

Andrzej Ł. CHOJNACKI

## PORÓWNANIE WSKAŹNIKÓW I WŁAŚCIWOŚCI NIEZAWODNOŚCIOWYCH PRZYŁĄCZY NAPOWIETRZNYCH I KABLOWYCH nN

**STRESZCZENIE** *W artykule przedstawiono wyniki badań niezawodnościowych przyłączy napowietrznych i kablowych nN eksploatowanych w krajowych spółkach dystrybucyjnych. Niezależne analizy przeprowadzono dla przyłączy napowietrznych wykonanych przewodami gołymi i izolowanymi oraz dla przyłączy kablowych. Zaprezentowano statystyki awaryjności przyłączy z 10 lat pracy sieci. Przedstawiono przyczyny awarii oraz sezonową zmienność częstości uszkodzeń. Dokonano analizy czasu trwania odnowy, czasu trwania przerw w zasilaniu odbiorców oraz wartości energii elektrycznej niedostarczonej do odbiorców w wyniku awarii. Przedstawiono modele empiryczne oraz wyniki próby identyfikacji modelu teoretycznego gęstości prawdopodobieństwa rozważanych parametrów. Obliczono niezawodnościowe wskaźniki eksploatacyjne przyłączy.*

**Słowa kluczowe:** sieci dystrybucyjne, przyłącza niskiego napięcia, niezawodność, intensywność awarii, współczynnik zawodności

### 1. WSTĘP

---

Na sieci niskiego napięcia składają się przede wszystkim linie napowietrzne i kablowe nN, przyłącza kablowe oraz napowietrzne, a także wszelkiego rodzaju złącza.

Przyłącze stanowi odcinek linii, który łączy zasilany obiekt z siecią elektroenergetyczną. Przyłącza mogą być wykonane jako napowietrzne lub kablowe.

Przyłącze napowietrzne wykonywane jest zazwyczaj, gdy obiekt jest zasilany z sieci napowietrznej oraz nie ma przeszkód uniemożliwiających prowadzenie przewodów przyłącza. W przypadku realizacji przyłącza za pomocą przewodów gołych,

---

**dr hab. inż Andrzej Łukasz CHOJNACKI**

e-mail: a.chojnacki@tu.kielce.pl

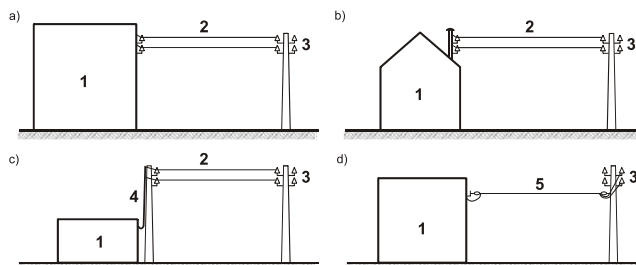
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki,  
Zakład Podstaw Energetyki, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 270, 2015

są one prowadzone między słupem rozgałęzonym sieci napowietrznej a izolatorami umocowanymi na ścianie budynku lub na stojaku (sztycy). Izolatory montowane na ścianie mogą być umieszczone na hakach wkręconych bezpośrednio w ścianę lub też na bolcach przymocowanych do metalowego wspornika (klamry), który jest przytwierdzony do konstrukcji budynku. W przypadku budynków niskich, dla których wysokość stojaka musiałaby być bardzo duża, ustawiany jest słup do którego doprowadzane jest przyłącze, natomiast od słupa do budynku prowadzony jest przewód lub kabel izolowany, ewentualnie przeznaczone do tego celu przewody kabelkowe. Przykładowe konstrukcje przyłączy napowietrznych przedstawia rysunek 1.

Przyłącza kablowe stosowane są wówczas, gdy sieć zasilająca jest siecią kablową, a także gdy względy estetyczne lub urbanistyczne nie pozwalają na wykonanie przyłącza napowietrzego. Połączenie przyłącza z siecią kablową realizowane jest za pomocą różnorodnych szaf rozdzielczych kablowych (rozdzielnic) lub za pomocą muf odgałęźnych.

W ostatnich latach praktycznie wszystkie przyłącza wykonuje się jako napowietrzne z przewodami izolowanymi lub jako przyłącza kablowe. Przyłącza napowietrzne wykonane przewodami gołymi, są stopniowo eliminowane z eksploatacji.



**Rys. 1. Przyłącza napowietrzne niskiego napięcia**

a) dościenne, b) ze stojakiem dachowym (sztycą), c) ze słupem przy budynku i podejściem wykonanym kablem nN, d) wykonane przewodem izolowanym samonośnym lub z wykorzystaniem linki nośnej (1 – zasilany obiekt, 2 – linia napowietrzna, 3 – słup rozgałęźny, 4 – podejście wykonane przewodem lub kablem izolowanym, 5 – samonośna linia napowietrzna izolowana)

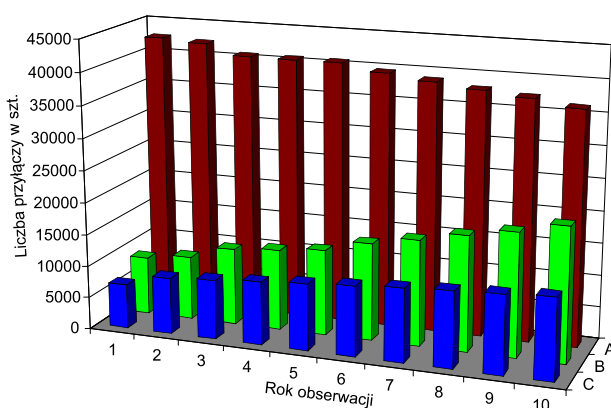
## 2. DANE STATYSTYCZNE ANALIZOWANYCH PRZYŁĄCZY NAPOWIETRZNYCH I KABLOWYCH nN

Obserwacja zawodności przyłączy nN obejmuje okres 10 lat, na terenie dużej spółki dystrybucyjnej energii elektrycznej w kraju. Na początku obserwacji, istniało w tej spółce łącznie 51720 przyłączy napowietrznych, w tym 9041 izolowanych, natomiast w ostatnim roku obserwacji 57326 przyłączy, w tym 20966 przyłączy izolowanych. Liczba przyłączy kablowych zmieniała się w tym czasie od 6880 do 12680 szt. Liczbę przyłączy w poszczególnych latach obserwacji przedstawia tabela 1 oraz rysunek 2.

**TABELA 1**

Liczba przyłączy w kolejnych latach obserwacji [szt.]

Rok obserwacji	Oznaczenie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Przyłącza napowietrzne gołe	A	42679	42234	40648	40648	40648	39568	38813	38040	37374	36360
Przyłącza napowietrzne izolowane	B	9041	9931	11966	12571	13328	15180	16541	18013	19261	20966
Przyłącza kablowe	C	6880	8790	9290	9850	10400	10925	11450	11870	12240	12680

**Rys. 2. Liczba przyłączy nN w ciągu dziesięciu lat prowadzenia badań (oznaczenia, jak w tabeli 1)**

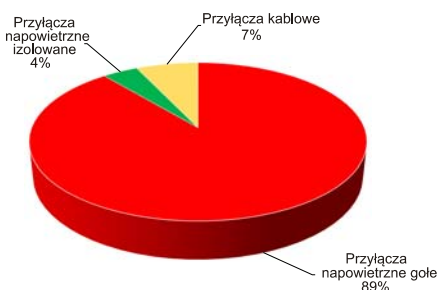
W czasie 10 lat obserwacji wystąpiło łącznie 3667 awarii przyłączy nN. Liczbę awarii w poszczególnych grupach przedstawia tabela 2 oraz rysunek 3.

Analizując dane przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 3 można zauważyć, iż najwięcej awarii jest powodowanych przez przyłącza napowietrzne gołe, natomiast najmniej przez przyłącza napowietrzne izolowane.

**TABELA 2**

Awarye przyłączy nN w ciągu 10 lat obserwacji

Urządzenie	Oznaczenie	Liczba awarii	Udział awarii grupy przyłączy w odniesieniu do liczby wszystkich awarii
---	---	[szt.]	[%]
Przyłącza napowietrzne gołe	A	3262	88,96
Przyłącza napowietrzne izolowane	B	147	4,01
Przyłącza kablowe	C	258	7,03



Rys. 3. Udział poszczególnych typów przłączy nN w całkowitej liczbie awarii

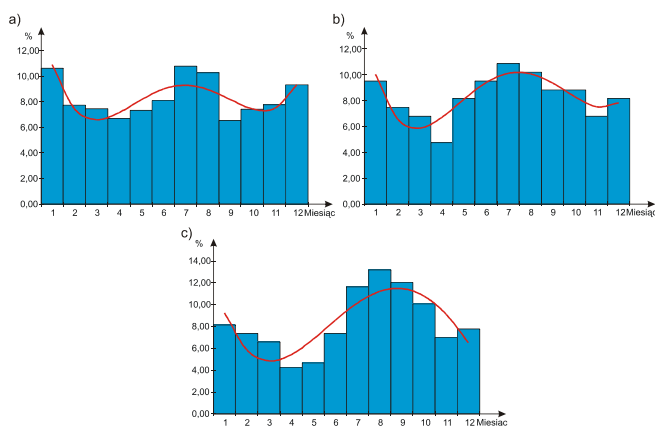
### 3. SEZONOWOŚĆ, PRZYCZYNY ORAZ SKUTKI AWARII

W tabeli 3 przedstawiona została częstość uszkodzeń przłączy nN w poszczególnych miesiącach roku. Dane te w postaci histogramów oraz funkcje aproksymacyjne przedstawione zostały na rysunku 4.

TABELA 3

Częstość uszkodzeń przłączy nN w poszczególnych miesiącach roku [%]

Miesiąc	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Przłącza napowietrzne gołe	10,64	7,73	7,45	6,68	7,33	8,09	10,79	10,27	6,53	7,42	7,76	9,32
Przłącza napowietrzne izolowane	9,52	7,48	6,80	4,76	8,16	9,52	10,88	10,20	8,84	8,84	6,80	8,16
Przłącza kablowe	8,14	7,36	6,59	4,26	4,65	7,36	11,63	13,18	12,02	10,08	6,98	7,75



Rys. 4. Wartości empiryczne i funkcje aproksymacyjne sezonowej zmienności częstości uszkodzeń przłączy nN

a) napowietrznych, wykonanych przewodami gołymi, b) napowietrznych, wykonanych przewodami izolowanymi, c) kablowych

Współczynniki funkcji aproksymacyjnych sezonowej zmienności częstości awarii przyłączy, przedstawionych na rysunku 4, zawiera tabela 4. W tabeli tej podano także współczynniki korelacji wyznaczonych funkcji w stosunku do danych empirycznych.

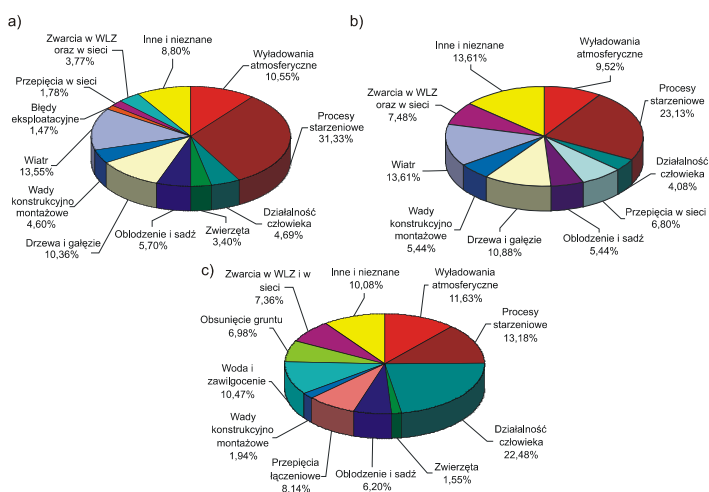
**TABELA 4**

Współczynniki funkcji aproksymacyjnych sezonowej zmienności częstości awarii przyłączy nN oraz współczynniki korelacji funkcji z danymi empirycznymi

Urządzenie	Współczynniki funkcji aproksymacyjnej					Współczynnik korelacji
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	
Przyłącza napowietrzne gołe	0,0116	-0,3160	2,9037	-10,1248	18,4453	0,80
Przyłącza napowietrzne izolowane	0,0108	-0,3114	2,9781	-10,3843	17,7627	0,87
Przyłącza kablowe	0,0044	-0,1758	2,1238	-8,5857	15,8846	0,83

Na rysunku 5 przedstawiono procentowy udział poszczególnych przyczyn w całkowitej liczbie awarii danej grupy przyłączy nN.

Awarie przyłączy napowietrznych niskiego napięcia wykonanych przewodami gołymi, polegają najczęściej na uszkodzeniu złączek (30,20%) oraz na zerwaniu przewodów (27,62%). Może się to odbywać na drodze mechanicznej (opadające drzewa i gałęzie, nadmierne obciążenie sadią), ale także termicznej (przepalenie przewodu w wyniku wyładowania atmosferycznego lub zwarcia). Awarie przyłączy napowietrznych niskiego napięcia wykonanych przewodami izolowanymi, polegają najczęściej na uszkodzeniu linki nośnej (44,90%) oraz na zerwaniu przewodów roboczych (42,18%).



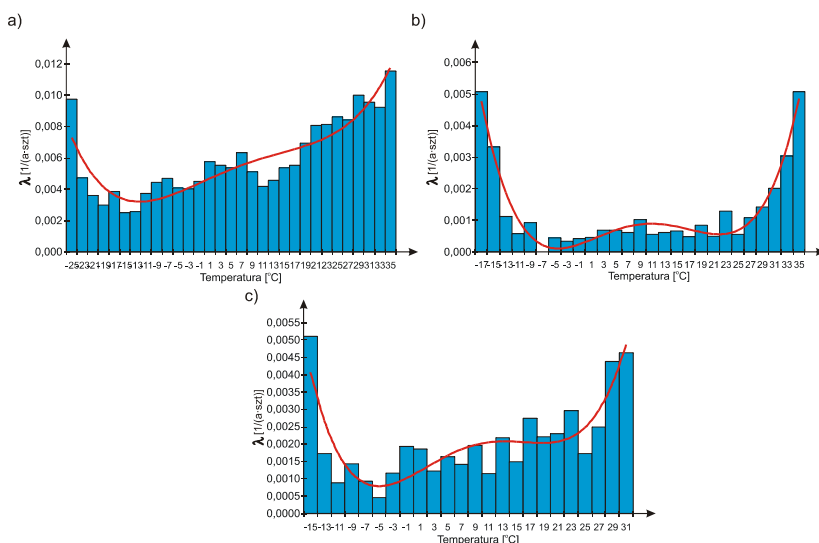
**Rys. 5. Procentowy udział przyczyn awarii przyłączy nN**

a) napowietrznych, wykonanych przewodami gołymi, b) napowietrznych, wykonanych przewodami izolowanymi, c) kablowych

Uszkodzenia przyłączy kablowych niskiego napięcia, polegają najczęściej na powstaniu zwarć doziemnych lub międzyfazowych. Może się to odbywać na drodze mechanicznej (uszkodzenie kabla w wyniku prac ziemnych, uszkodzenie przez sadyż na podejściach kabli do konstrukcji wsporczych) ale także w wyniku procesów starzeniowych (stopniowe osłabienie izolacji prowadzące do jej przebicia). Rzadziej zdarzają się przypadki braku ciągłości żył kabli nN bez widocznego uszkodzenia izolacji. Są to jednak sytuacje w których dość trudno jest zlokalizować miejsce uszkodzenia.

#### 4. WPŁYW TEMPERATURY OTOCZENIA NA INTENSYWNOŚĆ AWARII PRZYŁĄCZY

Dokonano analizy wpływu temperatury otoczenia na intensywność występowania awarii przyłączy nN. Otrzymane wyniki przedstawia rysunek 6.



**Rys. 6. Zależność intensywności awarii przyłączy nN od temperatury otoczenia**  
a) naporowatrznych, wykonanych przewodami gołymi, b) naporowatrznych, wykonanych przewodami izolowanymi, c) kablowych

Funkcje aproksymacyjne częstości uszkodzeń, przedstawione na rysunku 6, są wielomianami czwartego stopnia. Współczynniki funkcji aproksymacyjnych intensywności awarii przyłączy nN w funkcji temperatury otoczenia, zawiera tabela 5. W tabeli tej podano także współczynniki korelacji wyznaczonych funkcji w stosunku do danych empirycznych.

**TABELA 5**

Współczynniki funkcji aproksymacyjnych intensywności awarii przyłączy nN w funkcji temperatury otoczenia oraz współczynniki korelacji funkcji z danymi empirycznymi

Urządzenie	Współczynniki funkcji aproksymacyjnej					Współczynnik korelacji
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	
	[10 <sup>-8</sup> ]	[10 <sup>-8</sup> ]	[10 <sup>-8</sup> ]	[10 <sup>-6</sup> ]	[10 <sup>-6</sup> ]	
Przyłącza napowietrzne gołe	0,83	-23,43	-42,13	153,67	4501,24	0,92
Przyłącza napowietrzne izolowane	1,78	-67,07	328,31	74,49	311,98	0,97
Przyłącza kablowe	2,15	-77,65	385,10	107,80	1119,63	0,86

## 5. CZAS TRWANIA AWARII

Czas trwania awarii jest definiowany jako czas, który upływa od momentu powstania awarii do momentu zakończenia naprawy z jednoczesną możliwością przywrócenia zasilania i dostarczenia odbiorcom potrzebnej mocy [5, 6, 7, 8, 9]. Czas ten, zwany jest również czasem usuwania awarii lub czasem odnowy. Określenie to jest związane z przejściem urządzenia ze stanu uszkodzenia do ponownego stanu zdatości ruchowej [6, 9].

Wartość tego czasu zależy przede wszystkim od zakresu awarii oraz możliwości organizacyjnych i technicznych brygad remontowych.

Urządzenia elektryczne można podzielić na odnawialne oraz nieodnawialne. Przyłącza nN należą do grupy urządzeń odnawialnych. Poddawane są zazwyczaj odnowie polegającej na wymianie uszkodzonego elementu. Jedynie w razie poważnych uszkodzeń są złomowane w całości [9, 10].

Na podstawie danych empirycznych przeprowadzona została weryfikacja parametryczna oraz nieparametryczna czasu trwania awarii przyłączy. Wartość średnią z próby  $\bar{t}_a$  oszacowano metodą największej wiarygodności, na podstawie zależności [4, 6]:

$$\bar{t}_a = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} n_i \cdot t_i^o}{n} \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{t}_a$  – wartość średnia z próby;

$t_i^o$  – środek *i*-tej klasy szeregu rozdzielczego;

$n_i$  – liczba uszkodzeń w *i*-tej klasie szeregu rozdzielczego;

$n$  – całkowita liczba awarii;

$k$  – liczba klas szeregu rozdzielczego.

Otrzymane średnie wartości czasów trwania awarii wynoszą: dla przyłączy napowietrznych gołych –  $\bar{t}_{ang} = 10,45$  h, dla przyłączy napowietrznych izolowanych –  $\bar{t}_{ani} = 10,52$  h oraz dla przyłączy kablowych –  $\bar{t}_{ak} = 12,97$  h.

Przedział ufności dla średniej wyznacza się zgodnie z zależnością [4, 6]:

$$\bar{t}_a - u_\alpha \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < t < \bar{t}_a + u_\alpha \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

gdzie:

$u_\alpha$  – wartość zmiennej losowej  $U$  mającej rozkład normalny standaryzowany, wyznaczona dla danego współczynnika ufności  $1-\alpha$  z tablicy rozkładu normalnego;

$s$  – odchylenie standardowe z próby obliczone według zależności [4, 6, 10]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=k} \left( t_i - \bar{t}_a \right)^2 \cdot n_i} \quad (3)$$

Na podstawie wykonanych obliczeń otrzymano: dla przyłączy napowietrznych gołych  $s_{ang} = 12,52$  h oraz przedział ufności dla średniej  $10,02$  h  $< t_{ang} < 10,88$  h, dla przyłączy napowietrznych izolowanych  $s_{ani} = 8,98$  h oraz przedział ufności dla średniej  $9,05$  h  $< t_{ani} < 11,98$  h, natomiast dla przyłączy kablowych  $s_{ak} = 9,23$  h oraz przedział ufności dla średniej  $11,84$  h  $< t_{ak} < 14,10$  h.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza o logarytmiczno-normalnym rozkładzie czasu odnowy przyłączy napowietrznych gołych oraz kablowych, a także o rozkładzie wykładniczym czasu odnowy przyłączy napowietrznych izolowanych. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu logarytmiczno-normalnego ma postać [4, 6, 9]:

$$f(t_a) = \frac{\log e}{t_a \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\log t_a - m)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \quad (4)$$

natomiast rozkładu wykładniczego:

$$f(t_a) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t_a} \quad (5)$$

przy czym:

$m$  – wartość oczekiwana zmiennej losowej  $\log t_a$ ;

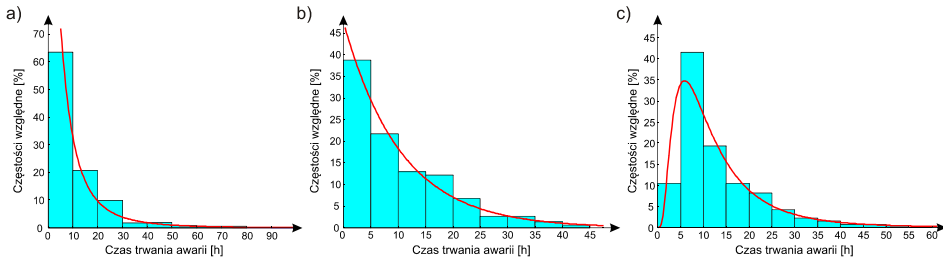
$\sigma$  – odchylenie standardowe zmiennej losowej  $\log t_a$ ;

$\lambda$  – parametr rozkładu wykładniczego.



Wyznaczone wartości parametrów rozkładu wynoszą: dla przyłączy napowietrznych gołych:  $m_{ang} = 1,7721$ ,  $\sigma_{ang} = 1,0781$ , dla przyłączy napowietrznych izolowanych:  $\lambda_{ami} = 0,0951$  oraz dla przyłączy kablowych:  $m_{ak} = 2,3181$ ,  $\sigma_{ak} = 0,7440$ .

Empiryczne i teoretyczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa czasu odnowy przyłączy nN oraz wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 7.



**Rys. 7. Empiryczne i teoretyczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa czasu trwania odnowy**

- a) przyłączy napowietrznych gołych ( $\lambda = 1,217 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 6,81 < \chi^2_\alpha = 25,00$ ),  
 b) przyłączy napowietrznych izolowanych ( $\lambda = 1,117 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 2,99 < \chi^2_\alpha = 19,70$ ),  
 c) przyłączy kablowych ( $\lambda = 1,264 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 6,42 < \chi^2_\alpha = 25,00$ )

Dla analizowanej próby przyłączy nN wyznaczone zostały także: średnia intensywność uszkodzeń oraz odnowy, a także współczynnik zawodności. Zależność teoretyczna, z której wyznaczono średnią intensywność uszkodzeń ma postać [10]:

$$\bar{\lambda} = \frac{2 \cdot m_a}{(n_p + n_k) \cdot \Delta t} \quad (6)$$

gdzie:

- $m_a$  – zaobserwowana liczba awarii;
- $n_p$  – liczebność próbki na początku okresu obserwacji;
- $n_k$  – liczebność próbki na końcu okresu obserwacji;
- $\Delta t$  – czas obserwacji.

Zależność, z której można wyznaczyć współczynnik zawodności [10]:

$$q = \frac{\bar{\lambda} \cdot \bar{t}_a}{1 + \bar{\lambda} \cdot \bar{t}_a} \quad (7)$$

Znając  $\bar{\lambda}$  oraz  $q$  można wyznaczyć średnią intensywność odnowy z zależności [11]:

$$\bar{\mu} = \frac{\bar{\lambda} \cdot (1 - q)}{q} \quad (8)$$

Otrzymane z próby średnie parametry zawodnościowe wynoszą: dla przyłączy napowietrznych gołych:  $\bar{\lambda}_{ang} = 82,54 \cdot 10^{-4} \frac{1}{a \cdot szt.}$ ,  $\bar{\mu}_{ang} = 837,96 \frac{1}{a \cdot szt.}$  oraz  $q_{ang} = 9,85 \cdot 10^{-6}$ , dla przyłączy napowietrznych izolowanych:  $\bar{\lambda}_{ani} = 9,80 \cdot 10^{-4} \frac{1}{a \cdot szt.}$ ,  $\bar{\mu}_{ani} = 830,51 \frac{1}{a \cdot szt.}$  oraz  $q_{ani} = 1,18 \cdot 10^{-6}$ , a dla przyłączy kablowych:  $\bar{\lambda}_{ak} = 26,38 \cdot 10^{-4} \frac{1}{a \cdot szt.}$ ,  $\bar{\mu}_{ak} = 674,68 \frac{1}{a \cdot szt.}$  oraz  $q_{ak} = 3,91 \cdot 10^{-6}$ .

## 6. CZAS TRWANIA PRZERW W ZASILANIU ODBIORCÓW

Czas przerwy w zasilaniu odbiorców energii elektrycznej jest to czas od chwili powstania przerwy w zasilaniu do chwili wznowienia zasilania odbiorców. Czas przerwy w zasilaniu odbiorców energii elektrycznej jest mniejszy (krótszy) od czasu trwania awarii. Na taki stan mają wpływ dwa czynniki. Pierwszym jest możliwość rezerwowego zasilania odbiorców, natomiast drugim dopuszczana przez energetykę praca układu elektroenergetycznego z uszkodzonym przyłączem, jeżeli nie stwarza ono zagrożenia dla osób postronnych oraz może w ograniczonym zakresie wypełniać swoje funkcje.

Na podstawie danych empirycznych przeprowadzona została weryfikacja parametryczna oraz nieparametryczna czasu trwania przerw w zasilaniu odbiorców. Wartość średnią z próby  $\bar{t}_p$  oszacowano metodą największej wiarygodności, na podstawie zależności (1). Otrzymane średnie wartości czasów trwania przerw w zasilaniu wynoszą: dla przyłączy napowietrznych gołych  $\bar{t}_{png} = 6,25$  h, dla przyłączy napowietrznych izolowanych  $\bar{t}_{pni} = 6,45$  h oraz dla przyłączy kablowych  $\bar{t}_{pk} = 6,02$  h.

Przedział ufności dla średniej wyznacza się zgodnie z zależnością (2), a odchylenie standardowe z próby według zależności (3).

Na podstawie wykonanych obliczeń otrzymano: dla przyłączy napowietrznych gołych  $s_{png} = 7,67$  h oraz przedział ufności dla średniej  $5,96 \text{ h} < t_{png} < 6,53$  h, dla przyłączy napowietrznych izolowanych  $s_{pni} = 5,55$  h oraz przedział ufności dla średniej  $5,45 \text{ h} < t_{pni} < 7,45$  h, natomiast dla przyłączy kablowych  $s_{pk} = 6,35$  h oraz przedział ufności dla średniej  $5,19 \text{ h} < t_{pk} < 6,85$  h.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza o rozkładzie Weibulla czasu przerw w zasilaniu w przypadku uszkodzenia przyłączy napowietrznych gołych oraz rozkładzie wykładniczym przerw w zasilaniu w przypadku uszkodzenia przyłączy napowietrznych izolowanych oraz kablowych. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu Weibulla ma postać [1, 4, 9]:

$$f(t_p) = \frac{\nu}{b} \cdot \left(\frac{t_p}{b}\right)^{\nu-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t_p}{b}\right)^\nu\right] \quad (9)$$

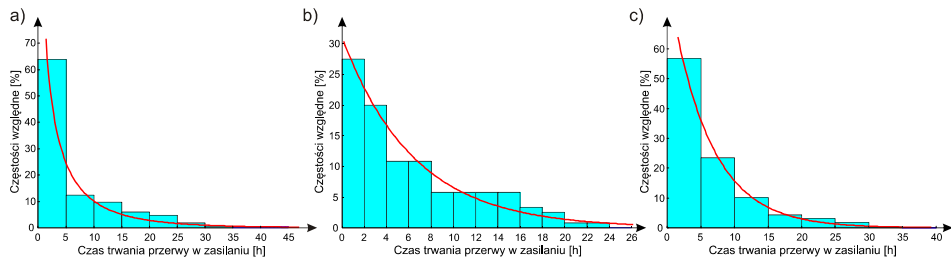
gdzie:

$b$  – parametr skali;

$\nu$  – parametr kształtu.

Wyznaczone wartości parametrów rozkładu wynoszą: dla przyłączy napowietrznych gołych:  $b_{png} = 4,2741$ ,  $\nu_{png} = 0,6727$ , dla przyłączy napowietrznych izolowanych:  $\lambda_{pni} = 0,1550$  oraz dla przyłączy kablowych:  $\lambda_{pk} = 0,1661$ .

Empiryczne i teoretyczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa czasu trwania przerw w zasilaniu odbiorców na skutek uszkodzenia przyłączy nN oraz wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 8.



**Rys. 8. Empiryczne i teoretyczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa czasu trwania przerw w zasilaniu odbiorców na skutek uszkodzenia:**

- a) przyłączy napowietrznych gołych ( $\lambda = 1,073 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 3,95 < \chi^2_\alpha = 21,00$ ),  
 b) przyłączy napowietrznych izolowanych ( $\lambda = 0,834 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 5,09 < \chi^2_\alpha = 22,40$ ),  
 c) przyłączy kablowych ( $\lambda = 0,947 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 1,93 < \chi^2_\alpha = 16,90$ )

Dla analizowanej próby przyłączy nN wyznaczone zostały także: średnia intensywność przerw oraz ich likwidacji, a także współczynnik zawodności dotyczący przerw awaryjnych. W tym celu wykorzystano zależności (6), (7) oraz (8).

Otrzymane z próby średnie parametry zawodnościowe wynoszą: dla przyłączy napowietrznych gołych:  $\bar{\lambda}_{png} = 70,35 \cdot 10^{-4} \frac{1}{a \cdot szt.}$ ,  $\bar{\mu}_{png} = 1401,39 \frac{1}{a \cdot szt.}$  oraz

$q_{png} = 5,02 \cdot 10^{-6}$ , dla przyłączy napowietrznych izolowanych:  $\bar{\lambda}_{pni} = 8,00 \cdot 10^{-4} \frac{1}{a \cdot szt.}$ ,

$\bar{\mu}_{pni} = 1355,93 \frac{1}{a \cdot szt.}$  oraz  $q_{pni} = 0,59 \cdot 10^{-6}$ , a także dla przyłączy kablowych:

$\bar{\lambda}_{pk} = 23,42 \cdot 10^{-4} \frac{1}{a \cdot szt.}$ ,  $\bar{\mu}_{pk} = 1454,66 \frac{1}{a \cdot szt.}$  oraz  $q_{pk} = 1,61 \cdot 10^{-6}$ .

## 7. ENERGIA ELEKTRYCZNA NIEDOSTARCZONA DO ODBIORCÓW NA SKUTEK AWARII

Bardzo ważnym wskaźnikiem gospodarczym, określającym straty ponoszone przez dystrybutorów energii elektrycznej oraz odbiorców, wskutek zaistniałej awarii, jest wartość niedostarczonej energii elektrycznej  $\Delta A$ . Wartość tego parametru jest zależna od czasu trwania przerwy w zasilaniu odbiorców, a także od poboru mocy. Jej wartość można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta A = P_{sr} \cdot t_p \quad (10)$$

gdzie:

$\Delta A$  – wartość niedostarczonej energii elektrycznej;

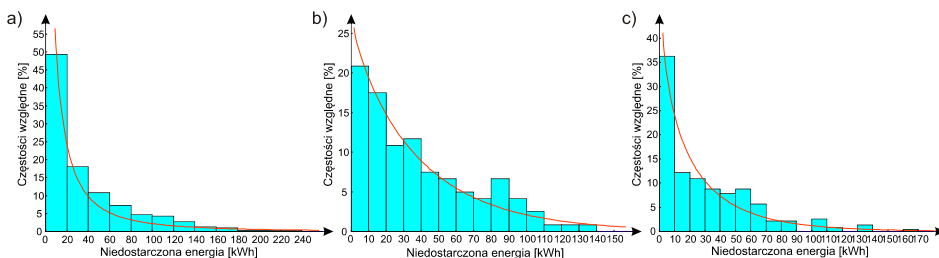
$P_{sr}$  – średnia wartości mocy, pobieranej przez odbiorców, ustalona na podstawie wykresów obciążeń;

$t_p$  – czas przerwy w dostawie energii elektrycznej do odbiorców.

Na podstawie dobowych wykresów obciążenia oraz czasów trwania przerwy w zasilaniu odbiorców wyznaczone zostały wartości niedostarczonej energii dla przypadku awarii przyłączy napowietrznych i kablowych niskiego napięcia. Otrzymane średnie wartości niedostarczonej energii wynoszą: dla przyłączy napowietrznych gołych  $\overline{\Delta A}_{ng} = 33,65$  kWh, dla przyłączy napowietrznych izolowanych  $\overline{\Delta A}_{ni} = 38,75$  kWh oraz dla przyłączy kablowych  $\overline{\Delta A}_k = 30,96$  kWh. Wyznaczone zostały także odchylenie standardowe oraz przedziały ufności dla średniej: dla przyłączy napowietrznych gołych  $s_{Ang} = 42,29$  kWh oraz przedział ufności dla średniej  $32,08$  kWh  $< \Delta A_w < 35,23$  kWh, dla przyłączy napowietrznych izolowanych  $s_{Ani} = 32,96$  kWh oraz przedział ufności dla średniej  $32,79$  kWh  $< \Delta A_{ni} < 44,71$  kWh, natomiast dla przyłączy kablowych  $s_{Ak} = 31,02$  kWh oraz przedział ufności dla średniej  $26,92$  kWh  $< \Delta A_k < 35,00$  kWh.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza o logarytmiczno-normalnym rozkładzie niedostarczonej energii dla przypadku awarii przyłączy napowietrznych gołych oraz rozkładzie Weibulla dla przypadku awarii przyłączy napowietrznych izolowanych oraz kablowych. Wyznaczone wartości parametrów rozkładu wynoszą: dla przyłączy napowietrznych gołych:  $m_{Ang} = 2,5624$ ,  $\sigma_{Ang} = 1,5825$ , dla przyłączy napowietrznych izolowanych:  $b_{Ani} = 40,3817$ ,  $\nu_{Ani} = 0,9673$  oraz dla przyłączy kablowych:  $b_{Ak} = 26,5794$ ,  $\nu_{Ak} = 0,8535$ .

Empiryczne i teoretyczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa niedostarczonej energii oraz wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 9.



**Rys. 9. Empiryczne i teoretyczne funkcje gęstości prawdopodobieństwa energii elektrycznej niedostarczonej do odbiorców na skutek uszkodzenia**

- a) przyłączy napowietrznych gołych ( $\lambda = 0,988 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 4,67 < \chi^2_\alpha = 21,00$ ),  
 b) przyłączy napowietrznych izolowanych ( $\lambda = 0,667 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 6,60 < \chi^2_\alpha = 26,30$ ),  
 c) przyłączy kablowych ( $\lambda = 1,077 < \lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 5,51 < \chi^2_\alpha = 23,70$ )

## 8. PODSUMOWANIE

Współczesny odbiorca energii wymaga wysokiej niezawodności jej dostaw. Nieciągłość zasilania energią elektryczną powoduje u odbiorcy straty gospodarcze. U odbiorcy przemysłowego straty z powodu niewykonania produkcji lub jej nieterminowego wykonania, u odbiorcy komunalnego z powodu ograniczenia jego aktywności. Z tego powodu bardzo istotnym obecnie problemem jest znajomość optymalnych warunków eksploatacji sieci dystrybucyjnych, a także procesów mających na celu przedłużenie okresu ich poprawnej pracy. W tym celu należy dokonać dokładnej analizy niezawodnościowej wszystkich elementów tych sieci. Szczególne znaczenie ma tutaj analiza prowadzona w dość długim przedziale czasowym. Ponieważ awarie przyłączy niskiego napięcia dotyczą pojedynczych odbiorców oraz są związane z niewielkimi ograniczeniami dostaw energii, problem ich zawadności jest zazwyczaj lekceważony. Tymczasem są to na ogół elementy nierzzerwane, a więc w wielu przypadkach determinują niezawodność zasilania konkretnego odbiorcy.

W artykule przedstawiono analizę awaryjności przyłączy niskiego napięcia eksploatowanych w sieci dystrybucyjnej dużej spółki energetycznej w kraju. Na jej podstawie wyznaczono średni czas trwania odnowy: przyłączy napowietrznych gołych –  $\bar{t}_{ang} = 10,45$  h, przyłączy napowietrznych izolowanych –  $\bar{t}_{ani} = 10,52$  h oraz przyłączy kablowych –  $\bar{t}_{ak} = 12,97$  h, a także średni czas przerwy w zasilaniu odbiorców w przypadku uszkodzenia: przyłączy napowietrznych gołych –  $\bar{t}_{png} = 6,25$  h, przyłączy napowietrznych izolowanych –  $\bar{t}_{pmi} = 6,45$  h oraz przyłączy kablowych –  $\bar{t}_{pk} = 6,02$  h.

Wyznaczono także średnią wartość energii elektrycznej niedostarczonej do odbiorców w wyniku awarii: przyłączy napowietrznych gołych –  $\bar{\Delta A}_{ng} = 33,65$  kWh, przyłączy napowietrznych izolowanych –  $\bar{\Delta A}_{ni} = 38,75$  kWh i przyłączy kablowych –  $\bar{\Delta A}_k = 30,96$  kWh.

Wyznaczono funkcje gęstości prawdopodobieństwa czasów odnowy, czasów wyłączeń awaryjnych, czasów przerw w zasilaniu oraz wartości energii elektrycznej

niedostarczonej do odbiorców, a także dokonano ich weryfikacji. Otrzymane rozkłady prawdopodobieństwa są rozkładami logarytmiczno-normalnymi, wykładniczymi oraz Weibulla. Dokonano także analizy sezonowości awarii. Na jej podstawie można wyciągnąć wniosek, iż przeglądy, remonty oraz pomiary przyłączy powinny być wykonywane w miesiącach od lutego do maja oraz w listopadzie. Są to bowiem miesiące o najmniejszej intensywności awarii wszystkich przyłączy. Okresem zwiększonej intensywności uszkodzeń są miesiące letnie.

Analizując otrzymane wskaźniki niezawodnościowe zauważa się, iż najgorsze właściwości niezawodnościowe posiadają przyłącza napowietrzne wykonane przewodami gołymi, natomiast najlepsze przyłącza napowietrzne wykonane przewodami izolowanymi. Przyłącza napowietrzne izolowane charakteryzują się współczynnikiem zawodności o rząd wielkości mniejszym niż przyłącza napowietrzne gołe.

Do badań wykorzystano sprzęt naukowo-badawczy zakupiony w ramach zrealizowanego Projektu MODIN II (Projekt „MODIN II – Modernizacja i Rozbudowa Infrastruktury Edukacyjno-Badawczej Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach” był współfinansowany ze środków Unii Europejskiej z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, realizowany w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013 Oś priorytetowa I: Nowoczesna Gospodarka. Działanie I.1: Infrastruktura uczelni; zgodnie z umową nr POPW.01.01.00–26–005/08/00 z dnia 27 listopada 2008r. Politechniki Świętokrzyskiej i Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości).

## LITERATURA

1. Chojnacki A.Ł.: Analiza niezawodności eksploatacyjnej elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2013.
2. Chojnacki A.Ł.: Optimum in-service time periods of MV/LV transformer-distribution substations. *Electric Power Systems Research*, vol. 83, nr 1, s. 212–219, 2012.
3. Filipiak S.: Application of evolutionary algorithm in optimisation of medium-voltage distribution networks post-fault configuration. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. vol. 1, s. 666–671, 2013.
4. Greń J.: Modele i zadania statystyki matematycznej. PWN, Warszawa, 1982.
5. Horak J., Popczyk J.: Eksploatacja elektroenergetycznych linii rozdzielczych. WNT, Warszawa, 1985.
6. Kowalski Z.: Niezawodność zasilania odbiorców energii elektrycznej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1992.
7. Kujszczyk S. i inni: Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze. PWN, Warszawa 1994.
8. Popczyk J.: Modele probabilistyczne w sieciach elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1991.
9. Sozański J.: Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego. WNT, Warszawa, 1990.
10. Sozański J.: Niezawodność zasilania energią elektryczną. WNT, Warszawa, 1982.

11. Wróblewski Z., Siwak P.: Trwałość eksploatacyjna elektroenergetycznych linii kablowych średnich napięć. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 9, s. 74–76, 2007.

*Przyjęto do druku dnia 14.09.2015 r.*

## COMPARISON OF CHARACTERISTICS AND INDICATORS OF RELIABILITY OF OVERHEAD AND CABLE LOW VOLTAGE CONNECTIONS

Andrzej Łukasz CHOJNACKI

**ABSTRACT** *The paper presents the research results of reliability of overhead and cable LV connections operating in domestic distribution companies. Independent analyzes were performed for overhead connections made of bare wires and insulated ones as well as for the cable connections. Failure statistics of these connections for the 10 years operation period of the network were considered. Causes of the failures and the seasonal variation of the damage frequency were presented. The recovery duration, the duration of electricity supply interruptions and the value of undelivered electricity to customers as a result of the failures were analysed. The empirical models and attempt to identify the theoretical model of probability density of considered parameters were presented as well. Indicators of reliability of connections for power supply were calculated.*

**Keywords:** *distribution network, low-voltage connections, reliability, failure intensity, unreliability indicator*

