



Dominik Duda\*, Zbigniew Gacek\*

## **ANALIZA WYBRANYCH PROCESÓW USZKADZALNOŚCI ELEKTROENERGETYCZNYCH KABLI ŚREDNIEGO NAPIĘCIA**

**Streszczenie:** W referacie przeanalizowano zmienność częstości uszkodzeń elektroenergetycznych linii kablowych średniego napięcia. W analizie uwzględniono uszkodzenia kabli spowodowane: przyczynami elektrycznymi (miejscowe osłabienie izolacji), wadami fabrycznymi i materiałowymi, procesami starzeniowymi. W celu wykazania istnienia ewentualnych przedziałów czasu charakteryzujących się zwiększoną liczbą uszkodzeń kabli rozważono zmienność dobową i roczną (sezonową) częstości uszkodzeń. Analizę przeprowadzono oddzielnie dla kabli o izolacji papierowo-olejowej i żywicznej (polietylenowej). Przeanalizowano wybrane strumienie uszkodzeń zarejestrowanych podczas eksploatacji kilku linii kablowych.

**Słowa kluczowe:** częstość uszkodzeń, strumień uszkodzeń

### **1. Wstęp**

Proces powstawania uszkodzeń w elektroenergetycznych liniach kablowych średniego napięcia ma charakter stochastyczny, dlatego też nie można dokładnie określić chwili wystąpienia uszkodzenia. Ocena tzw. strumienia uszkodzeń możliwa jest za pomocą metod statystycznych — w oparciu o dane pochodzące ze specjalnie zorganizowanych badań oraz z informacji o uszkodzeniach w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Przez uszkodzenie rozumie się w tym przypadku osłabienie izolacji prowadzące do zwarcia doziemnego lub międzyfazowego.

Rzeczywiste strumienie uszkodzeń posiadają skomplikowany charakter, co jest spowodowane losowością występowania: wad materiałowych izolacji linii kablowych ujawniających się podczas eksploatacji, przepięć łączeniowych i ziemnozwarciowych

---

\* Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

związanych z prowadzeniem ruchu w sieci średniego napięcia oraz uszkodzeniami w innych obiektach. Częstość uszkodzeń linii kablowych jest związana również z naturalnym starzeniem się izolacji, pogarszającym niezawodność tych obiektów wraz z upływem czasu. Osobną grupę przyczyn powstawania uszkodzeń w liniach kablowych SN stanowią przyczyny typowo mechaniczne, takie jak: prowadzenie robót ziemnych, próby kradzieży oraz osiadanie gruntu występujące na terenach eksploatacji górniczej. Ostatnia grupa przyczyn nie jest bezpośrednio związana ze stanem izolacji rozpatrywanych linii kablowych i powinna być analizowana oddzielnie. Uszkodzenia mechaniczne powodują jednak konieczność wykonywania remontów (zakładania muf), a zatem wprowadzania dodatkowych elementów do szeregowego układu niezawodnościowego.

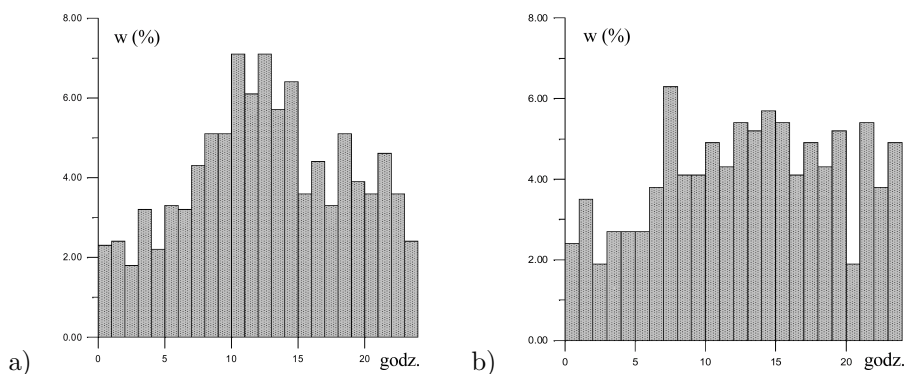
## 2. Dobowa i sezonowa zmienność częstości uszkodzeń

W referacie została przeanalizowana dobową i sezonową zmienność częstości uszkodzeń linii kablowych średniego napięcia związanych z osłabieniem izolacji. W analizie tej uwzględniono jedynie uszkodzenia kabli „w trasie”, które były spowodowane przyczynami elektrycznymi (miejscowe osłabienie izolacji), wadami fabrycznymi i materiałowymi oraz procesami starzenia i zmęczenia materiału. Pominięto uszkodzenia wcześniej wykonanych muf kablowych. Dane dotyczące rozpatrywanych uszkodzeń pochodzą z kart ewidencyjnych zakłóceń, stanowiących dobre źródło informacji o awaryjności rozpatrywanych obiektów. W kartach tych zawarta jest m.in. informacja o typie kabla, jego napięciu znamionowym, lokalizacji, roku produkcji i roku rozpoczęcia eksploatacji, czasie powstania uszkodzenia oraz — co jest bardzo ważne — o przyczynie powstania uszkodzenia. Dzięki temu możliwe było wyselekcjonowanie wyżej wymienionych przyczyn i ukierunkowanie prowadzonej analizy.

Analizując zebrane dane o uszkadzalnościach elektroenergetycznych kabli SN można przedstawić ich zmienność dobową oraz roczną (sezonową). Na rys. 1 przedstawiono zmienność dobową uszkadzalności kabli o izolacji papierowo-olejowej oraz syntetycznej. Miarą zmian uszkadzalności są w tym przypadku godzinowe częstości występowania uszkodzeń. Jak wynika z wykresu rys. 1a, zwiększoną liczbę uszkodzeń kabli z izolacją papierowo-olejową w porównaniu do pozostałych części doby obserwuje się w godzinach południowych.

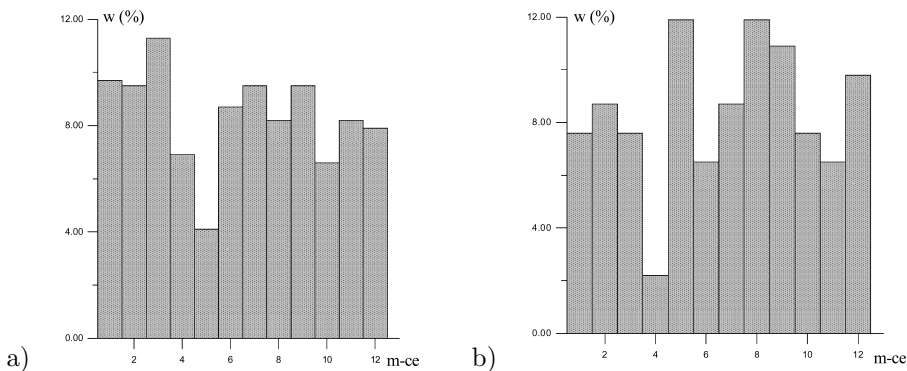
Uszkadzalność kabli SN o izolacji syntetycznej nie wykazuje w ciągu doby wyraźnego maksimum (rys. 1b), ale — podobnie jak w przypadku kabli o izolacji papierowo-olejowej — można zauważyć wzrost liczby uszkodzeń poza okresem nocnej doliny obciążenia. Zwiększenie liczby uszkodzeń może się wiązać ze wzrostem obciążenia linii kablowych. Ponadto w godzinach, w których obserwuje się zwiększoną częstość uszkodzeń, prowadzone są czynności ruchowe (łączeniowe). Zwiększa to prawdopodobieństwo wystąpienia przepięć łączeniowych. Zaobserwowano również niewielką ilość uszkodzeń linii kablowych związanych bezpośrednio z uszkodzeniami innych obiektów. Nałożeniem się na siebie wyżej wymienionych przyczyn można tłumaczyć zwiększoną częstość uszkodzeń poza okresem nocnej doliny obciążenia.

Wyraźny szczyt w dobowej częstości uszkodzeń kabli o izolacji papierowo-olejowej może być powodowany większą wrażliwością tych kabli na oddziaływanie wyżej wymienionych czynników, ze względu na znacznie dłuższy czas ich eksploataowania.



**Rys. 1.** Dobowa częstość występowania uszkodzeń kabli o izolacji: a) papierowo-olejowej, b) syntetycznej

Na rys. 2 przedstawiono roczną (sezonową) częstość uszkodzeń oddzielnie dla kabli o izolacji papierowo-olejowej oraz syntetycznej. Nie można wskazać wyraźnej sezonowości (zwiększonej częstości występowania uszkodzeń w kolejnych przedziałach czasu dłuższych niż 1 miesiąc). W przypadku kabli o izolacji syntetycznej miesięczne częstości występowania uszkodzeń są bardziej zróżnicowane.



**Rys. 2.** Roczna częstość występowania uszkodzeń w kablach o izolacji: a) papierowo-olejowej, b) syntetycznej

W związku z brakiem możliwości wyznaczenia przedziałów czasu w ciągu roku, w których można przyjmować stałą częstość występowania uszkodzeń, zachodzi konieczność sprawdzenia hipotezy, że częstość występowania uszkodzeń można traktować jako stałą w ciągu całego roku. W celu zweryfikowania tej hipotezy wykonano test  $\chi_2$  (tab. 1). Pozwala on na stwierdzenie, że miesięczne liczebności uszkodzeń nie różnią się istotnie od siebie. Wyniki testu  $\chi_2$  potwierdzają prawidłowość postawionej hipotezy. Występujące różnice pomiędzy miesięcznymi częstościami uszkodzeń widoczne na rys. 2 można zatem uznać za przypadkowe, a intensywność uszkodzeń — w przybliżeniu — za stałą.

**Tabela 1.** Weryfikacja hipotezy o miesięcznych częstościach uszkodzeń (wg [3])

Kable o izolacji papierowo-olejowej													Uwagi
miesiąc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$m = 12$
liczba uszk.	38	37	44	27	16	34	37	32	37	26	32	31	liczebność $N = 391$
średnia $\bar{n}_{sr}$													średnia liczebność uszkodzeń
$\chi^2$													$\frac{N}{\bar{n}_{sr}(N - \bar{n}_{sr})} \left( \sum_{j=1}^m n_j^2 - m \cdot \bar{n}_{sr}^2 \right)$
$\chi_{m-1;1-\alpha}^2$													poziom istotności $\alpha = 0,05$
wynik kryterium $\chi^2$	Brak podstaw do odrzucenia hipotezy, że miesięczne częstości uszkodzeń nie różnią się istotnie od siebie												dane wg [3]
Kable o izolacji syntetycznej													
liczba uszk.	7	8	7	2	11	6	8	11	10	7	6	9	liczebność $N = 92$
średnia $\bar{n}_{sr}$													średnia liczebność uszkodzeń
$\chi^2$													$\frac{N}{\bar{n}_{sr}(N - \bar{n}_{sr})} \left( \sum_{j=1}^m n_j^2 - m \cdot \bar{n}_{sr}^2 \right)$
$\chi_{m-1;1-\alpha}^2$													poziom istotności $\alpha = 0,05$
wynik kryterium $\chi^2$	Brak podstaw do odrzucenia hipotezy, że miesięczne częstości uszkodzeń nie różnią się istotnie od siebie												dane wg [3]

### 3. Strumienie uszkodzeń kabli SN

Uszkodzenia występujące podczas eksploatacji linii kablowych mogą być rozpatrywane w odniesieniu do jednego obiektu. Przy wielokrotnych uszkodzeniach tego samego obiektu chwile jego uszkodzeń tworzą losowy strumień uszkodzeń. Analiza strumienia uszkodzeń daje m.in. obraz o stanie technicznym tego obiektu lub jakości jego obsługi eksploatacyjnej.

Z obszernego materiału faktograficznego wytypowano kilka linii kablowych, których uszkodzenia tworzą strumień uszkodzeń. Wytypowane linie kablowe stanowią reprezentację eksploatowanych kabli o napięciu znamionowym 20 kV. Czasy pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami tej samej linii kablowej są zazwyczaj znacznie dłuższe niż doba, więc w analizie można pominąć dobową zmienność częstości uszkodzeń. Zakładając w przybliżeniu stałą wartość intensywności uszkodzeń w ciągu roku, można wnioskować o wykładniczym charakterze rozkładu czasów między kolejnymi uszkodzeniami.

W celu zweryfikowania postawionej hipotezy o wykładniczym charakterze czasów pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami zastosowano testy Fishera i Hartleya (tabela 2). Testy te służą do jednoczesnego sprawdzania hipotezy o wykładniczości funkcji niezawodności oraz istnienia dużego przedziału czasu pomiędzy uszkodzeniami. Zastosowanie powyższych testów jest korzystne, ponieważ w zarejestrowanych strumieniach uszkodzeń występują nieraz długie pojedyncze okresy bezawaryjnej pracy.

**Tabela 2.** Weryfikacja hipotezy o wykładniczym charakterze rozkładu czasów między kolejnymi uszkodzeniami w wybranych liniach kablowych SN (wg [2])

Typ kabla i napięcie znamionowe	Czas między uszkodzeniami ( $\tau$ )	Kryterium Fishera			Kryterium Hartleya		
		$\eta = \frac{\max \tau_i}{\sum_i \tau}$	$g_{n,\alpha}$	wynik kryterium	$\eta = \frac{\max \tau_i}{\min \tau_i}$	$h_{n,\alpha}$	wynik kryterium
—	doły	—	—	—	—	—	—
YHAKX (20 kV)	357	0,41	0,68	pozytywny	4,96	202	pozytywny
	196						
	92						
	76						
	137						
YHAKX (20 kV)	4	0,31	0,6	pozytywny	104,75	266	pozytywny
	34						
	117						
	9						
	104						
	101						
7							
YHAKX (20 kV)	549	0,46	0,73	pozytywny	45,75	142	pozytywny
	12						
	270						
	345						
HAKFtA (20 kV)	97	0,38	0,62	pozytywny	70,00	266	pozytywny
	125						
	200						
	26						
	280						
	4						
HAKFtA (20 kV)	9	0,79	0,82	pozytywny	64,20	88	pozytywny
	579						
	142						
YHAKX (20 kV)	122	0,67	0,82	pozytywny	5,30	88	pozytywny
	404						
	76						
YHAKX (20 kV)	105	0,42	0,68	pozytywny	26,25	202	pozytywny
	23						
	43						
	4						
	75						

Dla wszystkich linii kablowych przedstawionych w tabeli 2 wynik zastosowanych testów jest pozytywny. Brak jest zatem podstaw do odrzucenia hipotezy o wykładniczym charakterze rozkładu czasów między kolejnymi uszkodzeniami na poziomie istotności 5%, dla którego przeprowadzono obydwie testy. Linie kablowe wybrane do analizy nie stanowią jednak pełnej reprezentacji wszystkich eksploatowanych linii SN, gdyż liczną grupę stanowią również linie kablowe o napięciu znamionowym 6 i 15 kV. Dane zawarte w materiale faktograficznym nie pozwalają jednak przeprowadzić takiej

analizy, ze względu na małą liczbę pojawiających się uszkodzeń na jednym obiekcie. Prowadziłyby to do popełnienia dużych błędów związanych z małą liczebnością zbiorów danych. Analiza strumienia uszkodzeń dla tych kabli wymaga np. stworzenia zastępczego strumienia uszkodzeń, będącego superpozycją strumieni uszkodzeń podobnych kabli [1, 2].

#### 4. Podsumowanie

- Zwiększenie obciążenia oraz prowadzenie operacji ruchowych w sieci kablowej prowadzi do większej ilości uszkodzeń izolacji kabli SN poza okresem nocnej doliny obciążenia. Dobowa zmienność częstości uszkodzeń jest różna dla kabli o izolacji papierowo-olejowej i syntetycznej.
- Kable o izolacji papierowo-olejowej, eksploatowane w długim przedziale czasu wykazują tendencję do uszkadzania się w godzinach południowych.
- Nie stwierdzono sezonowej zmienności częstości uszkodzeń (np. istnienia kilku kolejnych miesięcy w ciągu roku o zwiększonej częstości uszkodzeń), a przeprowadzone testy dowodzą, że częstość uszkodzeń kabli SN w ciągu roku można uznać w przybliżeniu za stałą.
- Dla rozważanych kabli o napięciu znamionowym 20 kV rozkład czasów pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami jest zbliżony do rozkładu wykładniczego, co potwierdza stacjonarność strumieni uszkodzeń.

#### Literatura

- [1] **Gacek Z., Kiś W.:** *Modele obliczeniowe zawodności zabrudzeniowej izolacji liniowej.* Zeszyty Naukowe Pol. Śl., z. 52, Gliwice 1977
- [2] **Gniedenko B., Bieliajew J., Sołowiew A.:** *Metody matematyczne w teorii niezawodności.* Warszawa, WNT 1968
- [3] **Firkowicz S.:** *Statystyczne badanie wyrobów.* Warszawa, WNT 1970

#### ANALYSIS OF SELECTED FAILURE PROCESSES OF MV POWER CABLES

Variability of the failure frequency of MV power cable lines is analysed in the paper. The following failures of cables were taking into account: due to electrical causes (weakening of insulation), caused by manufacturing and material defects, and due to ageing processes (ageing and fatigue of materials). In order to show that some time periods with increased failure of cables exists, the day and year (seasonal) variability of failure frequency is considered in turn. Analysis was made separately for cables with paper-oil and polyethylene insulation. Selected failure streams, registered within the using of several cable lines, are analysed.