

О. М. ГРЕЧКО

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕГАЗУ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ. ІСТОРИЧНЕ МИНУЛЕ, СУЧАСНИЙ СТАН ТА МАЙБУТНІ ПЕРСПЕКТИВИ

Актуальним питанням сьогодення є аналіз можливостей щодо застосування елегазу та його ймовірних обмежень використання з точки зору шкідливого впливу на екологію навколишнього середовища. У статті на основі вільних джерел інформації систематизовано історичні факти щодо розвитку елегазу, основні етапи становлення елегазового середовища у якості ізоляції електротехнічного обладнання. Наведено порівняльні характеристики електричної міцності для різних ізоляційних речовин. Проведено дослідження щодо сучасних прикладів застосування елегазу у відмикачах середньої та високої напруги. Проаналізовано приклади застосування елегазу та його сумішей у якості газової ізоляції для високовольтних ліній електропередачі. Показано, що перспективним напрямком розвитку застосування елегазу є його використання у лініях електропередачі із газовою ізоляцією. Наведено конструктивні особливості та приклади практичного застосування високовольтних ліній електропередачі із газовою ізоляцією. Визначено особливості застосування елегазової ізоляції в електроустановках різних класів напруги. Проаналізовані актуальні екологічні проблеми, пов'язані із використанням елегазу та встановлено ймовірні напрями їх подолання. Розглянуто елементи продуктів розкладання елегазу, які є токсичними і являють найбільшу небезпеку. Наведено характеристики елегазу як парникового газу та показано перспективні шляхи зменшення його застосування. Встановлено, що за рахунок використання не чистого елегазу, а газових сумішей на його основі можна суттєво зменшити відсоток використання елегазу. Встановлено перспективні напрями подальшого розвитку газового ізоляційного середовища для електрообладнання без використання елегазу.

Ключові слова: елегаз, електрична міцність, ізоляційне середовище, розподільний пристрій, електротехнічне обладнання, парниковий газ, екологічні вимоги.

О. М. GRECHKO

APPLICATION OF SULFUR HEXAFLUORIDE IN ELECTRICAL ENGINEERING. HISTORICAL PAST, CURRENT STATE AND PROSPECTS IN FUTURE

A pressing issue today is the analysis of the possibilities of using SF₆ gas and its possible limitations of use from the point of view of harmful effects on the environment. The article, based on free sources of information, systematizes the historical facts of the development of SF₆ gas, the main stages of the formation of the SF₆ gas environment as insulation for electrical equipment. Comparative characteristics of electrical strength for various insulating substances are presented. Research has been carried out on modern examples of the use of SF₆ gas in medium and high voltage circuit breakers. Examples of the use of SF₆ gas and its mixtures as gas insulation for high-voltage power lines are analyzed. It is shown that a promising direction for the development of SF₆ gas is its use in gas-insulated power lines. Design features and examples of practical application of high-voltage gas-insulated power lines are presented. The features of using SF₆ insulation in electrical equipment of different voltage classes are determined. Current environmental problems associated with the use of SF₆ gas are analyzed and possible directions for overcoming them are established. The elements of SF₆ gas decomposition products that are toxic and pose the greatest danger are considered. The characteristics of SF₆ gas as a greenhouse gas are given and promising ways to reduce its use are shown. It has been established that by using not pure SF₆ gas, but gas mixtures based on it, it is possible to significantly reduce the percentage of SF₆ gas use. Promising directions for further development of gas insulating medium for electrical equipment without the use of SF₆ gas have been established.

Keywords: SF₆ gas, electrical strength, insulating medium, switchgear, electrical equipment, greenhouse gas, environmental requirements.

Вступ. Елегаз, або гексафторид сірки, або шестифториста сірка SF₆, є відомим у світі ізоляційним середовищем, що вже протягом майже 70 років широко застосовується для електротехнічного обладнання середньої та високої напруги [1–5]. На превеликий жаль, на сьогодні немає інформації, щодо промислового виробництва ані елегазових відмикачів (англ. – circuit-breakers), ані комплектних розподільних пристроїв із елегазовою ізоляцією (КРПЕ) вітчизняними електротехнічними компаніями – по крайній мірі така інформація у відкритому доступі відсутня. Не так давно виняток становили КРПЕ із елегазовою ізоляцією на номінальну напругу 35 кВ виробництва Рівненського заводу високовольтної апаратури (РЗВА), який у 2010 р. на виставці ELCOM-2010 (м. Київ) презентував дане обладнання, але натепер його випуск зупинено і на сайті компанії немає жодної інформації щодо його виробництва та можливості продажі замовникам.

Технічні рішення серед провідних світових електротехнічних компаній на сьогоднішній день в більшості випадків спрямовані на вдосконалення

конструкцій КРПЕ за рахунок об'єднання функціоналу різних електричних апаратів в єдиному модулі (наприклад, об'єднання функцій вимикача (англ. – switch), роз'єднувача і уземлювача в одному апараті) шляхом розробки КРПЕ із розміщенням всіх трьох фаз у одній оболонці. Такі технічні рішення дозволяють зробити електричну апаратуру більш компактною, а також зменшити необхідні для розміщення КРПЕ площі та території приміщень, і, як наслідок, підвищити загальні техніко-економічні характеристики.

Також світовими корпораціями ведеться активний пошук можливості заміни елегазу, що, як відомо [6], відноситься до парникових газів, на суміші елегазу із іншими газами, або ж взагалі відмови від нього і використанню у обладнанні інших екологічних видів газів та сумішей.

Отже, **метою статті** є аналіз історичних етапів розвитку елегазу як ізоляційного середовища, дослідження сучасного стану питання та його перспектив у майбутньому з точки зору шкідливого впливу на навколишнє середовище.

© О. М. Гречко, 2024

Історія відкриття елегазу та початок його використання в електротехніці. Гексафторид сірки (англ. – sulfur hexafluoride) або ж шестифториста сірка SF_6 була вперше описана та отримана відомими французькими хіміками Анрі Муассаном (Ferdinand Frederic Henri Moissan, рис. 1, фото зліва) та Полом Лебе (Paul Marie Alfred Lebeau, рис. 1, фото справа) у 1901 р. під час спільного проведення досліджень із вивчення хімічних властивостей фтору у Парижі у лабораторії Faculty of the School of Pharmacy [2, 3].



Рисунок 1 – Фото Анрі Муассана (1852–1907) (ліворуч) та Поля Лебе (1868–1959) (праворуч)

Фтор, що був синтезований електролізом, вступає у взаємодію із сіркою, і у результаті такої екзотермічної реакції було отримано стійкий газ. Через 5 років у 1906 р. А. Муассану була присуджена найвища нагорода – Нобелівська премія у галузі хімії «за великий обсяг виконаних ним досліджень та за отримання елемента фтору».

У центрі молекули елегазу SF_6 (рис. 2) розміщується атом сірки S, а на рівній відстані від нього у вершинах правильного октаедра розташовуються 6 атомів фтору F₆. Така будова визначає досить високу ефективність захоплення вільних електронів молекулами фтору, їх відносно велику довжину вільного пробігу та слабку реакційну здатність. Саме тому елегаз має високе значення електричної міцності. Також іншими відмінними характеристиками елегазу є висока теплоємність та значний коефіцієнт теплового розширення. Отже, наведені характеристики дали можливість застосовувати елегаз у якості доволі ефективного дугогасильного, охолоджуючого та одночасно електроізоляційного середовища.

Що стосується словосполучення «гексафторид сірки», то у вітчизняній літературі з електротехніки воно практично не зустрічається. Натомість, у нас поширеним є такий термін як «елегаз», який, до речі, знаходиться у звичайному обігу тільки в країнах колишнього СРСР, а ось за кордоном взагалі не використовується [3].

Власне така назва – «елегаз» – походить від скорочення словосполучення «електричний газ». Його було запропоновано до використання у 30-х роках ХХ століття нашим співвітчизником, відомим фізиком Гохбергом Борисом Михайловичем (рис. 3), який, до

того ж, був і членом-кореспондентом АН УРСР. Саме Б. М. Гохберг вперше сформулював допущення про можливість застосування елегазу як ізоляційного середовища в електрообладнанні високої напруги. Завдяки дослідженням проф. Гохберга, які були виконані у Ленінградському фізико-технічному інституті до II Світової Війни, саме СРСР мав пріоритет щодо використання елегазу у високовольтних апаратах. Наприклад, авторське свідоцтво на високовольтний апарат із використанням елегазу було оформлено ще у далекому 1942 р.

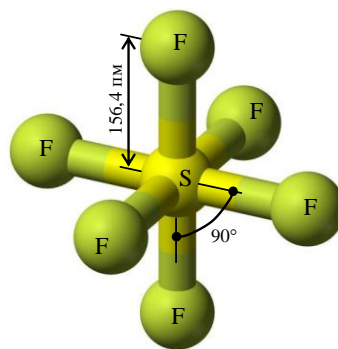


Рисунок 2 – Модель молекули гексафториду сірки SF_6



Рисунок 3 – Борис Михайлович Гохберг (1907–1994), який вперше дослідив ізоляційні властивості елегазу

Що стосується закордонних розробок, то перші дослідження із практичного використання елегазу були проведені у 1937 р. компанією General Electric [7]. А вже у 1939 р. був запатентований принцип використання елегазу для ізоляції високовольтних кабелів та конденсаторів. Після завершення II Світової Війни застосування елегазу набуло ще більших промислових масштабів. Так, наприклад, у 1960 р. було організовано серійне виробництво елегазу для будівництва електричних станцій у США та Європі. У цей самий час з'являються і перші розробки комутаційних апаратів у компанії Merlin Gerin для високої (35–230 кВ) та надвисокої (більше 230 кВ) напруги із застосуванням елегазу у якості як ізоляційного, так і дугогасильного середовища. У 1964 р. на замовлення від компанії EDF (Франція) розпочато проектування першої у світі електричної станції із елегазовою ізоляцією, яка була введена у експлуатацію у 1966 р. неподалік Парижу. За іншими джерелами [8] перший розподільний пристрій із

елегазовою ізоляцією на номінальну напругу 170 кВ було все ж встановлено у центрі Цюріха у 1966 р.

Але, звичайно ж, власне головне не знання точної дати початку промислового використання елегазу у розподільних пристроях, а те, що, немов сніжний ком, у багатьох країнах світу (Китай, Бразилія, Канада тощо) починається триумфальна хода елегазу у електротехнічній промисловості. Це, звичайно ж, пов'язано із наведеними вище вагомими перевагами цієї речовини, головною з яких, щодо використання саме у комплектних розподільних пристроях, є його надвисокі ізоляційні характеристики.

Електрична міцність елегазу в залежності від таких зовнішніх факторів, як тиск та температура, у декілька разів вища, ніж електрична міцність інших ізоляційних середовищ (рис. 4 і 5). Значна електрична міцність елегазу дозволяє суттєво зменшити ізоляційні проміжки та відстані в електроустановках середньої та високої напруги, що, у свою чергу, надає можливості значно зменшити габаритні розміри самого комплектного розподільного пристрою. Дана можливість має вагомe і вирішальне значення, наприклад, для таких об'єктів і країн, у яких розміри площі без перебільшення мають вагу золота (наприклад, у Японії) – це промислові підприємства, торговельні центри, офісні приміщення, термінали вокзалів та аеропортів тощо.

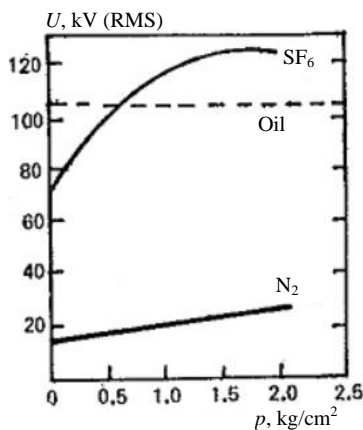


Рисунок 4 – Електрична міцність елегазу, трансформаторного масла та азоту у залежності від тиску

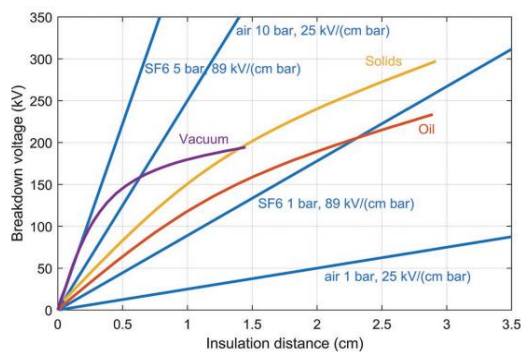


Рисунок 5 – Електрична міцність для різних середовищ [9]

Використання електроустановок із елегазовою ізоляцією на відкритій місцевості у відкритих

розподільних пристроях надвисокої та високої напруг також може суттєво скоротити займані площі.

Історія значного успіху КРПЕ, яка почалася майже 60 років тому, у теперішній час знов переживає зростання. Сучасні конструкції КРПЕ здатні задовольнити багатьом викликам та вимогам з боку енергетичних потреб промисловості, яке на сьогодні вимагає значних енергетичних затрат.

Як показує статистика [1, 3, 7], на теперішній час світова потреба у електричній енергії збільшується приблизно на 2–3 % щороку. Значне збільшення населення, особливо у країнах Азії, збільшення середньої тривалості життя та загальна тенденція до більш значної урбанізації – ось тільки з деяких причин такого швидкого зростання. Таким чином, як наслідок, існує необхідність у передачі все більшої та більшої кількості електроенергії до територій великих міст, передміських поселень, промислових підприємств із якомога меншими втратами.

Одним із наслідків даного сценарію є той факт, що в даний момент здійснюється активна модернізація мереж електропередачі у країнах Європи зі значень 220 кВ до 380 кВ. У великих мегаполісах зводяться все більше і більше розподільних підстанцій, які розраховані на надвисоку напругу понад 380 кВ. Таку тенденцію також можна простежити і у світових мегаполісах, наприклад, у Шанхаї або Сіднеї. Аж до кінця 60-х років ХХ століття у Німеччині зводились тільки традиційні підстанції із повітряною ізоляцією. Однак зростання значень напруги означає, що для улаштування таких підстанцій будуть необхідні значні площі, які дуже швидко стають дефіцитом у щільно населених районах та містах. Власне, ось чому розроблені біля 60-ти років тому підстанції із елегазовою ізоляцією стають на теперішній час все більш актуальними. Залежно від рівня робочої напруги, як показує світова практика, елегазовим підстанціям потрібно значно менше місця, ніж їх аналогічним підстанціям із повітряною ізоляцією. Елегазові підстанції є нечутливими до характеристик навколишнього середовища та можуть бути розміщені в дуже обмежених площах, наприклад, у громадських будівлях, офісних будівлях, спортивних стадіонах тощо. Їх навіть можна улаштувати під поверхнею громадських майданчиків для відпочинку та розваг.

Використання елегазу у високовольтних відмикачах. Відомо [3], що в діапазоні середньої напруги 6–35 кВ переважають вакуумні відмикачі, але із збільшенням напруги вже понад 35 кВ найбільш розповсюдженими вже стають саме відмикачі із елегазовою ізоляцією (рис. 6 та 7).

Відключення струмів у високовольтних відмикачах (більше 35 кВ) із елегазовою ізоляцією відбувається за рахунок розмикання контактів у середовищі елегазу, якій має високі діелектричні властивості у порівнянні із повітрям та маслом, і відмінну здатність щодо гасіння електричної дуги. Після розходження контактів електричний струм проходить скрізь дугу та переривається, коли дуга охолоджується потоком елегазу достатньої інтенсивності.

Потік елегазу, що впливає на електричну дугу, повинен бути здатним охолодити її настільки швидко, щоб температура між контактами відмикача знизилася від початкових 20000 К до менш ніж 2000 К всього через кілька сотень мікросекунд. Як відомо, необхідною умовою для успішного гасіння електричної дуги змінного струму та унеможливлення її повторного загоряння є більш швидке поновлення електричної міцності міжконтактного проміжку по відношенню до швидкості поновлення напруги на контактах апарата. Саме завдяки цьому стає можливим протистояти відновленню перехідної напруги на контактах після гасіння електричної дуги.



Рисунок 6 – Порівняння вакуумного відмикача (ліворуч) на напругу 36 кВ та елегазового відмикача (праворуч) на напругу 36 кВ внутрішньої установки



Рисунок 7 – Порівняння вакуумного відмикача (ліворуч) на напругу 36 кВ та елегазового відмикача (праворуч) на напругу 33 кВ зовнішньої установки

У 80-ті роки ХХ століття у відмикачах тиск, який був необхідний для гасіння дуги, створювався самим газом, який нагрівався за допомогою температури від тієї ж власне електричної дуги (це так звані автокомпресійні відмикачі).

Перші патенти щодо застосування елегазу у якості середовища для гасіння дуги були зареєстровані у 1938 році Віталієм Гроссе (компанія АЕГ) та, незалежно від нього, трохи згодом у США – у 1951 році дослідниками компанії «Westinghouse» Н. J. Lingal, Т. E. Browne, Jr. та А. Р. Strom [8].

Вперше елегаз SF₆ був застосований для переривання електричного струму у 1953 р., а вже у 1957 р. в елегазових відмикачах був використаний метод компресії, при якому відносно переміщення поршня та циліндра використовується для створення тиску, якого достатньо для гасіння електричної дуги через спеціальну форсунку, яка була зроблена із ізолюючого матеріалу [8].

При використанні даного методу тиск в основному збільшувався за рахунок стиснення газу. Перший же елегазовий відмикач із доволі значною здатністю до вимикання великих аварійних струмів був розроблений компанією «Westinghouse» у 1959 р. (рис. 8). Баковий елегазовий відмикач із номінальною потужністю у 10000 МВА був здатен вимикати струм 41,8 кА напругою 138 кВ та струм 37,6 кА напругою 230 кВ. Як на той час, ефективність відмикача була надзвичайно високою.

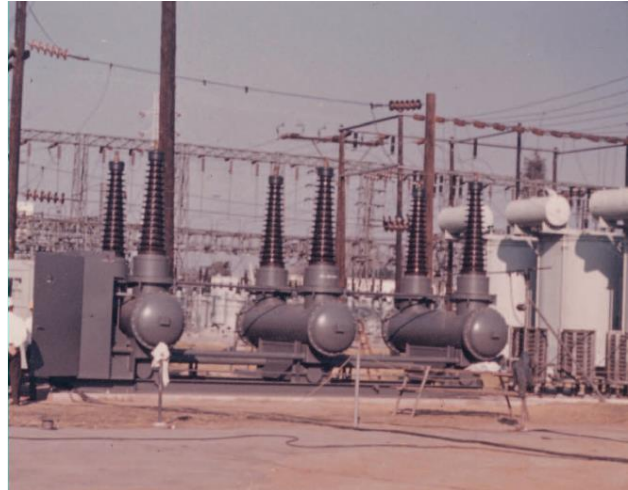


Рисунок 8 – Перший елегазовий відмикач виробництва компанії «Westinghouse» на напругу 230 кВ, встановлений на підстанції Brunner Island компанії Pennsylvania Power & Light Company (PP&L) у вересні 1960 р.

Перше реальне замовлення на елегазовий відмикач надійшло від компанії Pennsylvania Power & Light Company (PP&L). Елегазовий відмикач на напругу 230 кВ був встановлений на підстанції Brunner Island (рис. 8) у вересні 1960 р. [8]. Також перші два встановлені елегазові відмикачі номінальною напругою 138 кВ, 10000 МВА були змонтовані на підстанції Con Edison Hellgate у травні 1960 р. Однак на підстанції Con Edison Hellgate вже у лютому 1961 р. сталася аварія. Попередній негативний досвід подібних аварій на підстанції Con Edison Hellgate із відмовами масляних відмикачів або ж відмикачів із повітряною газовою під тиском ізоляцією свідчив, що зазвичай під час аварій відбувалося повне або практично повне руйнування відмикачів із неможливістю їх відновлення чи ремонту. А ось елегазовий відмикач було відремонтовано та повторно введено у експлуатацію вже через 2 дні! Таким чином, на основі такого не дуже приємного першого досвіду роботи з двома елегазовими відмикачами, компанія Con Edison Hellgate побачила перспективи їх застосування у майбутньому і розмістила перше вже насправді велике замовлення на елегазові відмикачі на 138 кВ (точна кількість, на жаль, не відома) [8].

Лінії електропередачі із елегазовою ізоляцією. Комбінування елегазових конструкторських ізоляційних рішень та засобів, які враховують застосування традиційної повітряної ізоляції, відоме під назвою гібридний дизайн або ж комбінована

технологія. У ряді випадків вона здатна надати суттєві переваги, такі як економія простору та застосування на надвисоких напругах. Наприклад, така комбінована технологія може охоплювати рівні напруги від 110 кВ до 1000 кВ. Вона була застосована на гідроелектростанції Yellow River Laxiwa у Китаї. Це перша електростанція в Китаї із використанням напруги у 800 кВ. Вона розташована на висоті приблизно 2500 м. У таких високогірних районах із надвисокою напругою та на великій висоті над рівнем моря використання звичайного кабелю із зшитого поліетилену було обмежене.

Також, іншим варіантом може бути, якщо у таких конструкціях основні елементи системи, такі як відмикачі, вимикачі, трансформатори струму та напруги, роз'єднувачі та уземлювачі будуть розміщені у відсіках комплектних пристроїв у елегазі та з'єднані із шиною живлення вже із повітряною ізоляцією за допомогою звичайних проводів у прохідних ізоляторах зовнішньої установки також у повітряній ізоляції. Завдяки модульному принципу побудови, практично всі можливі конфігурації розподільних пристроїв із елегазовими компонентами можуть бути впроваджені на підставі такого сучасного гібридного проектування.

Нові сучасні вимоги електроенергетики (більш високі значення напруги передавання, великі обсяги електричної енергії, екологічна стійкість тощо) також призводять до нових викликів та інженерних пошуків рішень для принципово нових способів транспортування електроенергії.

Це так звані Gas Insulated transmission Line (скорочено GIL) – лінії електропередачі із газовою ізоляцією [10]. GIL вперше були розроблені компанією Siemens. Дані лінії являють собою алюмінієву провідну трубку та алюмінієву закриваючу трубку, що заповнені ізоляційною газовою сумішшю. За допомогою такої технології можна забезпечити передачу потужностей до рівнів 3000 МВА. У випадках, де необхідні спеціальні нетрадиційні рішення, нова технологія GIL є більш економічною і екологічно раціональною альтернативою. У порівнянні із іншими системами передачі електроенергії, у цій системі втрати є нижчими, а випромінювання електромагнітного поля зменшено на практично 90%. Герметична конструкція GIL дозволяє їх розміщувати над землею або ж у надземних тунелях (рис. 9). Лінії GIL також можна прокладати безпосередньо і під землею. У цьому випадку буде економитись надземна площа, яка б для традиційного способу була необхідна для встановлення високовольтної повітряної лінії електропередачі.

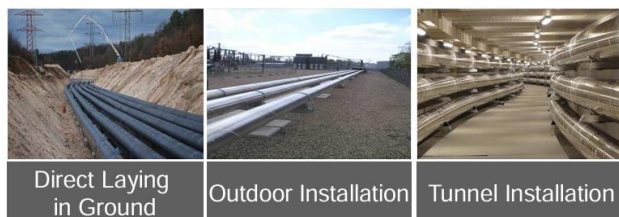


Рисунок 9 – Приклади розміщення систем GIL – пряме закопування у ґрунт, відкрите над землею та у тунелях під землею

GIL система змінного струму у м. Kelsterbach (Німеччина) напругою 420 кВ та струмом 3150 А з двома трифазними трубними системами, яка покриває відстань приблизно 900 м, являла собою на 2015 р. найбільшу протяжність підземних GIL, що були встановлені компанією Siemens (рис. 10). Для прокладки однофазної лінії труб загальною довжиною 5,4 км, близько 500 окремих модулів були поставлені та з'єднані між собою зварюванням вже на місці робіт. Модулі системи GIL встановлювалися та розміщувалися в ґрунт вздовж запланованого маршруту. Кожна з двох систем GIL володіє транспортною ємністю у обсязі 1800 МВА у робочому стані.



Рисунок 10 – GIL система змінного струму напругою 420 кВ та струмом 3150 А неподалік м. Kelsterbach (Німеччина)

У лініях GIL внутрішній провідник розташовується у металевому корпусі (трубі) завдовжки біля 15–20 м, приблизний діаметр якої становить 50–60 см (рис. 11). Секції з'єднуються між собою або зварюванням або фланцевим з'єднанням. Цей корпус утримується в центрі за допомогою дискових або опорних ізоляторів з литої епоксидної смоли. Для забезпечення електричної ізоляції труба заповнена ізоляційним газом під тиском 5–7 атм (це або чистий елегаз (активно застосовувався у період 1970–2000 рр.) чи його суміш (вже активно використовується після 2000 р.) з іншими газами, наприклад, у пропорції із азотом 80 % та елегазу 20 %) [10].

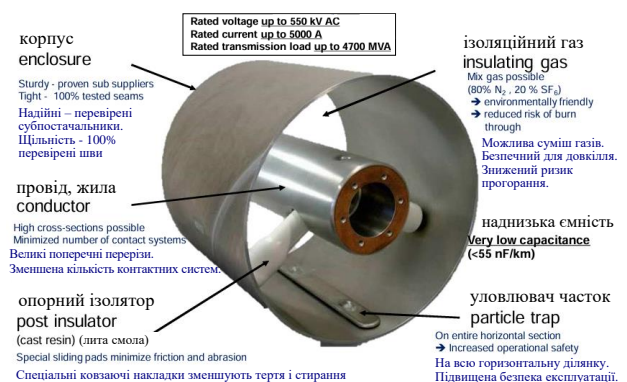


Рисунок 11 – Конструкція системи GIL

Компоненти системи GIL виробництва Siemens наведено на рис. 12:

1. Зовнішня оболонка – зазвичай алюмінієва труба діаметром близько 50–60 см із захисним покриттям лише у випадку безпосереднього підземного монтажу.

2. Внутрішній алюмінієвий провідник, поперечний переріз котрого залежить від значення струму та може складати, наприклад, 5340 мм², тобто діаметр провідника приблизно 82,5 мм.

3. Ізолятори із литої епоксидної смоли.

4. Газова ізоляція під тиском.

5. Додаткове зовнішнє покриття у випадку прямого закопування.

6. Компенсатори подовження труб та компоненти кутових переходів.

Зовнішній алюмінієвий корпус має також потенціал заземлення.

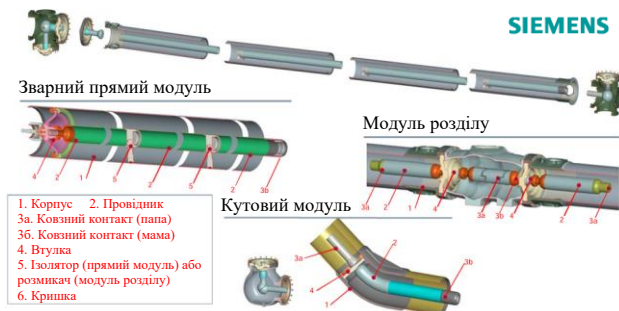


Рисунок 12 – Компоненти GIL системи виробництва Siemens та приклад їх монтажу під кутом 90° на гідроелектростанції Xiluodu Dam (Китай, є третьою за потужністю ГЕС у світі 13860 МВт) із довжиною GIL системи 12,5 км напругою 550 кВ потужністю 3950 МВА

У корпусі індуктується зворотний струм, що перевищує 99 % значення струму провідника. Через цей зворотний струм зовнішнє магнітне поле системи дуже слабке (рис. 13).

GIL поєднує у собі надійність одночасно із високою пропускною здатністю, малими втратами та низьким випромінюванням магнітних полів.

Порівняно із повітряними лініями електропередачі або традиційними підземними кабелями, електричне та магнітне поле GIL системи є дуже низьким. Системи GIL встановлюються у корпусах, які є закороченими з обох кінців і також надійно уземленими, тому зворотний струм через корпус майже такий самий високий, як і струм провідника, і, отже, результуюче магнітне поле за межами системи GIL доволі незначне.

У випадку прокладання системи у землі, а це є найчастішим випадком, GIL також задовольняє вимоги щодо ліній електропередач без будь-якого візуального впливу на навколишнє середовище чи місцевий ландшафт. Також систему GIL можна використовувати і для постачання електроенергії для задоволення

високих енергетичних потреб певних агломерацій та їх околиць.

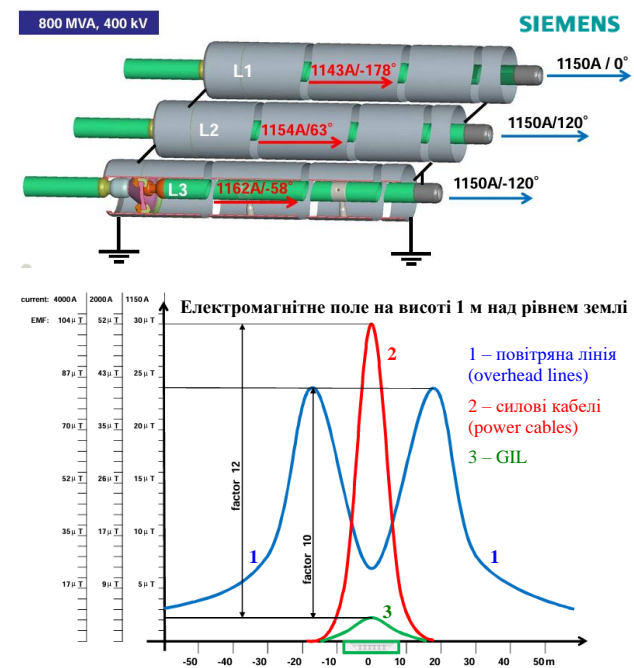


Рисунок 13 – З'єднання елементів GIL системи і рівні результуючого електромагнітного поля для різних видів ліній електропередачі

Пряме заглиблення системи GIL поєднує у собі переваги підземної прокладки кабелів з високою пропускною здатністю, яка є еквівалентною потужності повітряної лінії електропередачі. Переваги системи GIL:

1. Компенсація реактивної потужності. Через ємність, порівнянню з повітряними лініями, системи GIL зазвичай не потребують компенсації реактивної потужності.

2. Електромагнітні поля. Конструкція GIL забезпечує повне екранування електричних полів і набагато менших рівнів магнітних полів у порівнянні з традиційними кабелями та повітряними лініями.

3. Висока безпека. GIL є вогнестійкими та не містять легкозаймистих матеріалів, а також не виділяють шкідливих речовин у випадку пожежі. При коротких замиканнях всередині системи GIL можуть виникати токсичні продукти, але електрична дуга і ці продукти не виходять із відсіків GIL.

4. Термін експлуатації. Газ, що використовується як ізоляційне середовище, не старіє. У типовому практичному застосуванні можна очікувати подвоєння терміну служби порівняно зі звичайними кабелями.

5. Маршрутизація прокладання. Можливе виконання під кутом 90°, вертикальних та вигнутих ділянок із вузьким інтервалом перемичок.

Зараз GIL в основному використовуються на відносно малих відрізках на підстанціях, у густонаселених районах або для підключення промислових підприємств чи електростанцій до мережі.

Якщо резюмувати, то можна відмітити, що у минулому, наприклад, підстанції зводилися тільки з чисто функціональної точки зору, як споруди для цілєї розвитку інфраструктури, а нинішні конструкції заощаджують необхідний і дорогий простір шляхом розробки і впровадження високоєфективних технологій, таких як елегазові комплектні розподільні пристрої та газоізовані лінії електропередачі, які відповідають жорстким екологічним вимогам при максимальній гнучкості.

Особливості застосування елегазової ізоляції в електроустановках. Розвиток електричних підстанцій відбувається згідно із зростаючими вимогами. Жорсткі вимоги та високі стандарти щодо сучасних елегазових розподільних пристроїв засновані на суттєвому світовому досвіді їх експлуатації, що був накопичений за прийдешні роки, разом із численними новими розробками, що вводяться у життя виробниками електрообладнання.

Надсучасні конструкторські рішення щодо розробки КРПЕ призвели як до зменшення потрібного простору для їх розміщення, так і до використання мінімально необхідної кількості матеріалів та елегазу SF₆, при одночасному покращенні захисних характеристик.

В електричному полі електрообладнання елегаз має властивість захоплювати вільні електрони, що власне і є основою високої електричної міцності елегазу. Захоплюючи вільні електрони, елегаз утворює важкі іони, які є малорухомими, і які надзвичайно повільно прискорюються в електричному полі. Експлуатаційні характеристики елегазу значно поліпшуються у рівномірному електричному полі, тому для більшої експлуатаційної надійності конструкція окремих вузлів та елементів розподільних пристроїв має забезпечувати максимальну рівномірність та однорідність електричного поля.

У неоднорідному електричному полі виникають локальні перенапруження електричного поля, що викликають появу коронних розрядів. Під впливом і дією цих коронних розрядів елегаз розкладається, утворюючи при цьому у своєму середовищі нижчі фториди (SF₂, SF₄), які негативно впливають на конструкційні матеріали самої КРПЕ.

З метою запобігання появи коронних розрядів усі поверхні окремих елементів металевих деталей КРПЕ та екранів виконують із чистою і гладкою поверхнею, яка не повинна мати великої шорсткості та задирок. Обов'язковість щодо виконання цих вимог продиктована тим, що забруднення, пил та металеві частки також здатні створювати локальні напруженості електричного поля, а при цьому буде знижуватись електрична міцність елегазової ізоляції КРПЕ.

Отже, висока електрична міцність елегазу дозволяє зменшити ізоляційні проміжки та відстані при незначному робочому тиску елегазу, у результаті цього зменшуються масогабаритні показники електротехнічного обладнання. А це, у свою чергу, надає можливість зменшити габаритні розміри КРПЕ, що є вкрай важливим фактом для місцевостей, де кожен квадратний метр приміщення є дуже дорогим.

Тож, якщо підбити підсумок щодо використання елегазу у якості ізоляційного середовища, то можна сказати, що саме завдяки високому значенню пробивної напруги шестифториста сірка і стала називатися електричним газом. Відомо, що при нормальному тиску пробивна напруга елегазу дорівнює 89 кВ/см, що є майже втричі вище, ніж у повітря. Саме тому елегаз широко і успішно застосовується як ізоляційне середовище у різних типах електроустановок на середню і високу напругу.

Завдяки тому, що елегаз не є токсичною речовиною, то його відносять до 4 класу небезпеки, тобто до мало небезпечних хімічних речовин.

Елегаз також не має ані кольору, ані запаху, а також він володіє високою охолоджувальною здатністю, при цьому елегаз є дуже важким газом – він важчий в 5 разів за повітря. Такі властивості дозволяють застосовувати елегаз і у системах газового пожежогасіння.

Завдяки хорошій здатності до охолодження, високій пожежній безпеці та хімічній стійкості, застосування елегазу в електроустановках навіть за нормального тиску дозволяє підвищити струмове навантаження у порівнянні із традиційною повітряною ізоляцією приблизно на 25 %.

У випадку, якщо тиск буде збільшуватись, то відповідно буде зростати і електрична міцність, яка за певних обставин навіть може перевищувати аналогічні значення для рідких та твердих діелектриків.

На жаль, поруч із багатьма перевагами елегаз також володіє і рядом недоліків. Справа в тому, що при збільшенні тиску та при зниженні температури, елегаз із газуватого стану переходить у рідкий стан (рис. 14).

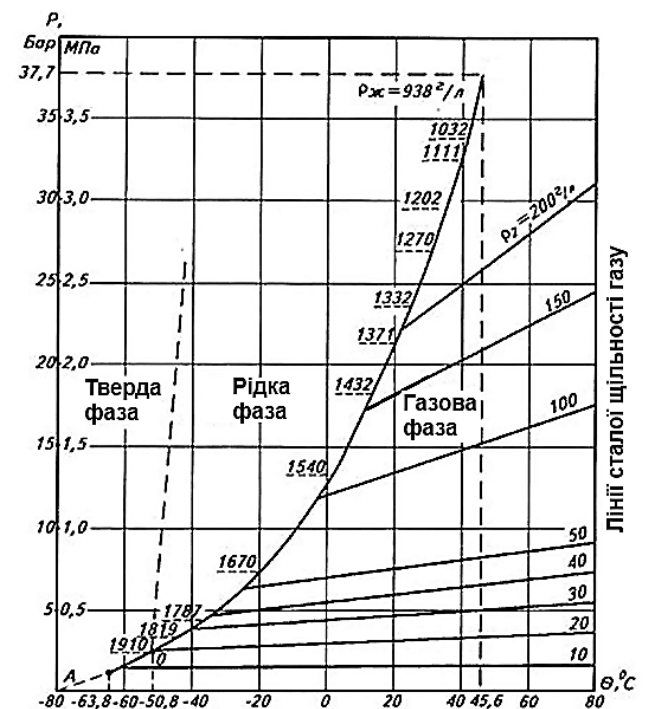


Рисунок 14 – Крива зрідження елегазу

Так, наприклад, при зменшенні температури до -30°C , елегаз перетворюється на рідину вже при

тиску 0,5 МПа. Дана проблема була вирішена за рахунок змішування чистого елегазу із іншими газами, які переходять у рідку фазу при значно меншій температурі, але вони на жаль мають і меншу електричну міцність. Так, наприклад, при додаванні азоту N_2 , отримувана суміш, яка складається із 30 % азоту і 70 % елегазу, буде переходити у рідку фазу вже при значному більшому тиску у 8 МПа та меншій температурі -45 °С. Звичайно, такі добавки інших газів неминуче призводить до зниження електричної міцності ізоляційного середовища.

Також для того, щоб уникнути перехід елегазу у рідкий стан застосовується і підігрів. Таке просте рішення дозволяє використовувати елегаз у закритих розподільних пристроях, що обладнані опаленням.

Для розміщення електроустановки на відкритому повітрі вона також має бути обладнана системою підігріву. Крім того, сумісне використання газових сумішей різного складу та підігріву, дає можливість отримання оптимального результату для різних кліматичних умов.

Як було сказано раніше, застосування елегазу вимагає значної чистоти внутрішніх поверхонь електрообладнання. Наявність задирок, виступаючих частин, пилу та інших забруднень неминуче буде призводити до локальних нерівномірностей електричного поля, що, в свою чергу, призведе до утворення коронних розрядів. Такі розряди викликать розкладання елегазу і зниження його ізоляційних характеристик.

Також варто пам'ятати, що хоча елегаз і не має токсичності, він здатен накопичуватися на нижніх поверхнях підстанцій завдяки тому, що він у п'ять разів важчий за повітря. При цьому працівник може спуститися на нижній поверх, де може спостерігатись висока концентрація елегазу, який витискає звідти кисень, що вже є небезпечним. Тому під час проектування таких підстанцій згідно ПУЕ обов'язково передбачаються вентиляційні системи.

Елегаз не придатний для вдихання, тому при його накопиченні у приміщенні, велика ймовірність виникнення дефіциту кисню. За [11] елегаз відноситься до 4-го рівня небезпеки (слабконебезпечні). Граничнодопустима концентрація елегазу у атмосфері виробничих приміщень складає 5000 мг/м³, а в атмосфері – $0,001$ мг/м³.

Доволі високі властивості елегазу як ізоляційного та дугогасного середовища призвели до його швидкого розповсюдження в електроустановках. У 70-ті роки ХХ століття елегаз став використовуватися і при розробці елегазових відмикачів середньої та високої напруги із високою здатністю до вимикання струмів короткого замикання.

Успішне впровадження елегазових вимикачів можна пояснити такими характеристиками:

1. Відносна простота конструкції дугогасної камери, хоча і більш складна у порівнянні із вакуумною камерою.

2. Автономна експлуатація, що не потребує участі людини.

3. Можливість отримання високої ефективності при вимиканні струму короткого замикання до 63 кА.

4. Можливість експлуатації без відновлення елегазу протягом строку служби у 20 років.

5. Можливість створення компактних розподільних пристроїв.

6. Висока надійність при відносно невисокій ціні.

За останні роки енергія, яка необхідна відмикачу для відключення, була зменшена у 5–7 разів. Це добре доводить те, що за ці роки досягнуто суттєвих результатів у галузі розвитку способів і методів відключення аварійних струмів за допомогою як вакуумних, так і елегазових вимикачів.

Також, на додаток до технічної сторони, інші параметри, такі як естетичність конструкцій, екологічна складова, архітектурне виконання, рівень захищеного спорудження та захист власності тощо, відіграють все більш і більш важливу роль при проектуванні таких підстанцій. Сучасні підстанції у ряді випадків мають майже зливатися з оточуючим середовищем, наприклад, у центральних частинах міст, і мають бути непомітними і естетичними з точки зору дизайну.

Електромагнітна сумісність останнім часом також відіграє все більш і більш важливу роль при проектуванні електрообладнання підстанцій. На практиці це призводить до того, що в даний час все більше комплектні високовольтні підстанції вже будуються під землею або ж інтегруються у комплекси нових будівель ще на етапі будівництва. Так, наприклад, ціла трансформаторна підстанція у комплексі з усіма необхідними додатковими системами була внесена до плану розвитку м. Доха (Катар).

Проблеми, пов'язані із використанням елегазу.

Наскільки відомо автору, елегаз наразі не заборонений до використання в електрообладнанні середньої та високої напруги в жодній країні.

Елегаз не чинить шкідливого впливу на метали, пластики, та інші матеріали, які застосовуються у конструкціях елегазового обладнання. Але, незважаючи на всі переваги від використання елегазової ізоляції, є ряд недоліків та насущних проблем від його застосування, а саме:

1. Елегаз відноситься до переліку газів, які викликають так званий «парниковий ефект» [6]. Елегаз SF_6 – найпотужніший із усіх на сьогодні відомих парникових газів. Він у 23900 разів ефективніше, тобто сильніше затримує інфрачервоне випромінювання, ніж така сама еквівалентна кількість діоксиду вуглецю CO_2 , та залишається в атмосфері протягом 3200 років.

Відомо [6], що елегаз є штучним парниковим газом із найвищим показником GWP – Global Warming Potential, тобто потенціалом глобального потепління, який дорівнює 23900. Це означає, що 1 кг елегазу, який буде викинуто у навколишнє середовище, викликає такий самий парниковий ефект, як викид 23900 кг діоксиду вуглецю CO_2 . До того ж елегаз розкладається за температури біля 500 °С, а за температури 20 °С

період його розкладання становить більш ніж 3200 років.

Міжурядова комісія ЄС із контролю за зміною світового клімату оцінила елегаз як такий газ, що представляє собою найбільшу загрозу із тих речовин, які впливають найбільше на навколишнє середовище, і як газ, який здатний призвести до збільшення парникового ефекту [6]. Його внесок у глобальне потепління у 23900 більше, ніж у діоксиду вуглецю CO₂ та згідно із Кіотським протоколом елегаз віднесено до газів із обмеженим застосуванням.

Зрозуміло, що спеціально ніхто не викидає елегаз у навколишнє середовище. Електроустановка, яке містить у своєму складі ізоляцію із застосуванням елегазу SF₆, спроектоване власне таким чином, щоб унеможливити викиди даного газу в атмосферу. Однак елегаз SF₆ може випадково потрапляти у навколишнє середовище з причини виникнення аварійних ситуацій, появи витоків газу на різних етапах роботи електрообладнання. У деяких випадках витіки можуть виникати через застаріле обладнання. Газ також може виділятися при виготовленні, монтажних роботах, технічному обслуговуванні або ж ремонті обладнання, а також при його виведенні із експлуатації.

2. Токсичність продуктів розпаду елегазу. У обладнанні, що має у своєму складі елегаз, у нормальному режимі роботи, при комутаційних операціях, а також у випадках виникнення аварійних режимів та появи електричних дуг відбуватиметься часткове розкладання елегазу SF₆. При цьому може спостерігатись виникнення твердих або газуватих продуктів розкладання елегазу. Коли загоряється електрична дуга у середовищі із невеликою кількістю елегазу, то в цьому випадку утворюються продукти розкладання елегазу – гази нижчого порядку.

На сьогодні у конструкціях електрообладнання, де застосовується елегазове середовище, часто використовують так званий автокомпресійний принцип гасіння електричної дуги. Під впливом високої температури горіння дуги елегаз розкладається із утворенням різноманітних компонентів. Елементи продуктів розкладання елегазу це, зазвичай, CF₄ і SF₄, а також у незначній кількості S, F, S₂, F₂, SOF₂, SOF₄, SO₂ та інші сполуки. І більшість із перерахованих елементів розкладання елегазу є доволі токсичними. Характеристики сполук розкладання елегазу зведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики елементів розкладання елегазу

Причина появи	Сполука	Стан	Інтенсивність утворення
Часткові розряди	SOF ₂	Газуватий	Низька
	SOF ₄		
	SO ₂ F ₂		
	SO ₂		
	HF		
Загоряння електричної дуги	CF ₄	Газуватий	Середня
	CuF ₂	Твердий	
	WF ₆	Газуватий	
Аварійний режим роботи під час КЗ	AlF ₃	Твердий	Висока
	FeF ₃	Твердий	
	SF ₄	Газуватий	

Продукти розкладання елегазу нейтралізують за рахунок використання спеціальних адсорбуючих речовин, наприклад, активованій оксид алюмінію, цеоліт тощо. Також застосовуються молекулярні сита, які встановлюють безпосередньо всередині електрообладнання. Оксид алюмінію також додатково і підсушує елегаз та зберігає його первинні електричні властивості.

Задля зниження техногенного шкідливого елегазу впливу на навколишнє середовище його також можна використовувати повторно. Для цього необхідно елегаз відкачати із спеціальних газонаповнених відсіків, які очищують із використанням спеціального обладнання, здійснюють моніторинг якості елегазу, і тільки потім повторно його використовують.

3. Витиснення та заміщення повітря із киснем елегазом. Відомо [1–3], що елегаз важчий приблизно у 5 разів за повітря, тому у об'єктах, де використовується обладнання із застосуванням елегазу, необхідно дотримуватись певних правил безпеки. При вході у замкнуті приміщення, які низько розташовані за рівень землі – підвали, тунелі тощо, в яких може накопичуватись елегаз задля уникнення ризику появи явища витиснення та заміщення повітря із киснем елегазом.

Орієнтовно безпечні рівні щодо концентрації нового чистого елегазу у атмосферному повітрі для населених місць на межі охоронної та санітарно-захисної зон устаткування знаходиться на рівні 1500 мг/м³. Даний факт не пов'язаний із токсичністю, але є встановленою граничною межею згідно із «Гігієнічний регламент. Гранично допустимі концентрації хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць», відповідно до якого орієнтовні безпечні рівні дії на межі охоронної та санітарно-захисної зон об'єкта електроенергетики мають становити не більше ніж 30 % від гранично допустимої концентрації нового чистого елегазу у повітрі робочої зони. Якщо ж відсотковий вміст кисню у повітрі, що вдихається, буде менше за 17 % та/або ж відсотковий вміст елегазу буде більше за 19 %, то існуватиме суттєва небезпека задухи для робочого персоналу, що працює у цих зонах. Особливо небезпечними та чутливими зонами є ті ділянки приміщень, що знаходяться нижче за рівень землі, погано чи зовсім є не вентильованими, наприклад, кабельні камери, кабельні поверхи, кабельні тунелі та колодязі, канали, дренажні системи, оглядові колодязі, підвали тощо.

4. Складність конструкцій апаратів із елегазом. Відомо, що в елегазових відмикачах при їх відключенні потік газу відводить тепло і електричної з дуги та дозволяє її згасити при першому проходженні струму через нульове значення. В цей же час потік вже деіонізованого елегазу між контактами апарату відновлює діелектричну міцність робочого проміжку, унеможливаючи повторне загоряння електричної дуги. Необхідність створення механізму дугтя визначає складність конструкції керуючого механізму апарату та відповідно збільшує його вартість. Нові конструкційні та технологічні розробки у галузі

гаєння електричної дуги в елегазовому середовищі направлені на часткове зменшення або ж повну ліквідацію цього недоліку.

Як висновок, можна підсумувати, що за нормальних умов роботи елегаз є нешкідливим інертним газом без запаху, пожежо- і вибухобезпечним та не є токсичним. Однак, при високих температурах більш ніж 1000 °С, елегаз розкладається на складові елементи, а продукти розкладання вже є дуже токсичними. Це потребує застосування додаткових заходів щодо боротьби з цими недоліками від використання елегазу.

Перспективи елегазу у майбутньому.

Відповідно до значень електричної міцності (див. рис. 4, 5) у різних ізоляційних середовищах, то безперечно елегаз SF₆ володіє значно кращими властивостями та характеристиками, аніж вакуум у діапазоні середньої та високої напруг. Власне саме тому елегаз і використовується у якості сучасного електроізоляційного матеріалу та як дугогасильне середовище. Використання елегазу дозволяє виробникам спроектувати електрообладнання більш компактних габаритних розмірів та надає більше місця на площах підстанцій [12–14]. Це і є основою того, що приблизно 50 % від загального об'єму елегазу використовується в світі як ізоляція у електричних апаратах. Сучасні конструкції елегазових розподільних пристроїв [12–14] є не тільки компактними та ефективними у застосуванні. Зменшена необхідність у кількості електричної енергії під час виробництва, раціональне використання усіх ресурсів, а також більш тривалий термін експлуатації на додаток із низькими витратами на технічне обслуговування об'єднуються саме у системах КРПЕ та роблять їх розумними сучасними інвестиціями у майбутнє. Отже, їх використання є надзвичайно вагомим внеском у енергоефективність, якість та надійність енергопостачання загалом.

До традиційного шляху вирішення проблеми належить вживання заходів щодо зменшення викидів елегазу, вдосконалення конструкцій обладнання, навчання персоналу правильній роботі із елегазом, обмеження елегазу за рахунок застосування його суміші із іншими газами, наприклад, азотом. До більш сміливого і, можна сказати, радикального шляху відноситься повна відмова від використання елегазу [15, 16], як це, наприклад, зробила компанія Schneider Electric, припинивши випуск розподільних пристроїв середньої напруги із елегазовою ізоляцією, на зміну яким прийшло так зване SF₆-free обладнання із використанням у якості ізоляційного середовища очищеного осушеного повітря під тиском у 8–9 атм (рис. 15). Проте, ймовірно, потрібен досить значний час і не один рік, щоб елегаз повністю припинив використовуватись в сферах електроенергетики та електромеханіки.

Розвиток електрообладнання із елегазовою ізоляцією з моменту першого використання і до сьогодні є дуже суттєвими. Останні покоління КРПЕ є вже набагато компактнішими і, таким чином, вимагають набагато менше застосування елегазу, ніж

перші покоління КРПЕ. Також, як показує практика, різко скоротилися рівні витоків елегазу як під час експлуатації, так і під час виробництва, випробувань та введення в експлуатацію. Слід очікувати, що ринок SF₆-free обладнання буде зростати, і виробники розроблятимуть устаткування для все більшого ширшого спектру задач та для більших значень напруги. Також варто відзначити, що у перспективі будуть розроблені і вакуумні відмикачі та вакуумні камери (переривники) для вищих класів напруги.



Рисунок 15 – Розподільний пристрій виробництва Schneider Electric із застосуванням екологічної SF₆-free технології (фото зробив магістр кафедри «Електричні апарати» НТУ «ХПІ» Георгій Ламаш на виставці Hannover Messe (Німеччина, 22–26 квітня 2024 р.))

Крім очевидних напрямків покращення існуючих конструкцій обладнання, розширення пропонованої номенклатури продукції на різні класи напруги, актуальним також є пошук нових газів та сумішей [15, 16], які можуть скласти конкуренцію вже існуючим сполукам.

Висновки. В цілому, у довгостроковій перспективі повна відмова від використання елегазу є, напевно, єдиним способом подальшого скорочення його викидів, і з сьогоднішньої точки зору, беручи до уваги всі сучасні дослідження та розробки, здається технічно можливою для електроенергетики. Але це дуже кошторисний шлях розвитку, який не можливий без підтримки як держаних структур, так і зацікавленого бізнесу. На думку автора, слід підтримувати і прискорювати такий перехід, встановлювати сміливі цілі та задачі, і працювати на перспективу, на майбутнє, доки все нове електрообладнання не стане вільним від елегазу, а старе елегазове обладнання, що досі використовується, не буде утилізовано та замінено на сучасне SF₆-free устаткування.

Список літератури

- Sulphur hexafluoride in modern medium-voltage switchgear: advantages, hazards, and environmental impact / A. Boskovic et al. *Journal of the Serbian Chemical Society*. 2024. Vol. 89, no. 5. P. 693–704. DOI: <https://doi.org/10.2298/jsc231203008b>.
- Гречко А. М. Распределительные устройства среднего напряжения 6–35 кВ с элегазовой изоляцией. *Електротехніка і електромеханіка*. 2011. № 1. С. 14–18.
- Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс с (видання друге, допрацьоване та доповнене): навчальний посібник. Харків: Видавництво «Точка», 2013. 400 с.
- Розподільні пристрої з елегазовою ізоляцією Safering & Safeplus: безпечність, надійність, компактність. *Електротехніка і електромеханіка*. 2010. № 5. С. 67–72.
- Розподільні пристрої з елегазовою ізоляцією Safering & Safeplus: безпечність, надійність, компактність. *Електротехніка і електромеханіка*. 2010. № 6. С. 74–78.
- 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*. 2014. 20 May. P. 195–230. URL: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur133686.pdf>.
- Koch D. SF6 properties, and use in MV and HV switchgear. *Cahier Technique Schneider Electric*. 2003. No. 188. P. 22. URL: https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/SF6_properties.pdf.
- Yeckley R. N., Colclaser R. G. First SF6 breaker design: Westinghouse engineers tell the inside story [History]. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2016. Vol. 14, no. 3. P. 80–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/mpe.2016.2525238>.
- 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>.
- 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>.
- Правила улаштування електроустановок. Харків: Форт, 2017. 760 с.
- SIEMENS AG. Switchgear Type 8DH10 up to 24 kV, Gas-Insulated, Extendable. Medium-Voltage Switchgear. Catalog HA 41.11. 2008. 44 p. URL: http://www.infrastructure-cities.siemens.com.cn/powerdistribution/downloadCenter/upload/8DH10%20Up%20to%2024kV_GIS_Catalogue_EN.pdf.
- Schneider Electric Industries SAS, Merlin Gerin. Ring Main Unit. RM6 24 kV. Catalogue. 2006. URL: https://www.studiecd.dk/pdfs/Kap_13/MV_Anlaeg/RM6/amted398032en.pdf.
- ABB. SafeRing/ SafePlus 36 Gas Insulated Secondary Switchgear. 2022. 94 p. URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD006114%20GB&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=B>.
- Green gas for grid as an eco-friendly alternative insulation gas to SF6: a review / B. Pan et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 7. 2526. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072526>.
- Recent development of two alternative gases to SF6 for high voltage electrical power applications / J. Owens et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 16. 5051. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14165051>.
- impact”, *Journal of the Serbian Chemical Society*, vol. 89, no. 5, pp. 693–704, 2024, doi: <https://doi.org/10.2298/jsc231203008b>
- A. M. Grechko, “Switchgear for average voltage 6–35 kV”, *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 14–18, 2011. (in Russian).
- B. V. Klymenko, *Elektrychni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs (vydannia druhe, dopratsovane ta dopovnene) [Electrical apparatus. Electromechanical switching, control and protection equipment. General course (second edition, revised and expanded)]*. Kharkiv: Vyd-vo «Tochka», 2013. (in Ukrainian).
- “Rozpodilni prystroi z elehazovoiu izoliatsiieiu Safering & Safeplus: Bezpechnist, nadiinist, kompaktnist [SF6-insulated switchgear Safering & Safeplus: safe, reliable, compact]”, *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 5, pp. 67–72, 2010. (in Ukrainian).
- “Rozpodilni prystroi z elehazovoiu izoliatsiieiu Safering & Safeplus: Bezpechnist, nadiinist, kompaktnist [SF6-insulated switchgear Safering & Safeplus: safe, reliable, compact]”, *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 6, pp. 74–78, 2010. (in Ukrainian).
- “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*, L 150, pp. 195–230, May 20, 2014. [Online]. Available: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur133686.pdf>
- D. Koch, “SF6 properties, and use in MV and HV switchgear”, *Cahier Technique Schneider Electric*, no. 188, p. 22, 2003. [Online]. Available: https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/SF6_properties.pdf
- R. N. Yeckley and R. G. Colclaser, “First SF6 breaker design: Westinghouse engineers tell the inside story [History]”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 80–95, May 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/mpe.2016.2525238>
- C. M. Franck, A. Chachereau, and J. Pachin, “SF6-free gas-insulated switchgear: Current status and future trends”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 37, no. 1, pp. 7–16, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2021.9290463>
- A. P. Purnomoadi, A. Rodrigo Mor, and J. J. Smit, “Spacer flashover in Gas Insulated Switchgear (GIS) with humid SF6 under different electrical stresses”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 116, Mar. 2020, Art. no. 105559, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105559>
- Pravyla ulashuvannia elektroustanovok [Rules for electrical installations]*. Kharkiv, Fort Publ., 2017. 760 p. (in Ukrainian).
- SIEMENS AG, *Switchgear Type 8DH10 Up to 24 kV, Gas-Insulated, Extendable. Medium-Voltage Switchgear. Catalog HA 41.11*. 2008. [Online]. Available: http://www.infrastructure-cities.siemens.com.cn/powerdistribution/downloadCenter/upload/8DH10%20Up%20to%2024kV_GIS_Catalogue_EN.pdf
- Schneider Electric Industries SAS and Merlin Gerin, *Ring Main Unit. RM6 24 kV. Catalogue*. 2006. [Online]. Available: https://www.studiecd.dk/pdfs/Kap_13/MV_Anlaeg/RM6/amted398032en.pdf
- ABB, *SafeRing/ SafePlus 36 Gas Insulated Secondary Switchgear*. 2022. [Online]. Available: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VDD006114%20GB&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch&DocumentRevisionId=B>
- 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. 2020, Art. no. 2526, doi: <https://doi.org/10.3390/app10072526>
- 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>

References

- A. Boskovic, M. Sremacki, S. Vjestica, A. Cavic, N. Markovic, and B. Borovac, “Sulphur hexafluoride in modern medium-voltage switchgear: Advantages, hazards, and environmental

Надійшла (received) 13.06.2024

Відомості про автора (-is) / About the Author (-s)

Гречко Олександр Михайлович (Oleksandr Grechko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7872-8585>; e-mail: a.m.grechko@gmail.com.