

doi:10.15199/48.2024.11.44

# Wpływ temperatury na powstawanie wyładowań niezupełnych w inkluzjach gazowych w izolacji kabli napięcia przemiennego

**Streszczenie.** Kable napięcia przemiennego stanowią obecnie główny rodzaj kabli elektroenergetycznych stosowanych w systemach przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Ich niezawodna praca jest warunkowana m.in. obecnością defektów izolacji, które mogą być źródłami wyładowań niezupełnych (wnz). W artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych rozkładów pola elektrycznego oraz analiz dla określenia warunków, w których inkluzje gazowe w izolacji mogą stać się źródłami wnz. W szczególności oszacowano numerycznie rozmiar krytyczny inkluzji sferycznych zlokalizowanych w izolacji XLPE na promieniu obciążonego kabla. Uwzględniono przy tym wpływ temperatury żyły kablowej oraz rozkładu pola temperatury w izolacji na możliwość iniepcji wnz w inkluzjach gazowych. Wykazano, że zmiany temperatury izolacji XLPE obciążonego kabla HVAC modyfikują warunki dla inicjowania i rozwoju wyładowań niezupełnych. W badaniach zastosowano złożony model numeryczny izolacji kabla AC ze sprzężonymi polami elektrycznym i cieplnym, implementując go w programie COMSOL oraz Matlab. Dzięki temu uzyskano możliwość akwizycji modelowanych sekwencji impulsów wnz w formie obrazów fazowo-rozdzielczych PRPDP.

**Abstract.** AC voltage cables are currently the main type of power cables used in electricity transmission and distribution systems. Their reliable operation is conditioned, among others, by: the presence of insulation defects, which may be sources of partial discharges (PD). The article presents the results of numerical simulations of electric field distributions and analyzes to determine the conditions under which gas inclusions in insulation may become sources of PD. In particular, the critical size of spherical inclusions located in the XLPE insulation at the radius of the loaded cable was numerically estimated. The influence of the cable core temperature and the distribution of the temperature field in the insulation on the possibility of PD inception in gas inclusions was taken into account. It has been shown that changes in the temperature of the XLPE insulation of a loaded HVAC cable modify the conditions for the initiation and development of partial discharges. The research uses a complex numerical model of AC cable insulation with coupled electric and thermal fields, implementing it in COMSOL and Matlab. Thanks to this, it was possible to acquire modeled PD pulse sequences in the form of phase-resolved PD patterns. (The influence of temperature on the formation of partial discharges in gas inclusions in the insulation of AC voltage cables).

**Słowa kluczowe:** kable AC, inkluzje gazowe, wyładowania niezupełne, symulacje numeryczne, modele polowe izolacji, COMSOL.

**Keywords:** AC cables, gaseous inclusions, partial discharges, numerical simulations, coupled electro-thermal fields, COMSOL.

## Wprowadzenie

Kable elektroenergetyczne są niezbędnymi i istotnymi komponentami wszystkich współczesnych systemów i sieci przesyłu, dystrybucji i użytkowania energii elektrycznej. W długodystansowych systemach przesyłowych, w tym przede wszystkim podmorskich oraz w układach odbioru mocy z morskich farm wiatrowych o bardzo dużych mocach znamionowych, zastosowanie znajdują głównie kable wysokiego napięcia stałego HVDC (ang. *High Voltage Direct Current*). Pomimo to, rola i znaczenie kabli prądu przemiennego AC (ang. *Alternating Current*) niezmiennie pozostają kluczowe dla poprawnego i efektywnego funkcjonowania systemów elektroenergetycznych. Kable elektroenergetyczne AC znajdują zastosowanie na każdym z poziomów napięciowych stosowanych w sieciach elektrycznych, od niskiego napięcia (nn) poczynając, poprzez sieci średniego napięcia (SN), a na sieciach wysokich (WN) i najwyższych napięć (NN) kończąc [1-4].

Współczesne konstrukcje kabli elektroenergetycznych należy uznać za dojrzałe projektowo i technicznie, uwzględniające zarówno wymagania ich użytkowników, jak i możliwości produkcyjne, które wynikają z obecnego stanu rozwoju technologii materiałów i układów izolacji kablowej [1, 2]. Pomimo to, istotnymi problemami pozostają wciąż różnego rodzaju niedoskonałości i defekty izolacji, które warunkują aktywację procesów starzeniowych typu *extrinsic* [5-7]. Na skutek destruktywnego działania tych procesów dochodzi do stopniowego obniżenia wytrzymałości elektrycznej izolacji i w efekcie skrócenie jej technicznego czasu życia.

Defekty izolacji kablowej mogą powstawać na różnych etapach: w procesie technologicznym wytwarzania kabla, podczas jego składowania, transportu, instalacji (układania) oraz w czasie eksploatacji. Mogą one mieć różną postać i formę, które wpływają, bezpośrednio lub pośrednio, na charakter i warunki rozwoju procesu degradacji izolacji. Jednym z rodzajów defektów są inkluzje (wtrąciny, pustki)

gazowe ulokowane wewnątrz materiału izolacyjnego, które mogą stać się źródłami wyładowań niezupełnych (wnz). Ich obecność w dielektryku stałym jest najczęściej efektem procesu technologicznego wytwarzania układu izolacyjnego oraz jego parametrów. Współczesne technologie produkcji kabli starają się minimalizować rozmiary defektów tego typu. Trzy dekady temu wielkość wtrąciny gazowej wynosząca 20  $\mu\text{m}$  była poziomem kontroli jakości tego typu defektów w izolacji XLPE kabli 500 kV [8]. Analizy weryfikowanego eksperymentalnie czasu życia izolacji XLPE wykazały jednak, że szacowane rozmiary krytyczne mikrostrukturalnych defektów tego dielektryka są o jeden rząd wielkości mniejsze [9-11].

Dla oceny rozmiaru krytycznej inkluzji gazowej (tzn. takiego, przy którym inkluzja może być źródłem wnz, w danym układzie izolacyjnym, przy określonych warunkach polowych i termicznych) możliwe jest zastosowanie odpowiednich, poprawnie zdefiniowanych modeli numerycznych kabla z inkluzją gazową, uwzględniających warunki wymagane dla powstawania impulsów wnz. W badaniach zastosowano taki model dla kabla AC, przygotowany w programie COMSOL, którego procedury symulacji polowych były wywoływane i parametryzowane przez odpowiednie sekwencje programowe, realizowane w programie Matlab. Efektem przeprowadzonych symulacji numerycznych były rozkłady pola elektrycznego w izolacji i w inkluzji gazowej, a także powstające w efekcie sekwencje czasowe impulsów wnz. Impulsy te podlegały rejestracji w macierzy obrazu fazowo-rozdzielczego  $\varphi$ - $q$ - $n$ , tzn. wynikiem symulacji był rozkład liczby impulsów  $n$  na płaszczyźnie faza-ładunek  $\varphi$ - $q$ . Stosując przygotowany model dokonano oszacowania rozmiaru krytycznej inkluzji sferycznych zlokalizowanych w izolacji XLPE na promieniu obciążonego kabla AC 500 kV. Uwzględniono przy tym wpływ temperatury żyły kablowej i pola temperatury w izolacji na możliwość iniepcji wnz.

## Opis analizowanego problemu

Inkluzje gazowe, zlokalizowane w izolacji kabli mogą być źródłami wyładowań niezupełnych. Jest to uwarunkowane:

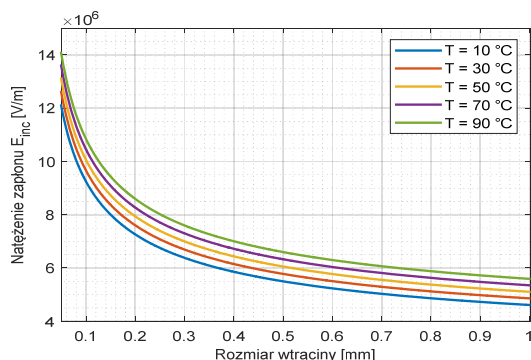
- rozmiarem, kształtem i położeniem inkluzji;
- rodzajem napięcia  $U$  (AC lub DC) i jego wartością;
- przenikalnością elektryczną  $\varepsilon$  oraz rezystywnością skrośną  $\rho_v$  materiału izolacyjnego (dielektryka);
- rozkładem pola elektrycznego  $E$  w izolacji kabla;
- rozkładem pola temperatury  $T$  w izolacji kabla.

Celem analiz przedstawionych w artykule było określenie wpływu położenia inkluzji na powstawanie wnz oraz oszacowanie rozmiaru krytycznej inkluzji sferycznej dla określonego rodzaju i konstrukcji kabla, dla którego będą spełnione warunki powstawania impulsów wyładowań przy napięciu znamionowym. Analizy wykonano dla kabla AC 500 kV z izolacją XLPE, bazując podczas definiowania parametrów modelu na geometrii rzeczywistego kabla tego typu. W kablach AC rozkład pola elektrycznego w izolacji jest determinowany przez wartość przenikalności elektrycznej. Jest ona zależna od temperatury w wielokrotnie mniejszym stopniu aniżeli rezystywność skrośna, która determinuje rozkład pola w izolacji kabli DC. W modelu uwzględniono jednak wpływ temperatury na przenikalność elektryczną XLPE, bowiem nie tylko powoduje ona niewielkie zmiany rozkładu pola  $E$  w dielektryku, ale również modyfikuje wartość współczynnika wzmocnienia pola  $E_{void}$  w inkluzji gazowej. Ponadto, temperatura wpływa na wartość natężenia iniepcji (zapłonu) wyładowań  $E_{inc}$ .

## Warunki powstawania wnz i model kabla z inkluzją

Dla powstania impulsów wnz w inkluzji gazowej muszą być spełnione dwa warunki:

1. Natężenie pola elektrycznego w inkluzji gazowej  $E_{void}$  musi osiągnąć wartość natężenia zapłonu  $E_{inc}$ . Natężenie to jest zależne od temperatury (wg charakterystyki Paschena) oraz rozmiaru (średnicy  $d$ ) inkluzji (rys. 1).
2. Musi pojawić się elektron, inicjujący rozwój wyładowania wewnątrz inkluzji. Jest to określone z pewnym prawdopodobieństwem  $P_d$  (wzór (1)), co prowadzi do opóźnienia inicjacji wyładowania względem chwili, w której został spełniony warunek 1.



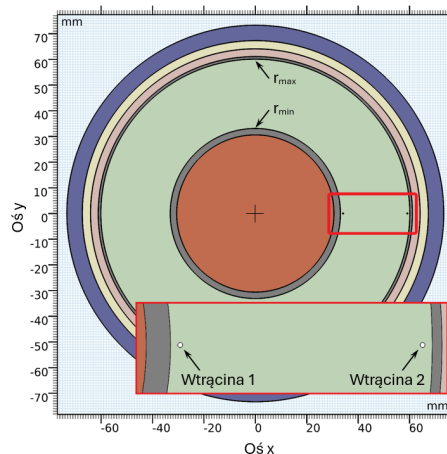
Rys.1. Zależność natężenia zapłonu wnz od rozmiaru wtrąciny gazowej oraz temperatury gazu we wtrącinie

$$(1) \quad P_d = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{\Delta t_{inc}}{\tau_{lag}}\right) & E_{void} \geq E_{inc} \\ 0 & E_{void} < E_{inc} \end{cases}$$

gdzie:  $\Delta t_{inc}$  – czas od osiągnięcia natężenia zapłonu wnz,  
 $\tau_{lag}$  – statystyczny czas opóźnienia zapłonu.

Analizowanym obiektem był numeryczny model kabla elektroenergetycznego XLPE na napięciu przemiennie 500 kV. W izolacji kabla ulokowano dwie wtrąciny gazowe,

dla których weryfikowano możliwość spełnienia warunków dla inicjacji wnz. Za pomocą złożonego modelu polowego, uwzględniającego sprzężone pola elektryczne oraz temperaturowe, wyznaczono obrazy fazowo-rozdzielcze wnz. Na rysunku 2 przedstawiono przekrój analizowanego modelu kabla, z zaznaczonym położeniem modelowych wtrącin gazowych (wtrącina nr 1 znajduje się w niewielkiej odległości od żyły kabla, a wtrącina nr 2 umiejscowiona została bliżej ekranu półprzewodzącego na izolacji). W tabeli 1 zestawiono podstawowe wymiary i parametry kabla oraz pozostałe parametry użyte podczas symulacji.



Rys.2. Numeryczny model kabla AC 500 kV z dwiema inkluzjami

Tabela 1. Parametry modelu kabla AC 500 kV

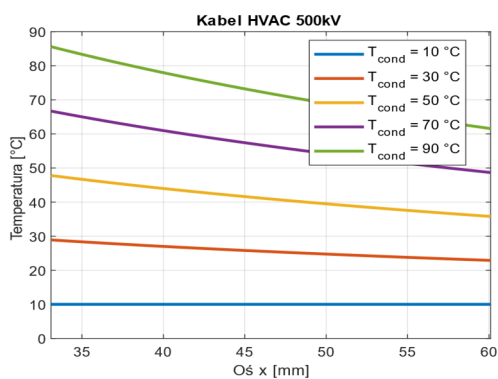
Parametr	Wartość	Jedn.
Napięcie znamionowe $U_n$	500	kV
Przekrój żyły kabla	2500	mm <sup>2</sup>
Promień zewn. ekranu na żyłę $r_{min}$	33.1	mm
Promień zewn. izolacji $r_{max}$	60.1	mm
Stała dielektryczna gazu	1.0	-
Stała dielektryczna XLPE dla 10°C	2.35	-
Stała dielektryczna XLPE dla 90°C	2.10	-
Temperatura żyły	10 do 90	°C
Temperatura otoczenia (gruntu)	10	°C
Średnica wtrącin nr 1 oraz nr 2	0.5	mm
Położenie wtrąciny nr 1	34.1	mm
Położenie wtrąciny nr 2	59.1	mm

Wartość stałej dielektrycznej XLPE zależy od temperatury, przy czym wzrost temperatury materiału powoduje spadek wartości  $\varepsilon_r$ . Podawana w literaturze wartość przenikalności względnej XLPE, dla częstotliwości 50/60 Hz, wynosi od 2,1 do 2,45 dla temperatury 25°C, a przy wzroście temperatury do 90°C następuje jej obniżenie do wartości od 1,85 do 2,2 [12-14]. W badaniach własnych, wykonanych przy użyciu systemu do szerokopasmowych pomiarów parametrów dielektrycznych Novocontrol, określono wpływ temperatury na przenikalność dielektryczną próbek XLPE. Na tej podstawie, wyznaczono charakterystykę  $\varepsilon_r(T)$ , którą w zakresie temperatur od 10°C do 90°C przybliżono funkcją liniową. Funkcję tę zastosowano następnie dla określenia wartości  $\varepsilon_r$  w modelu symulacyjnym (Tabela 1).

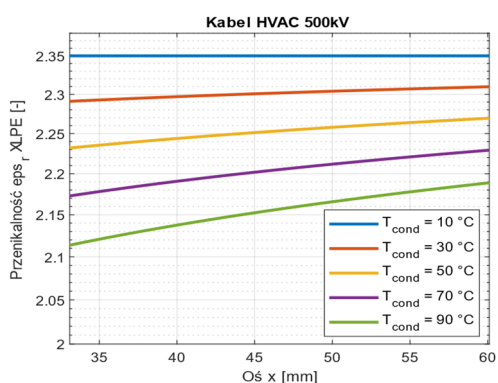
## Wyniki symulacji numerycznych dla kabla AC 500 kV

Na rysunkach 3 do 7 przedstawiono wyniki symulacji numerycznych wpływu temperatury żyły kabla AC na rozkład temperatury  $T$ , przenikalności elektrycznej

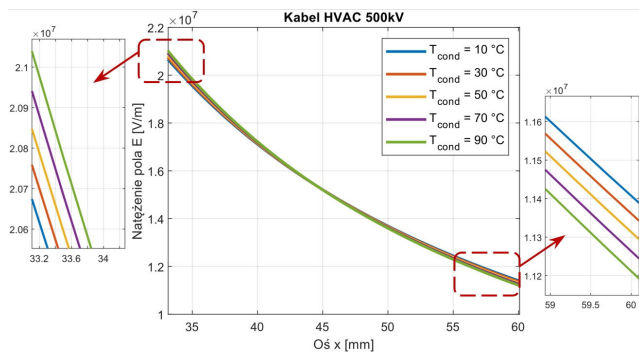
względnej  $\epsilon_r$  oraz natężenia pola elektrycznego  $E$  w izolacji XLPE oraz modelowych inkluzjach na promieniu analizowanego kabla.



Rys.3. Rozkład temperatury  $T(x)$  w izolacji XLPE kabla, przy temperaturach żyły kabla 10°C, 30°C, 50°C, 70°C i 90°C



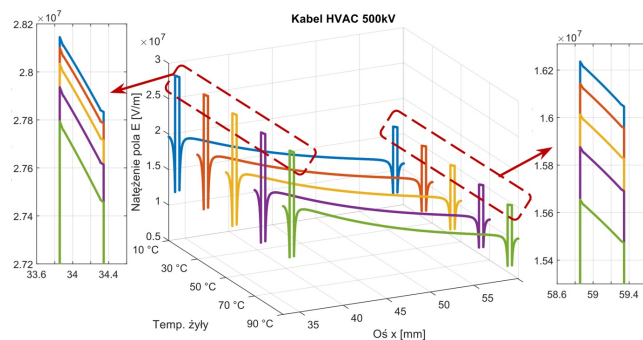
Rys.4. Rozkład stałej dielektrycznej  $\epsilon_r(x)$  w izolacji XLPE kabla, przy temperaturach żyły kabla 10°C, 30°C, 50°C, 70°C i 90°C



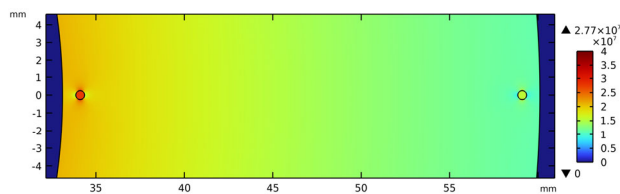
Rys.5. Rozkład natężenia pola elektrycznego  $E(x)$  w izolacji XLPE kabla, przy temperaturach żyły kabla 10°C, 30°C, 50°C, 70°C i 90°C

Wszystkie przedstawione rozkłady dotyczą stanu ustalonego i zostały wyznaczone przy określonej temperaturze żyły kabla. Wzrost temperatury żyły, wynikający ze zwiększenia obciążenia kabla, powoduje przyrost temperatury izolacji na jego promieniu (rys. 3). W przypadku nieobciążonego kabla temperatura jego izolacji jest równa temperaturze otoczenia, a wartość stałej dielektrycznej XLPE jest jednakowa wzdłuż całego promienia (rys. 4). W kablu obciążonym, obszary izolacji położone najbliżej żyły osiągają najwyższe temperatury (do ok. 85°C), co przekłada się na niewielki spadek wartości przenikalności elektrycznej w tych obszarach (do wartości ok. 2,1 dla temperatury żyły 90°C). Rozkłady natężenia pola  $E$  na promieniu kabla są typowe (rys. 5), a najwyższe wartości, przekraczające 20 kV/mm, występują przy ekranie na żyłce roboczej. Zmiana temperatury

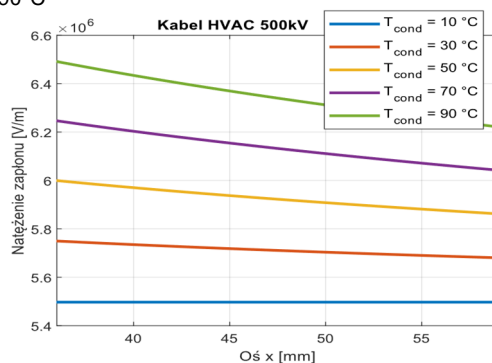
modyfikuje (pośrednio, przez zmianę wartości stałej dielektrycznej) rozkład pola  $E$  w skrajnych obszarach izolacji kabla. Wzrost temperatury żyły kabla skutkuje niewielkim wzrostem natężenia pola w obszarach izolacji w pobliżu żyły oraz niewielkim jego spadkiem części izolacji znajdującej się w warstwach zewnętrznych, bliżej ekranu zewnętrznego.



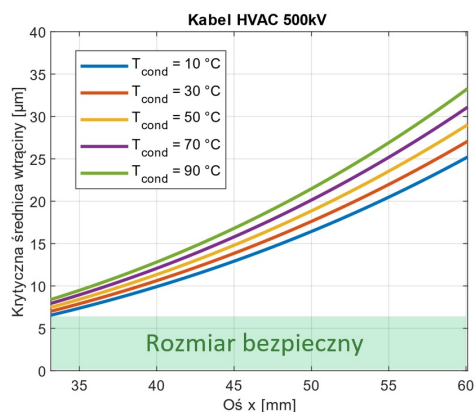
Rys.6. Rozkład natężenia pola elektrycznego  $E(x)$  w izolacji XLPE kabla, w której znajdują się dwie wtrączy gazowe, przy temperaturach żyły kabla 10°C, 30°C, 50°C, 70°C i 90°C



Rys.7. Mapa barwna rozkładu pola  $E(x)$  [V/m] w izolacji XLPE kabla, w której znajdują się dwie wtrączy gazowe, przy  $T$  żyły kabla 90°C

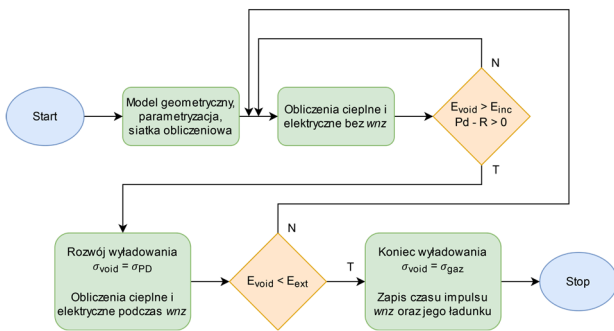


Rys.8. Natężenie zapłonu wyładowań  $E_{inc}$  dla inkluzji gazowej o średnicy 0,5 mm, położonej w izolacji XLPE na promieniu kabla, przy temperaturach żyły 10°C, 30°C, 50°C, 70°C i 90°C

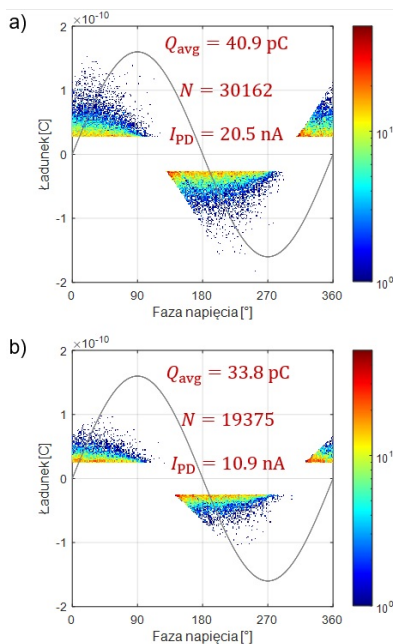


Rys.9. Wielkość krytycznej średnicy inkluzji gazowej na promieniu kabla, przy temperaturach żyły 10°C, 30°C, 50°C, 70°C i 90°C

Natężenie pola  $E$  wewnątrz modelowanych inkluzji gazowych odzwierciedla zewnętrzne warunki polowe w ich otoczeniu (rys. 6 i rys. 7), przy uwzględnieniu wartości współczynnika wzmocnienia pola, który zależy od stosunku przenikalności dielektryk stały/gaz. Z tego powodu w inkluzji nr 1 występują wyższe wartości natężenia pola, przekraczające 27 kV/mm. Większe obciążenie kabla i wzrost temperatury izolacji XLPE powodują spadek wartości natężenia pola wewnątrz obu analizowanych inkluzji, przy czym większy spadek został zaobserwowany dla wtrąciny nr 2. Jest to spowodowane faktem, że zmiana stałej dielektrycznej XLPE modyfikuje również wartość współczynnika wzmocnienia pola we wtrącinach.



Rys.10. Schemat blokowy algorytmu do wyznaczania obrazów fazowo-rozdzielczych wnz w inkluzjach gazowych w izolacji modelowanego kabla



Rys.11. Uzyskane jako wynik symulacji obrazy fazowo-rozdzielcze wnz za okres 60 s w modelowych inkluzjach gazowych 0,5 mm przy temperaturze żyły kabla 90°C oraz podstawowe parametry impulsów wyładowań dla: a) inkluzji nr 1; b) inkluzji nr 2

Wrzecz ze wzrostem temperatury, wzrasta ciśnienie gazu zamkniętego w objętości wtrąciny ( $p/T = \text{const.}$ ), co zgodnie z charakterystyką Paschena powoduje wzrost natężenia zapłonu wnz, zależnie od położenia wtrąciny na promieniu kabla (rys. 8). Porównując wartości natężenia pola  $E$  we wtrącinie z natężeniem zapłonu  $E_{inc}$ , oszacowano wymiar krytyczny wtrąciny gazowej, w zależności od jej lokalizacji na promieniu kabla oraz temperatury żyły (rys. 9) Za pomocą złożonego modelu polowego rozwoju wnz, którego algorytm przedstawiono na rysunku 10, uzyskano

obrazy fazowo-rozdzielcze (dla czasu akwizycji 60 s) dla wtrącin gazowych w izolacji obciążonego kabla (rys. 11).

## Podsumowanie i wnioski

Zmiana temperatury izolacji XLPE obciążonego kabla HVAC modyfikuje warunki inicjacji i rozwoju wyładowań niepełnych. Analizując wpływ temperatury na czynniki warunkujące powstawanie wnz, oszacowano rozmiar krytyczny wtrącin, które mogą być źródłami wyładowań przy napięciu znamionowym. Dla kabla HVAC o przedstawionej konstrukcji bezpieczny (dopuszczalny) rozmiar wtrąciny gazowej w XLPE wynosi ok. 6  $\mu\text{m}$ .

Za pomocą złożonego modelu numerycznego, ze sprzężonymi polami  $E$  i  $T$ , zaimplementowanego w programach Matlab i COMSOL, możliwe jest wyznaczenie i porównanie parametrów wnz oraz obrazów fazowo-rozdzielczych, dla inkluzji gazowych położonych w różnych miejscach izolacji kabla. Wtrącina nr 1 (przy żyły kabla) charakteryzuje się wyższą intensywnością wnz w stosunku do wtrąciny nr 2 (przy ekranie zewnętrznym). Uwidaczniają to wyznaczone podstawowe parametry zbiorów symulowanych impulsów wnz, m. in. średni ładunek wyładowań, całkowita liczba impulsów oraz średni prąd wyładowań niepełnych.

**Autorzy:** mgr inż. Paweł Mikrut, dr hab. inż. Paweł Zydroń, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków E-mail: mikrut@agh.edu.pl, przydron@agh.edu.pl

## LITERATURA

- [1] Hammons T.J. et al., State of the art in ultra-high-voltage transmission. *Proc. IEEE*, 100 (2012), pp. 360–390
- [2] Zhou H. et al. (eds.), Ultra-high voltage AC/DC power transmission; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019.
- [3] Worzyk T., Submarine power cables design, installation, repair, environmental aspects; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009.
- [4] Mazzanti, G.; Marzinotto, M. Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development; Wiley-IEEE Press: Milwaukee, WI, USA, 2013.
- [5] Densley J., Ageing mechanisms and diagnostics for power cables - an overview, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 17 (2001), no. 1, pp. 14–22.
- [6] Choudhary M. et al., A review of aging models for electrical insulation in power cables, *Energies*, 15 (2022), 3408
- [7] Florkowska B., Florkowski M., Rozwój badań wyładowań niepełnych w kablach elektroenergetycznych wysokiego napięcia w ramach prób poprodukcyjnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), no. 4, pp. 154–162
- [8] Kaminaga K et al., Development of 500-kV XLPE cables and accessories for long-distance underground transmission lines. V. Long-term performance for 500-kV XLPE cables and joints, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 11 (1996), pp. 1185–1194
- [9] Mazzanti G., Issues and challenges for HVDC extruded cable systems, *Energies*, 14 (2021), 4504
- [10] Mazzanti G., Montanari G.C, Civenni F., Model of inception and growth of damage from microvoids in polyethylene-based materials for HVDC cables. 1. Theoretical approach, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 14 (2007), pp. 1242–1254
- [11] Mazzanti G., Montanari G.C, Civenni F., Model of inception and growth of damage from microvoids in polyethylene-based materials for HVDC cables. 2. Parametric Investigation and data fitting, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 14 (2007), pp. 1255–1263
- [12] Li G., Liu M., Hao C. et al., Conductivity and interface charge accumulation between XLPE and SIR for HVDC cable accessory. *J Mater Sci: Mater Electron*, 30 (2019), pp. 1450–1457
- [13] Gouda O.E., Matter Z., Effect of the temperature rise on the XLPE dielectric properties, *Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Washington, DC, USA, 1992, pp. 95–98 vol.1
- [14] Wouters P., Deursen A., Li Y., Analysis and verification of signal propagation as method for temperature monitoring of underground power cables, *Electric Power Systems Research*, 213 (2022), 108739