



Krzysztof PĘDZISZ¹, Józef ROEHRICH²

Akademia Górniczo-Hutnicza, doktorant na Wydziale EAIiE (1)
Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki (2)

Kable średnich napięć o izolacji etylenowo-propylenowej (EPR)

Streszczenie. W artykule przedstawiono właściwości gumy etylenowo-propylenowej jako polimeru stosowanego na izolację w kablach średnich i wysokich napięć. Porównano podstawowe parametry kabli elektroenergetycznych o izolacji EPR z konstrukcjami o izolacji XLPE. Omówiono metody badań kabli średnich napięć po produkcji i długotrwałych, których celem jest ocena gumy etylenowo-propylenowej przede wszystkim ze względu na zjawisko drzewienia w izolacji.

Abstract. EPR (ethylene-propylene rubber) is widely used as insulating material in medium and high voltage cables in developed countries like USA and Italy, in other countries XLPE dominates. EPR is worse insulating material than XLPE but it is more resistive to water treeing. There are other attributes like better thermal conductivity and flexibility in a wide range of temperatures that makes EPR a good substitute of XLPE. In this paper main advantages of EPR cables were described and special methods of EPR cable systems test were presented. (*EPR medium-voltage cables*).

Słowa kluczowe: kable EPR, izolacja EPR, guma etylenowo-propylenowa, polietylen sieciowany (XLPE).

Keywords: EPR cables, EPR insulation, ethylene-propylene rubber, crosslinked polyethylene (XLPE).

Wstęp

Znaczący postęp, będący udziałem technologii chemicznej, stworzył nowe możliwości zastosowania dielektryków stałych w przemyśle kablowym, przyczyniając się do poprawy właściwości fizycznych, elektrycznych, mechanicznych, cieplnych i eksploatacyjnych kabli elektroenergetycznych.

Kable o izolacji polimerowej sukcesywnie zastępują kable tradycyjne w izolacji papierowo-olejowej. Obecnie, najczęściej znajdują zastosowanie polietylen sieciowany (XLPE) i guma etylenowo-propylenowa (EPR).

Badania prowadzone od wielu lat, w różnych ośrodkach na świecie, potwierdzają, że guma etylenowo-propylenowa, stosowana jako izolacja w elektroenergetycznych kablach średnich i wysokich napięć, może z powodzeniem stanowić alternatywę dla izolacji z polietylenu sieciowanego, przewyższając ją nawet pod względem niektórych parametrów [5].

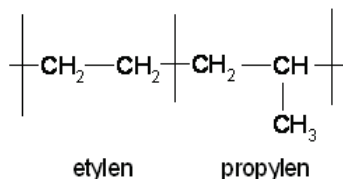
Okres rozwoju materiałów etylenowo-propylenowych EPR sięga połowy lat 50 ub. wieku, od momentu pierwszego zsyntezowania kopolimeru etylenowo-propylenowego w 1955 roku. Od tego czasu datowane są prace mające na celu zastosowanie go jako komponentu izolacji kablowej, ukończone konstrukcją prototypu kabla 15 kV w roku 1962, a następnie potwierdzeniem możliwości budowy kabli EPR 50 kV. Skutkiem tego było wprowadzenie do eksploatacji w USA w 1964 roku pierwszego kabla EPR 45 kV, a w 1988 roku opracowanie prototypu kabla wysokonapięciowego EPR 245 kV [2, 9]. Zainteresowanie polimerem EPR wynika m.in. z korzystnych własności dotyczących: odporności na wilgoć, możliwości pracy w podwyższonych temperaturach, odporności na wyładowania niezupełne i ozon oraz znakomitych własności mechanicznych [7].

Elektroenergetyczne kable o izolacji etylenowo-propylenowej stosowane są w USA i krajach Europy zachodniej od wielu lat, wykazując dobre doświadczenia eksploatacyjne. Kable EPR są objęte normami oraz propozycjami normalizacji [15, 16, 17, 18].

Budowa i właściwości mieszanek etylenowo-propylenowych

W reakcji polimeryzacji monomerów etylenu i propylenu, w określonych warunkach powstaje kopolimer nazywany etylenowo-propylenowym. Stosunek etylenu do propylenu

może zmieniać się w szerokim zakresie. Najbardziej charakterystyczne dla tego związku jest to, że segmenty (rys.1) propylenowe wbudowane w łańcuch polimerowy zakłócają naturalną tendencję polietylenu do szeregowego łączenia się cząsteczek. W rezultacie uzyskana struktura EPR nie jest w pełni krystaliczna.



Rys.1. Sposób łączenia monomerów etylenu i propylenu w łańcuchu polimerowym

W niektórych przypadkach pożądanym jest dodawanie trzeciego monomeru przed polimeryzacją. Monomer ten zwany dienem jest stosowany w celu ułatwienia procesu wulkanizacji. Takie materiały mają nazwę EPDM, to jest terpolimer etylenowo-propylenowo-dienowy [6]. EPR jest nasyconym elastomerem syntetycznym. Nieobecność w jego łańcuchu wiązań podwójnych sprawia, że jest on odporny na działanie światła, ciepła, tlenu i w szczególności ozonu i pary wodnej (warunki atmosferyczne). EPDM, który zawiera w swej strukturze nieco grup nienasyconych jest mniej odporny na te czynniki. Właściwości gumy etylenowo-propylenowej zależą od zawartości etylenu w łańcuchu kopolimeru oraz rozkładu monomerów w cząsteczkach. W przypadku przekroczenia 60 procent molowych etylenu w EPR/EPDM, staje się on twardy i w coraz większym stopniu krystaliczny. Guma etylenowo-propylenowa EPR, aby stanowić dobry materiał izolacyjny, poddawana jest procesowi wulkanizacji, w przeciwnym razie byłaby zbyt miękka i lepka. Wulkanizacja może odbywać się tylko za pomocą nadtlenu, natomiast dzięki obecności wiązań podwójnych w mieszaninie EPDM, możliwe jest zastosowanie siarki lub innych zespółów sieciujących, np. żywic. W celu uzyskania lepszych właściwości mechanicznych, niezbędne jest mieszanie EPR/EPDM z nieorganicznymi napełniaczami, takimi jak sadza i plastyfikatorami w postaci olejów parafinowych. Właściwości mechaniczne mieszanek etylenowo-propylenowych zależą od składu elastomerów oraz typu i ilości napełniaczy. Elastomery EPR

posiadają bardzo dobrą sprężystość i wysoką odporność na odkształcenia trwałe (szczególnie sieciowane nadtlenkami) oraz małą gęstość [3].

Główny wpływ na właściwości mieszanek gumowych mają warunki panujące podczas operacji mieszania, przyczyniając się do poprawy wydajności procesu i właściwości użytkowych wyrobów gotowych, czystości linii produkcyjnej, zachowanie odpowiednich parametrów technologicznych na każdym etapie produkcji, powtarzalność procesu mieszania [3].

Składnikami mieszanki EPR są [14]:

- kopolimer etyleno-propylenowy lub terpolimer, podstawowy materiał, tworzący fazę ciągłą, w której są jednolicie rozproszone wszystkie niżej wymieniane składniki. Materiał ten kontroluje elastyczność końcowego produktu;
- wypełniacz mineralno nieorganiczny – poprawia właściwości mechaniczne mieszanki;
- tlenek cynku (ZnO) – tradycyjny składnik mieszanek EPR oraz EPDM, stosowany w celu stabilizacji termicznej i elektrycznej mieszanki oraz poprawiający wytrzymałość elektryczną;
- tlenki ołowiu – poprawiają właściwości elektryczne, ograniczają procesy starzeniowe;
- nadtlenek dikumylowy – związek sieciujący stosowany jest m.in. jako efektywny inicjator wysokotemperaturowych procesów polimeryzacji i sieciowania kauczuków;
- dodatki, takie jak parafiny lub oleje, są wprowadzane do mieszanki w celu poprawienia procesu formowania;
- przeciwutleniacze – przeciwdziałają depolimeryzacji polimeru w trakcie procesu wytłaczania.

W celu zapewnienia właściwego oddziaływania polimer-wypełniacz może być zastosowany dodatkowy silan. Uzupełnieniem w/w mieszanki mogą być dodatkowe składniki, które indywidualni wytwórcy zastrzegają sobie w recepturze mieszanek EPR. Domieszki mogą przyczyniać się do zmiany właściwości mieszanek, np. poprawiać odporność na starzenie, modyfikować właściwości dielektryczne. EPR jest doskonałym dielektrykiem, jednakże właściwości te w znacznym stopniu uzależnione są od kompozycji składników mieszanek (tab.1) [3,4].

Tabela 1. Podstawowe właściwości mieszanek izolacyjnych gumy EPR do kabli elektroenergetycznych [1, 9]

Właściwości	U_n	
	6 ÷ 30 kV	> 60 kV
Gęstość [g/cm ³]	1,2 ÷ 1,4	
Przenikalność dielektryczna względna	2,4 ÷ 3,2	
Współczynnik strat dielektrycznych	0,04	0,0016 ÷ 0,003
Wytrzymałość dielektryczna [kV/mm]	≥20	30 ÷ 40
Dopuszczalna temperatura długotrwale [°C]	90	90
przy zwarciach [°C]	250	250
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	4,2 ÷ 8,5	8,6 ÷ 12,4
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	200	305 ÷ 320
Moduł elastyczności przy wydłużeniu [MPa]	4,5	5 ÷ 14
Rezystywność cieplna [K·m/W]	3,5	5,0
Ciepło właściwe [J/(m ³ ·K)]	2·10 ⁶	

Porównanie EPR i XLPE

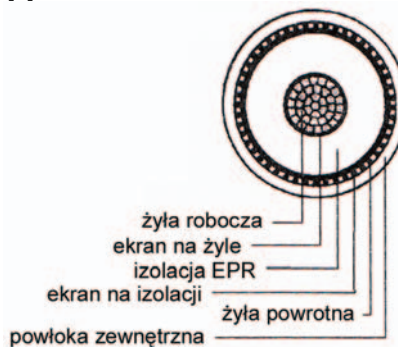
Tendencje rozwojowe w kablownictwie wykazują konieczność uzyskania następujących korzystnych właściwości konstrukcji kablowych [14]:

- zmniejszenie ciężaru;
- większą giętkość;
- odporność na korozję;
- łatwość usuwania izolacji i instalowania.

Obecnie, dwa polimery: XLPE i EPR, spełniają te oczekiwania.

Obok powszechnie stosowanego już na szeroką skalę w przemyśle kablowym polietylenu sieciowanego na niektórych rynkach jako materiał izolacyjny preferowana jest guma etylenowo-propylenowa. W USA i Włoszech kable EPR są bardzo często stosowane w sieciach średniego napięcia od 15 do 35kV włącznie. Ulepszona konstrukcja kabli średnich napięć (rys.2) spowodowała, że obecnie zwiększono robocze natężenie pola dla EPR z 2,7 kV/mm do 4,2 kV/mm [6]. Z tego względu porównanie oraz konkurencyjność kabli o izolacji etylenowo-propylenowej należy odnosić do kabli z polietylenu sieciowanego.

Do podstawowych zalet kabli o izolacji etylenowo-propylenowej zalicza się przede wszystkim: dobre właściwości dielektryczne w warunkach działania narażeń zespolonych, wysoką odporność na wyładowania niezupełne, giętkość w szerokim zakresie temperatur oraz korzystne właściwości szczególnie w wysokiej temperaturze, takie jak: odporność na deformacje, duża wytrzymałość mechaniczna, niska rozszerzalność, wysoka odporność na starzenie w atmosferze powietrznej i w wodzie [5].



Rys.2. Kabel średniego napięcia w izolacji EPR, 15 kV

W tabeli 2 przedstawiono porównanie podstawowych właściwości fizykochemicznych i elektrycznych polimerów (EPR i XLPE). Kluczowymi parametrami różniącym te dwa materiały są: współczynnik strat dielektrycznych tgδ, przenikalność elektryczna oraz wytrzymałość elektryczna.

Straty dielektryczne w izolacji EPR są o około 1 rząd wielkości większe niż w kablach o izolacji z polietylenu sieciowanego, pracujących poniżej temperatury 90°C (temperatura topnienia fazy krystalicznej XLPE). Powyżej tej temperatury straty dielektryczne w izolacji XLPE znacznie wzrastają i maleje ich wytrzymałość elektryczna. Dotyczy to również własności mechanicznych (tab. 3). W wyższych temperaturach wytrzymałość XLPE zależy od fazy krystalicznej w polimerze. W stanach awaryjnych, w temperaturze przeciążenia (130°C) polimer wykazuje znaczną podatność na odkształcenia. W podwyższonych temperaturach izolacja EPR posiada lepsze właściwości elektryczne niż XLPE i zachowuje ich stałość w szerokim zakresie temperatur. Izolacja etylenowo-propylenowa charakteryzuje się mniejszą wytrzymałością udarową niż izolacja z polietylenu sieciowanego, jest jednak większa od wytrzymałości osprzętu i urządzeń zasilających [14].

Badania wykazały, że kable EPR nadają się do pracy w temperaturze długotrwalej 105°C i dorywczo 140°C [19]. Zwiększenie odporności cieplnej izolacji etylenowo-propylenowej umożliwia oszczędność przekroju żyły roboczej kabla.

Materiały izolacyjne charakteryzujące się wysoką przewodnością cieplną (tab.4), są w przemyśle kablowym najbardziej preferowane. Znaczący wpływ na poprawę przewodności cieplnej mieszanek etylenowo-propylenowych mają mineralne wypełniacze. Dzięki domieszkom izolacja EPR charakteryzuje się zdolnością odprowadzania ciepła wyższą o 30% w porównaniu z izolacją XLPE, co jest szczególnie istotne w warunkach przeciążenia [8].

Tabela 2. Porównanie właściwości fizykochemicznych i elektrycznych XLPE i EPR [12]

Właściwość	EPR	XLPE
Struktura chemiczna	Łańcuchy węglowodorów	Łańcuchy węglowodorów
Tlenki modyfikujące	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , (96%) TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ (3%)	–
Pozostałości katalizatorów	V, Al, itp.	Szczałkowe lub żadne
Ilość odgałęzień w łańcuchu	200	15÷30
Długość odgałęzień	1÷4	2÷4
Stopień krystalizacji	5÷25%	50÷60%
Gęstość	0,85 g/cm ³	0,91÷0,93 g/cm ³
Wytrzymałość na naprężenia mechaniczne	8÷12,4 MPa	16,7 MPa
Wydłużenie w momencie zerwania	300 %	500 %
Rozszerzalność cieplna (20 – 130 °C)	8 %	12 %
Przenikalność dielektryczna	2,4÷3,2	2,3
Wytrzymałość elektryczna	22÷44 kV/mm	100 kV/mm
Współczynnik strat dielektrycznych	10 ⁻³	10 ⁻⁴

Tabela 3. Porównanie właściwości fizycznych EPR i XLPE [10]

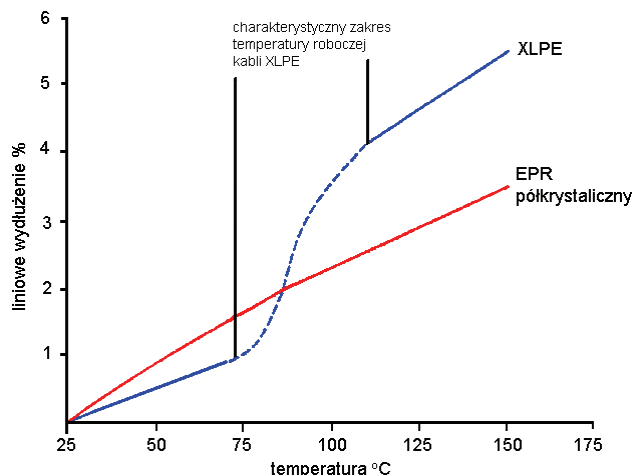
	EPR półkrystaliczny	XLPE
Wytrzymałość na naprężenia mechaniczne, w temp. pokojowej [MPa]	12,4	16,7
Wytrzymałość w momencie zerwania, w temp. pokojowej [%]	320	500
Moduł elastyczności przy 100 % wydłużeniu, w temp. pokojowej [MPa]	4,7	7,9
Moduł elastyczności przy 100 % wydłużeniu, w temp. 90o [MPa]	1,8	3,4
Moduł elastyczności przy 100 % wydłużeniu, w temp. 130o [MPa]	1,5	0,2
Rozszerzalność cieplna [%]	8	20
Wytrzymałość na naprężenia mechaniczne, w temp. pokojowej, po 100% wydłużeniu [MPa]	5	43

Tabela 4. Przewodność cieplna materiałów izolacyjnych w określonych warunkach [8]

Przewodność cieplna [W/m.°C]	EPR półkrystaliczny	XLPE
W temp. 90°C	0,268	0,226
w temp. 130°C	0,264	0,205

Rozszerzalność cieplna materiałów izolacyjnych ma znaczący wpływ na awaryjność kabli. Nie stanowi to problemu w normalnej temperaturze pracy, jednak znacząca zmiana średnicy w stanach awaryjnych (przeciążenia) może stanowić zagrożenie dla konstrukcji

kabla. Rozszerzalność izolacji pod wpływem podwyższonej temperatury może powodować wzrost ciśnienia wywieranego na powłoki izolacyjne, a w konsekwencji do odseparowania izolacji i powłok oraz powstawania wolnych przestrzeni między nimi. Inkluzje gazowe są wówczas źródłami wyładowań niezupełnych, co prowadzi do degradacji izolacji i uszkodzenia kabla. Kable w izolacji EPR charakteryzują się mniejszą, w porównaniu z kablami XLPE, rozszerzalnością cieplną, której efektem może być zwiększenie grubości izolacji (rys.3).



Rys. 3. Rozszerzalność cieplna materiałów izolacyjnych w określonych warunkach [8]

Wyładowania niezupełne, w tym drzewienie wodne i drzewienie elektryczne w izolacji mają znaczący wpływ na jej żywotność. Badania laboratoryjne kabli EPR [8] wykazały, że izolacja etylenowo-propylenowa posiada znaczną odporność na obydwa rodzaje drzewienia, tj. zjawiska inicjujące procesy degradacji izolacji. Ta cecha kabli etylenowo-propylenowych predysponuje jej do pracy w środowisku o dużej wilgotności, jak również przy cyklicznych zmianach obciążenia.

Łatwość instalowania, dzięki wysokiej elastyczności w szerokim zakresie temperatur, odporność na wpływy środowiskowe, nieskomplikowana i stosunkowo tania technologia wykonywania głowic i muf kabli w izolacji EPR są również ważnymi zaletami tego typu kabli [8].

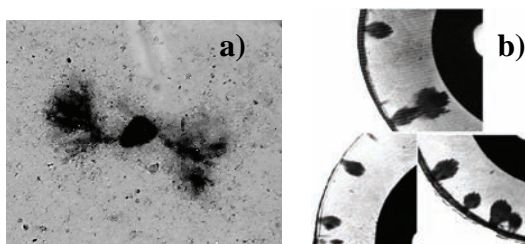
Metody badań

Bezpośrednio po produkcji w ramach prób wyrobu wykonywane są pomiary: rezystancji izolacji, współczynnika strat dielektrycznych, intensywności wyładowań niezupełnych. W przypadku kabli XLPE pomiar rezystancji izolacji wykonywany jest tylko dla kabli o niższych napięciach znamionowych. Dopuszczalna wartość współczynnika strat dielektrycznych dla kabli w izolacji EPR wynosi $20 \cdot 10^{-3}$, a dla kabli XLPE $4 \cdot 10^{-3}$. Pomiar wyładowań niezupełnych bezpośrednio po produkcji przeprowadza się w celu identyfikacji występujących w izolacji zanieczyszczeń, inkluzji gazowych jak również mikrostrzy, które mogłyby powstawać na powierzchni ekranu żyły lub na powierzchni izolacji pod ekranem zewnętrznym. Wartość ładunku pozornego wyładowań niezupełnych dla kabli EPR wg. IEC 502 [15] nie powinna przekraczać 20 pC przy napięciu probierczym $1,5 U_n$ (U_n – znamionowe napięcie fazowe). W ramach prób napięciowych wykonywane są: próba napięciem przemiennym 50 Hz oraz próba napięciem udarowym obydwo biegunowości.

W badaniach starzeniowych stosowane jest podwyższone natężenie pola elektrycznego oraz podwyższona temperatura. W celu ujednoczenia metodyki badań

odporności izolacji na drzewienie wodne opracowano kilka metod, umożliwiających porównanie wyników badań uzyskanych w różnych laboratoriach. W próbach starzeniowych stosuje się specjalnie przygotowane próbki kabli bez powłok toteż dostęp wody do izolacji od zewnątrz jest swobodny [6, 12]. W zależności od rodzaju próby, woda może być wprowadzona do żyły kablowej. Badania zjawiska drzewienia polegają na poddaniu kabla długotrwałemu działaniu podwyższonego napięcia w okresie od 1 roku do 6 lat. Po zakończeniu próby przeprowadzana jest analiza mikroskopowa powstałych drzewek w izolacji (rys.4).

Przyspieszone badanie zjawiska drzewienia wodnego AWTT (ang. *Accelerated Water Treeing Testing*) [6], polega na zanurzeniu specjalnie przygotowanego kabla w wodzie oraz wprowadzeniu wody z zewnątrz do żyły. Woda migruje wówczas w przestrzenie pomiędzy drutami, z których składa się żyła. Kabel nie posiada powłoki, badaniu podlega tylko jego izolacja (ekran na żyłę, izolacja i ekran zewnętrzny). Kabel poddaje się długotrwałej próbie napięciowej napięciem o wartości $3U_n$. Badanie trwa 24 miesiące [6].



Rys.4. Drzewka elektryczne w izolacji a) EPR [12]; b) XLPE [13]

Modyfikacją metody AWTT jest metoda AWTT/dry [6]. W tej metodzie kabel zanurzony jest w wodzie, a żyła jest sucha. Próba analogicznie jak standardowa próba AWTT przeprowadzana jest przy napięciu o wartości $3U_n$.

Kolejna próba AWTT/dry/hi temp [6], polega na zanurzeniu kabla o suchej żyłce w wodzie i poddaniu go próbie starzeniowej w temperaturze 110°C .

Przyspieszone badanie czasu życia kabla ACLT (ang. *Accelerated Cable Life Testig*) [6], polega, podobnie jak w przypadku próby AWTT, na zanurzeniu kabla w wodzie, oraz poddaniu go próbie napięciem probierczym o wartości $3U_n$. W przypadku próby ACLT żyła przewodząca pozostaje sucha, jest jednak obciążana. Prąd obciążenia jest utrzymywany na takim poziomie, aby kabel znajdował się w podobnym stanie cieplnym jak w przypadku normalnych warunków pracy. Obciążenie kabla utrzymywane jest w reżimie 8 godzin pracy, 16 godzin postoju. Próba ACLT jest próbą długotrwałą, badanie starzeniowe trwa 6 lat, w tym czasie zazwyczaj większość próbek nie ulega uszkodzeniu [11]. Po zakończeniu próby ACLT badana jest wytrzymałości elektryczna próbek. Badania wykazały, że procesy starzeniowe zachodzą szybciej w układzie „nasączona żyła – kabel w powietrzu” niż w układzie „sucha żyła - kabel w wodzie” [11].

Zakończenie

Zastosowanie na dużą skalę kabli EPR w energetyce, szczególnie w Stanach Zjednoczonych i Włoszech wskazuje na dobre ich właściwości eksploatacyjne i możliwości alternatywy dla izolacji XLPE.

LITERATURA

- [1] Grobicki J., Materiały izolacyjne stosowane w kablownictwie, Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce, tom 1, *Wyd. Politechniki Poznańskiej*, Poznań 1996
- [2] Rakowska A., Kryteria oceny weryfikujące jakość polietylenu usieciowanego stosowanego jako izolacja kabli elektroenergetycznych, *Rozprawy Politechniki Poznańskiej*, Poznań 2000
- [3] White J. R., Sadhan K. De., Poradnik technologa gumy, *Instytut Przemysłu Gumowego „Stomil”*, Piastów 2003
- [4] Gajewski M., Chemia i technologia elastomerów, *Wyd. Politechniki Radomskiej*, Radom 1997
- [5] Semik Z., Rozwój kabli i przewodów elektroenergetycznych w izolacji z gumy etylenowo-propylenowej na średnie napięcia znamionowe, XIII Konferencja Szkoleniowo-Techniczna KABEL '2006, Materiały Konferencyjne, *Wydawca: Centrum Szkoleniowo-konferencyjne „Energetyk”*, Zakopane 2006
- [6] Cinquemani P.L., Kuchta F.L., Hades H.L., Chavarria G.E., Lindler C.E., Jr., Long-Term Testing and Applications of High-Stress MV EPR Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, January 2005
- [7] Arhart R.J., The Chemistv of Ethylene Propylene Insulation, Part I, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 9, No. 5, September/October 1993
- [8] Brown M., EPR-Based URD Insulation: A Question of Confidence, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 4, No. 5, September/October 1988;
- [9] Chan J. C., Havtley M. D., Hiiwala L. J., Performance Characteristics of XLPE Versus EPR as Insulation for High Voltage Cables, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 9, No. 3, May/June 1993
- [10] Brown M., Performance of Ethylene-Propylene Rubber Insulation in Medium and High Voltage Power Cable, *IEEE Summer Power Meeting*, San Francisco, July 1982
- [11] Walton M.D., Bernstein B.S., Smith J.T., III, Thue W.A., Groeger J.H., Accelerated Cable life Testing of EPR-Insulated Medium Voltage Distribution Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, July 1994;
- [12] Bogus S., Xu J., Water Treeing—Filled versus Unfilled Cable Insulation, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 17, No. 1, January/February 2001
- [13] DiLorenzo R., Krajick F., Bogus S., Ronzello J., Fridland G., Pehlert G., Dharmarajan R., Annicelli R., Comparison of AC and Impulse Breakdown of Model EPR and TR-XLPE Cables as a Function of Wet Electrical Aging, *PES ICC*, April 2002
- [14] Opracowania „Kable EPR”, Katedra Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie;
- [15] IEC 502:1994. Extruded solid dielectric insulated Power cables for rated voltage from 1kV up to 30kV
- [16] BS 6622:1991. Specifications for Cables with Extruded Cross-linked Polyethylene or Ethylenepropylene Rubber Insulation for Rated Voltages from 3800/6600V up to 19000/33000V
- [17] UL 1072. Medium-Voltage Power Cables, Underwriters Laboratories Inc;
- [18] AEIC CS8-00: Specification for extruded dielectric, shielded power cables rated 5 through 46 kV, December 2000
- [19] Montanari G. C., Motori A., Short-term Thermal Endurance Characterisation of Polymeric Cable Insulating Materials, *IEEE Transactions on DEI*, Vol. 3, No. 4, 1996

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Pędzisz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Studia doktoranckie, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: krzysztof.pedzisz@agh.edu.pl;
mgr inż. Józef Roehrich, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: roehrich@agh.edu.pl;