

Sześćciofluorek siarki a ochrona środowiska

Streszczenie. W artykule opisano zastosowanie sześćciofluorku siarki jako medium izolacyjnego w urządzeniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia. Przedstawiono także inne gazy i ich mieszaniny jako alternatywne do SF₆.

Abstract. The paper describes the use of sulfur hexafluoride as an insulating medium in high voltage power devices. Other gases and mixtures thereof are also presented as alternatives to SF₆. (**Sulfurhexafluoride and environmental protection**).

Słowa kluczowe: izolacja gazowa, sześćciofluorek siarki, gazy alternatywne, ochrona środowiska.

Keywords: gas insulation, sulfurhexafluoride, alternative gases, environment protection.

Wstęp

W elektroenergetyce izolacja gazowa wykorzystywana jest od wielu, wielu lat. Na początku była to wyłącznie izolacja używana w liniach i rozdzielniach napowietrznych. Obecnie do gazów wykorzystywanych w technice izolacyjnej urządzeń elektroenergetycznych należą m.in. sześćciofluorek siarki (SF₆), azot (N₂) i różne mieszaniny (mix gazowy). Jednak najbardziej naturalną i powszechnie występującą mieszaniną jest powietrze. W normalnych warunkach powietrze jest niemal idealnym dielektrykiem, dlatego powszechność jego stosowania jest znana od wielu lat. I tak wykorzystuje się np. odstęp między przewodami fazowymi linii napowietrznej, odstęp powietrzny pomiędzy elementami urządzeń rozdzielczych itp. Wytrzymałość elektryczna powietrza zależy od: odległości między elektrodami, kształtu elektrod (najwyższa wytrzymałość dla układu elektrod płaskich, najniższa – dla ostrzowych), ciśnienia powietrza, temperatury, wilgotności (szczególnie silny wpływ przy elektrodach ostrzowych), rodzaju przyłożonego napięcia (stałe, zmienne, udarowe). Jednakże, gdy urządzenia elektroenergetyczne muszą być montowane w trudnych warunkach klimatycznych i zabrudzeniowych oraz konieczna jest miniaturyzacja urządzeń wówczas najczęściej powietrze zastępowane jest sześćciofluorkiem siarki, którego użycie pozwala na kompaktowość budowy tych urządzeń przy zachowaniu odpowiednich parametrów użytkowych [1, 2]. Jednakże w ostatnich latach, ze względu na zagrożenia dla środowiska naturalnego, jakie są związane ze stosowaniem SF₆, proponowane jest coraz szersze zastępowanie tego gazu przez mieszaniny tzw. gazów alternatywnych [3-5]. Gazy te muszą posiadać odpowiednie parametry, nie gorsze niż SF₆, ale przede wszystkim muszą być przyjazne dla środowiska naturalnego.

Historia stosowania SF₆ w elektroenergetyce

Warto przybliżyć kilka dat pokazujących historię otrzymania i następnie wdrażania sześćciofluorku siarki zanim stał się gazem powszechnie stosowanym, jako medium izolacyjne w urządzeniach elektroenergetycznych. Poniżej zestawiono kilka z tych dat:

1900 – H.Moissan i P.Lebeau (Francja) – jako pierwsi otrzymali SF₆ w reakcji bezpośredniego działania fluoru na siarkę w rurze miedzianej,
1905 – M.Berthelot – stwierdził, że SF₆ ma bardzo dobre właściwości elektryczne i nie ulega rozkładowi pod wpływem wyładowań elektrycznych,
1937 – pierwsze próby użycia w urządzeniach elektrotechnicznych,
1939 – patent we Francji na zastosowanie w układzie izolacyjnym kabli i kondensatorów,

1947 – USA – opanowanie produkcji SF₆ na skalę przemysłową,
1965 – produkcja osłoniętych rozdzielnic WN oraz wyłączników WN.

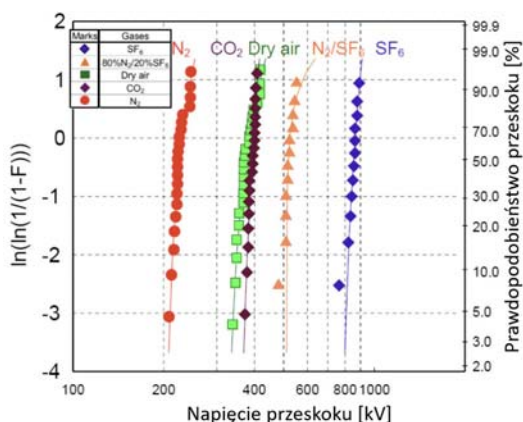
W Polsce, w roku 1970 w Instytucie Elektrotechniki, skonstruowano jednopolową rozdzielnicę z izolacją SF₆ na napięcie 123 kV, prąd 1250 A, z wyłącznikiem o prądzie wyłączalnym 25 kA.

Należy sobie uzmysłowić, że obecnie roczna produkcja SF₆ na świecie to około 7-8 tysięcy ton, a z tego około 80% wyprodukowanego SF₆ jest zużywane w urządzeniach elektroenergetycznych, takich jak: wyłączniki, przekładniki, transformatory GIT (ang. *Gas Insulated Transformers*), linie GIL (ang. *Gas Insulated Lines*), rozdzielnie GIS (ang. *Gas Insulated Substations/Switchgear*), kable GIC (ang. *Gas Insulated Cables*). Natomiast około 20% wykorzystywane jest w przemyśle metalurgicznym oraz w instalacjach dźwiękochłonnych (prędkość rozprzestrzeniania się dźwięku w SF₆ to 136 m/s).

Właściwości SF₆

- Sześćciofluorek siarki to gaz:
- syntetyczny, cząstka o kształcie oktaedrycznym (ośmiościennym) – 1 atom siarki w środku, 6 atomów fluoru w wierzchołkach,
 - bardzo stabilny do temperatury około 500°C, choć w obecności krzemu (np. blacha stalowo-krzemowa w transformatorze) zaczyna się rozkładać już w 200°C,
 - niereagujący z wodorem i metalami, a z tlenem reaguje tylko w obecności wyładowań niepełnych,
 - bezbarwny,
 - bez zapachu,
 - nietrujący – mieszanina 80% SF₆ i 20% O₂, w której umieszczono zwierzęta laboratoryjne nie spowodowała w ich organizmach zmian fizjologicznych,
 - niepalny,
 - o gęstości równej 6,16 g/dm³, to znaczy około 5 razy większej niż gęstość powietrza (jeden z najcięższych gazów),
 - elektroujemny, czyli wykazuje powinowactwo elektronowe, to znaczy zdolność do wychwytywania wolnych elektronów z przestrzeni międzyelektrodowej,
 - o doskonałych właściwościach elektroizolacyjnych – wytrzymałość elektryczna w polu jednorodnym 2,4-rza większa od wytrzymałości powietrza (rys.1),
 - o wytrzymałości elektrycznej zależnej od obecności zanieczyszczeń i niejednorodności pola elektrycznego,
 - charakteryzujący się współczynnikiem stratności dielektrycznej $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-6}$,
 - o przenikalności elektrycznej względnej równej $\epsilon_w = 1,002$,

- którego przewodność cieplna wynosi $\gamma_c = 1,26 \cdot 10^{-2}$ W/mK,
- posiadający dużą zdolność przenoszenia ciepła – odprowadza ciepło z torów prądowych umożliwiając obciążenie ich większym prądem, w wyłączniku intensywnie odprowadza ciepło z łuku elektrycznego, co prowadzi do zmniejszenia średnicy i wzrostu rezystancji łuku.



Rys.1. Porównanie wytrzymałości elektrycznej SF₆ z innymi gazami przy napięciu przemiennym [6]

Istnieją niestety pewne ograniczenia w stosowaniu sześciopowodku siarki związane z jego wadami. Są to, między innymi:

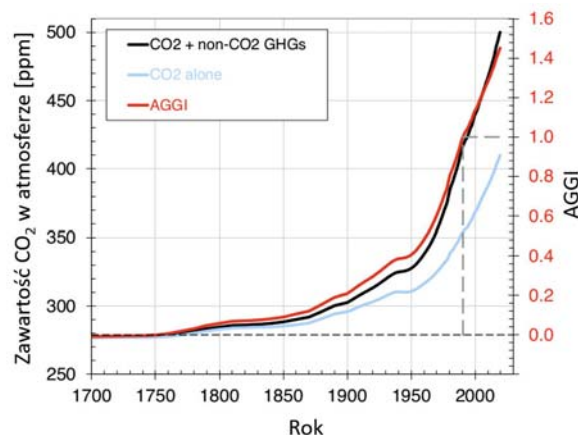
- wysokie koszty inwestycyjne budowy urządzeń elektroenergetycznych,
- konieczność starannego doboru materiałów konstrukcyjnych i izolacyjnych stałych do współpracy z SF₆ – nie mogą chemicznie reagować ze sobą, wprowadzać zanieczyszczeń, oddawać wilgoci zaabsorbowanej przed montażem. Wymagany jest suchy i czysty montaż na każdym etapie produkcji urządzenia,
- konieczność wytworzenia próżni technicznej w urządzeniu przed napełnieniem go SF₆,
- możliwość rozszczelnienia osłony i niekontrolowana emisja gazu do atmosfery,
- konieczność stosowania osłon o dużej szczelności, aby zapobiec przedostawaniu się gazu do atmosfery,
- skomplikowany demontaż, naprawa i ponowny montaż fragmentów instalacji w przypadku awarii – wymaga dużo dłuższego czasu niż usuwanie awarii w rozdzielnicach konwencjonalnych (z izolacją powietrzną),
- agresywność produktów rozpadu SF₆ powstających pod wpływem działania łuku elektrycznego – tworzące się związki toksyczne osadzają się w filtrach i stwarzają zagrożenie dla pracowników obsługi podczas remontu i demontażu urządzeń napełnionych SF₆,
- konieczna kontrola jakości gazu co 1-5 lat podczas okresowego przeglądu,
- czysty SF₆ skrapla się w niskich temperaturach (około -40°C), co powoduje zmniejszenie jego gęstości w zamkniętym szczelnie urządzeniu i pociąga za sobą gwałtowny spadek wytrzymałości elektrycznej,
- konieczność przekonania społeczeństwa o braku zagrożeń ze strony SF₆ przez efekt cieplarniany, niszczenie warstwy ozonowej i obecność substancji trujących.

SF₆ a środowisko naturalne

Normy międzynarodowe określają dopuszczalny ubytek SF₆ przez nieszczelność urządzeń na nie więcej niż 1%

rocznie. W urządzeniach najlepszych producentów ubytek ten nie przekracza zwykle 0,1%/rok. SF₆ przechowywany jest w butlach ciśnieniowych, a używany w instalacjach o dużej szczelności i trwałej obudowie. Odzysk zużytego gazu wykonywany jest przez specjalistyczne firmy.

Przeciwnicy stosowania SF₆ w urządzeniach elektroenergetycznych często powołują się na wzmocnienie przez ten gaz efektu cieplarnianego. Naukowe rozważania pokazują, że realny wpływ SF₆ na efekt cieplarniany jest bardzo ograniczony (rys. 2 i rys. 3).

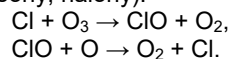


Rys.2. Wzrost zawartości dwutlenku węgla w atmosferze w poszczególnych latach; AGGI – indeks roczny przyrostu zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze [6]

Faktem jest, że SF₆ podobnie jak CO₂ i CFC (ang. *ChloroFluoroCarbons*), do których należą:

- freony: CF₂Cl₂, CF₃Cl, CFCl₃, CHFCl₂,
- halony: CF₂BrCl; CBrF₃,

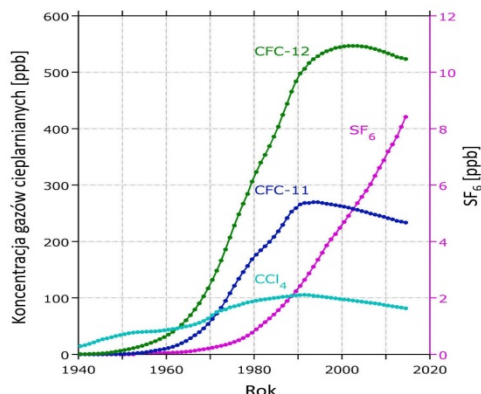
absorbują promieniowanie podczerwone i może przyczyniać się do tzw. wtórnego sztucznego napromieniowania podczerwonego powracającego w dolne partie atmosfery powodując efekt cieplarniany. Jednak z drugiej strony, światowa roczna produkcja SF₆ (maksimum produkcji to 9000 ton w 1996 i od tego czasu systematycznie spada) oraz bardzo niewielka ilość, która może uwolnić się do atmosfery jest wielokrotnie mniejsza niż produkcja freonów (w Chinach i Indiach), czy też znacznie mniejsza od ilości CO₂ powstającego w procesie naturalnego spalania. Szacuje się, że udział SF₆ w efekcie cieplarnianym stanowi tylko 0,07% całego zjawiska! Należy także dodać, że nie obserwuje się wpływu SF₆ na powstawanie dziury ozonowej, gdyż SF₆ nie uczestniczy w procesie stratosferycznego rozkładu ozonu O₃, ponieważ nie ulega aktywności fotolitycznej (rozkład pod wpływem światła) i nie posiada atomów chloru w swojej cząsteczce. Za rozpad ozonu odpowiedzialne są przede wszystkim bardzo agresywne atomy chloru, które uwalniają się pod wpływem promieniowania świetlnego z substancji zwanych CFC (freony, halony):



Fluor należy do VII grupy układu okresowego pierwiastków zwanych fluorowcami lub halogenami – fluor, chlor, brom, jod, astat. Są to pierwiastki elektroujemne o dużej aktywności chemicznej. Fluor bardzo szybko łączy się z wodorem tworząc HF – nie wchodzi w reakcję z ozonem (rys.3).

Sześciopowodku siarki nie przyczynia się również do niszczenia warstwy ozonu w stratosferze. Niestety w wyniku rozpadu SF₆ pod wpływem łuku elektrycznego oraz wyładowań niepełnych powstają produkty w formie gazów i proszków, a niektóre z nich są szkodliwe dla

środowiska. Proces rozkładu SF₆ powoduje powstanie związków takich jak: S, F₂, SF₂, S₂F₂, SF₄, S₂F₁₀. Ten ostatni jest gazem bardzo toksycznym, trudnym do wykrycia. Gazowe i stałe związki powstające na drodze reakcji produktów rozpadu z materiałami konstrukcyjnymi urządzenia to: CuF₂, AlF₃, WF₆, CF₄. Związki powstające w procesie rekombinacji produktów rozpadu ze śladowymi pozostałościami wody i tlenu to: SOF₂, SO₂, SO₄, HF, CF₄, SO₂F₄.



Rys.3. Koncentracja gazów cieplarnianych w atmosferze na półkuli północnej w poszczególnych latach; ppb – parts per billion (części na bilion – 10⁻¹²) [7]

W celu zneutralizowania powstających produktów rozpadu wewnątrz komór umieszcza się absorbenty takie jak:

- Al₂O₃,
- mieszanina NaOH + CaO,
- sito molekularne (sorbent o regularnej strukturze krystalicznej i określonej strukturze porów).

Zastosowanie SF₆ w systemie elektroenergetycznym

W tabeli 1 przedstawiono zakres stosowania SF₆ w systemie elektroenergetycznym.

Tabela 1. Zakres stosowania SF₆ [8]

	Rodzaj urządzenia	Poziom napięcia [kV]	Zakres temperatury [°C]	Masa SF ₆
SN	rozdzielnice	3,6÷52	-25÷40 (wnętrzowa)	~1 kg
	wyłączniki	3,6÷52	-25÷40	~0,1÷~0,2 kg
	autoreklozery	3,6÷52	-40÷50	~0,4 kg
WN	rozdzielnie	72,5÷1200	-30÷40 -50 z podgrzewaniem	30÷>1200 kg
	wyłączniki	72,5÷1200	-30÷40	2÷>400 kg dla różnych rozwiązań
	linie GIL	115÷1200	-25÷40	5÷30 kg/m w zależności od napięcia
Mieszanina z SF ₆				
SF ₆ /N ₂	wyłączniki	72,5÷735	-50÷40	36÷80% SF ₆ 3÷73 kg
	linie GIL	230÷550	-30÷40	20÷60% SF ₆ 3÷6 kg
SF ₆ /CF ₄	wyłączniki	72,5÷735	-60÷40	25÷52% SF ₆ 1÷83 kg

Wyprowadzenie energii elektrycznej z elektrowni i z OZE o coraz wyższych parametrach wytwórczych wymaga budowy linii elektroenergetycznych o coraz wyższych zdolnościach przesyłowych [9, 10]. Coraz częściej do odebrania energii elektrycznej bezpośrednio z elektrowni

stosowane są gazowe linie przesyłowe – czyli *Gas Insulated Line* (GIL), w których medium izolacyjne to SF₆ (pierwsza generacja GIL) lub mieszanina SF₆ i N₂ (druga generacja). Pierwsza instalacja wysokonapięciowej linii GIL to rok 1971. Była to linia Eastlink w Ohio (USA) na napięciu 345 kV i długości 122 m – oczywiście z czystym SF₆. Natomiast w Europie pierwszy GIL to połączenie elektrowni wodnej z systemem 400 kV (długość linii 670 m) w roku 1976 w Niemczech. Z kolei w roku 1981 uruchomiono w Guri Dam w Wenezueli GIL 800 kV, 1200 A. Spektakularne wykorzystanie tej technologii to GIL wyprowadzający energię z elektrowni w Arabii Saudyjskiej uruchomiony w 1997 – parametry tej najdłuższej (w przeliczeniu na fazę) linii to 380 kV i suma długości 17 010 m [11]. Natomiast rok później w Japonii uruchomiono najdłuższą wówczas linię GIL o długości 3 300 m (linia dwutorowa, trójfazowa) na napięciu 275 kV. Inwestorzy przeprowadzili bardzo szczegółowe analizy dotyczące wyboru rodzaju linii mającej służyć do połączenia elektrowni Shinmeika-Tokai z systemem elektroenergetycznym i wykazano, że wybór technologii GIL był rozwiązaniem znacznie tańszym niż zastosowanie 5-torowej linii 3-fazowej ułożonej kablami o izolacji XLPE z żyłami roboczymi o polu przekroju 2500 mm² [12]. Natomiast pierwszy GIL, w którym zastosowano mieszaninę gazów SF₆ i N₂ (druga generacja GIL), uruchomiono w 2001 w Genewie (Szwajcaria) – zastępując fragment linii napowietrznej. Jest to GIL na napięciu 220 kV o długości 420 m. Jednak w kolejnych oddawanych do eksploatacji GIL-ach nadal stosowany jest czysty SF₆. Tak jest np. w linii 800 kV, 4000 A uruchomionej w 2009 r. w Laxiwa Dam w Chinach (rys. 4) o całkowitej długości 2928 m (2 tory x 3 fazy) [11].



Rys.4. Widok linii GIL Laxiwa [11]

Również, w aktualnie najdłuższej linii GIL, jako izolację gazową zastosowano czysty sześćfluorek siarki. Jest to linia Suzhou-Nantong w Chinach. Oddano ją do eksploatacji w roku 2019, a jej główne parametry techniczne to napięcie robocze 1000 kV i zdolność przesyłowa 10 GW. Linię o długości 5,8 km tworzą dwa tory trójfazowe, co łącznie daje ok. 35 km jednofazowego GIL-a. Jak wielkim wyzwaniem technologicznym było ułożenie tej linii niech świadczy fakt, że jest to linia poprowadzona pod rzeką Jangcy w tunelu na głębokości dochodzącej do 75 m pod lustrem wody. Na rysunku 5 przedstawiono widok wnętrza tunelu z dwoma torami linii GIL [11, 13].

Recykling SF₆

Recykling jest to wykorzystanie odpadów lub zużytych elementów do wytworzenia nowych produktów i urządzeń. Kolejność postępowania w tym przypadku to: odzyskiwanie, regeneracja, przechowywanie, ponowne użycie, dalsza

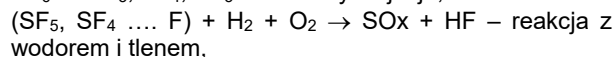
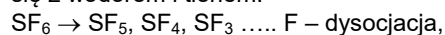
obróbka i ostateczne zlikwidowanie (zniszczenie). Produkcja, eksploatacja i likwidacja urządzeń z SF₆ spełnia założenia tzw. Agendy 21 „Czystsza produkcja” – zbiór zaleceń pro-ekologicznych ustalonych na konferencji ONZ w Rio de Janeiro w 1992 roku. Wszelkie urządzenia należy tak projektować i konstruować, aby ułatwić procedurę recyklingu.



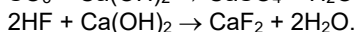
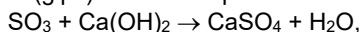
Rys.5. Tunel pod rzeką Jangcy z dwutorową linią Suzhou-Nantong na napięcie 1000 kV [13]

Zużyty SF₆ powinien być tak zneutralizowany, aby został wyeliminowany z ekocyklu poprzez przekształcenie w substancje nieszkodliwe dla środowiska naturalnego. Procedurę spalania SF₆ w specjalnych instalacjach schematycznie można przedstawić następująco:

- podgrzewanie do temperatury 1200°C, w której gaz zaczyna dysocjować w reaktywne substancje łączące się z wodorem i tlenem:



- produkty reakcji (SO_x i HF) są przepuszczane przez wilgotną płuczkę wieżową wypełnioną roztworem wodorotlenku wapnia gdzie formują się stałe siarczany wapnia (gips) i fluorek wapnia:



Uzyskany w tym procesie gips CaSO₄ jest naturalnym minerałem używanym w budownictwie. Natomiast CaF₂ jest naturalnym minerałem używanym, jako składnik pasty do zębów i innych substancji służących ochronie zdrowia (np. fluorowanie wody w wodociągach). Skuteczność powyższego procesu jest bardzo wysoka i wynosi około 99%.

Gazy alternatywne do SF₆

Gazy izolacyjne stosowane alternatywnie do SF₆ używane jako medium izolacyjne w urządzeniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia (GIS, GIL, GIT, GIC) oraz do gaszenia łuku elektrycznego w wyłącznikach WN to przede wszystkim:

- suche powietrze: N₂ (80%) + O₂ (20%),
- mieszanina z azotem: SF₆ (20-40%) + N₂ (80-60%),
- fluoroketon:
 - C5 FK 5115 – (CF₃)₂CFC(O)CF₃,
 - C6 FK 1230 – C₆F₁₂O CF₃CF₂COCF(CF₃)₂,
- fluoronitryl C4-FN 4710, często oznaczany jako g³ (ang. *Green Gas for Grid*), o składzie chemicznym: (CF₃)₂CFCN,
- mieszanina trójfluorodometanu z dwutlenkiem węgla: CF₃I (30%) + CO₂ (70%),
- czterofluoropropen HFO: C₃H₂F₄.

Podsumowanie

Można przytoczyć długą listę urządzeń pracujących w systemie elektroenergetycznym, w których stosuje się sześćfluorek siarki, jako medium izolacyjne i gaszące łuk elektryczny. Proponowane gazy alternatywne nie posiadają jednak tak dobrych właściwości eksploatacyjnych jak SF₆, chociaż ich wpływ na środowisko jest dużo mniej szkodliwy. Dodatkowo należy podkreślić, że ujemny wpływ sześćfluorku siarki na środowisko nie jest aż tak duży, jak jest to jemu często przypisywane.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Aleksandra Rakowska, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, e-mail: aleksandra.rakowska@put.poznan.pl; dr hab. inż. Krzysztof Siodła, prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, e-mail: krzysztof.siodla@put.poznan.pl;

LITERATURA

- [1] Piechocki A., Co warto wiedzieć o SF₆?, *Wydawnictwo PTPIREE*, Poznań, 1999
- [2] Rakowska A., Siodła., Sześćfluorek siarki i gazy alternatywne jako izolacja w urządzeniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 3 2022, 3-6
- [3] Shen W., Kloos A., et.al., Environment, health and safety aspects of gas-insulated power equipment containing non-SF₆ gases and gas mixtures, *CIGRE Session 2020*, paper C3-205
- [4] Stoller P.C., Schwinne M., et.al., C5 fluoroketone based gas mixture as current interrupting media for high voltage switchgear, *CIGRE Session 2020*, paper A3-118
- [5] Wang Y., Huang D., et.al., Alternative environmentally friendly insulating gases for SF₆, *MDPI Processes*, 2019, 7, 216
- [6] Hama H., Okabe S., et.al., Dry air, N₂, CO₂ and N₂/SF₆ mixtures for gas-insulated systems, *CIGRE TB No 730*, WG D1.51, June 2018
- [7] Bullister J. L., Atmospheric Histories (1765-2015) for CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl₄, SF₆ and N₂O, ORNL/CDIAC-161, NDP-095, doi: 10.3334/CDIAC/otg.CFC_ATM_Hist_2015
- [8] Franck C. M., Juhre K., Kieffel Y., et.al., Electric performance of new non-SF₆ gases and gas mixtures for gas-insulated systems, *CIGRE TB No 849*, WG D1.67, October 2021
- [9] Rakowska A., Linie energetyczne WN i NN – światowe rekordy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, R. 92, nr 10
- [10] Szczerbowski R., Rakowska A., Aspekty techniczne budowy i przyłączenia elektrowni wiatrowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, R. 92, nr 10
- [11] Koch H., Benato R., et.al., Factors for Investment Decision GIL vs. Cables for AC Transmission, *CIGRE TB No. 639*, December 2015
- [12] Rakowska A., GIL – przyszłość w przesyłce energii elektrycznej, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2005, nr 2
- [13] <https://www.nsenerybusiness.com/news/chinese-state-gil-utility-tunnel-project>