



Krzysztof PĘDZISZ

Akademia Górniczo-Hutnicza, doktorant na Wydziale EAIIe

## Awaryjność linii kablowych średniego napięcia

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono na podstawie literatury oraz danych statystycznych problem awaryjności linii kablowych średniego napięcia. Omówiono najczęściej spotykane przyczyny uszkodzeń kabli i mechanizmy degradacji izolacji kablowej. Analizie poddane zostały dane statystyczne dotyczące Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, spółki dystrybucyjnej i zakładu energetycznego.

**Abstract.** Insulation systems of power cables are subject to different kinds of stresses during their service life and thus, to degradation and deterioration. These can lead to a reduction of life and so to a lower reliability of electrical power systems. This paper presents failure of medium-voltage power lines based on literature and statistical data. (**Failure of medium-voltage power lines**).

**Słowa kluczowe:** linie kablowe, kable średniego napięcia, awaryjność, niezawodność, degradacja izolacji.

**Keywords:** cable lines, medium voltage cables, failure, reliability, insulation degradation.

### Wstęp

Miarą niezawodności systemów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej jest zdolność do jej bezprzerwowej transmisji. Częstość i czas trwania awarii są podstawowymi wskaźnikami oceny niezawodności systemów.

Sieć średniego napięcia stanowi jeden z podstawowych elementów sieci rozdzielczej, a jej zasadniczym zadaniem jest dostarczenie energii elektrycznej, w wymaganej ilości i parametrach mieszczących się w granicach określonych standardów, do odbiorców finalnych.

Linie kablowe średnich napięć, w odróżnieniu od linii napowietrznych, w mniejszym stopniu narażone są na czynniki środowiskowe, jednak ich uszkodzenie, ze względu na brak zdolności izolacji do samoregeneracji, ma zazwyczaj charakter trwały, a naprawa jest kosztowna i czasochłonna.

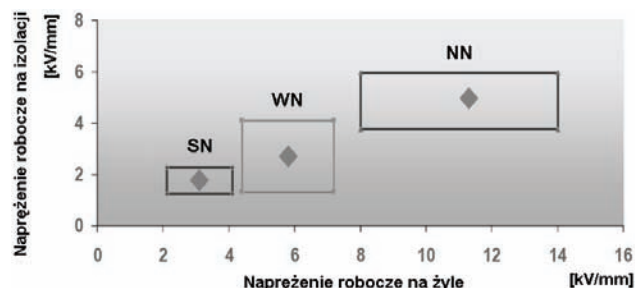
### Linie kablowe średniego napięcia

Zakres zastosowania kabli elektroenergetycznych w sieciach dystrybucyjnych średniego napięcia determinuje rodzaj układu izolacyjnego oraz docelowe ich przeznaczenie. Biorąc pod uwagę najczęściej występujące w sieciach średnich napięć poziomy napięciowe, a więc 15 i 20 kV, odpowiednio kable o izolacji polietylenowej i z gumy etylenowo-propylenowej wykonuje się jako jednożyłowe, natomiast kable tradycyjne w izolacji papierowo-olejowej (PO) są produkowane jako trójżyłowe [2]. Zaletą kabli jednofazowych jest możliwość dalszej ich pracy w przypadku uszkodzenia jednej fazy, łatwiejszy i mniej skomplikowany montaż osprzętu i instalowanie. Kable o izolacji polimerowej, wytłaczanej w sposób ciągły na żyły przewodzące, sukcesywnie zastępują kable tradycyjne o izolacji papierowo-olejowej, ze względu na ich skomplikowany proces technologiczny, jak również obawy przed zanieczyszczeniem ziemi impregnatem, w przypadku uszkodzenia powłoki kablowej. Obecnie, najczęściej znajdują zastosowanie dwa rodzaje materiałów izolacyjnych, są to: polietylen sieciowany (XLPE) i guma etylenowo-propylenowa (EPR), która na krajowym rynku nie jest jeszcze powszechnie stosowana. Kable EPR z powodzeniem wykorzystywane są od lat w USA i krajach Europy zachodniej, wykazując dobre doświadczenia eksploatacyjne.

Kierunki rozwoju konstrukcji kablowych determinowane są przede wszystkim przez wymagania użytkowników obejmujące: uzyskanie odpowiednich parametrów elektrycznych (dielektrycznych) oraz mechanicznych,

możliwość pracy w wysokich temperaturach, uzyskanie lżejszych kabli o mniejszych grubościach izolacji, zwiększenie długości produkowanych odcinków, podwyższenie giętkości ułatwiające układanie, bezpieczeństwo ogniowe, eliminację materiałów niebezpiecznych i wzrost odporności na czynniki eksploatacyjne i starzeniowe [2].

Wyższe napięcia i stosowanie izolacji o mniejszej grubości prowadzi do podwyższenia maksymalnej wartości roboczego natężenia pola elektrycznego. Na rysunku 1 porównano typowe wartości napiężeń roboczych dla kabli średnich (SN), wysokich (WN) i najwyższych napięć (NN).



Rys.1. Porównanie zakresów typowych wartości napiężeń roboczych dla kabli SN, WN i NN [1]

Długi okres stosowania kabli z izolacją papierowo-olejową doprowadził do stanu, w którym można uznać ich konstrukcje za całkowicie dopracowane i w pełni dojrzałe technicznie [2].

Rozwój technologii wytwarzania materiałów syntetycznych oraz metod domieszkania i modyfikowania ich własności prowadzi do uzyskiwania poprawy własności dużej grupy materiałów, a w konsekwencji wytwarzania izolacji kablowej o lepszych parametrach izolacyjno-eksploatacyjnych.

### Przyczyny uszkodzeń i awarii linii kablowych

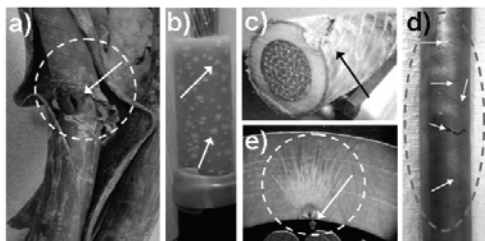
Właściwa eksploatacja linii kablowych, odcinków kabli, muf i głowic, a więc elementów wchodzących w jej skład polega na zapobieganiu uszkodzeniom w ruchu.

Jeden z podstawowych podziałów uszkodzeń linii kablowych w eksploatacji rozróżnia uszkodzenia proste i złożone. Do pierwszego rodzaju można zakwalifikować: zwarcia jedno-, dwu- i trójfazowe, zwarcia dwu- i trójfazowe doziemne, przerwy jednej, dwóch lub trzech faz oraz zwarcia przemijające, które dla kabli papierowo-olejowych stanowią przeciętnie 3% wszystkich uszkodzeń.

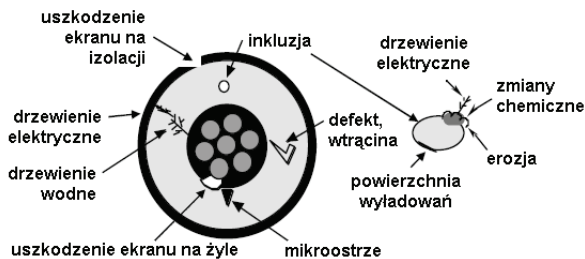
Uszkodzenia złożone, występujące znacznie rzadziej, obejmują dwa lub więcej uszkodzeń prostych, np. zwarcie jednofazowe z jednoczesną przerwą w fazie. Poza tym zwarcia można podzielić na bezpośrednie lub pośrednie, poprzez rezystancję przejścia.

Rozróżnia się dwie grupy przyczyn uszkodzeń linii kablowych: przyczyny zewnętrzne i wewnętrzne (rys.2). Do przyczyn zewnętrznych można zaliczyć wszelkie uszkodzenia powstałe w wyniku prac ziemnych oraz zdarzeń losowych, jak zapadliny, osiadanie gruntu, uszkodzenia spowodowane przez zwierzęta, itp. Przyczyny uszkodzeń linii kablowych powodowane czynnikami wewnętrznymi mogą być następujące:

- błędy konstrukcyjne i wady technologiczne nie stwierdzone przy odbiorze,
- nieprawidłowe ułożenie i błędy montażowe,
- elektryczne, w tym wyładowania niepełne (rys.3),
- starzenie lub zmęczenia materiałowe,
- niewłaściwe zabezpieczenie linii od przepięć atmosferycznych i łączeniowych,
- niewłaściwe zabezpieczenie linii od przetężeń,
- niewłaściwe zabezpieczenie linii od korozji.



Rys. 2. Przyczyny uszkodzeń kabli elektroenergetycznych: a) uszkodzenie elektryczne kabla SN o izolacji EPR [2], b) spienienie izolacji polimerowej [3], c) uszkodzenie mechaniczne kabla XLPE [4], d) pęknięcie powłoki kabla [3], e) drzewienie elektryczne spowodowane nierównością powierzchni ekranu [5]



Rys. 3. Typowe defekty w kablach o izolacji wytłaczanej powodujące powstawanie wyładowań niepełnych [3]

Powstawanie uszkodzenia nie jest procesem zdeterminowanym i bardzo często składa się z wielu przyczyn występujących równocześnie lub następujących po sobie.

Największy udział w uszkodzeniach linii kablowych mają przyczyny elektryczne, które stanowią około 40% wszystkich awarii. Są to zazwyczaj przepięcia łączeniowe piorunowe oraz przetężenia prądowe. Nie selektywne działanie automatyki zabezpieczeniowej podczas zwarcia może spowodować termiczne uszkodzenie kabla w wielu miejscach, co utrudnia lokalizację i wydłuża czas usuwania niezdatności.

W izolacji papierowo-olejowej, w wyniku zachodzących reakcji chemicznych może występować degradacja cieplna, a prawdopodobieństwo jej zajścia rośnie wraz ze wzrostem temperatury. Izolacja papierowo-olejowa to materiał organiczny, który ulega niszczeniu wskutek działania procesu utleniania. Rozkład oleju odbywa się poprzez reakcję łańcuchową. Proces zaczyna się, kiedy cząsteczka węgłowodoru z oleju utlenia się do nadtlenku wodoru, który

z kolei rozkłada się do wolnych rodników. Wysoce reaktywne wolne rodniki w prosty sposób utleniają następną cząsteczkę węgłowodoru, by utworzyć nowe wolne rodniki. Wysoka temperatura i zanieczyszczenia przyspieszają zachodzące reakcje. Bardzo szkodliwymi czynnikami dla izolacji PO są: wilgoć i kwasowe produkty rozkładu oleju. Degradacja papieru pogarsza jego własności mechaniczne, papier staje się bardziej kruchy, nie wpływając w znacznym stopniu na własności elektryczne.

Na degradację izolacji papierowo-olejowej mają również wpływ naprężenia mechaniczne, wyładowania niepełne, promieniowanie UV oraz utleniające działanie gazów, które nie tylko aktywują, ale również katalizują zaistniałe procesy. Innymi czynnikami powodującymi degradację mechaniczną są: rozszerzalność cieplna materiału, wibracje oraz prądy zwarcio-we. Wzrost porowatości papieru wpływa na liczbę cząsteczek celulozy i poziom wytrzymałości napięciowej układu izolacyjnego. Pod wpływem wilgoci olej staje się lokalnie niejednorodny, co prowadzi do miejscowych wysokich wartości natężenia pola elektrycznego. Gazy rozpuszczone w oleju wpływają na obniżenie wytrzymałości elektrycznej izolacji.

Izolacja polimerowa ulega niszczeniu na skutek działania trzech głównych procesów: degradacji fizycznej, chemicznej i elektrycznej. Polimery bezpośrednio po produkcji nie posiadają struktury krystalicznej. Końcowa wulkanizacja struktury izolacji jest procesem powolnym i może trwać nawet do kilku lat. Z tego powodu wewnątrz izolacji mogą powstawać mikroinkluzje gazowe i lokalnie zagęszczone obszary. Niejednorodna struktura izolacji pogłębia się na skutek oddziaływania pola elektrycznego w wyniku czego wzrasta ryzyko przebicia izolacji. Izolacja polimerowa jest wrażliwa nawet na działanie wyładowań niepełnych o bardzo małej intensywności. Degradacja chemiczna powoduje zmiany własności mechanicznych izolacji. Rezultatem rozkładu chemicznego może być przerwanie długich łańcuchów polimerowych, w procesie depolimeryzacji. W takich przypadkach mogą tworzyć się nowe, krótsze połączenia krzyżowe. Reakcja zachodzi przy udziale chemicznie aktywnych wolnych rodników powstających podczas utleniania izolacji. Szybkość ich tworzenia się zależy od temperatury, obecności tlenu i promieniowania. Największe zagrożenie dla izolacji polimerowej stanowią procesy degradacji elektrycznej, a przede wszystkim: wyładowania niepełne, drzewienie elektryczne i drzewienie wodne (rys. 3).

Procesy degradacji elektrycznej mają charakter lokalny, nie działając na całej długości kabla. Wada technologiczna w postaci niewielkiego defektu lokalnego rozprzestrzeniając się prowadzi do końcowego przebicia izolacji. Wysoka wartość roboczego natężenia pola elektrycznego i długi czas eksploatacji są powszechnymi przyczynami inicjującymi procesy degradacji izolacji kablowej. W procesie produkcji lub instalowania kabla w izolacji lub między poszczególnymi jej warstwami mogą się tworzyć niewielkie inkluzje gazowe. Gdy wartość natężenia pola elektrycznego wewnątrz inkluzji gazowej jest wystarczająco duża może nastąpić rozwój wyładowania i procesy erozyjne w izolacji. Mikroostrza lub zanieczyszczenia wewnątrz izolacji mogą prowadzić do koncentracji wyładowań niepełnych w jednym miejscu. W wyniku mechanizmu drzewienia elektrycznego rozwija się kanał przewodzący.

Kształtowanie drzewa wodnego zaczyna się w niehomogenicznych mikroobszarach izolacji pod wpływem zawartej w niej wilgoci. Różnica między procesami drzewienia wodnego i elektrycznego polega na tym, że drzewka wodne nie muszą formować trwałych i widocznych kanałów w izolacji, ich tworzenie może trwać wiele lat, a szybkość ich rozwoju uzależniona jest od obecności wilgoci,

natężenia pola elektrycznego i jego częstotliwości, rodzaju materiału izolacyjnego, temperatury i występujących naprężeń mechanicznych.

Uszkodzenia na trasie kabla związane z ruchami gruntu bardzo często występują na terenach eksploatacji górniczej, na sztucznie wykonanych nasypach w terenach górskich oraz na terenach o podwyższonej aktywności sejsmicznej. Ruchy gruntu sprawiają, że izolacja w kablu poddawana jest silnym naprężeniom, w wyniku których następuje przesunięcie dielektryka w kablu, co jest szczególnie niebezpieczne w kablach o izolacji papierowej.

### Charakterystyka linii kablowych SN w Polsce

Napięciem dominującym w sieciach SN, eksploatowanych przez spółki dystrybucyjne, jest obecnie 15 kV. Napięcie 20 kV występujące w kilku rejonach Polski, stanowi około 20% ogólnej długości linii średniego napięcia. Ze względu na kryteria ekonomiczne i unifikację międzynarodową jest uznawane za rozwojowe.

W tabeli 1 zaprezentowano stan ilościowy w zakresie elektroenergetycznych linii kablowych i napowietrznych średniego napięcia.

Tabela 1. Długość linii średnich napięć (15 – 20 kV) [6]

Rok	1990	1995	2000	2004	2005
Linie kablowe					
długość [km]	34 399	40 762	46 554	53 782	54 544
Linie napowietrzne					
długość [km]	206 429	215 547	219 200	228 772	228 757
Razem					
długość [km]	240 828	256 309	265 754	282 554	283 301

W Polsce, wg danych statystycznych za rok 2005 dotyczących polskiej energetyki opublikowanych przez Agencję Rynku Energii [6], linie kablowe stanowią 25% sieci energetycznej, a ich łączna długość wynosi 187,8 tys. km. Procentowy udział linii kablowych w sieciach średnich napięć to 21%, z czego 18% stanowią sieci o napięciu 15-20 kV. W grupie sieci kablowych SN linie kablowe o napięciach 15-20 kV stanowią 88% całej populacji. Przyrost względny długości linii kablowych o napięciu 15-20 kV, w latach 2000-2005, wyniósł 17%, a wskaźnik dynamiki dla tego okresu 1,17 i był wyższy w porównaniu z liniami napowietrznymi o tym samym napięciu znamionowym, dla których wyniósł odpowiednio 4% przy wskaźniku dynamiki 1,04, w analogicznym okresie czasu.

Wskaźnik długości linii kablowych na jednego mieszkańca danego kraju osiąga dla Polski wartość 4,9 m, dla sieci SN wynosi 1,6 m, a dla linii o napięciu 15-20 kV 1,4 m.

### Wskaźniki awaryjności linii kablowych

Wskaźnik awaryjności stanowi iloraz całkowitej liczby uszkodzeń rozpatrywanej linii kablowej i całkowitej długości linii podanej w kilometrach. Jednostką wskaźnika jest liczba uszkodzeń przypadająca na 100 km linii w ciągu roku kalendarzowego (1).

$$(1) \quad W_U = \frac{\text{całkowita liczba uszkodzeń}}{\text{całkowita długość linii [km]}} \cdot 100$$

W oparciu o wskaźnik  $W_U$  można zdefiniować wskaźnik uszkodzeń dla kabla o danym typie lub rodzaju izolacji, na przykład dla izolacji papierowo-olejowej, polietylenowej.

W tabeli 2 przedstawione zostały wskaźniki uszkodzeń linii kablowych średnich napięć, w polskim systemie elektroenergetycznym, w poszczególnych latach [6].

Porównując dane z roku 2002 i 2005 można zauważyć spadek uszkodzeń linii kablowych SN. Optymizmem

napawa fakt sukcesywnego polepszania się stanu sieci kablowej, będący efektem wycofywania z eksploatacji kabli z polietylenu termoplastycznego, z powodu ich wysokiej awaryjności, wprowadzanie do eksploatacji kabli o coraz lepszych parametrach izolacyjno-eksploatacyjnych, jak również poprawa technicznej kultury ich układania [7].

Tabela 2. Wskaźnik uszkodzeń na 100 km linii SN [6]

Rok	2002	2003	2004	2005
Linie kablowe				
liczba uszkodzeń [szt.]	22,7	18,3	16,2	16,6
Linie napowietrzne				
liczba uszkodzeń [szt.]	10,6	7,2	8,7	8,3

W tabeli 3 zestawione zostały średnie czasy przerw w dostawie energii elektrycznej dla sieci średnich napięć. Ze względu na zastosowanie sieci zamkniętych czas trwania przerwy w dostawie energii elektrycznej jest zazwyczaj dużo krótszy od czasu trwania awarii.

Tabela 3. Średni czas przerwy w dostawie energii z powodu awarii linii SN [6]

Rok	2002	2003	2004	2005
Linie kablowe				
czas przerwy [godz.]	2,4	2,1	2,0	1,9
Linie napowietrzne				
czas przerwy [godz.]	4,5	2,9	4,2	3,8

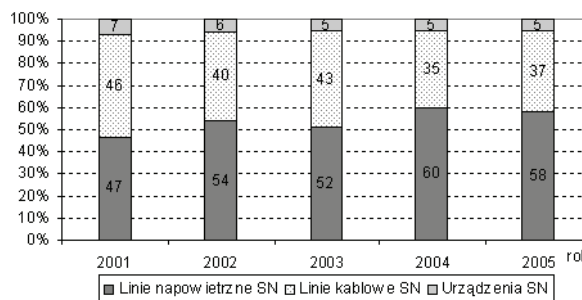
### Analiza awaryjności sieci średniego napięcia

Przedstawiono analizę awaryjności sieci średniego napięcia w oparciu o dane statystyczne pochodzące ze spółki dystrybucyjnej (SD) i jednego zakładu energetycznego ZE prowadzących działalność na terytorium Polski.

Tabela 4. Ogólne zestawienie awaryjności sieci średnich napięć [8]

	liczba zakłóceń w roku [szt.]				
	2001	2002	2003	2004	2005
Sieć napowietrzna	1803	2450	2019	2346	2124
Sieć kablowa	1766	1830	1685	1390	1365
Urządzenia	281	273	212	201	192
Razem	3850	4553	3916	3937	3681

Tabela 4 zawiera ogólne informacje o awaryjności sieci średnich napięć w analizowanej SD, w latach 2001-2006. Najbardziej awaryjnymi urządzeniami w rozpatrywanym okresie były linie napowietrzne, na których zakłócenia stanowią średnio ponad połowę ogółu wszystkich awarii. Następną pod względem poziomu awaryjności grupą urządzeń, są linie kablowe (rys.4). Ogólny spadek awaryjności w sieci SN determinowany jest w dużej mierze przez około 23% spadek awaryjności linii kablowych.



Rys.4. Zestawienie awaryjności sieci SN z procentowym podziałem na grupy [8]

Przedstawione w tabeli 5 zestawienie awaryjności poszczególnych elementów składowych sieci kablowej SN,

przedmiotowej SD, jest potwierdzeniem ogólnej tendencji spadkowej w liczbie uszkodzeń. Spadek liczby awarii osprzętu kablowego (głowice, mufy) w 2005 roku, w stosunku do roku 2001, jest efektem wprowadzania nowych technologii, poprawy jakości wykonywania prac monterskich oraz nowoczesnego podejścia do eksploatacji.

Tabela 5. Awaryjność poszczególnych elementów składowych linii kablowych średnich napięć [8]

	Liczba uszkodzeń [szt.]				
	2001	2002	2003	2004	2005
W trasie	1724	1796	1694	1366	1187
Głowica	114	115	91	85	78
Mufa	34	13	19	22	25
Razem	1872	1924	1804	1473	1290

Przedstawiona w tabeli 6 dane awaryjności linii kablowych (kable w trasie), z uwzględnieniem materiału izolacyjnego, wskazują, że największą awaryjnością odznaczają się kable z polietylenu termoplastycznego (PE niesiecianego). Spadek awaryjności tej grupy kabli w ostatnich latach spowodowany jest ich systematyczną wymianą i malejącym udziałem w ogólnej długości linii kablowych średnich napięć.

Tabela 6. Awaryjność linii kablowych z podziałem na kable o danym rodzaju materiału izolacyjnego [8]

Rok	liczba uszk.	$W_U$	liczba uszk.	$W_U$	liczba uszk.	$W_U$
	PO		PE		XLPE	
2001	643	13,22	901	107,13	86	3,60
2002	667	13,71	984	116,99	61	2,56
2003	572	11,76	979	116,40	74	3,10
2004	540	11,10	577	68,60	112	4,69
2005	516	10,61	532	63,25	58	2,43
liczba uszk – [szt.]; $W_U$ – [liczba uszk./100 km]						

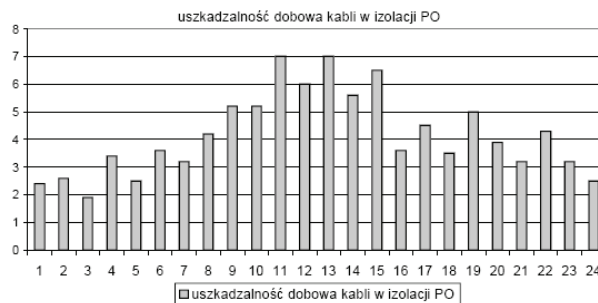
Ze względu na bardzo długi okres eksploatacji i starzenie się izolacji papierowo-olejowej, również ta grupa kabli podlega wymianie.

Dotychczasowe doświadczenia eksploatacyjne wskazują na wysoką niezawodność kabli o izolacji z polietylenu sieciowanego, a ich uszkodzenia spowodowane są przeważnie działaniem osób trzecich.

Opierając się na danych analizowanego zakładu energetycznego ZE, dotyczących uszkodzalności elektroenergetycznych sieci kablowych SN można zestawzić dobową oraz roczną (sezonową) zmienności uszkodzalności kabli o danym rodzaju izolacji.

Godzinowe częstości występowania uszkodzeń są miarą zmian uszkodzalności kabli. Jak wynika z rysunku 5, wzrost liczby awarii kabli PO notuje się w godzinach popołudniowych, co jest efektem zwiększonej częstości łączeń, zwiększających prawdopodobieństwo wystąpienia przepięć łączeniowych. Kable o izolacji syntetycznej nie wykazują widocznego zarysowanego wzrostu liczby uszkodzeń w ciągu doby. Charakterystyczny spadek liczby uszkodzeń dla obu rodzajów izolacji obserwuje się podczas nocnej doliny obciążenia.

Zestawienie całoroczne częstości uszkodzeń nie wykazuje przedziałów czasowych o zwiększonej uszkodzalności. Dla kabli o izolacji papierowo-olejowej awaryjność utrzymuje się na stałym poziomie. Wzmożony wzrost liczby awarii linii kablowych w miesiącach letnich powodowany jest przez absorpcję wilgoci przez izolację kabli po gwałtownym jej schłodzeniu. Dla kabli o izolacji syntetycznej częstość uszkodzeń jest bardziej zróżnicowana (rys.6).



Rys.5. Dobowa częstość (%) występowania uszkodzeń kabli o izolacji papierowo-olejowej (PO) [8]



Rys.6. Roczna częstość (%) występowania uszkodzeń kabli o izolacji polietylenowej (XLPE) [8]

## Podsumowanie

Procentowy udział linii kablowych w sieciach średnich napięć zwiększa się. Podstawowym celem, jaki towarzyszy rozwojowi linii kablowych jest zapewnienie wysokiej niezawodności przesyłu oraz spełnienie odpowiednich standardów i wymagań ekonomicznych i środowiskowych. Realizacja wspomnianych zadań następuje przez:

- wprowadzenie materiałów przewodzących, izolacyjnych i konstrukcyjnych o ulepszonych parametrach eksploatacyjnych,
- modernizację i poprawę parametrów technologicznych linii produkcyjnych,
- prowadzenie badań w optymalnym zakresie w cyklu produkcyjnym i po produkcji oraz po zainstalowaniu linii kablowej i w trakcie jej eksploatacji,
- prowadzenie analiz jakości i niezawodności kabli w oparciu o dane statystyczne i wskaźniki awaryjności oraz rozwijanie baz danych.

## LITERATURA

- [1] Hampton N., HV XLPE Cables, ICC Fall 2003 Education Session, Borealis
- [2] Opracowania własne Katedry Elektroenergetyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie
- [3] Lanz B., Shielded Power Cable Testing. Choosing the Right Test, IMCORP, 2005
- [4] Abdolali K., Halldorson G. L., Green D., Condition Assessment and Failure Modes of Solid Dielectric Cables in Perspective, IEEE Transactions on Power Delivery, 17 (2002), n.1, 18-24
- [5] <http://www.imcorpotech.com/sample.htm> - link aktualny na dzień 23.05.2007
- [6] Praca zbiorowa, Statystyka elektroenergetyki polskiej 2005, Agencja Rynku Energii S.A., Warszawa, 2006
- [7] Rakowska A., Analiza awaryjności linii kablowych średniego napięcia na przykładzie 5 zakładów energetycznych, Opracowanie: IE-41/537/2001, Poznań, 2001
- [8] Materiały własne

**Autor:** 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](mailto:krzysztof.pedzisz@agh.edu.pl)