинниками цього переходу стали підвищення вимог до екологічної безпеки, надійності та довговічності апаратів, а також прагнення зменшити експлуатаційні витрати. Масляні вимикачі потребують періодичного обслуговування, мають підвищену пожежонебезпеку, а повітряні – значні габарити та складну систему дугогасіння [3, 5].

Елегазові вимикачі (SF<sub>6</sub>) характеризуються високою комутаційною здатністю, проте використання газу SF<sub>6</sub>, який має великий потенціал парникового ефекту, обмежується екологічними нормами Європейського союзу [2, 6].

Вакуумні вимикачі (ВВ) позбавлені вказаних недоліків. У середовищі глибокого вакууму (10<sup>-5</sup>–10<sup>-6</sup> мм рт. ст.) дуга утворюється лише з парів металу контактів, швидко згасає при проходженні струму через нуль і не вимагає зовнішнього охолодження. Як зазначено у працях R. Holm і W. Schade, час гасіння дуги у вакуумі становить 5–10 мкс, а відновлення діелектричної міцності проміжку відбувається в сотні разів швидше, ніж у газових середовищах [7].

Завдяки цьому ВВ демонструють стабільну роботу при понад 30–50 тис. комутацій без технічного обслуговування [8].

Матеріали контактів (найчастіше CuCr або AgWC) визначають стійкість дуги й рівень ерозії. Контакти зі сплаву CuCr забезпечують низький рівень розбризкування металу і добру вакуумну стійкість, що підтверджено експериментами A. Greenwood та Y. Zhao [9, 10].

Таким чином, ефективність ВВ зумовлена комбінацією фізичних властивостей вакууму, оптимізованих контактних матеріалів і компактності дугогасильної камери.

Розглянемо механізми комутації та дугогасіння у вакуумі. У процесі розмикання контактів виникає металева плазма, яка підтримує струм до моменту проходження через нуль. Внаслідок відсутності газового середовища і низького тиску, продукти ерозії швидко конденсуються на холодних частинах камери, що запобігає повторній іонізації [7].

Згідно з моделями J. Slade [11], для вакуумних дуг характерний катодний плямовий механізм провідності, при якому струм зосереджений у невеликій кількості активних плям, кожна з яких генерує мікродугу тривалістю 1–2 мкс.

Після проходження нульового струму відновлення напруги на проміжку відбувається за експоненціальним законом, і вже через 10–20 мкс досягається рівень понад 20 кВ/мм [12]. Це пояснює

здатність ВВ гасити струми короткого замикання без додаткових засобів охолодження.

На основі отриманих результатів дослідження здійснена порівняльна характеристика вакуумних та традиційних вимикачів.

Порівняльні результати, узагальнені на основі даних Siemens [13], ABB [14] і Schneider Electric [15], подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння різних типів вимикачів та їх характеристик

Тип вимикача	Середовище гасіння дуги	Ресурс комутацій	Потреба в обслуговуванні	Екологічність	Габарити
Масляний	Масло	1–3 тис.	Висока	Низька	Великі
Повітряний	Стиснене повітря	5–10 тис.	Середня	Висока	Великі
Елегазовий	SF <sub>6</sub>	10–20 тис.	Середня	Обмежена	Середні
Вакуумний	Вакуум	30–50 тис.	Мінімальна	Висока	Компактні

**Обговорення результатів.** Як видно з таблиці, вакуумні вимикачі мають найкраще співвідношення «ресурс – екологічність – надійність», що робить їх оптимальними для підстанцій 6–35 кВ, а також перспективними для рівнів 110–220 кВ у складі цифрових підстанцій Smart Grid [16].

Підвищення надійності роботи електричних мереж вимагає не лише досконалості комутаційного апарата, а й його інтеграції з інтелектуальними системами моніторингу та діагностики.

Сучасні рішення базуються на стандартах IEC 61850 і передбачають застосування мікропроцесорних блоків контролю, які здійснюють вимірювання струму, напруги, температури, тиску, частоти комутацій, а також проводять самодіагностику стану приводу та ізоляції [17; 18].

Такі системи дають змогу:

- виявляти передаварійні стани (зростання температури контактів, затримка спрацювання приводу);
- прогнозувати залишковий ресурс апарата;
- автоматично реєструвати та передавати дані у SCADA або АСКТП;
- інтегрувати керування у єдину цифрову підстанцію Smart Grid [19].

Загальну структуру інтегрованої системи керування вакуумними вимикачами, що враховує функції вимірювання, діагностики, прогнозування ресурсу та автоматичного керування показано на рис. 1.

Система включає сенсори струму, напруги, температури та тиску, що передають дані до мікропроцесорного контролера. Контролер здійснює первинну обробку сигналів, формує діагностичні параметри, передає інформацію до модуля

прогнозування ресурсу та генерує керуючі команди для виконавчих механізмів. Передача інформації на верхній рівень здійснюється через інтерфейс IEC 61850 до систем SCADA/АСКТП, де реалізується візуалізація, архівація та аналітична обробка даних.

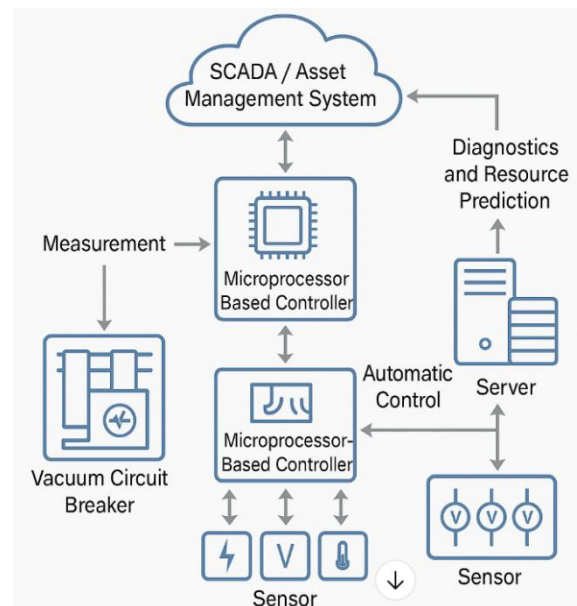


Рисунок 1 – Структурна схема інтегрованої системи керування вакуумними вимикачами

Як показують дослідження Н. Zhang зі співавторами [13], застосування систем контролю на базі IEC 61850 дозволяє зменшити час виявлення відмов на 35–40 %, а кількість аварійних вимкнень – на 20–25 %.

У роботах К. Sakai та D. Vukovic [22] підкреслюється, що цифрові комутаційні пристрої з вбудованими діагностичними модулями значно підвищують коефіцієнт готовності обладнання (до 0,995) порівняно з традиційними аналоговими схемами (0,94–0,96).

Таким чином, для промислових і агропромислових об'єктів доцільно застосовувати вакуумні вимикачі серій VD4 (ABB), VPR-12 (Schneider Electric) та VE1 (Tavrda Electric), обладнані цифровими контролерами моніторингу.

Інтеграція таких пристроїв у єдину інформаційно-керуючу систему дозволяє реалізувати функції:

- онлайн-контролю параметрів електрообладнання;
- автоматичного вимкнення у разі короткого замикання або перегріву;
- збереження протоколів подій у пам'яті контролера;
- дистанційного доступу через мережеві інтерфейси (Modbus, IEC 61850, Ethernet).

Такі рішення сприяють створенню цифрових підстанцій нового покоління, що відповідають концепції Smart Grid і вимогам ДСТУ EN 61850-3:2019.

Проведений аналіз підтверджує, що вакуумні вимикачі у поєднанні з цифровими системами моніторингу формують новий рівень надійності й автоматизації електричних мереж.

Основними перевагами інтегрованих систем є:

- підвищення швидкодії комутаційних процесів на 30–50 %;
- відсутність необхідності періодичного обслуговування;
- зменшення ризику аварій через контроль стану ізоляції та приводів у реальному часі;
- екологічна безпечність та зниження операційних витрат.

Результати узгоджуються з висновками досліджень у роботах [8, 22–24] і підтверджують доцільність упровадження вакуумних вимикачів у цифрові енергетичні системи.

**Висновки.** На основі проведеного аналізу застосування вакуумних вимикачів у поєднанні з сучасними системами контролю та діагностики, сформульовано наступні висновки:

1. Проведено оглядово-аналітичне узагальнення сучасного стану комутаційної техніки в електричних мережах середньої та високої напруги. Встановлено, що вакуумні вимикачі є найбільш поширеним і технічно доцільним рішенням для мереж 6–35 кВ, а їх застосування на рівнях 110–220 кВ є перспективним напрямом розвитку цифрових підстанцій.

2. Проведено порівняльний аналіз вакуумних, масляних, повітряних і елегазових вимикачів. Показано, що за сукупністю показників (ресурс, екологічність, надійність, вартість експлуатації) вакуумні вимикачі переважають інші типи апаратів і є базовими для побудови підстанцій нового покоління.

3. Обґрунтовано доцільність впровадження систем моніторингу та контролю, інтегрованих із вакуумними вимикачами, які базуються на міжнародному стандарті ІЕС 61850. Такі системи забезпечують автоматичний збір, аналіз і передачу інформації про технічний стан апаратів, що дозволяє зменшити кількість аварійних відмов на 20–25 % і скоротити час локалізації несправностей на 30–40 %.

4. Запропоновано структурну схему інтегрованої системи «вакуумний вимикач – система контролю» для цифрових підстанцій Smart Grid, яка включає датчики струму, напруги, температури, мікропроцесорний контролер, інтерфейс зв'язку ІЕС 61850 та SCADA-рівень керування.

5. Практична реалізація запропонованих рішень у промислових і агропромислових електромережах сприятиме підвищенню надійності електропостачання, енергоефективності, зниженню експлуатаційних витрат та відповідності вимогам сучасних стандартів енергетики.

6. Узагальнено, що науково-практична цінність роботи полягає не у створенні нового типу вимикача, а в систематизації сучасних технічних рішень і формуванні цілісної структурно-функціональної

моделі інтеграції вакуумного вимикача з цифровими засобами контролю, діагностики, прогнозування ресурсу та диспетчерського керування.

### Список літератури

1. Ohanu C. P., Rufai S. A., Oluchi U. C. A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 3. e25705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705>.
2. Ethirajan V., Mangaiyarkarasi S. P. An in-depth survey of latest progress in smart grids: paving the way for a sustainable future through renewable energy resources. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. 2025. Vol. 12, no. 1. 9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43067-025-00195-z>.
3. Pranjic F., Vrtic P. Analysis of the operational reliability of different types of switching substations using the Monte Carlo method. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 13. 3142. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17133142>.
4. Reliability evaluation and thermal design of medium-voltage converter for underwater long-distance high-voltage direct current transmission system / S. Ma et al. *The Journal of Engineering*. 2019. Vol. 2019, no. 16. P. 2239–2243. DOI: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8809>.
5. Tian Y., Konstantinou G. Reliability analysis of modular multilevel converters in MVDC applications. *E-Prime - advances in electrical engineering, electronics and energy*. 2024. Vol. 9. 100671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100671>.
6. IEE Power Engineering Series / ed. by C. H. Flurscheim. Institution of Electrical Engineers, 1982. Vol. 1 : Power circuit breaker theory and design. 628 p. DOI: <https://doi.org/10.1049/PBPO001E>.
7. CIGRE Working Group 13.01. Practical application of arc physics in circuit breakers. Survey of calculation methods and application guide. *Electra*. 1988. Vol. 118. P. 66–79.
8. Arc temperatures in a circuit breaker experiment from iterative analysis of emission spectra / S. Franke et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2020. Vol. 53, no. 38. 385204. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab936c>.
9. Review of monitoring and diagnosis methods for vacuum circuit breaker electrical wear / X. M. Fan et al. *High Voltage Apparatus*. 2011. No. 10. P. 81–86.
10. Mu Y., Wang Y., Zou J. Reliability analysis of vacuum circuit breaker with permanent magnet material actuator based on competitive failure model. *International Journal of Environmental Technology and Management*. 2021. Vol. 24, no. 5/6. P. 390–403. DOI: <https://doi.org/10.1504/ijetm.2021.117301>.
11. Razi-Kazemi A. A., Fallah M. R. Investigation of aging procedure of vacuum circuit breakers used in wind farms. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 123. 105292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105292>.
12. Mechanical reliability of a 126 kV single-break vacuum circuit breaker / X. Yao et al. *2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Palm Harbor, FL, USA, 26–29 January 2015. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/rams.2015.7105196>.
13. Research on intelligent communication system for circuit breaker condition monitoring / Q. Deng et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1187, no. 3. 032058. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1187/3/032058>.
14. A model-based measurement method for intelligent circuit breaker with data communication / Z. Liu et al. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2017. Vol. 40, no. 6. P. 1854–1862. DOI: <https://doi.org/10.1177/0142331217693672>.
15. Розрахунок втрат електроенергії в розподільчих мережах при електропостачанні з використанням масляних та вакуумних вимикачів / А. О. Семенов та ін. *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>.
16. Artificial intelligence based intrusion detection system for IEC 61850 sampled values under symmetric and asymmetric faults / T. S. Ustun et al. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 56486–56495. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3071141>.

17. Використання технологій Smart Grid для підвищення ефективності електропостачання споживачів / О. М. Мороз та ін. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 3 (49). С. 82–86. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2017.117369>.
18. ДСТУ EN IEC 62271-100:2022. Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 100. Визначення змінного струму. Чинний від 2023-12-31. Вид. офіц.
19. ДСТУ EN 61850-3:2022. Комунікаційні мережі та системи для автоматизації електроенергетичних підприємств. Частина 3. Загальні технічні вимоги. Чинний від 2023-12-31. Вид. офіц.
20. Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. Правила улаштування електроустановок. Харків : Видавництво «Форт», 2017. 760 с.
21. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : Наказ Міністерства палива та енергетики України від 25.07.2006 № 258 : станом на 21 лют. 2017 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text>.
22. Métivier D., Vuffray M., Misra S. Efficient polynomial chaos expansion for uncertainty quantification in power systems. *Electric Power Systems Research*. 2020. Vol. 189. 106791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106791>.
23. An intelligent predictive maintenance framework for high voltage circuit breakers in smart grids using condition monitoring data / S. H. Rouhani et al. *2025 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Taipei, Taiwan, 15–20 June 2025. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1109/ias62731.2025.11061458>.
24. Recent advances in vacuum circuit breakers / K. Papadiotis et al. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2022. Vol. 15, no. 6. P. 164–169. DOI: <https://doi.org/10.25103/jestr.156.20>.
25. *Technology and Management*, vol. 24, no. 5/6, pp. 390–403, 2021, doi: <https://doi.org/10.1504/ijetm.2021.117301>
11. A. A. Razi-Kazemi and M. R. Fallah, “Investigation of aging procedure of vacuum circuit breakers used in wind farms,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 123, May 2021, Art. no. 105292, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105292>
12. X. Yao, Y. Geng, Z. Liu, and J. Wang, “Mechanical reliability of a 126 kV single-break vacuum circuit breaker,” in *2015 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Palm Harbor, FL, USA, Jan. 26–29, 2015. IEEE, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/rams.2015.7105196>
13. Q. Deng, H. Zhang, M. Liao, H. Zhang, Y. Fu, and L. Gai, “Research on intelligent communication system for circuit breaker condition monitoring,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1187, no. 3, Apr. 2019, Art. no. 032058, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1187/3/032058>
14. Z. Liu, X. Duan, M. Liao, G. Ge, and J. Zou, “A model-based measurement method for intelligent circuit breaker with data communication,” *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 40, no. 6, pp. 1854–1862, Mar. 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0142331217693672>
15. A. Semenov, R. Kharak, V. Arendarenko, and Y. Bychkov, “Calculation of electrical energy losses in distribution networks for power supply using oil and vacuum circuit breakers,” *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (8), pp. 105–110, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.13> (in Ukrainian)
16. T. S. Ustun, S. M. S. Hussain, L. Yavuz, and A. Onen, “Artificial intelligence based intrusion detection system for IEC 61850 sampled values under symmetric and asymmetric faults,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 56486–56495, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3071141>
17. O. M. Moroz, M. M. Cheremisin, O. A. Savchenko, S. A. Popadchenko, and S. V. Diubko, “Using Smart Grid’s technologies for increasing efficiency of consumers’ electric supply,” *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, no. 3 (49), pp. 82–86, Dec. 2017, doi: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2017.117369> (in Ukrainian)
18. *High-Voltage Switchgear and Controlgear - Part 100: Alternating-Current Circuit-Breakers*, IEC 62271-100:2021.
19. *Communication Networks and Systems for Power Utility Automation - Part 3: General Requirements*, IEC 61850-3:2013.
20. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, *Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok [Rules for the installation of electrical installations]*. Kharkiv: Vyd-vo «Fort», 2017. (in Ukrainian)
21. Ukraine, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. (2006, Jul. 25). *Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine no. 258, Pro zatverdzhennia Pravyl tekhnichnoi ekspluatatsii elektroustanovok spozhyvachiv [On the Approval of the Rules for the Technical Operation of Consumer Electrical Installations]*. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06#Text> (in Ukrainian)
22. D. Métivier, M. Vuffray, and S. Misra, “Efficient polynomial chaos expansion for uncertainty quantification in power systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 189, Dec. 2020, Art. no. 106791, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106791>
23. S. H. Rouhani, Y. Chiang, L. Su, S. Mobayen, T. Yu, and M. A. Sepestanaki, “An intelligent predictive maintenance framework for high voltage circuit breakers in smart grids using condition monitoring data,” in *2025 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, Taipei, Taiwan, Jun. 15–20, 2025. IEEE, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/ias62731.2025.11061458>
24. K. Papadiotis, M. G. Danikas, R. Sarathi, and G. Falekas, “Recent advances in vacuum circuit breakers,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 15, no. 6, pp. 164–169, 2022, doi: <https://doi.org/10.25103/jestr.156.20>

## References

1. C. P. Ohanu, S. A. Rufai, and U. C. Oluchi, “A comprehensive review of recent developments in smart grid through renewable energy resources integration,” *Heliyon*, vol. 10, no. 3, Feb. 2024, Art. no. e25705, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705>
2. V. Ethirajan and S. P. Mangaiyarkarasi, “An in-depth survey of latest progress in smart grids: Paving the way for a sustainable future through renewable energy resources,” *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 12, no. 1, Mar. 2025, Art. no. 9, doi: <https://doi.org/10.1186/s43067-025-00195-z>
3. F. Pranjic and P. Vrtic, “Analysis of the operational reliability of different types of switching substations using the Monte Carlo method,” *Energies*, vol. 17, no. 13, Jun. 2024, Art. no. 3142, doi: <https://doi.org/10.3390/en17133142>
4. S. Ma et al., “Reliability evaluation and thermal design of medium-voltage converter for underwater long-distance high-voltage direct current transmission system,” *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 2239–2243, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8809>
5. Y. Tian and G. Konstantinou, “Reliability analysis of modular multilevel converters in MVDC applications,” *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 9, Jul. 2024, Art. no. 100671, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100671>
6. C. H. Flurscheim, Ed., *IEE Power Engineering Series, vol. 1, Power Circuit Breaker Theory and Design*. Institution Elect. Engineers, 1982, doi: <https://doi.org/10.1049/PBPO001E>
7. CIGRE Working Group 13.01, “Practical application of arc physics in circuit breakers. Survey of calculation methods and application guide,” *Electra*, vol. 118, 1988, Art. no. ELT\_118\_1.
8. S. Franke, R. Methling, D. Uhrlant, S. Gortschakow, F. Reichert, and A. Petchanka, “Arc temperatures in a circuit breaker experiment from iterative analysis of emission spectra,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 53, no. 38, 2020, Art. no. 385204, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab936c>
9. X. M. Fan et al., “Review of monitoring and diagnosis methods for vacuum circuit breaker electrical wear,” *High Voltage Apparatus*, no. 10, pp. 81–86, 2011.
10. Y. Mu, Y. Wang, and J. Zou, “Reliability analysis of vacuum circuit breaker with permanent magnet material actuator based on competitive failure model,” *International Journal of Environmental*

Надійшла (Received) 02.05.2026

Прийнята (Accepted) 07.05.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.313.622.1

**SEMENOV ANATOLII** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>; e-mail: [asemen2015@gmail.com](mailto:asemen2015@gmail.com).

**ARENDARENKO VOLODYMYR** – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Professor of the Department of Construction and Vocational Education, Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0701-7983>; e-mail: [volodymyr.arendarenko@pdau.edu.ua](mailto:volodymyr.arendarenko@pdau.edu.ua).

**KHARAK RUSLAN** ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6131-8501>; e-mail: [ruslan.kharak@pdau.edu.ua](mailto:ruslan.kharak@pdau.edu.ua).

**VOVK VIACHESLAV** – Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5530-1115>; e-mail: [viacheslav.vovk@pdau.edu.ua](mailto:viacheslav.vovk@pdau.edu.ua).

## CURRENT STATE OF INTEGRATION OF VACUUM CIRCUIT BREAKERS AND CONTROL SYSTEMS IN MEDIUM- AND HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS

The article has a review and analytical character and is devoted to the systematization of modern approaches to the integration of vacuum circuit breakers with control, monitoring, and diagnostic systems in medium- and high-voltage electrical networks. The main attention is paid to 6–35 kV networks, where vacuum circuit breakers have gained the widest practical application, as well as to the prospects for their use in 110–220 kV high-voltage installations as part of Smart Grid digital substations. An analytical and comparative review of switching devices (oil, air, SF<sub>6</sub>, and vacuum types) is presented, with a generalized analysis of the electrophysical mechanisms of arc extinction in vacuum, the influence of contact materials (CuCr, AgWC), and the degree of vacuum on the dielectric recovery of the contact gap. The architectures of monitoring and diagnostic systems compatible with IEC 61850 are evaluated, including sensors for electrical and thermal parameters, microprocessor controllers, and Supervisory Control and Data Acquisition or Automated Control System for Technological Processes integration. The results demonstrate that vacuum circuit breakers ensure fast arc extinction and rapid dielectric recovery, have a long switching life, and require no periodic maintenance. Integration with digital monitoring systems significantly reduces fault detection time and the number of emergency shutdowns, while increasing equipment availability. A structural scheme of an integrated “vacuum circuit breaker – control system” complex is proposed, along with practical recommendations for its implementation in industrial and agro-industrial networks of 6–35 kV and potentially up to 110–220 kV. The findings confirm the feasibility of transitioning to digital substations based on IEC 61850 standards. The practical implementation of the proposed technical solutions in industrial and agro-industrial electrical networks will ensure improved power supply reliability, enhanced energy efficiency, reduced operating costs, and compliance with the requirements of modern energy standards.

**Keywords:** high-voltage engineering; vacuum circuit breaker; arc extinction; contact materials; monitoring system; diagnostics; SCADA; digital substation.