

Пантелєєва І.В.

ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія»

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕГАЗОВОГО ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Актуальним питанням сучасності є дослідження можливостей використання елегазу, зокрема його унікальних фізико-хімічних властивостей, які роблять його одним із найефективніших ізоляційних середовищ для електротехнічного обладнання. Водночас актуальність його застосування обумовлена необхідністю забезпечення надійності та безпеки енергетичних систем, зокрема високовольтного обладнання, в умовах підвищених вимог до компактності та ефективності, а також обмежень, пов'язаних з його впливом на екологію. У статті систематизовано аспекти розвитку елегазу, розглянуто основні етапи впровадження елегазового середовища як ізоляції електротехнічного обладнання. Представлено порівняльні характеристики електричної міцності різних ізоляційних речовин. Проаналізовано сучасні приклади застосування елегазу в автоматичних вимикачах середньої та високої напруги, а також його сумішей у газовій ізоляції високовольтних ліній електропередачі. Визначено перспективи розвитку застосування елегазу в газоізолюваних лініях електропередачі, наведено їх конструктивні особливості та приклади практичного використання.

Актуальним питанням сучасності є дослідження можливостей використання елегазу, а також обмежень, пов'язаних з його впливом на екологію. У статті систематизовано аспекти розвитку елегазу, розглянуто основні етапи впровадження елегазового середовища як ізоляції електротехнічного обладнання. Представлено порівняльні характеристики електричної міцності різних ізоляційних речовин. Проаналізовано токсичні продукти розкладання елегазу, які становлять значну загрозу, а також його властивості як парникового газу. Обґрунтовано можливості зменшення обсягу використання елегазу за рахунок переходу на газові суміші. Проаналізовано сучасні приклади застосування елегазу в автоматичних вимикачах середньої та високої напруги, а також його сумішей у газовій ізоляції високовольтних ліній електропередачі. Визначено перспективи розвитку застосування елегазу в газоізолюваних лініях електропередачі, наведено їх конструктивні особливості та приклади практичного використання.

Ключові слова: елегаз, електрична міцність, ізоляційне середовище, розподільний пристрій, електротехнічне обладнання, елегазовий вимикач, підстанція з елегазовою ізоляцією, парниковий газ, екологічні вимоги.

Постановка проблеми. У центрі молекули елегазу (SF₆) розміщений атом сірки, а на рівній відстані від нього у вершинах правильного октаедра розташовуються шість атомів фтору. Це визначає високу ефективність захоплення електронів молекулами, їх відносно велику довжину вільного пробігу і слабку реакційну здатність. Елегаз відрізняється високою електричною міцністю. Іншими важливими характеристиками цієї речовини є висока теплоємність та значний коефіцієнт теплового розширення. Завдяки цим властивостям елегаз успішно застосовується як ефективне середовище для гасіння дуги, охолодження та ізоляції [1, 2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Після Другої світової війни, у 1960 році було розпочато серійне виробництво елегазу, яке спрямовувалося на будівництво електростанцій у США

та Європі. У цей період компанія Merlin Gerin розробила перші комутаційні апарати, які використовували елегаз як ізоляційне та дугогасне середовище для високої (35–230 кВ) та надвисокої (понад 230 кВ) напруги.

У 1964 році компанія EDF (Франція) ініціювала проектування першої у світі підстанції з елегазовою ізоляцією, яку ввели в експлуатацію в 1966 році неподалік Парижа. За іншими джерелами [3], перший розподільний пристрій з елегазовою ізоляцією, розрахований на номінальну напругу 170 кВ, було створено в Цюриху того ж року. Однак ключовим залишається не стільки точна дата початку, скільки значущість цих подій для розвитку технології. Це обумовлено вищезгаданими перевагами елегазу, серед яких основною, у контексті його застосування в комплектних розподільних пристроях (КРУ), є його чудові ізоляційні властивості.

Елегаз характеризується електричною міцністю, яка, залежно від зовнішніх умов (тиску та температури), перевищує міцність повітря у 2–3 рази (рис. 1).

Висока електрична міцність елегазу дає можливість зменшити ізоляційні відстані в електроустановках, що дозволяє значно скоротити розміри КРУЕ. Це, у свою чергу, має важливе практичне значення там, де площа має надзвичайно високу цінність: торгові центри, офісні будівлі, промислові підприємства, а також термінали аеропортів і вокзалів. Використання електрообладнання з елегазовою ізоляцією у відкритих розподільчих при-

строях (ВРП) високої та надвисокої напруги дозволяє значно скоротити займану площу (рис. 2).

Дещо раніше винятком були КРП з елегазовою ізоляцією на номінальну напругу 35 кВ, що виготовлялися Рівненським заводом високовольної апаратури (РЗВА).

У 2010 році на виставці ELCOM-2010 у Києві підприємство презентувало це обладнання. Проте на сьогодні його виробництво припинено, і на офіційному сайті компанії відсутня будь-яка інформація щодо можливості виготовлення цього обладнання чи його продажу підприємствам-замовникам.

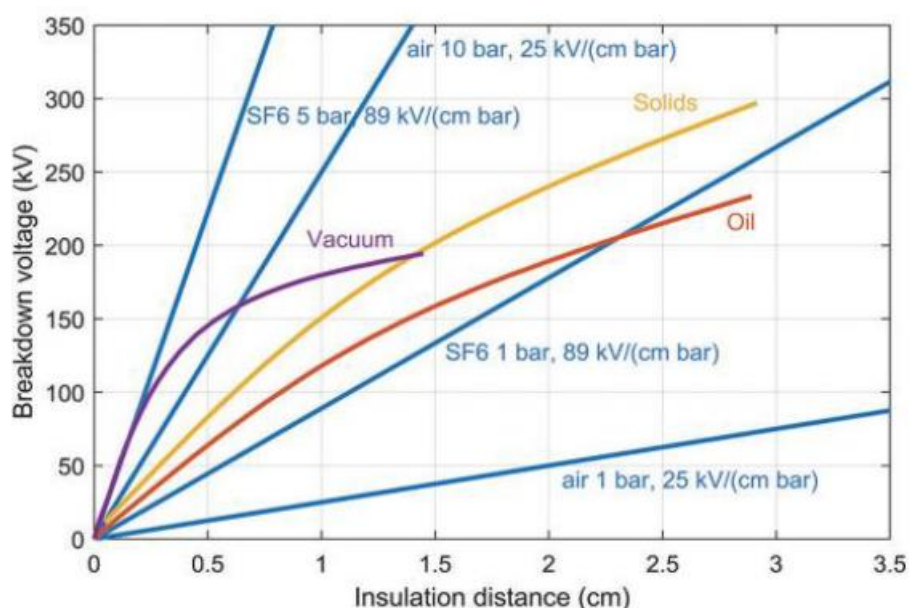


Рис. 1. Електрична міцність для різних середовищ

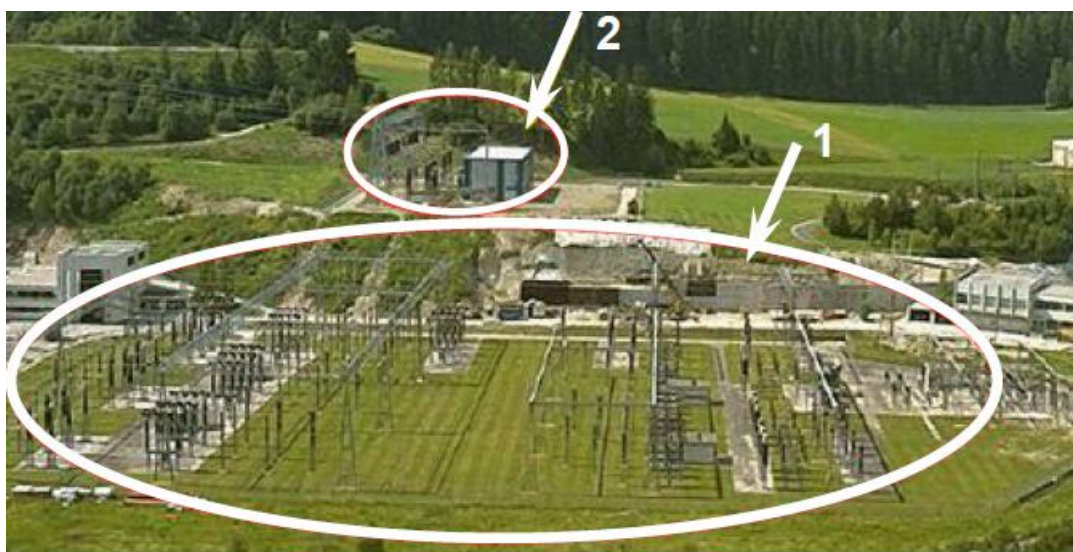


Рис. 2. Порівняння відкритого розподільного пристрою (ВРП) напругою 220 кВ з повітряною (1) та елегазовою (2) ізоляцією

У більш сучасних КРУЕ як комутаційний апарат застосовується вакуумний вимикач ВРС-35, три полюси якого разом із системою збірних шин розташовані в повністю герметичному баку, заповненому елегазом. Три полюси вимикача з'єднані з пружинним приводом, розташованим у верхній частині фасаду КРУЕ, за допомогою ізолюючих тяг і сильфонів. Використання елегазової ізоляції дозволило зменшити міжполюсну відстань вакуумного вимикача та скоротити відстань між збірними шинами.

КРУЕ типу КУ35С має низку важливих переваг, серед яких екологічна безпека, висока надійність, зручність обслуговування, широкий вибір типових виконань і схем релейного захисту та автоматики на базі мікропроцесорів різних типів. Крім того, завдяки використанню елегазової ізоляції в герметичному корпусі, обладнання можна встановлювати на об'єктах, розташованих у складних кліматичних умовах, таких як пил, бруд або соляний туман [4].

Сучасні технічні розробки провідних світових електротехнічних компаній здебільшого зосереджені на покращенні існуючих конструкцій КРПЕ, удосконалюються шляхом інтеграції функцій різних електричних апаратів у єдиний модуль. Наприклад, в одному пристрої можуть поєднуватися функції вимикача (switch), роз'єднувача та заземлювача, а також шляхом розміщення всіх трьох фаз в одній оболонці [5]. Такі технічні рішення роблять електрообладнання більш компактним, зменшують площу, необхідну для встановлення КРПЕ, і зменшують простір приміщень. У результаті покращуються загальні техніко-економічні показники. Світові корпорації активно працюють над пошуком альтернатив електричного газу, який, як відомо [6, 7], належить до парникових газів. Розглядаються варіанти його заміни на суміші електричного газу з іншими газами або повна відмова від електричного газу на користь екологічно безпечних газів та їхніх сумішей.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження етапів розвитку електричного газу як ізоляційного середовища, аналіз сучасного стану питання та оцінка його перспектив на майбутнє з урахуванням впливу на довкілля.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно зі статистикою, світова потреба в електроенергії щороку зростає на 2–3 %. До основних причин цього явища належать значне збільшення чисельності населення, особливо в країнах Азії, підвищення середньої тривалості життя та посилення урбанізації. У результаті виникає потреба

в передачі все більшого обсягу електроенергії до великих міст, передміських зон і промислових підприємств, забезпечуючи при цьому мінімальні втрати.

Одним із наслідків цього розвитку подій є активна модернізація електричних мереж у країнах Європи, де напругу підвищують із 220 кВ до 380 кВ [8]. У мегаполісах будується все більше розподільчих підстанцій, розрахованих на надвисоку напругу понад 380 кВ. Подібна тенденція спостерігається і в інших світових мегаполісах, таких як Шанхай, Сідней та Мехіко. Саме тому підстанції з елегазовою ізоляцією, розроблені близько 65 років тому, стають дедалі актуальнішими сьогодні. Як показує світова практика, елегазові підстанції не тільки потребують значно менше простору порівняно з аналогічними підстанціями, що використовують повітряну ізоляцію, залежно від рівня робочої напруги, але й не залежать від умов навколишнього середовища і можуть бути встановлені на обмежених площах, що вже відзначалося. Їх також можна розміщувати під поверхнею відкритих майданчиків для відпочинку та розваг.

Як зазначено в [9], у мережах із середньою напругою 6–35 кВ зазвичай використовуються вакуумні вимикачі. Однак із підвищенням напруги понад 35 кВ найбільш поширеними стають вимикачі з елегазовою ізоляцією (рис. 3).

Високовольтні вимикачі (понад 35 кВ) з елегазовою ізоляцією здійснюють відключення струму шляхом розмикання контактів у середовищі електричного газу. Цей газ має значно кращі діелектричні властивості порівняно з повітрям і маслом, а також ефективно гасить електричну дугу. Після розмикання контактів струм проходить через дугу, яка припиняється, коли потік електричного газу достатньої інтенсивності охолоджує її.

Щоб успішно загасити електричну дугу, потік електричного газу повинен швидко охолодити її, знижуючи температуру між контактами вимикача з початкових 20 000 К до менше ніж 2 000 К всього за кілька сотень мікросекунд. Для ефективного гасіння дуги змінного струму та уникнення її повторного виникнення критично важливо, щоб електрична міцність міжконтактного проміжку відновлювалася швидше, ніж напруга на контактах апарата. Це дозволяє ефективно протистояти відновленню перехідної напруги після гасіння дуги.

Поєднання ізоляційних рішень, заснованих на використанні електричного газу, з елементами традиційної повітряної ізоляції називають гібридним дизайном або комбінованою конструкцією. У деяких



Рис. 3. Порівняння вакуумного вимикача (ліворуч) на напругу 35 кВ та елегазового вимикача (праворуч) на напругу 35 кВ для внутрішньої установки

випадках така конструкція може забезпечити значні переваги, зокрема зменшення займаного простору та можливість використання на надвисоких рівнях напруги.

Комбінована технологія може охоплювати діапазон напруги від 110 кВ до 1000 кВ. Її було вперше застосовано на гідроелектростанції Yellow River Laxiwa в Китаї, яка стала першою в країні станцією з напругою 800 кВ. Вона розташована на висоті близько 2500 метрів над рівнем моря [10]. У подібних високогірних районах із надвисокою напругою використання стандартних кабелів із зшитого поліетилену неможливе.

Завдяки модульному підходу до проектування, практично всі можливі конфігурації розподільчих пристроїв з елегазовими компонентами можуть бути реалізовані на основі сучасного гібридного дизайну. Нові вимоги електроенергетики, такі як вищі рівні напруги передавання, збільшення обсягів електроенергії та забезпечення екологічної стійкості, створюють нові виклики та стимулюють пошук інноваційних інженерних рішень для вдосконалення способів транспортування електроенергії.

У минулому підстанції будувалися виключно з функціональної точки зору, як об'єкти для підтримки розвитку інфраструктури. Сучасні конструкції, навпаки, дозволяють економити цінний та дорогий простір завдяки впровадженню передових технологій, таких як елегазові комплектні розподільчі пристрої (КРПЕ) та газоізолювані лінії електропередачі. Вони забезпечують високу ефективність, відповідають суворим екологічним стандартам і надають максимальну гнучкість

у використанні. Сучасні інженерні рішення в проектуванні КРПЕ дозволили суттєво зменшити простір, необхідний для їх розміщення, а також знизити витрати матеріалів і обсяг використаного елегазу SF₆. При цьому були значно покращені захисні властивості обладнання.

У випадку неоднорідного електричного поля виникають локальні перенапруження, які спричиняють коронні розряди. Під впливом цих розрядів елегаз розкладається, утворюючи нижчі фториди (SF₂, SF₄), що мають шкідливий вплив на матеріали, використані в конструкціях КРПЕ. Для запобігання виникненню коронних розрядів усі поверхні металевих елементів КРПЕ та екранів повинні мати чисту та гладку текстуру без значної шорсткості чи задирок. Це вимога є обов'язковою, оскільки забруднення, пил і металеві частки можуть створювати локальні напруження електричного поля, що знижує електричну міцність елегазової ізоляції КРПЕ.

Таким чином, завдяки високій електричній міцності елегазу можна зменшити ізоляційні проміжки та відстані при низькому робочому тиску елегазу, що, у свою чергу, дозволяє знизити масогабаритні характеристики електротехнічного обладнання.

Підсумовуючи використання елегазу як ізоляційного середовища, можна відзначити, що висока пробивна напруга шестифтористої сірки забезпечує її роль електричного газу. Відомо, що при нормальному тиску пробивна напруга елегазу становить 89 кВ/см, що майже втричі перевищує показник для повітря. Саме завдяки цій властивості елегаз активно і ефективно використову-

ється як ізоляційний матеріал у різних електричних установках середньої та високої напруги.

Оскільки елегаз не є токсичним, він відноситься до 4 класу небезпеки, що вказує на його малу небезпеку для здоров'я. Цей газ не має ані кольору, ані запаху, а також володіє високими охолоджувальними властивостями. Окрім того, елегаз є значно важчим за повітря – його вага в п'ять разів більша. Завдяки таким характеристикам елегаз використовують також у системах газового пожежогасіння [11].

Завдяки високим охолоджувальним властивостям, підвищеній пожежній безпеці та хімічній стійкості, використання елегазу в електроустановках дозволяє збільшити струмове навантаження на 25 % порівняно з традиційною повітряною ізоляцією, навіть при нормальному тиску. Якщо тиск підвищується, електрична міцність також зростає, і за певних умов вона може перевищити аналогічні показники для рідких та твердих діелектриків.

Попри численні переваги, елегаз має і певні недоліки. Зокрема, при підвищенні тиску та зниженні температури елегаз може переходити з газоподібного стану в рідкий. Цю проблему вдалося вирішити шляхом змішування чистого елегазу з іншими газами, які переходять у рідку фазу при значно нижчій температурі, хоча вони і мають меншу електричну міцність. Наприклад, при додаванні азоту до елегазу, суміш, що складається з 30 % азоту і 70 % елегазу, переходить у рідкий стан при тиску 8 МПа та температурі -45°C . Однак такі добавки призводять до зниження електричної міцності ізоляційного середовища.

Щоб уникнути переходу елегазу в рідку фазу, застосовується його підігрів. Це просте рішення дозволяє використовувати елегаз у закритих розподільчих пристроях, оснащених опаленням. Для електроустановок на відкритому повітрі також необхідна система підігріву. Крім того, комбіноване використання газових сумішей різного складу та підігріву забезпечує оптимальні умови для експлуатації в різних кліматичних зонах.

У якості прикладу розглянуто КРУЕ SafeRing, виробництва концерну ABB [12, 13], призначене для вторинного розподілу електричної енергії, здебільшого в міських електричних мережах, побудованих за кільцевим принципом. Це обладнання працює при напрузі 6–10 кВ і підтримує відносно низькі робочі струми збірних шин (до 630 А). Основною метою КРУЕ SafeRing є забезпечення захисту трансформаторів потужністю до 630 кВА. Система SafeRing представляє собою комплекс герметичних блоків, виготовлених із нержавіючої сталі,

в яких розміщуються два, три або чотири модулі з електричними пристроями. Це можуть бути трипозиційні перемикачі, вакуумні силові вимикачі, плавкі запобіжники, заземлювачі та пристрої для захисту від коротких замикань. Усі ці апарати знаходяться в герметичному контейнері (апаратному відсіку А – рис. 4), заповненому елегазом.



Рис. 4. КРУЕ SafeRing: А – апаратні відсіки, Б – відсік управління, В – кабельний відсік

У систему SafeRing входять чотири види модулів, кабельними виводами, що закінчуються знизу, а зверху приєднуються до загальної живильної шини.

Основні технічні характеристики КРУЕ SafeRing наведено у табл. 1.

Таблиця 1
Основні технічні характеристики SafeRing

Параметр	Значення
Номинальна напруга, кВ	12–24
Номинальний струм збірних шин, А	630
Номинальний струм відключення силового вакуумного вимикача, кА	16–21
Номинальний струм термічної стійкості 3 с, кА	21
Номинальний струм електродинамічної стійкості, кА	52,5
Габаритні розміри:	
– ширина, мм	325
– глибина, мм	765
– висота, мм	1336
Маса	320–380

Хоча елегаз не є токсичним, він має властивість накопичуватися на нижніх поверхнях підстанцій через свою велику щільність, що в п'ять разів перевищує щільність повітря. Це може призвести до утворення зон з високою концентрацією елегазу, який витісняє кисень і становить небезпеку для людей. Тому при проєктуванні таких підстанцій згідно з ПУЕ обов'язково враховуються вентиляційні системи для забезпечення безпеки.

Успіх використання елегазових вимикачів можна пояснити такими перевагами:

- Простота конструкції дугогасної камери, хоча вона і складніша порівняно з вакуумною камерою.
- Автономність у роботі, що не вимагає втручання людини для експлуатації.
- Здатність до досягнення високої ефективності при вимиканні струму короткого замикання до 63 кА.
- Можливість експлуатації без потреби в поповненні елегазу протягом 20 років.
- Здатність створювати компактні розподільчі пристрої.
- Висока надійність за відносно невисокою ціною.

Елегаз не має шкідливого впливу на метали, пластики та інші матеріали, що використовуються у конструкціях елегазового обладнання. Однак, незважаючи на численні переваги використання елегазової ізоляції, існують певні недоліки та актуальні проблеми, пов'язані з її застосуванням [14].

Однак, попри всі переваги використання елегазової ізоляції, існують певні недоліки та актуальні проблеми, пов'язані з її застосуванням, зокрема:

1. Елегаз належить до категорії газів, які сприяють утворенню так званого «парникового ефекту» [15]. Елегаз SF₆ є найсильнішим із відомих на сьогодні парникових газів. Його вплив у 23 900 разів потужніший, ніж у такої ж кількості діоксиду вуглецю (CO₂), оскільки він ефективніше затримує інфрачервоне випромінювання, і зберігається в атмосфері до 3200 років. Викид 1 кг елегазу в навколишнє середовище еквівалентний за впливом на парниковий ефект викиду 23 900 кг діоксиду вуглецю (CO₂). Крім того, елегаз починає розкладатися при температурі близько 500 °C, тоді як при 20 °C його розкладання в атмосфері триває понад 3200 років.

Елегаз може непередбачено потрапляти в навколишнє середовище через аварійні ситуації або витіки, що виникають на різних етапах експлуатації електрообладнання. У деяких випадках

причиною витоків стає застаріле обладнання. Крім того, викиди газу можуть відбуватися під час його виробництва, монтажу, технічного обслуговування, ремонту або утилізації обладнання, яке виводиться з експлуатації.

2. Токсичність речовин, що утворюються при розпаді елегазу. У обладнанні, яке використовує елегаз, його частковий розпад може відбуватися як під час нормальної роботи та виконання комутаційних операцій, так і в умовах аварійних режимів або виникнення електричних дуг. Сучасні конструкції електрообладнання з елегазовим середовищем часто застосовують автокомпресійний принцип гасіння електричної дуги. Під впливом високих температур, що виникають під час горіння дуги, елегаз розкладається, утворюючи різні хімічні сполуки. Для нейтралізації продуктів розкладання елегазу використовуються спеціальні адсорбуючі матеріали, такі як активовані оксид алюмінію, цеоліт та інші [16]. Окрім того, у конструкції електрообладнання інтегрують молекулярні сита. Оксид алюмінію виконує додаткову функцію осушення елегазу, що дозволяє зберігати його початкові електричні характеристики.

Для зменшення техногенного впливу елегазу на навколишнє середовище його можна повторно використовувати. Для цього газ відкачують зі спеціальних наповнених відсіків, очищають за допомогою спеціального обладнання, контролюють його якість, і лише після цього застосовують повторно.

3. Як відомо [16], елегаз приблизно в 5 разів важчий за повітря, тому в об'єктах, де використовується обладнання з його застосуванням, важливо дотримуватись правил безпеки. Особливу увагу слід приділяти входу в замкнуті простори, розташовані нижче рівня землі, такі як підвали чи тунелі, де можливе скупчення елегазу. Це необхідно для запобігання ризику витіснення повітря та заміщення кисню елегазом.

Якщо вміст кисню в повітрі, що вдихається, знижується нижче 17 % і/або вміст елегазу перевищує 19 %, це створює значну загрозу задухи для персоналу, що працює в таких умовах. Найбільш небезпечними є ділянки, розташовані нижче рівня землі та з поганою або відсутньою вентиляцією, такі як кабельні камери, кабельні поверхи, тунелі, колодязі, канали, дренажні системи, оглядові колодязі, підвали та інші подібні приміщення.

4. Складність конструкцій пристроїв з елегазом. Відомо, що в елегазових вимикачах під час їх відключення потік газу забирає тепло від електричної дуги, що дозволяє погасити її під

час першого проходження струму через нульове значення. Потреба в розробці механізму дуття зумовлює складність конструкції керуючого механізму пристрою, що, в свою чергу, збільшує його вартість.

Сучасні конструкції елегазових розподільних пристроїв не лише компактні та ефективні у використанні, але й відзначаються зниженими вимогами до енергоспоживання під час виробництва, раціональним використанням ресурсів і більш тривалим терміном служби. Додатково, ці системи вимагають мінімальних витрат на технічне обслуговування, що робить їх вигідними інвестиціями в майбутнє. Таким чином, їх застосування є важливим внеском у підвищення енергоефективності, якості та надійності енергопостачання в цілому.

Традиційним підходом до вирішення цієї проблеми є вжиття заходів для зменшення викидів елегазу, вдосконалення конструкцій обладнання, навчання персоналу правильному поводженню з елегазом, а також обмеження використання елегазу через його змішування з іншими газами, такими як азот.

Більш радикальним підходом є повна відмова від використання елегазу, як це, наприклад, зробила компанія Schneider Electric, припинивши випуск розподільних пристроїв середньої напруги з елегазовою ізоляцією. На їх місце прийшло так зване SF₆-free обладнання, яке використовує очищене осушене повітря під тиском 8–9 атмосфер як ізоляційне середовище. Однак, ймовірно, для повної відмови від елегазу в галузі електроенергетики та електромеханіки знадобиться чимало часу, і процес не завершиться за один рік.

Як свідчить практика, в сучасній енергетиці значно зменшилися рівні витоків елегазу як під час експлуатації, так і на етапах виробництва, випробувань та введення в експлуатацію. Очікується, що ринок SF₆-free обладнання буде активно зростати, і виробники продовжуватимуть роз-

робку нових технологій для ще більшого спектра завдань і для вищих рівнів напруги. Крім того, варто зазначити, що в майбутньому будуть створені вакуумні вимикачі та вакуумні камери (переривники) для високих класів напруги.

Висновки. У статті здійснено детальний аналітичний огляд сучасних розподільних пристроїв середньої напруги в діапазоні 6–35 кВ, що використовують елегазову ізоляцію, від провідних світових виробників. Вивчено основні технічні характеристики, переваги та недоліки цих пристроїв, а також порівняння з традиційними розподільними пристроями України, які застосовують повітряну ізоляцію.

Акцентовано увагу на енергетичній ефективності, надійності, компактності та безпеці елегазових розподільних пристроїв, а також на можливостях їх застосування в умовах сучасного енергетичного ринку. Крім того, розглянуто економічні аспекти переходу на нові технології, зокрема вартість обслуговування та технічного підтримання таких пристроїв.

Визначено перспективи розвитку та адаптації цих технологій в Україні, з урахуванням інфраструктурних особливостей та потреб національної енергетичної системи.

Загалом, в довгостроковій перспективі повна відмова від використання елегазу, ймовірно, є єдиним ефективним способом подальшого зменшення його викидів. З огляду на сучасні дослідження та розробки, це здається технічно можливим для електроенергетики. Однак такий шлях розвитку є високовартісним і вимагає підтримки як державних органів, так і зацікавленого бізнесу.

Необхідно підтримувати та прискорювати перехід до такого розвитку, ставити амбіційні цілі та завдання, орієнтуючись на майбутнє, доки нові електрообладнання не стануть вільними від елегазу, а застаріле елегазове обладнання, яке ще використовується, не буде замінено на сучасне SF₆-free обладнання та утилізоване.

Список літератури:

1. A. Boskovic et al. Sulphur hexafluoride in modern medium-voltage switchgear: advantages, hazards, and environmental impact. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2024. Vol. 89, № 5. P. 693–704. DOI: <https://doi.org/10.2298/jsc231203008b>.
2. Зарубіжний досвід енергетичної статистики міжнародних організацій (МЕА, Євростат, ООН). Нормативно-правове забезпечення та автоматизовані системи збору і оброблення інформації енергетичної статистики. Київ, 2018. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/5. – Statystyka-energetyki.pdf>
3. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.energobalans.com/>.
4. Regulation (EU) No. 517/2014 of the European Parliament and of the Council on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No. 842/2006. *Official Journal of the European Union*. 2019. 20 May. P. 195–230. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur133686.pdf>.

5. Yeckley R. N., Colclaser R. G. First SF6 breaker design: Westinghouse engineers tell the inside story [History]. IEEE Power and Energy Magazine. 2018. Vol. 14, no. 3. P. 80–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/mpe.2016.2525238>
6. Franck C. M., Chachereau A., Pachin J. SF6-free gas-insulated switchgear: current status and future trends. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2021. Vol. 37, no. 1. P. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.1109/mei.2021.9290463>.
7. Purnomoadi A. P., Rodrigo Mor A., Smit J. J. Spacer flashover in Gas Insulated Switchgear (GIS) with humid SF6 under different electrical stresses. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 116. 105559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105559>.
8. SIEMENS AG. Switchgear Type 8DH10 up to 24 kV, Gas-Insulated, Extendable. Medium-Voltage Switchgear. Catalog HA 41.11. 2018. 44 p. URL: <http://www.infrastructure>
9. ABB. SafeRing/ SafePlus 36 Gas Insulated Secondary Switchgear. 2022. 94p. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD006114%20GB&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=B>.
10. B. Pan. Green gas for grid as an eco-friendly alternative insulation gas to SF6: a review Applied Sciences. 2020. Vol. 10, no. 7. 2526. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072526>
11. J. Owens et al. Recent development of two alternative gases to SF6 for high voltage electrical power applications. Energies. 2021. Vol. 14, no. 16. 5051. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14165051>.
12. B. Pan, G. Wang, H. Shi, J. Shen, H.-K. Ji, and G.-S. Kil, “Green gas for grid as an eco-friendly alternative insulation gas to SF6: A review”, Applied Sciences, vol. 10, no. 7, Apr. 2021, Art. no. 2526, DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072526>
13. J. Owens, A. Xiao, J. Bonk, M. DeLorme, and A. Zhang. Recent development of two alternative gases to SF6 for high voltage electrical power applications, Energies, vol. 14, no. 16, Aug. 2021, Art. no. 5051, doi: <https://doi.org/10.3390/en14165051>
14. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс (видання друге): навчальний посібник. Харків. 2018, 400 с.
15. Розподільні пристрої з елегазовою ізоляцією SafeRing & SafePlus: безпечність, надійність, компактність. Електротехніка та електромеханіка. 2020, № 6. С. 74–78.
16. IEC 60529. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code).

Pantielieieva I.V. PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ELEGAS ELECTRICAL EQUIPMENT IN ENERGY SYSTEMS

A topical issue of our time is the study of the possibilities of using SF6, in particular its unique physicochemical properties, which make it one of the most effective insulating media for electrical equipment. At the same time, the relevance of its use is due to the need to ensure the reliability and safety of energy systems, in particular high-voltage equipment, in conditions of increased requirements for compactness and efficiency, as well as restrictions related to its impact on the environment. The article systematizes aspects of the development of SF6, considers the main stages of the introduction of SF6 medium as insulation for electrical equipment. Comparative characteristics of the electrical strength of various insulating substances are presented. Modern examples of the use of SF6 in medium and high voltage circuit breakers, as well as its mixtures in gas insulation of high-voltage power transmission lines, are analyzed. The prospects for the development of the use of SF6 in gas-insulated power transmission lines are determined, their design features and examples of practical use are given.

A topical issue of our time is the study of the possibilities of using SF6, as well as the limitations associated with its impact on the environment. The article systematizes aspects of the development of SF6, considers the main stages of the introduction of SF6 as an insulation medium for electrical equipment. Comparative characteristics of the electrical strength of various insulating substances are presented. Toxic decomposition products of SF6, which pose a significant threat, are analyzed, as well as its properties as a greenhouse gas. The possibilities of reducing the volume of SF6 use by switching to gas mixtures are substantiated. Modern examples of the use of SF6 in medium and high voltage circuit breakers, as well as its mixtures in gas insulation of high-voltage power transmission lines, are analyzed. Prospects for the development of the use of SF6 in gas-insulated power transmission lines are determined, their design features and examples of practical use are given.

Key words: SF6, electrical strength, insulating medium, switchgear, electrical equipment, SF6 circuit breaker, SF6 insulated substation, greenhouse gas, environmental requirements.