

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-76-80>

УДК 621.316

ДІЕЛЕКТРИЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ОБЛАДНАННІ

Філімоненко Н.М., Філімоненко К.В.

DIELECTRIC ENVIRONMENT IN HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

Filimonenko N. M., Filimonenko K. V.

Стаття присвячена аналізу сучасних альтернатив SF₆ у високовольтному обладнанні електроенергетичних систем з акцентом на їхні електричні характеристики, безпеку та екологічну ефективність.

Протягом тривалого часу SF₆ залишався основним діелектричним середовищем у високовольтному обладнанні електроенергетичних систем. Проте, враховуючи його надзвичайно тривалий період перебування в атмосфері та високий потенціал глобального потепління, уряди спрямували зусилля на скорочення викидів цього газу. У відповідь промисловість почала впроваджувати технології без використання SF₆ у традиційних застосуваннях, зокрема у розподільчих пристроях, автоматичних вимикачах та лініях або шинах під високою напругою.

SF₆ – це інертний та нетоксичний газ, що має велике значення для електричних розподільчих пристроїв, що використовуються для розподілу та передачі електроенергії по всьому світу. Це обладнання розміщується у вузлах мережі для відключення струмів короткого замикання, як тільки вони виникають. SF₆ – це газ, що ізолює напругу, який має втричі кращі ізоляційні властивості, ніж повітря, краще, ніж будь-який інший газ. Таким чином, він дозволяє проектувати невеликі закриті та газонепроникні розподільчі пристрої з малим розміром, що має визнані переваги в суворих умовах навколишнього середовища та з обмеженим простором, наприклад, у вітрових вежах. Наразі SF₆ не має економічно та енергоефективної альтернативи для розподільчих пристроїв вище 52 кВ, тобто для використання в мережі передачі, де він застосовується завдяки своїм чудовим можливостям переривання струму.

Серед безSF₆ рішень відзначаються газові суміші на основі фторованих сполук із низьким кліматичним впливом, зокрема фторнітрил (3M™ Novec™ 4710) та фторкетон (3M™ Novec™ 5110). Застосування цих сумішей у елегазовому обладнанні дозволяє

зменшити викиди парникових газів більш ніж на 99% порівняно з SF₆, зберігаючи високі електричні та експлуатаційні характеристики. У статті представлені основні компоненти альтернативних газових сумішей та оновлені дані щодо їх продуктивності, безпеки та екологічної ефективності у сучасних електроенергетичних системах.

Ключові слова: високовольтне обладнання; гексафторид сірки; SF₆; ізоляція; діелектричне середовище; альтернатива елегазу; фторрокетон; фторнітрил.

Вступ. Гексафторид сірки (SF₆) є інертним, нетоксичним газом, що відіграє ключову роль у функціонуванні електричних розподільчих пристроїв, призначених для передавання та розподілу електроенергії на глобальному рівні. Унікальне поєднання його хімічних, електричних і фізичних властивостей зумовило широке використання SF₆ як високоефективного діелектричного середовища в елегазових розподільчих установках (ЕРУ), газових вимикачах (ГВ) та елегазових лініях (ЕЛ). Таке обладнання є невід'ємною частиною енергетичних систем, забезпечуючи відключення струмів короткого замикання безпосередньо в момент їх виникнення.

SF₆ вирізняється високими ізоляційними характеристиками – його діелектрична міцність утричі перевищує аналогічний показник повітря, що робить цей газ ефективнішим за будь-яке інше газоподібне ізоляційне середовище. Завдяки цьому стає можливим проектування компактних, герметичних і високонадійних розподільчих пристроїв, придатних для експлуатації в умовах

обмеженого простору та підвищених вимог до стійкості довкілля.

Постановка проблеми. На сьогодні гексафторид сірки не має економічно обґрунтованих та енергоефективних альтернатив для обладнання, що працює з напругою понад 52 кВ. Саме тому SF₆ залишається незамінним у системах передавання електроенергії, де особливо важливими є його виняткові властивості з гасіння електричної дуги та забезпечення безперервності енергопостачання.

Водночас SF₆ є потужним парниковим газом із надзвичайно високим потенціалом глобального потепління. Через тривалий період перебування в атмосфері (приблизно 3200 років) навіть незначні викиди SF₆, як минулі, так і майбутні, спричиняють його накопичення та поступове зростання концентрації в атмосфері. У зв'язку з цим чинне європейське законодавство щодо фторвмісних газів [1,2] передбачає суттєве скорочення щорічних викидів SF₆ з електричних розподільчих установок, навіть попри вже досягнуті результати завдяки галузевим ініціативам.

Метою роботи є характеристика основних джерел емісії SF₆. Також розглянуто технічні можливості зниження викидів SF₆ – як шляхом удосконалення конструкції розподільчих пристроїв, так і завдяки впровадженню більш ефективних методів контролю за поведінням із газом на етапах виробництва та випробувань обладнання.

Результати дослідження. Глобальний радіаційний вплив, спричинений усіма фторованими газами (F-газами), становить приблизно 12,5% впливу всіх техногенних парникових газів, включаючи CO₂, CH₄ та N₂O. Вплив глобального потепління F-газів все ще домінує в озоноруйнівних газах, таких як CFC, HCFC та CCFC.

Наразі внесок SF₆ становить 0,15% від загального глобального радіаційного впливу всіх парникових газів, з тенденцією до зростання. Його атмосферна концентрація постійно контролюється в кількох місцях світу, і процес глобального розподілу добре вивчений. SF₆ швидко поширюється по всьому світу. Час змішування між північною та південною півкулями становить від 1 до 1,5 років [3]. Таким чином, локальні викиди SF₆ розподіляються в межах цього періоду часу по всьому світу та виявляються як глобально зростаюча концентрація в атмосфері.

Технічні можливості зниження викидів SF₆ існують як шляхом удосконалення конструкції розподільчих пристроїв, так і завдяки впровадженню більш ефективних методів контролю за поведінням із газом на етапах виробництва та випробувань обладнання.

Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (РКЗК ООН) збирає дані про інвентаризацію та викиди F-газів з 42 країн світу. Загальний обсяг річних викидів SF₆ із сектора електричних розподільчих пристроїв включається до загального об'єму парникових газів.

Згідно з даними про викиди в EDGAR, електрообладнання, що використовує SF₆, становить 58% усіх глобальних викидів (розрахунок 2008 року). Види джерел, зібрані в різних секторах, відрізняються залежно від країни та залежать від місцевих галузей промисловості, які використовують SF₆ для різних цілей.

Промислове виробництво сучасних розподільчих пристроїв поєднує випробування на герметичність та заповнення газом SF₆. Процес повністю автоматичний і виключає можливість роботи з SF₆ до успішного проходження випробування на герметичність. Для типової газорозподільної станції з трубопроводами характерним є оснащення системою, яка спочатку відкачує повітря всередині розподільчого пристрою та заповнює його гелієм, потім відкачує гелій і, нарешті, заповнює розподільчий пристрій необхідною кількістю газу SF₆.

З'єднувальні труби складаються зі зварних з'єднань та переходів для зменшення муфт та фітінгів, які мають потенційну ймовірність витоку. Розподільний пристрій залишається підключеним до системи заповнення протягом усього циклу випробувань і автоматично від'єднується в кінці. Перед від'єднанням труб SF₆, що залишився в трубах, збирається та повторно використовується для наступного заповнення. Робота з SF₆ – практично без викидів.

Сніфер – аналізатор, чутливий до елегазу, розміщується поблизу розподільчого пристрою з елегазом та повільно переміщується по його поверхні, зокрема по всіх фланцях.. Для підтвердження герметичності великих високовольтних розподільчих пристроїв використовується метод сніфера.

Щорічний моніторинг, що проводиться в рамках добровільних зобов'язань виробників та користувачів розподільчих пристроїв, доводить

постійне скорочення викидів SF_6 . Про постійне скорочення викидів SF_6 від електричних розподільчих пристроїв також повідомляють такі країни, як Німеччина, Франція та Норвегія, і це має бути доцільним у довгостроковій перспективі для кожної країни світу.

Протягом багатьох років SF_6 був кращим діелектричним середовищем в електроенергетичних системах, особливо у високовольтному елегазовому обладнанні. Однак, усвідомлюючи, що SF_6 має надзвичайно довгий термін життя в атмосфері та дуже високий потенціал глобального потепління, уряди прагнули скорочення викидів від газонаповненого обладнання. На жаль, саме ті властивості, які роблять SF_6 ідеальним ізоляційним газом, а саме хімічна інертність, є тими ж властивостями, які роблять його надзвичайно довговічним в атмосфері.

Електроенергетична промисловість відреагувала на цю екологічну проблему, застосовуючи технології без SF_6 до ширшого кола застосувань, де традиційно використовувався SF_6 , включаючи елегазові розподільчі пристрої, елегазові автоматичні вимикачі та елегазові лінії або шини. Деякі з цих рішень без SF_6 включають газові суміші, що містять фторовані сполуки, які мають низький вплив на клімат, серед них фторнітрил та фторкетон, розроблені як ізоляційний газ 3M™ Novec™ 4710 та ізоляційний газ 3M™ Novec™ 5110 відповідно. Як фторнітрильні, так і фторкетонові суміші успішно використовуються в елегазовому обладнанні, яке зараз працює в електромережі, де вони зменшують викиди парникових газів більш ніж на 99% порівняно з SF_6 .

Визначення життєздатних альтернатив SF_6 ускладнюється унікальним поєднанням властивостей, необхідних для діелектричних застосувань. Тому, будь-яка заміна SF_6 як ізоляційного газу повинна неявно мати певну форму реакційної здатності, щоб сприяти розкладанню в атмосфері та подолати екологічні проблеми. Матеріали також повинні бути негорючими та достатньо низькотоксичними, щоб забезпечити безпечне поводження з ними з використанням методів, подібних до тих, що зараз використовуються в промисловості. Альтернативи, безумовно, повинні мати дуже високу діелектричну міцність, забезпечуючи характеристики, максимально наближені до SF_6 . Оскільки газонаповнене обладнання буде використовуватися в різних умовах, матеріали

повинні залишатися газоподібними вище очікуваних робочих температур цих систем.

Діелектричне середовище також має бути стабільним протягом терміну служби цього обладнання, не сприяючи корозії чи іншим негативним впливам на пристрій. Найголовніше, щоб бути сталими альтернативами, нові сполуки повинні мати прийнятні комбінації екологічних властивостей, включаючи відсутність потенціалу руйнування озонового шару та значне зменшення викидів парникових газів від цих застосувань порівняно з SF_6 , оскільки це є основною причиною переходу на нові технології.

В результаті, електроенергетична промисловість почала впроваджувати газові суміші на основі цих сполук як альтернативу SF_6 протягом останніх кількох років [5]. Фторнітрил та фторкетон визнані в електроенергетичній промисловості як ізоляційний газ 3M™ Novec™ 4710 та ізоляційний газ 3M™ Novec™ 5110 відповідно [4]. У деяких публікаціях їх називають C4-FN або C5-FK, або навіть просто C4 або C5..

Властивості чистих ізоляційних газів Novec. Ізоляційні гази Novec демонструють кілька фізичних властивостей, подібних до SF_6 . Вони є високофторованими, негорючими газами високої щільності з надзвичайно низькими температурами замерзання та чудовими діелектричними властивостями. При будь-якому заданому тиску чисті гази Novec демонструють напругу діелектричного пробою, яка перевищує напругу SF_6 , як показано на рисунку [4]. Вимірюється за допомогою паралельних дискових електродів із зазором 2,5 мм.

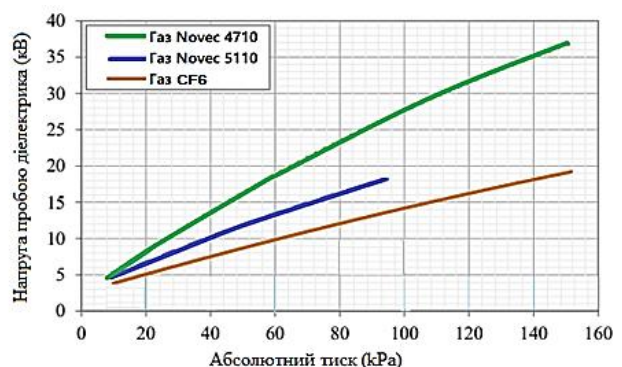


Рис. Напруга діелектричного пробою чистих газів

Численні системи, що використовують газові суміші Novec, наразі працюють у мережі, включаючи установки GIS, GCB та GIL. Ці

системи були розроблені для забезпечення продуктивності, порівнянної з аналогічним обладнанням SF₆ [5,6].

Додаткові міркування повинні бути застосованими під час роботи з будь-яким шкідливим газом після виникнення дугового горіння. У разі електричної дуги в обладнанні, що містить SF₆, можуть утворюватися високотоксичні побічні продукти розкладання, такі як HF, S₂F₁₀ та SO₂. Ці побічні продукти є дуже небезпечними та становлять потенційний ризик токсичності для тих, хто зазнає впливу. Залежно від характеру дугового горіння, газові суміші Novac також можуть зазнавати певного ступеня розкладання. Навіть якщо випробування показали, що дугові газові суміші Novac можуть бути менш небезпечними, ніж дугові суміші SF₆ [4], слід вживати аналогічних запобіжних заходів під час роботи з такими газовими сумішами. Працівники, які виконують процедури технічного обслуговування електричних вимикачів, що містять дугогасний елемент, повинні використовувати належні процедури поводження та носити засоби індивідуального захисту.

Висновки. SF₆ в електричних розподільчих пристроях становить менше 0,15% від загального глобального радіаційного впливу всіх парникових газів, проте спостерігається тенденція до зростання. Знаючи про високий потенціал парникового потепління та тривалий термін життя SF₆ в атмосфері, європейський сектор електротехнічної промисловості вжив різноманітних заходів для зменшення викидів SF₆. Викиди SF₆ були мінімізовані протягом усього життєвого циклу розподільчих пристроїв високої та середньої напруги завдяки передовим практикам промислового проектування та процедур поводження.

Газові суміші, що містять фторкетон або фторнітрил, ізоляційний газ Novac™ 5110 та ізоляційний газ Novac™ 4710 відповідно, впроваджуються як альтернативи SF₆ з низьким впливом на клімат. При використанні під вищим тиском ці газові суміші можуть забезпечити діелектричні характеристики, порівнянні з SF₆ у високовольтних системах. Безпека газів Novac була оцінена за допомогою серії токсикологічних досліджень, які демонструють, що профілі безпеки газових сумішей, що містять ці матеріали, безпечні для використання в газонаповненому обладнанні

Література

1. Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 517/2014 від 16 квітня 2014 року про фторовані парникові гази. Документ 984_031-14. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_031-14#Text
2. Коефіцієнт викидів парникових газів для виробництва та споживання електроенергії Аналітичне дослідження та опис методологічного підходу до розрахунку. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf
3. Kieffell, Y., Biquez, F., Vigouroux, D.; Ponchon, P., Schlernitzauer, A.; Magous, R., Cros, G., Owens, J. *Characteristics of g₃—An alternative to SF₆. CIREN Open Access Proc. J.* 2017, 1, 54–57
4. Owens J., Xiao A., Bonk J., DeLorme M., Zhang A. *Recent Development of Alternative Gases to SF₆ for High Voltage Electrical Power Applications* 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 6–10 September 2020, 1–4.
5. Stoller, P., Hengstler, J., Doiron, C.; Scheel, S., Simka, P., Müller, P. *Environmental Aspects of High Voltage Gas Insulated Switchgear That Uses Alternatives to SF₆ and Monitoring and Long-Term Performance of a Pilot Installation*; Cigré: Paris, France, 2018; Paper D1-202.
6. Laruelle, E.; Maksoud, L.; Kieffell, Y.; Lüscher, R.; Fichoux, A. *SF₆ Alternative—What to Learn from the High Voltage Experience*; Cigré: Madrid, Spain, 2019; Paper 0028.

References

1. Rehlament Yevropeys'koho Parlamentu i Rady (YES) № 517/2014 vid 16 kvitnya 2014 roku pro ftorovani parnykovi hazy. Dokument 984_03114. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_031-14#Text
2. Koefitsiyent vykydiv parnykovykh haziv dlya vyrobnytstva ta spozhyvannya elektroenerhiyi Analitychne doslidzhennya ta opys metodolohichnoho pidkhotu do rozrakhunku. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf
3. Kieffell, Y., Biquez, F., Vigouroux, D.; Ponchon, P., Schlernitzauer, A.; Magous, R., Cros, G., Owens, J. *Characteristics of g₃—An alternative to SF₆. CIREN Open Access Proc. J.* 2017, 1, 54–57
4. Owens J., Xiao A., Bonk J., DeLorme M., Zhang A. *Recent Development of Alternative Gases to SF₆ for High Voltage Electrical Power Applications* 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 6–10 September 2020, 1–4.
5. Stoller, P., Hengstler, J., Doiron, C.; Scheel, S., Simka, P., Müller, P. *Environmental Aspects of High Voltage Gas Insulated Switchgear That Uses Alternatives to SF₆ and Monitoring and Long-*

Term Performance of a Pilot Installation; Cigré: Paris, France, 2018; Paper D1-202.

6. Laruelle, E.; Maksoud, L.; Kieffell, Y.; Lüscher, R.; Ficheux, A. SF6 Alternative – What to Learn from the High Voltage Experience; Cigré: Madrid, Spain, 2019; Paper 0028.

Filimonenko N.M., Filimonenko K.V. Dielectric environment in high-voltage equipment.

The article is devoted to the analysis of modern alternatives to SF6 in high-voltage equipment of power systems, with a focus on their electrical performance, safety, and environmental efficiency.

For a long time, SF6 has remained the primary dielectric medium in high-voltage power system equipment. However, considering its extremely long atmospheric lifetime and high global warming potential, governments have focused efforts on reducing emissions of this gas. In response, the industry has begun implementing SF6-free technologies in traditional applications, including switchgear, circuit breakers, and high-voltage lines or busbars.

SF6 is an inert and non-toxic gas that is of great importance for electrical switchgear used for the distribution and transmission of electricity worldwide. This equipment is placed at network nodes to interrupt short-circuit currents as soon as they occur. SF6 is a voltage-insulating gas that has three times better insulating properties than air, better than any other gas. It therefore allows the design of small, enclosed and gas-tight switchgear with a small footprint, which has recognized advantages in harsh environmental

conditions and with limited space, such as in wind towers. SF6 currently has no cost-effective and energy-efficient alternative for switchgear above 52 kV, i.e. for use in the transmission network, where it is used due to its excellent current-interrupting capabilities.

Among the SF6-free solutions, gas mixtures based on fluorinated compounds with low climate impact stand out, particularly fluoro-nitrile (3M™ Novec™ 4710) and fluoro-ketone (3M™ Novec™ 5110). The use of these mixtures in gas-insulated equipment allows for a reduction of greenhouse gas emissions by more than 99% compared to SF6, while maintaining high electrical and operational performance. The article presents the key components of alternative gas mixtures and provides updated data on their performance, safety, and environmental effectiveness in modern power systems.

Keywords: *high-voltage equipment; sulfur hexafluoride; SF6; insulation; dielectric medium; SF6 gas alternative; fluoroketone; fluoronitrile.*

Філімоненко Ніна Миколаївна – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Філімоненко Костянтин Вадимович – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Стаття подана 05.10.2025.