

Krzysztof WIECZOREK¹, Przemysław RANACHOWSKI²,
Zbigniew RANACHOWSKI³, Norbert Krzysztof MISZTAŁ⁴
ORCID: ¹0000-0002-8906-0557, ²0000-0002-1152-610X, ³0000-0003-2447-4705
DOI: 10.15199/48.2026.02.11

Wyniki wstępnych badań porównawczych wytrzymałości elektrycznej gazów do zastosowania w układach izolacyjnych wysokiego napięcia

*Results of preliminary comparative studies of the electrical strength of
gases for use in high-voltage insulation systems*

¹ Krzysztof Wieczorek, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27 50-370 Wrocław,
e-mail: krzysztof.wieczorek@pwr.wroc.pl

² Przemysław Ranachowski – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa,
e-mail: pranach@ippt.pan.pl

³ Zbigniew Ranachowski – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa,
e-mail: zranach@ippt.pan.pl

⁴ Norbert Krzysztof Misztal, AE Steel Sp. z o.o., ul. Olszewskiego 6, 25-663 Kielce, e-mail: biuro@aesteel.eu

Adres do korespondencji: krzysztof.wieczorek@pwr.wroc.pl

Streszczenie: W 2024 roku zaczęło obowiązywać rozporządzenie Unii Europejskiej w sprawie stopniowego wycofywania gazu izolacyjnego – heksafluorku siarki – stosowanego w układach wysokiego napięcia. Związek ten uważa się za bardzo silny gaz cieplarniany. Z tego powodu zaistniała pilna potrzeba znalezienia alternatywnego gazu, który mógłby zastąpić dotychczasowe rozwiązanie. W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań gazów, które mogłyby być wykorzystane w układach wysokiego napięcia. W specjalnie zaprojektowanym układzie ciśnieniowym wyposażonym w układ elektrodowy przeprowadzono pomiary wyładowań niezupełnych metodą akustyczną oraz pomiary wytrzymałości elektrycznej. Badania przeprowadzono przy kilku różnych poziomach nadciśnienia. Porównano wyniki wytrzymałości powietrza, dwutlenku węgla, azotu i argonu.

Słowa kluczowe: wytrzymałość elektryczna, wyładowania niezupełne, gazy elektroizolacyjne, emisja akustyczna

Abstract: The European Union's regulation to phase out the insulating gas – sulfur hexafluoride, used in high-voltage systems, took effect in 2024. The compound is considered a very potent greenhouse gas. For this reason, there was an urgent need to find an alternative gas that could replace the existing solution. The article presents the results of preliminary studies of gases that could be used in high-voltage systems. In a specially designed pressure system, equipped with an electrode system, measurements of electric strength as well as partial discharges – using the acoustic method – were carried out. The tests were performed at several different levels of overpressure. The results of air, carbon dioxide, nitrogen and argon strength were compared.

Keywords: electrical strength, partial discharges, electrical insulating gases, acoustic emission

Wstęp

Heksafluorek siarki (SF_6 – fluorek siarki (VI)) ma bardzo dobre właściwości dielektryczne – jest około 3 razy lepszym izolatorem od powietrza. Jest przy tym niezwykle inertny i stabilny chemicznie, niepalny i co szczególnie istotne – nietoksyczny. Łatwo może też być skraplany i przechowywany w butlach [1]. Niezwykle cenną cechą SF_6 jest zdolność gaszenia łuku elektrycznego, który powstaje w momencie

otwierania obwodu, przez który płynie prąd. Jak wiadomo, łuk jest zjawiskiem szkodliwym i destrukcyjnym. Może doprowadzić nawet do tzw. zwarcia metalicznego, prowadzącego do zniszczenia urządzenia pracującego w sieci. W związku z tym, gaz ten od lat znajduje bardzo szerokie zastosowanie w urządzeniach rozdzielczych z izolacją gazową. Wręcz może być uznany za najważniejsze gazowe medium wykorzystywane w elektroenergetyce. Zastosowanie SF_6

w urządzeniach elektroenergetycznych umożliwiło przede wszystkim dużą miniaturyzację gabarytów, w porównaniu do urządzeń z konwencjonalną izolacją gazową. Zamknięte w atmosferze SF_6 elementy przewodzące mogą być znacząco mniejsze. Ponadto poważnie wzrósł poziom bezpieczeństwa pracy urządzeń sieciowych [2].

Obok wszystkich wskazanych powyżej zalet, SF_6 ma jedną zasadniczą wadę, jest on mianowicie uważany za najgroźniejszy znany gaz cieplarniany. Miara, określającą w jakim stopniu dany gaz cieplarniany przyczynia się do globalnego ocieplenia, w określonym przedziale czasu, jest współczynnik globalnego ocieplenia (GWP - ang. Global Warming Potential). Odniesienie stanowi dwutlenek węgla (GWP = 1), bo tego czynnika cieplarnianego światowa gospodarka uwalnia najczęściej do atmosfery. W przypadku SF_6 wartość współczynnika GWP wynosi aż 23 900, przy czym emisja tego gazu jest wyłącznie antropogeniczna – przede wszystkim z elektroenergetyki – i powoduje jego rosnącą i nieodwracalną akumulację w atmosferze Ziemi. SF_6 zaliczany jest tak zwanych F-gazów, inaczej fluorowanych gazów cieplarnianych, które obok wysokich wartości GWP, odznaczają się bardzo wysoką trwałością w atmosferze. Czas rozkładu SF_6 jest jedynie szacowany, jednak może on wynosić nawet ponad 3 000 lat [3]. Udowodniono przy tym wysoki wzrost jego stężenia w atmosferze w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat. Rocznie wytwarza się około 8 000 ton gazu, z czego 80% jest wykorzystywanych w elektroenergetyce do gaszenia łuku elektrycznego, chłodzenia oraz izolacji [4]. SF_6 użytkowany jest jedynie w szczelnych urządzeniach (wyłączniki, przekładniki, rozdzielnice). Niemniej, w technologicznym cyklu produkcji, eksploatacji oraz utylizacji następuje wyciek pewnych jego ilości [5]. Szacuje się, że F-gazy z SF_6 stanowią 2,5% gazów cieplarnianych, emitowanych w Unii Europejskiej [6].

Decydenci UE, dążąc do gospodarki niskoemisyjnej, a następnie nawet zeroemisyjnej, postanowili systematycznie wycofywać z użycia związki wywołujące efekt cieplarniany. Dotyczy to w szczególności SF_6 . Komisja głosowała nad nowelizacją rozporządzenia w sprawie F-gazów w marcu 2023 roku, a w październiku uzgodniono ostateczną wersję uchwały. Eliminacja SF_6 , według przyjętych założeń, ma przebiegać etapami [7]. Od początku 2026 roku zakazane będzie użycie gazu w rozdzielnicach średniego napięcia (SN) do 24 kV, natomiast od 2028 roku w rozdzielnicach 24 – 52 kV. W przypadku urządzeń wysokonapięciowych (WN) zakaz wejdzie w życie częściowo od 2028, a częściowo od 2031 roku (rozdzielnice powyżej 145 kV). Całkowite wycofanie F-gazów z użycia ma nastąpić do 2050 roku.

Od lat poszukiwane są gazy, często o charakterze mieszanin, które mając dużo mniejszy wpływ na środowisko i porównywalne właściwości dielektryczne, mogłyby stanowić alternatywę dla SF_6 [8]. Gaz (mieszanina gazów) stanowiący zamiennik dla SF_6 powinien odznaczać się szeregiem właściwości, które decydują o wysokiej wytrzymałości elektrycznej. Wysoka elektroujemność (zdolność atomów pierwiastka do przyciągania elektronów) powoduje, że gaz może efektywnie wychwytywać wolne elektrony, ograniczając ryzyko powstawania wyładowań elektrycznych. Bardzo istotna jest wysoka przewodność cieplna, gdyż umożliwia skuteczne odprowadzanie ciepła wytwarzanego przez przepływ prądu w czasie pracy urządzeń energetycznych. Zapobiega to przegrzaniu i uszkodzeniu izolacji. Wskazana jest wysoka gęstość gazu – w jednostce objętości znajduje się wtedy większa liczba atomów, co poprawia jego właściwości izolacyjne. Kolejnym istotnym czynnikiem przy wyborze gazowego medium izolacyjnego jest jego niepalność. Redukuje to ryzyko pożaru w przypadku wyładowań elektrycznych i pozwala na szybsze oraz bardziej efektywne gaszenie łuku elektrycznego podczas pracy urządzenia. Wskazana też jest możliwie wysoka inercja, stabilność chemiczna oraz nietoksyczność gazu. Inną istotną właściwością są zdolności do rekombinacji. Powodują one, że mogą szybko łączyć się produkty rozpadu (jony dodatnie i ujemne). Pozwala to zachować właściwości izolacyjne gazu. Zamiennik SF_6 będzie tym bardziej efektywny, im w większym stopniu łączyć będzie wymienione właściwości.

Wyniki nawet stosunkowo prostych eksperymentalnych badań laboratoryjnych wykazały, że odpowiednio dobrane mieszaniny gazów mogą poprawić wytrzymałość elektryczną w stosunku do powietrza o kilkanaście procent [9]. Już taki wynik pozwala na zmniejszenie odległości między elektrodami, jak i gabarytów urządzeń. Rozwiązania alternatywne powinny być możliwie proste technologicznie i nie wymuszać na producentach urządzeń uciążliwych i kosztownych zmian konstrukcyjnych. Jest to o tyle ułatwione, że stosuje się najczęściej znaczne marginesy gabarytowe i pewne przewymiarowanie urządzeń.

W świetle obecnych doniesień, jako ekologiczna alternatywa dla SF_6 , rozpatrywane są różne możliwości [8, 10, 11]. Obiecujące możliwości daje wykorzystanie próżni albo suchego i oczyszczonego powietrza lub też mieszaniny czystego N_2 i O_2 w – stosunku 80/20. Jakkolwiek pewien problem może stanowić utrzymanie szczelności urządzeń i odpowiednia czystość gazów. Inną możliwością jest zastosowanie mieszanin suchych gazów np. CO_2 i O_2 (90/10), posiadających wyższą od powietrza wytrzymałość elektryczną.

Kolejną alternatywę stanowią gazy syntetyczne i ich mieszaniny o dobrej wytrzymałości elektrycznej np. fluoroketon albo fluoronitryl (ewentualnie z CO_2 i O_2). W tym jednak wypadku problem stanowi wciąż wysoka wartość współczynnika GWP oraz nie całkiem rozpoznany wpływ na środowisko lub nawet toksyczność.

Tematyka prezentowanej pracy ma dwojaki charakter. Pierwszym zagadnieniem jest wstępne badanie potencjalnej możliwości wykorzystania powietrza, dwutlenku węgla, azotu i argonu, z podwyższeniem ich ciśnienia, w charakterze gazu izolacyjnego. Badania prowadzono w specjalnie zaprojektowanym i wykonanym układzie badawczym ze stali nierdzewnej. Drugim zagadnieniem badawczym była możliwość wykorzystania metody emisji akustycznej (EA) do monitorowania wyładowań niezupełnych (WNZ). W tym celu wykorzystywana była przemysłowo produkowana aparatura akustyczna, zawierająca czujnik membranowy, który rejestrował sygnały EA z układu ciśnieniowego, zawierającego badane gazy.

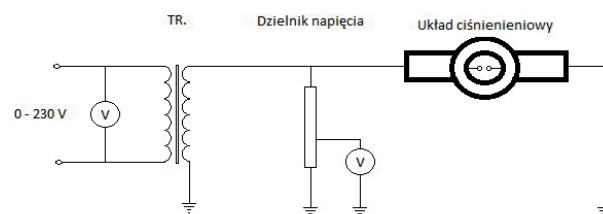
Układ pomiarowy, metodyka pomiarów

Celem przeprowadzonych badań było zmierzenie i porównanie wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych, zapewniających równomierny i nierównomierny rozkład pola elektrycznego, w obecności różnych gazów i przy różnym ich ciśnieniu. Badanie obejmowało również pomiary napięcia początkowego wyładowań niezupełnych metodą emisji akustycznej (EA). Porównywano wytrzymałość układu w obecności powietrza, azotu, dwutlenku węgla i argonu. Ciśnienie wewnątrz układu zmieniano w zakresie od ciśnienia atmosferycznego (0 barów) do nadciśnienia wynoszącego 2 bary. Przed napełnieniem układu badanym gazem, za każdym razem przy pomocy pompy próżniowej usuwano znajdujący się wewnątrz gaz, wytwarzając podciśnienie o wartości -0,6 bara. Manometry zainstalowane na króćcach z zaworami pozwalały na kontrolę ciśnienia badanego gazu. Następnie układ napełniano do wymaganego nadciśnienia. Do wyprowadzonych na zewnątrz elektrod podłączone zostało zasilanie z transformatora probierczego, pracującego w układzie niesymetrycznym. Jedna z elektrod posiadała potencjał ziemi, druga – wysoki. Wysokie napięcie mierzone było metodą pośrednią z wykorzystaniem uniwersalnego dzielnika napięcia wysokiej klasy, którego zakres pomiarowy wynosił 100 kV. Układ regulacji napięcia pozwalał na ręczne, płynne i powolne podnoszenie napięcia do wartości, przy której następował przeskok. W kolejnych

próbach napięcie podnoszone było z taką samą prędkością. Zasadnicze badania wytrzymałości elektrycznej poprzedzone zostały próbami wstępnymi, którymi zadaniem było kondycjonowanie układu pomiarowego. Odstępy pomiędzy mosiężnymi elektrodami układów zapewniających równomierny i nierównomierny rozkład pola dobrany został z uwzględnieniem parametrów geometrycznych obudowy. Większa wytrzymałość układu zapewniającego równomierny rozkład pola elektrycznego wymusiła dobór mniejszego odstępu izolacyjnego pomiędzy elektrodami w porównaniu do układu zapewniającego nierównomierny rozkład pola.

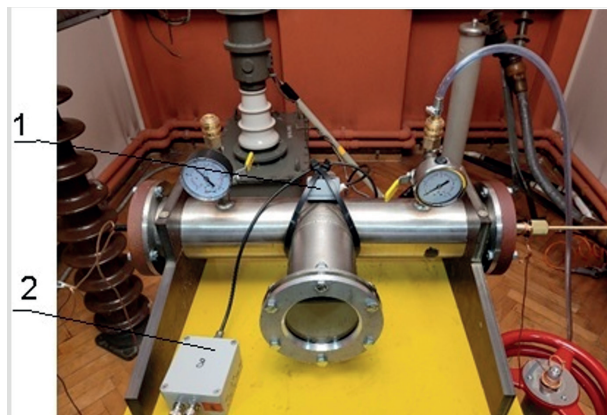
Dla każdego zadanego ciśnienia gazu wykonano po 10 pomiarów napięć przeskoku. Schemat układu pokazano na rysunku 1.

Typowe laboratoryjne systemy pomiaru WNZ, oparte są na normie IEC 60270 i zbierają analizowany sygnał w postaci elektrycznej. Wyładowania niezupełne są źródłem impulsów prądu, które można mierzyć w postaci zmian napięcia rejestrowanych na impedancji pomiarowej. W prezentowanej pracy rejestracja efektów WNZ realizowana była z wykorzystaniem alternatywnej metody EA. Technika ta jest z powodzeniem stosowana od lat z wykorzystaniem różnego rodzaju aparatury [12, 13, 14].



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego

W przedstawianych badaniach rejestracja sygnałów akustycznych (EA), generowanych w trakcie wyładowań niezupełnych (WNZ), wykonywana była z wykorzystaniem zestawu przemysłowego produkcji firmy AEstee [15]. Aparatura przystosowana jest do badań urządzeń wysokonapięciowych, stosowanych w elektroenergetyce. Zasadniczym elementem układu pomiarowego był czujnik membranowy EA, o specjalnej konstrukcji – przystosowany w szczególności do badania elementów z blachy metalowej [16]. Czujnik ten, osadzony na mosiężnej membranie, odbiera sygnały w zakresie od 6 do 60 kHz i znajduje się w pyłoszczelnej obudowie. Współpracuje on ze wzmacniaczem emisji akustycznej o wysokiej czułości. Rejestrowane przez czujnik sygnały EA mają niskie napięcie skuteczne – rzędu ułamka mikrowolta. Ekstremalnie niski poziom sygnału użytecznego stwarza wysokie wymagania względem toru służącego do jego



Rys. 2. Ciśnieniowy zestaw do badań efektu WNZ w gazach. Widoczny jest zainstalowany membranowy czujnik EA (1) oraz połączony z nim wzmacniacz pasmowo-przepustowy (2)

akwizycji. Sygnały EA są wzmacniane we wzmacniaczu pasmowo-przepustowym, który pokazany został na rysunku 2.

W celu uzyskania wymaganego stosunku sygnału do szumu, w urządzeniu zastosowane zostały precyzyjne wzmacniacze operacyjne, o bardzo niskim poziomie szumu oraz zespół filtrów górno- i dolnoprzepustowych. Filtr górnoprzepustowy tłumi sygnały tła akustycznego w paśmie częstotliwości $0 \div 6$ kHz, natomiast filtr dolnoprzepustowy eliminuje składowe sygnału powyżej 60 kHz, przyczyniając się do obniżenia szumu generowanego przez elementy składowe wzmacniacza. Po wzmocnieniu (54 dB) i filtracji pasmowo-przepustowej, sygnał EA jest przesyłany do analogowo-cyfrowego modułu konwersji i akwizycji danych.

W trakcie wszystkich cykli pomiarowych stosowany był przemysłowy moduł akwizycji danych typu USB-1901, wyprodukowany przez firmę ADLINK INC – rysunek 3. Moduł umożliwia konwersję analogowo-cyfrową z rozdzielczością 70 mikrowoltów na bit, w zakresie pomiarowym ± 2 V oraz ciągły transfer danych do komputera, rejestrującego z prędkością 250 kilopróbek na sekundę. Wysokiej jakości procesor analogowy zapewnia transmisję danych, o stosunku sygnału do szumu wynoszącym 89 dB. Jest to kluczowym czynnikiem przy rejestracji słabych sygnałów akustycznych. Moduł umożliwia zapis sygnałów analogowych z wykorzystaniem do czterech kanałów wejściowych i programowalnej prędkości transmisji.

W celu określenia progu czułości aparatury rejestrującej sygnały generowane przez WNZ przygotowane zostało oprogramowanie analizujące cyfrowe zapisy sygnału. Oprogramowanie umożliwiało dalszą eliminację szumów tła metodą filtracji wąskopasmowej, przy pomocy krótkookresowej transformaty Fouriera (STFT). Rejestrowany sygnał był analizowany

przy zastosowaniu fragmentacji na segmenty o czasie trwania 70 milisekund. Dla każdego segmentu wykonywana była krótkookresowa czasowo-częstotliwościowa transformacja Fouriera. Pozwoliło to na wyróżnienie 216 segmentów widmowych o szerokości 250 Hz, z wyznaczoną lokalną gęstością mocy dla zakresu widma sygnału $6 \text{ kHz} \div 60 \text{ kHz}$. Wyniki prezentowane są w postaci spektrogramu, czyli wykresu o dwóch wymiarach geometrycznych, z których oś odciętych reprezentuje czas, a oś rzędnych – częstotliwość. Lokalny poziom wyznaczonej amplitudy sygnału (mikrowolty) jest reprezentowany przez kolor określonego punktu obrazu. Równocześnie, w przygotowanym oprogramowaniu załączono procedurę wyznaczającą średni poziom tła rejestrowanego sygnału. Dodatkowa procedura umożliwia zsumowanie przekroczeń wyznaczonego poziomu tła, w obrębie wszystkich segmentów widma sygnału i wszystkich fragmentów czasowych.



Rys. 3. Moduł do konwersji analogowo-cyfrowej i akwizycji danych typu USB-1901, firmy ADLINK INC

Tło jest tu rozumiane jako średni poziom amplitudy sygnału, wyznaczony dla całego czasu wykonania pomiaru. Liczba przekroczeń średniego poziomu tła indukuje lokalną aktywność generowanych procesów wyładowań niezupełnych. Sposób wyliczania tła i liczby przekroczeń dostosowany jest do charakterystyki widmowej sensora przemysłowego EA. Z powodu nieliniowej charakterystyki czułości akustycznego sensora membranowego, analizowany przedział częstotliwości podlegał obróbce z użyciem dwóch podprzedziałów – niższego w zakresie 6-33 kHz oraz wyższego, w zakresie 33-60 kHz. W trakcie przeprowadzonych badań ustalono, że w niższym z wymienionych przedziałów częstotliwości aparatura rejestruje o wiele wyższą liczbę przekroczeń poziomu tła. Odpowiadają one wyładowaniom niezupełnym. Sygnały w górnym zakresie częstotliwości odpowiadają natomiast efektom przebicia.

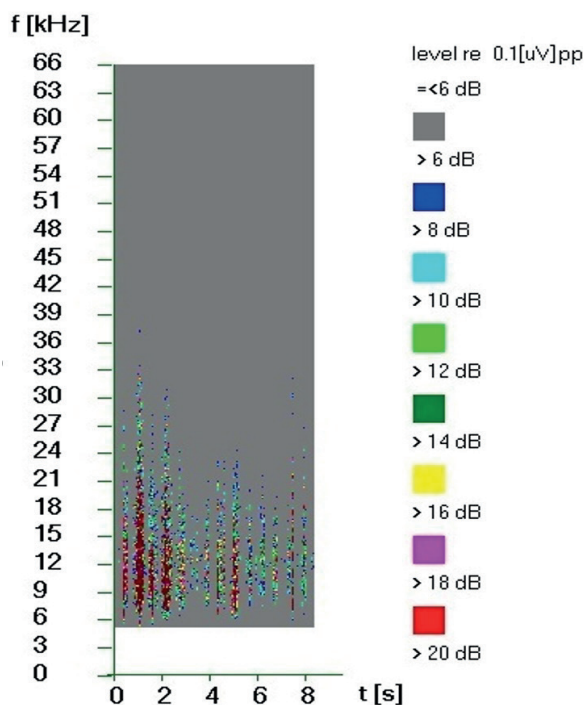
Wykorzystanie chwilowej gęstości widmowej sygnałów, analizy widmowej z użyciem spektrogramów oraz regulowanego progu detekcji, ustalanego indy-

widualnie do konkretnego tła akustycznego, pozwala na poprawę stosunku sygnału do szumu tła i w konsekwencji znaczącą poprawę czułości metody.

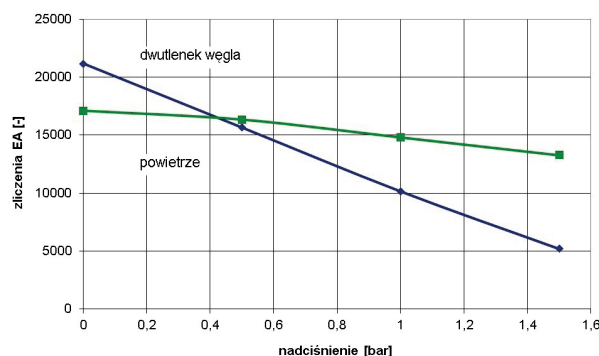
Prezentowane wyniki zostały wyznaczone jako średnie wartości z trzech przeprowadzonych pomiarów. Opisane w artykule wyładowania niezupełne na poziomie kilkuset pikokulombów miały charakter niestabilny, wartość uwalnianego ładunku podlegała znacznym fluktuacjom w czasie. W związku z tym autorzy artykułu wykorzystywali średnią wartość wskazań użytego analizatora akustycznego uzyskaną w trakcie dziesięciosekundowego pomiaru. Wskazania opisanego w artykule analizatora akustycznego zostały zwalidowane w trakcie serii pomiarów przeprowadzonych w Instytucie Energetyki równolegle z pomiarami prowadzonymi na laboratoryjnym urządzeniu typu PD Smart firmy Doble Lemke [17]. Na podstawie tych porównań stwierdzono, że próg detekcji wyładowań niezupełnych analizatora akustycznego wynosi 200 pC. Dla tego poziomu wyładowań przedział niepewności pomiarowej serii 10 powtórzeń oszacowano na 100 pC. Jest to wartość zadowalająca. Ograniczeniem metody akustycznej jest natomiast konieczność izolacji od drgań o charakterze mechanicznym – ze źródeł przemysłowych lub transportu oraz od źródeł promieniowania elektromagnetycznego o dużej

mocy. Ponadto brak jest bezpośredniej zgodności metody EA z wymaganiami normowymi.

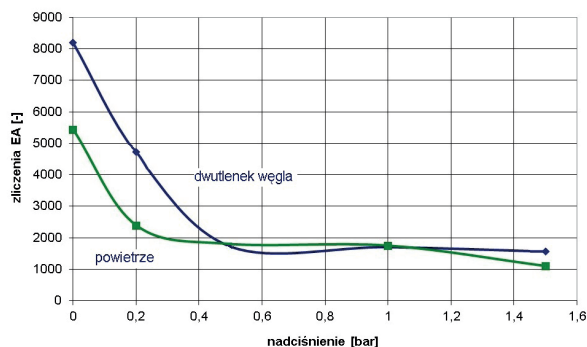
Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy spektrogram – zarejestrowany dla CO₂ w zestawie ciśnieniowym, pod napięciem 8 kV, dla lekkiego nadciśnienia równego 0,2 bar, przy czym układ ciśnieniowy był uziemiony. Suma zliczeń przekroczeń poziomu tła dla zakresu częstotliwości 6 ÷ 33 kHz wynosiła 4675. Jak wspomniano, odpowiadają one wyładowaniom niezupełnym. Są one liczne przy tak niskim nadciśnieniu. Zarejestrowano zaledwie kilka sygnałów o nieco wyższej częstotliwości, które mogłyby odpowiadać przeskokom większych ładunków. Dla każdego sygnału kolorem oznaczona została jego amplituda.



Rys. 4. Spektrogram sygnałów EA zarejestrowany dla CO₂ pod napięciem 8 kV, dla ciśnienia 0,2 bar, układ ciśnieniowy był uziemiony. Suma zliczeń przekroczeń poziomu tła dla zakresu częstotliwości 6 ÷ 33 kHz – odpowiadająca WNZ – wynosiła 4675. Zarejestrowano zaledwie kilka sygnałów o nieco wyższej częstotliwości. Kolorem oznaczona została lokalna amplituda sygnału



Rys. 5. Liczba zliczeń EA w funkcji ciśnienia dla układu nieziemionego



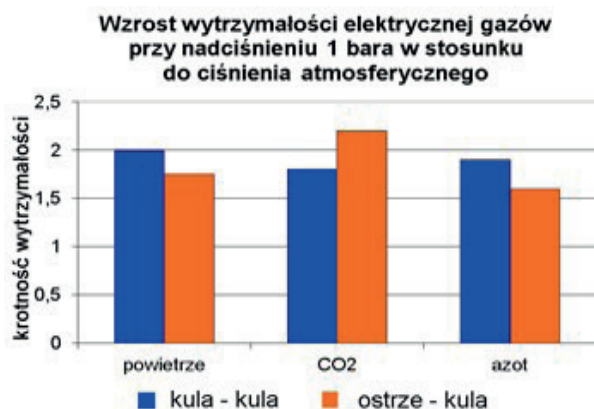
Rys. 6. Liczba zliczeń EA w funkcji ciśnienia dla układu uziemionego

Z kolei na rysunkach 5 i 6 przedstawione zostały zależności liczby zliczeń EA w funkcji ciśnienia dla układu badawczego, odpowiednio – nieziemionego oraz uziemionego. Wzrost nadciśnienia wiąże się ze wzrostem wytrzymałości elektrycznej gazu, a zatem słabszym efektem WNZ i w konsekwencji – spadającą sumą zliczeń sygnałów akustycznych. W przypadku układu nieziemionego zarejestrowano liniowy spadek sumy rejestrowanych zliczeń EA dla rosnącego ciśnienia gazu w układzie. Przy czym dla CO₂ spadek ten był znacznie większy niż w przypadku powietrza. W przypadku układu uziemionego, spadek miał bardziej złożony charakter (Rys. 6). Był on jednak również wyraźniej silniej zaznaczony dla CO₂ niż powietrza.

Wyniki badań wytrzymałości elektrycznej

Badana była wytrzymałość układu zapewniającego równomierny oraz nierównomierny rozkład pola przy kilku poziomach nadciśnienia. Wyniki badań przedstawiają rysunki 7-9.

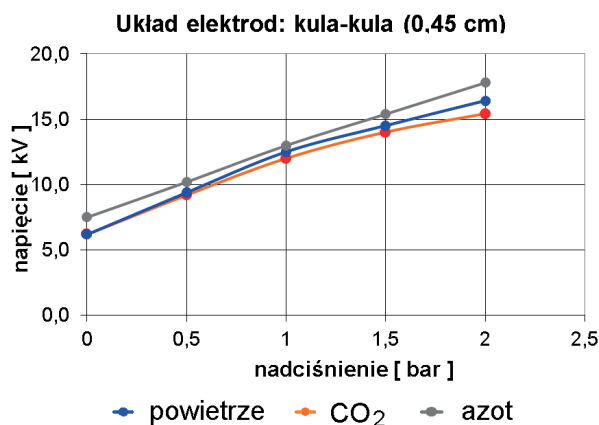
W przypadku układu zapewniającego równomierny rozkład pola elektrycznego – składającego się z dwóch elektrod kulowych przy odstępnie 0,45 cm – wzrost ciśnienia badanych gazów powodował wyraźny wzrost wytrzymałości elektrycznej. W przypadku powietrza, przy nadciśnieniu 1 bara, odnotowano dwukrotny wzrost wytrzymałości w stosunku do wytrzymałości przy ciśnieniu atmosferycznym. Nieco mniejsze wartości wyznaczono dla azotu i dwutlenku węgla (rys. 7). Na rysunku 8 przedstawiono porównanie wytrzymałości elektrycznej badanych gazów. Największą wytrzymałość uzyskano dla azotu. Różnice były jednak stosunkowo niewielkie.



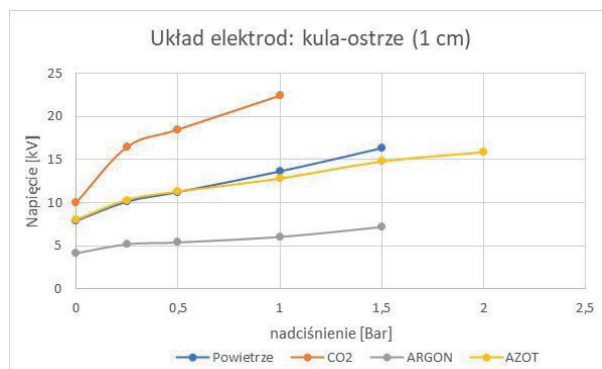
Rys. 7. Wyniki porównawcze wzrostu wytrzymałości elektrycznej gazów przy nadciśnieniu 1 bara

W przypadku układu zapewniającego nierównomierny rozkład pola (elektroda ostrzowa – elektroda kulowa), największą wytrzymałość elektryczną zarejestrowano w obecności dwutlenku węgla – rysunki 7 i 9. Z kolei najniższą wytrzymałością elektryczną odznaczał się argon – rysunek 9. Ponadto argon okazał się być gazem, którego wytrzymałość wzrasta jedynie w bardzo niewielkim stopniu wraz ze wzrostem ciśnienia. Wykazały to również wstępne pomiary z wykorzystaniem EA. Należy zauważyć, że w przypadku układu z nierównomiernym rozkładem pola wytrzymałość elektryczna gazów wykazała dobrą korelację z ich gęstością, związaną z ilością atomów w cząsteczce.

W przypadku układu zapewniającego nierównomierny rozkład pola (elektroda ostrzowa – elektroda kulowa), największą wytrzymałość elektryczną zarejestrowano w obecności dwutlenku węgla – rysunki 7 i 9. Z kolei najniższą wytrzymałością elektryczną



Rys. 8. Charakterystyka wytrzymałości elektrycznej układu równomiernego (elektroda kulowa – elektroda kulowa), w obecności różnych gazów, przy różnych wartościach nadciśnienia



Rys. 9. Charakterystyka wytrzymałości elektrycznej układu nierównomiernego (elektroda ostrzowa – elektroda kulowa) w obecności różnych gazów przy różnych nadciśnieniach

odznaczał się argon – rysunek 9. Ponadto argon okazał się być gazem, którego wytrzymałość wzrasta jedynie w bardzo niewielkim stopniu wraz ze wzrostem ciśnienia. Wykazały to również wstępne pomiary z wykorzystaniem EA. Należy zauważyć, że w przypadku układu z nierównomiernym rozkładem pola wytrzymałość elektryczna gazów wykazała dobrą korelację z ich gęstością, związaną z ilością atomów w cząsteczce. W przypadku CO₂ są to trzy atomy – 44 g/mol i wyraźnie najbardziej korzystna charakterystyka. Dla powietrza oraz azotu są to dwa atomy (O₂ i N₂) i odpowiednio 29 i 28 g/mol – stąd niemal identyczne charakterystyki. W przypadku szlachetnego argonu występują pojedyncze atomy, jakkolwiek o wysokiej masie – 40 g/mol. W tym wypadku decyduje jednak inny efekt – zerowa elektroujemność atomów z oktetem elektronów na podpowłokach 3s i 3p. Podczas gdy atomy tlenu i azotu mają charakter silnie elektroujemny. Ze względu na duży rozrzut otrzymanych wartości pomiarów zarówno WNZ jak i wytrzymałości elektrycznej, wyniki dla argonu nie zostały w pełni zaprezentowane. Podsumowując, stwierdzono brak przydatności tego gazu jako medium elektroizolacyjnego.

Wnioski

Na podstawie analizy wyników wstępnych badań porównawczych wytrzymałości gazów można stwierdzić, że w przypadku układu zapewniającego nierównomierny rozkład pola, największe wartości napięcia przeskoku występują dla dwutlenku węgla. Nie budzi to zdziwienia biorąc pod uwagę trójatomowe cząsteczki gazu i relatywnie wysoką jego gęstość. W układzie pola równomiernego wyniki pomiarów wykazały, że wszystkie z poddanych badaniu gazów charakteryzowały się podobną wytrzymałością elektryczną. Wspólną cechą wyników otrzymanych z badań obu układów była zauważalna zależność wytrzymałości gazów od ich ciśnienia, która wykazywała tendencję rosnącą. W przypadku powietrza, przy nadciśnieniu 1 bara, odnotowano dwukrotny wzrost wytrzymałości w stosunku do wytrzymałości przy ciśnieniu atmosferycznym. Bardzo podobne wyniki otrzymano dla dwutlenku węgla i azotu. Jednak w przypadku argonu tendencja ta była niewielka, co potwierdziły wyniki wstępnych badań z wykorzystaniem emisji akustycznej. Z tego punktu widzenia można wnioskować, że argon nie nadaje się do zastosowania jako gaz elektroizolacyjny.

Jest to konsekwencją jego właściwości jako gazu szlachetnego o zerowej elektryczności atomów. W przyjętych warunkach przeprowadzonego eksperymentu dwutlenek węgla wykazał się największą wytrzymałością w obecności pola nierównomiernego, przy akceptowalnych wynikach wytrzymałości azotu i powietrza w polu równomiernym, co może wskazywać kierunek doboru mieszanin gazów w dalszych badaniach.

Kolejnym etapem badań będą badania mieszaniny nietoksycznych gazów, które mają charakteryzować się biodegradowalnością nie zagrażającą środowisku naturalnemu. W tym celu konieczne będzie podjęcie współpracy ze specjalistami z dziedziny chemii.

W kontekście coraz powszechniejszego zastosowania wysokiego napięcia stałego w systemie przesyłu energii elektrycznej na świecie, planowane jest również wykorzystanie ciśnieniowego układu pomiarowego do badania wytrzymałości gazów w obecności wysokiego napięcia stałego.

Przyjęto: 26.06.2025, zaakceptowano: 30.01.2026, opublikowano: 17.02.2026

LITERATURA

- [1] Haynes William M.(red.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, wyd. 97, Boca Raton: CRC Press, (2016), ISBN 978-1-4987-5429-3 (ang.)
- [2] <https://www.kierunekenergetyka.pl/artikul,59300,bezpieczna-praca-z-sf6.html>
- [3] Ravishankara A.R. et al., Atmospheric Lifetimes of Long-Lived Halogenated Species, Science, 259 (5092), (1993), 194–199
- [4] Polski Przemysł – Ekologiczny rozdział energii, Green Switching, 50 (2012)
- [5] BBC Climate change: Electrical industry's 'dirty secret' boosts warming (2019), (bbc.com)
- [6] <https://wysokienapiecie.pl/96956-unijna-regulacja-zakazujaca-stosowania-gazu-sf6-jest-juz-gotowa-sa-juz-alternatywy/>
- [7] Rozporządzenie Parlamentu i Rady UE odnośnie fluorowanych gazów cieplarnianych [4] Report – A9-0048/2023 (2023), (Regulation, Annex IV)
- [8] Bellofatto L., Sigismondi P., SF6 FREE Alternative – Study of Ternary Mix Natural Gas for Electrical Insulation Purpose, PCIC Energy Europe (PCIC Energy), Milan, Italy, (2023), 1–7
- [9] Kogut K., Kasprzyk K., Brzeziński H., Kłóś R., Alternative for SF6 – review and Łukasiewicz – Institute of Electrical Engineering (Ł - IEL) approach to the subject, Przegląd Elektrotechniczny, 100 (2024), 12/2024, 157-160
- [10] Owen J., Xiao A., Bonk J. et al., Recent Development of Two Alternative Gases to SF6 for High Voltage Electrical Power Applications, Energies, 14 (2021), No. 16, 5051
- [11] Okabe S., Goshima H., Tanimura A., Tsuru S., Yaegashi Y., Fundamental Insulation Characteristic of High-Pressure CO2 Gas under Actual Equipment Conditions, IEEE Trans. on Dielectrics and Elect. Insulation 15 (2008), No. 4, 1023–1030
- [12] Sikorski W., Development of Acoustic Emission Sensor Optimized for Partial Discharge Monitoring in Power Transformers, Sensors, 19, 1865 (2019)
- [13] Fechet R., Petrariu A.I., Graur A., Partial Discharge and Internet of Things: A Switchgear Cell Maintenance Application Using Microclimate Sensors, Sensors, 21, 8372 (2021)
- [14] Morris J., Smith C., Tavernier K., Improved condition monitoring using internally mounted PD sensors within network components and switchgear enclosures, Proc. of 27th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2023, Rome, 12–15 June 2023, Paper nr 11486
- [15] <https://aesteel.eu>
- [16] Castro B., Clerice G., Ramos C., Andreoli A., Baptista F., Campos F., Ulson J., Partial Discharge Monitoring in Power Transformers Using Low-Cost Piezoelectric Sensors, Sensors, 16 (2016), 1266
- [17] Śmietanka H., Molas M., Ranachowski Z., Ranachowski P., Wiczorek K., Application of the acoustic emission method to record partial discharges in a medium voltage switchgear model, Przegląd Elektrotechniczny, 100 (2024), 11/2024, 286–290