

## Linie kablowe wysokich i najwyższych napięć – doświadczenia eksploatacyjne

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono dane statystyczne dotyczące długości linii kablowych na napięciu powyżej 60 kV oraz zaprezentowano doświadczenia z eksploatacji tych linii.

**Abstract.** The analyse of statistical data relating to the installed quantities of underground cable systems rated at 60 kV and above together with the service experience and the performance of existing underground cable systems there are present. (*HV and EHV power cable lines AC- service experiences*).

**Słowa kluczowe:** linie kablowe wysokich i najwyższych napięć, doświadczenia eksploatacyjne  
**Keywords:** HV and EHV cable lines, service experiences

### Wstęp

W ostatnich latach zainstalowano znaczące długości linii kablowych zarówno lądowych i morskich, wykorzystując coraz lepsze i doskonalone metody ich układania oraz stosując najnowsze konstrukcje osprzętu kablowego. Chcąc ocenić jakie są doświadczenia z eksploatacji tych coraz dłuższych linii kablowych wysokich i najwyższych napięć podejmowane są na całym świecie próby gromadzenia danych. Między innymi w Holandii utworzone zostało międzynarodowe stowarzyszenie KSANDR, które jako cel swego działania przyjęło prowadzenie badań stanu szczególnie linii kablowych, czyli prowadzenie szerokich badań diagnostycznych, a także kształcenie w zakresie zarządzania majątkiem sieciowym [1]. Organizacja ta zbiera między innymi z całego świata dane o awaryjności sieci elektroenergetycznej, jednakże dane te dotyczą głównie doświadczeń z eksploatacji linii kablowych średniego napięcia. Próby gromadzenia danych podejmowano także w ramach działalności CIGRE już od roku 1991. Ostatnio w ramach działania Grupy Roboczej B1 WG-10 *Update of service experience on underground and submarine cables* zajmowano się także oceną stanu sieci kablowej wysokich i najwyższych napięć. Efektem tego są publikacje [2, 3], których współautorem jest także autorka niniejszego artykułu. Przeprowadzona analiza obejmowała linie kablowe na napięciu 60 kV i wyższe.

W broszurze technicznej, w której zebrano i przeanalizowano dostarczone z całego świata dane, dokonano także pewnego przeglądu najbardziej typowych konstrukcji kabli elektroenergetycznych oraz najpowszechniej stosowanego osprzętu kablowego [2]. Datą końcową gromadzenia danych eksploatacyjnych był koniec 2005 roku.

Ogółem przeanalizowano doświadczenia eksploatacyjne dla linii kablowych lądowych prądu przemiennego o długości ponad 33 000 km w przeliczeniu na jeden tor linii (tabela 1). Niestety uzyskany obraz nie obejmuje wszystkich istniejących na całym świecie linii kablowych ponieważ nie otrzymano odpowiedzi na wszystkie rozesłane ankiety, a w niektórych przypadkach brak odpowiedzi dotyczył całego kraju. Jednakże zakres zgromadzonych danych pozwala przyjąć, że wyniki są reprezentatywne i na ich podstawie można oszacować stan sieci kablowej oraz istniejące trendy jej rozwoju [4].

Analiza stanu linii kablowych WN i NN obejmowała linie o sumarycznej długości równej 32 917 km, co w porównaniu z analizowaną w 1991 r. siecią kablową 6 195 km pozwala na uzyskanie znacznie szerszego obrazu stanu rzeczywistego eksploatowanych linii kablowych. Pokazuje także, że następuje dynamiczny rozwój tych linii.

Analiza doświadczeń z eksploatacji sieci kablowej o długości 33 000 km, także jak i porównanie z danymi opublikowanymi przez CIGRE w 1991 pokazują, że dominującą konstrukcją w instalowanych liniach kablowych są kable o izolacji XLPE oraz o izolacji papier+olej o ciśnieniu wewnętrznym (tabela 2).

Tabela 1. Długość linii kablowych dla których przeprowadzono analizę danych statystycznych [3]

Poziom napięcia [kV]	Długość linii kablowych wg. różnych analiz podana w [km]				
	CIGRE B1-10 2008	Electra 137 1991	Worldwide EHV 2006	CIGRE B1-07 2007	Komisja Europ. 2003
60-109	18 000	3 646	0	24 859	0
110-219	9 500	717	0	22 406	16 000
220-314	4 500	1 591	2 000	5 555	1 720
315-500	1 000	230	200	1 586	120
>500	0	2	0	0	0
Suma	33 000	6 195	2 200	54 406	17 840

Tabela 2. Długość linii kablowych AC eksploatowanych na końcu 2005 r. wyrażona w km [3]

Typ kabla	Powłoka /uszczelnienie	Poziom napięcia [kV]			
		60-109	110-219	220-314	315-500
SCOF	brak danych	3 308	4 116	2342	724
HPOF	brak danych	121	474	579	24
GC	brak danych	68	592		
PILC	brak danych	522			
EPR	lita powłoka metalowa	11	137	1	
	bez uszczelnienia		16		
PE	lita powłoka metalowa	497	60	397	1
	bez uszczelnienia	125	7		
	uszczelnienie z folii Al.	9			
XLPE	lita powłoka metalowa	3 161	2 609	1 114	229
	bez uszczelnienia	4 480	415	1	
	uszczelnienie z folii Al.	5 683	1 057	23	21
suma	32 917	17 978	9 483	4 457	999

W tablicy przyjęto następujące oznaczenia:

SCOF - kable o izolacji papier+olej o ciśnieniu wewnętrznym;

HPOF - kable o izolacji papier+olej o ciśnieniu zewnętrznym (wyższym niż w przypadku kabli SCOF);

GC - kable o izolacji papier+gaz;

## **VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

PILC - kable o izolacji papierowej przesyconej impregnatem, posiadające powłoki ołowiane;  
EPR, XLPE, PE - kable o izolacji wytłaczanej; odpowiednio o izolacji z gumy etylenowo-propylenowej, z polietylenu usieciowanego lub polietylenu termoplastycznego.

W analizowanej sieci kablowej dla poziomu napięć do 110 kV włącznie – największy udział mają linie ułożone kablami o izolacji XLPE, natomiast dla linii na najwyższe napięcia nadal dominują linie ułożone kablami o izolacji papierowej. Izolacja papierowa w połączeniu z olejem była dawniej jedynym alternatywnym rozwiązaniem dla konstrukcji kabli wysokich i najwyższych napięć.

Wśród instalowanych pomiędzy rokiem 2000 i 2005 linie kablowe na napięcie poniżej 220 kV to w 90% linie ułożone kablami o izolacji XLPE. Dynamicznemu rozwojowi linii kablowych ułożonych kablami o izolacji z polietylenu usieciowanego towarzyszy coraz szersze stosowanie kabli z barierami promieniowymi oraz wzdłużnymi przeciwko wnikaniu i rozprzestrzenianiu wilgoci. Są to konstrukcje nazywane potocznie konstrukcjami uszczelnionymi. W liniach kablowych o strategicznym znaczeniu, szczególnie liniach najwyższych napięć, standardem staje się korzystanie z kabli z wbudowanym modułem światłowodowym umożliwiającym monitoring temperatury kabla w czasie rzeczywistym [5].

### **Rozwój linii kablowych WN i NN**

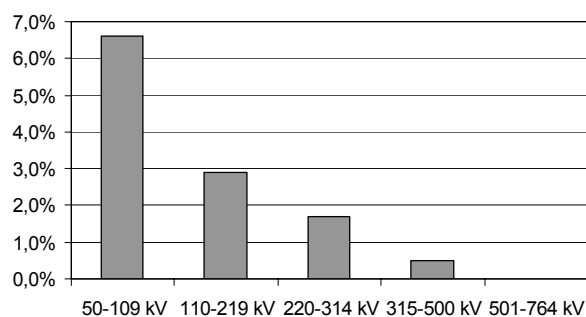
Na stawiane pytanie – co należy budować: linię napowietrzną czy linię kablową odpowiedź coraz częściej nie jest jednoznaczna, ponieważ sprzeciw ludności przeciwko obecności wysokonapięciowej linii napowietrznej w pobliżu ich domów, ogrodów itp. jest coraz ostrzejszy. Szczególnie jest to obserwowane w momentach podejmowania decyzji o budowie nowych linii. Coraz częściej również prace modernizacyjne przeprowadzane na istniejącej linii napowietrznej w centrach miast zmierzają w kierunku zamiany jej na linię kablową na całej długości lub, co najmniej na długości kilku jej przęseł. Decyzja o podejmowaniu inwestycji kablowej WN spowodowana jest kilkoma przesłankami, z których należy wymienić: względy techniczne, względy topograficzne (teren trudny do montażu linii napowietrznej), względy ekologiczne, ale coraz częściej są to również względy społeczne. W ostatnich latach zdecydowanie aspekt społeczny wysuwa się na pierwsze miejsce wśród czynników warunkujących podejmowanie decyzji inwestycyjnych [6]. Obecnie zupełnie nierealne są szanse na uzyskanie społecznej zgody, aby zainstalować linię napowietrzną w centrum miasta – jak pokazano przykładowo na rys. 1 [7]. Porównując koszty budowy linii elektroenergetycznych wysokich napięć napowietrznych i kablowych, jak dotychczas każdorazowo okazuje się, że dla linii napowietrznych koszt ten jest niższy. I to niezależnie jaką konstrukcją kabli elektroenergetycznych będzie się rozpatrywało. Wydają się więc, że budowa linii kablowych nie zawsze będzie pod względem ekonomicznym optymalnym rozwiązaniem i dlatego jeszcze wiele z budowanych linii łączących np. systemy różnych państw będzie nadal liniami napowietrznymi. Jednakże w przypadku linii budowanych na terenach zurbanizowanych lub o wysokich walorach ekologicznych czy historycznych – nie może być innej alternatywy niż instalowanie linii kablowych WN i NN.

Analiza stanu sieci elektroenergetycznej wysokich i najwyższych napięć pokazała, że nadal linie napowietrzne wyraźnie dominują w systemie elektroenergetycznym – niezależnie od poziomu napięcia, co pokazano na rysunku 2 [6, 8]. W różnych państwach kształtuje się to nieco odmiennie (tabela 3), jednakże generalnie w zakresie napięć 50 – 109 kV linie napowietrzne stanowią 93% sieci, a w przypadku napięcia 501-

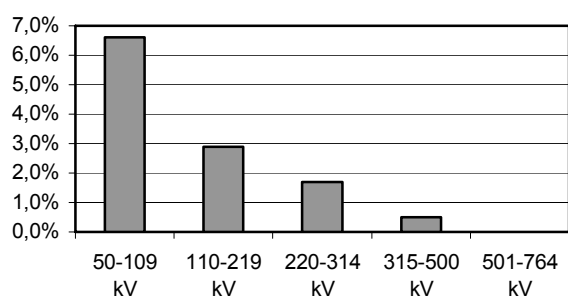
764 kV to aż 100%. Na rysunku 2 pokazano procentowy udział linii kablowych dla poszczególnych poziomów napięcia.



Rys. 1. Wysokonapięciowa linia napowietrzna w centrum osiedla mieszkaniowego [7]



Rys. 2. Procentowy udział linii kablowych w sieci dla poszczególnych poziomów napięć [6 wg.8]



Rys. 3. Procentowy udział kabli o izolacji wytłaczanej w sumarycznej długości linii kablowych [6 wg.8]

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Mniejszy udział kabli o izolacji wytłaczanej w liniach kablowych na wyższe napięcia odzwierciedla etapy rozwoju jakości i technologii produkcji tych kabli (rys.3). Kable o izolacji wytłaczanej na średniego napięcia (czyli z niższymi natężeniami pola elektrycznego w izolacji) były opracowane i zainstalowane w systemie elektroenergetycznym znacznie wcześniej, natomiast kable wysokich i najwyższych napięć (o znacząco wyższym roboczym natężeniu pola elektrycznego) zaczęto instalować znacznie później [6]. Kable o izolacji wytłaczanej na napięcie powyżej 50 kV stosowane są od początku lat sześćdziesiątych, a kable na napięcie 400- 500 kV nie były właściwie układane przed rokiem 2000 [9].

Poza kosztem budowy linii kablowej wyższym niż budowa równoważnej linii napowietrznej dodatkowym ograniczeniem stosowania linii kablowych NN jest fakt, że najwyższa aktualnie uzyskana zdolność przesyłowa zbudowanej linii kablowej np. 400 kV niewiele przekracza 1500 MVA [10].

Tabela 3. Sumaryczna długość linii kablowych dla państw, w których długość linii kablowych na napięcie powyżej 50 kV przekracza 1000 km [8]

Kraj	Długość linii kablowych [km] na napięcie:			
	50-109 [kV]	110-219 [kV]	220-314 [kV]	315-500 [kV]
Dania	1 930	515		52
Francja	2 316	1	903	2
Hiszpania	509	181	479	80
Holandia	2 558	1 068	6	7
Japonia	11 760	1 769	1 440	123
Korea	2	2 144		221
Niemcy	857	4 972	45	65
Singapur	1 185		651	111
USA	946	2 904	663	536
W. Brytania	1 457	2 967	496	166
Włochy		907	197	34

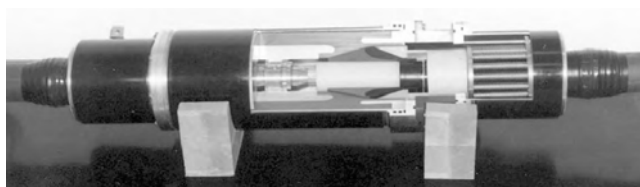
### **Doświadczenia eksploatacyjne**

Doświadczenia z eksploatacji linii kablowych wysokich i najwyższych napięć zgodnie z zebranymi danymi w publikacji [2] pozwalają ocenić bardzo wysoko wybrane konstrukcje kabli. W tabeli 4 zebrano sumaryczne liczby uszkodzeń dla poszczególnych typów linii kablowych oraz z podziałem na uszkodzenie samego kabla lub osprzętu kablowego (mufa i głowica kablowa). W tabeli nie pokazano 42 przypadków uszkodzeń, w których nie zdefiniowano miejsca uszkodzenia.

Ogółem zanotowano 855 przypadków uszkodzenia linii kablowych wysokich i najwyższych napięć w liniach zakwalifikowanych jako linie lądowe w okresie 5 lat (okres ten kończył rok 2005). Aż 310 uszkodzeń zanotowano w liniach kablowych ułożonych kablami o izolacji papier+syciwo czyli kablami o izolacji masowej zwanych również kablami tradycyjnymi (PILC). Ale należy przypomnieć, że większość tych linii eksploatowanych jest bardzo długo i większość z nich przekroczyła już spodziewany czas życia linii. Wśród zanotowanych uszkodzeń 189 to awarie kabli lub osprzętu w liniach z kablami o izolacji XLPE. Na dodatek aż 55% uszkodzeń samych kabli o izolacji XLPE zostało zakwalifikowane jako uszkodzenia wewnętrzne. Natomiast całościowo dla kabli AC jako uszkodzenie wewnętrzne (spowodowane czynnikami wewnętrznymi) zakwalifikowano 33% wszystkich uszkodzeń a 67% uszkodzeń w wyniku działania czynników

zewnątrznych. W tabeli 4 zestawiono zgromadzone dane z doświadczeń eksploatacyjnych z liniami kablowymi na napięciu 60 kV i powyżej.

O niezawodnej pracy linii kablowa decyduje nie tylko sam kabel, ale także osprzęt kablowy – jego jakość, prawidłowa instalacja i prawidłowa eksploatacja (o czym nie wolno zapominać). Dlatego konieczne jest opracowywanie takiego osprzętu, aby możliwość popełnienia błędów podczas montażu była maksymalnie zminimalizowana, a wymagane czynności eksploatacyjne podczas wieloletniej bezawaryjnej pracy linii maksymalnie uproszczone. Z tego wynika między innymi coraz większa popularność osprzętu kablowego wykonanego w technologii prefabrykowanej – rys. 4 i 5.



Rys. 4. Przykładowa konstrukcja mufy prefabrykowanej do łączenia dwóch odcinków kabla o izolacji XLPE [11]



Rys. 5. Montaż mufy 400 kV [12]

W tabeli 5 i 6 zestawiono współczynniki uszkodzalności linii kablowych prądu przemiennego w oparciu o zanotowane uszkodzenia z przyczyn wewnętrznych oraz z uwzględnieniem wszystkich odnotowanych uszkodzeń. Ciekawe jest porównanie współczynników uszkodzalności dla kabli w tzw. trasie oraz dla osprzętu kablowego z wydzieleniem awarii muf kablowych oraz głowic.

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Tabela 4. Liczba uszkodzeń w kablowych liniach AC na napięcie zanotowanych w okresie od 2000 do 2005 roku dla linii [2]

Typ kabla - rodzaj izolacji	Rodzaj uszkodzenia	Miejsce uszkodzenia		
		kabel	mufa	głowica
XLPE	wewnętrzne	26	40	28
	zewewnętrzne	47	13	17
	nieznane	3	6	5
papier+olej	wewnętrzne	21	12	11
	zewewnętrzne	63	6	9
	nieznane	3	3	4
PE	wewnętrzne	9	1	21
	zewewnętrzne	33	3	6
	nieznane	3	0	6
papier+olej o ciśnieniu zewewnętrznym	wewnętrzne	13	6	3
	zewewnętrzne	19	7	2
	nieznane	1	0	1
gaz +papier	wewnętrzne	10	1	3
	zewewnętrzne	4	0	6
	nieznane	0	0	2
EPR	wewnętrzne	0	0	2
	zewewnętrzne	4	0	0
	nieznane	0	0	0
PILC	wewnętrzne	244	9	4
	zewewnętrzne	49	1	2
	nieznane	0	0	1
kable AC nieokreślonego rodzaju	wewnętrzne	0	0	1
	zewewnętrzne	3	4	1
	nieznane	4	1	0
Sumaryczna liczba uszkodzeń		549	130	134

Tabela 5. Współczynnik uszkaźalności linii kablowych z podziałem na rodzaj konstrukcji wyrażony liczbą uszkodzeń na 100 km linii; **wszystkie zanotowane uszkodzenia** [4 wg. 2]

Element linii	Linie o izolacji XLPE		
	60-219 kV	220-500 kV	razem
kable	0,085	0,133	0,088
mufy	0,007	0,048	0,008
głowice	0,011	0,050	0,013
Element linii	Linie o izolacji papier+olej o ciśnieniu wewnętrznym		
	60-219 kV	220-500 kV	razem
kable	0,109	0,248	0,149
mufy	0,004	0,014	0,006
głowice	0,014	0,028	0,019

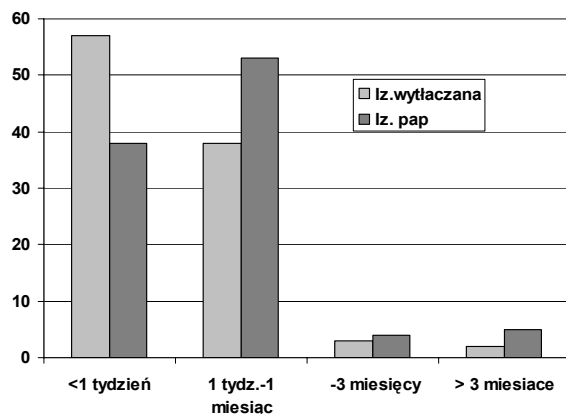
Oceniając doświadczenia eksploatacyjne dotyczące linii kablowych WN i NN uwzględniono także zbieranie danych o czasie usuwania awarii. Rozpatrywano to w różnych aspektach. Przykładowo dla linii kablowych prądu przemiennego eksploatowanych na poziomie napięcia pomiędzy 60 a 219 kV, czyli najbardziej

interesującego polskich energetyków, aż 90% wszystkich awarii było usuwanych w okresie krótszym niż jeden miesiąc lecz dla 5% kabli o izolacji papier+olej czas naprawy był dłuższy niż 3 miesiące. Na rysunku 6 przedstawiono porównanie czasu naprawy linii kablowych ułożonych kablami o izolacji wytłaczanej oraz o izolacji papier+olej dla całego rozpatrywanego zakresu napięć linii. Średni czas naprawy linii kablowych ułożonych kablami o izolacji XLPE wyniósł 20 dni a dla linii ułożonych kablami o izolacji papier+olej o ciśnieniu wewnętrznym 29 dni.

Tabela 6. Współczynnik uszkodzalności linii kablowych prądu przemiennego z podziałem na rodzaj konstrukcji wyrażony liczbą uszkodzeń na 100 km; **uszkodzenia wewnętrzne** linii [4 wg. 2]

Element linii	Linie o izolacji XLPE		
	60-219 kV	220-500 kV	razem
kable	0,027	0,067	0,030
mufy	0,005	0,026	0,005
głowice	0,006	0,032	0,007
Element linii	Linie o izolacji papier+olej o ciśnieniu wewnętrznym		
	60-219 kV	220-500 kV	razem
kable	0,014	0,107	0,041
mufy	0,002	0,010	0,004
głowice	0,005	0,015	0,009

W ramach analizowanych przypadków uszkodzenia linii kablowych zajmowano się tylko tymi czasami naprawy linii, dla których czas naprawy wynosił nie mniej niż 1 dzień i nie był dłuższy niż 6 miesięcy. Przypadki poza wyznaczonymi granicami czasowymi nie uwzględniano w analizie. Dla linii kablowych na napięcie do 220 kV różnica średniego czasu wynosi 5 dni dla dwóch najbardziej popularnych konstrukcji kabli zastosowanych w danych liniach. Natomiast dla napięć wyższych czas ten już wydłuża się. W tabelicy 7 pokazano średni czas wyrażony w liczbie dni koniecznych do naprawy linii lądowej dla dwóch najczęściej stosowanych metod układania linii kablowych. Dla poziomu wyższych napięć zanotowano czas naprawy średnio o 20 dni dłuższy w przypadku ułożenia linii kablowej w przepuście, kanale lub tunelu.



Rys. 6. Procentowy udział czasu naprawy linii kablowych ułożonych kablami o izolacji wytłaczanej oraz o izolacji papier+olej o ciśnieniu wewnętrznym



## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Tabela 7. Średni czas naprawy wyrażony w dobach w zależności od sposobu ułożenia linii [2]

Poziom napięcia [kV]	Ułożenie linii kablowej	
	bezpośrednio w ziemi	w przepuście, kanale, tunelu
60 do 219	14	15
220 do 500	25	45

### LITERATURA

- [1] Gulski E., Wester F., Smit J., Seitz P., Turner M., Advanced PD Diagnostic of MV Power Cable System Using Oscillating Wave Test System, IEEE Electrical Insulation Magazine, 16, 2, 2000, 17-25
- [2] Rosevear R.D., Choquette M., Rakowska A., Update of service experience of underground and submarine cable systems, CIGRE TB 379, April 2009, 1-84
- [3] Rosevear R.D., Choquette M., Fairhurst M., Jorgensen H.J., Larsen J.E., Mamepay B., Rakowska A., Waschk V., Update of service experience of HV underground and submarine cable systems, ELECTRA, No 245, April 2009, CIGRE, pp. 53-57
- [4] Rakowska A., Światowe doświadczenia z eksploatacji linii kablowych, VII Konf. *Elektroenergetyczne linie kablowe, stan obecny i nowe techniki*, Toruń.2009, s.7-14
- [5] Mokański W., Kabel elektroenergetyczny WN z modułem światłowodowym, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 6, 2009, s.29-31
- [6] Rakowska A., Linie kablowe najwyższych napięć prądu przemiennego, Przegląd Elektrotechniczny, R.84, Nr 4/2008 s.39-45
- [7] Overview of the Potential for Undergrounding the Electricity Networks in Europe, DG TREN/European Commission, 2003
- [8] Swingler S., Barber K., Daly J., Awad R., Antic J., Zenger W., Statistics of AC underground cables in power networks, CIGRE TB 338, WG B1-07, December 2007
- [9] Rakowska A., Linie kablowe wysokich najwyższych napięć, Wiadomości Elektrotechniczne, Nr 11, 2009, s.3-8
- [10] Rakowska A., Grzybowski A., Siodła K., Stiller J., Nowe technologie budowy linii kablowych NN, opracowanie IE PP dla PSE-Operator, Poznań 2007/2008
- [11] Antic J., Borne W., Christensen P., Mirebeau P., Parpal J-L., Rakowska A., de Wild F., Remaining life management of existing AC underground lines, TB CIGRE 358, October 2008
- [12] Kobayashi S., Tanak S., Suetsugu M., Development of factory-expanded cold-shrinkable joint for EHV XLPE cables, JICABLE 2003, paper A5.1

**Autor:** dr hab. inż. Aleksandra Rakowska prof. PP, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: [aleksandra.rakowska@put.poznan.pl](mailto:aleksandra.rakowska@put.poznan.pl)

