

Funkcje niezawodnościowe przyłączy elektroenergetycznych nn

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki oceny podstawowych funkcji określających właściwości niezawodnościowe przyłączy nn, jakimi są funkcja intensywności awarii, funkcja niezawodności oraz funkcja zawodności. Na podstawie wieloletnich obserwacji przyłączy nn eksploatowanych w sieci dużej spółki dystrybucyjnej energii elektrycznej w kraju, określono postacie empiryczne wymienionych funkcji. Przeprowadzono także analizę zgodności rozkładu empirycznego z założonym rozkładem teoretycznym. Wyznaczono wartość oczekiwaną czasu poprawnej pracy przyłączy nn do uszkodzenia. Dodatkowo określono postać funkcyjną skumulowanej intensywności uszkodzeń oraz oczekiwanego pozostałego czasu zdatności.

Abstract. The paper presents the results of the evaluation of basic functions determining reliability characteristics of LV connections, they are a failure intensity function, function reliability and unreliability function. Based on years of follow-up LV connections operated in large electricity distribution company in the country were defined empirical waveforms mentioned features. It was also carried out an analysis of the empirical distribution of compliance with the assumed theoretical distribution. In paper was determined the expected value of lifetime to damage of LV connections. In addition, the cumulative intensity of damage and the expected residual duration are specified. (**Reliability functions of low voltage electrical connections**).

Słowa kluczowe: sieci dystrybucyjne, przyłącza niskiego napięcia, niezawodność, intensywność awarii, funkcje niezawodnościowe
Keywords: distribution network, low-voltage connections, reliability, failure intensity, reliability functions

Wstęp

Problem niezawodności urządzeń elektroenergetycznych jest bardzo ważny ze względu na pewność dostaw energii elektrycznej do znacznej grupy jej odbiorców. W wielu przypadkach przerwy w dostawie energii stwarzają realne zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzkiego, np. w przypadku osób korzystających z profesjonalnej aparatury medycznej podtrzymującej życie. Stałe więc nadzorowanie pracy sieci elektroenergetycznych oraz analiza awarii w nich występujących są konieczne, aby ustalić metody właściwej eksploatacji oraz przedsięwziąć wszelkie środki mające na celu wyeliminowanie niektórych awarii w przyszłości. Konieczne jest zwłaszcza wyeliminowanie tych awarii, które wynikają z zaniedbań służb eksploatacyjnych oraz niewłaściwej organizacji pracy przy urządzeniach elektroenergetycznych [12].

Bardzo ważnym zagadnieniem jest wyznaczenie parametrów oraz funkcji określających właściwości niezawodnościowe poszczególnych elementów sieci. Aby w sposób pełny określić właściwości niezawodnościowe obiektów elektroenergetycznych nienaprawialnych, należy określić ich funkcje $R(t)$, $F(t)$ oraz $\lambda(t)$. W przypadku obiektów podlegających odnowie należy dodatkowo określić rozkład odnowy oraz dane procesu stochastycznego, opisującego jego pracę. Należy zbadać takie właściwości procesu jak stacjonarność, stałość intensywności uszkodzeń i odnowy, itp. W praktyce, ze względu na brak wiarygodnych danych pochodzących z eksploatacji, uzyskanie pełnej i dokładnej informacji niezawodnościowej jest bardzo trudne i pracochłonne, a w wielu przypadkach wręcz niemożliwe. Dlatego też najczęściej, do przybliżonych analiz i obliczeń, wykorzystywane są wartości średnie intensywności uszkodzeń λ_{sr} , średnie czasy trwania odnowy (naprawy) t_a oraz średni współczynnik zawodności q .

W artykule Autorzy wyznaczyli podstawowe funkcje niezawodnościowe elektroenergetycznych przyłączy napowietrznych gołych oraz izolowanych, a także przyłączy kablowych. Ze względu na stosunkowo niewielkie koszty ich zawodności, urządzenia te są często pomijane w prowadzonych analizach niezawodnościowych. Tymczasem ich awaryjność wpływa bezpośrednio na ciągłość dostaw energii do odbiorców ze względu na fakt, iż nie są one zazwyczaj rezerwowane. Jedynie obiekty o wymaganej zwiększonej pewności zasilania posiadają kilka niezależnych przyłączy. Wszystkie analizy, których wyniki zostały zaprezentowane w niniejszym artykule zostały

przeprowadzone na podstawie danych pochodzących z 10 lat obserwacji. Przyjęty poziom istotności $\alpha = 0,05$.

Ogólna charakterystyka elektroenergetycznych przyłączy niskiego napięcia

Przyłączem elektroenergetycznym nazywamy odcinek lub element elektroenergetycznej linii napowietrznej o napięciu do 1 kV ograniczony z jednej strony słupem lub mufą kablową, a z drugiej konstrukcją umieszczoną na zasilanym budynku [13]. Jego zadaniem jest włączenie instalacji elektrycznej danego obiektu do sieci elektroenergetycznej, a co za tym idzie, umożliwienie dostarczenia do odbiorcy energii elektrycznej [10, 14]. Wykonując przyłącze należy brać pod uwagę indywidualne warunki. Głównymi czynnikami determinującymi wybór określonego rodzaju przyłączy są przewidywany pobór mocy, rozwiązanie sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia, czy typ budynku, który zostanie do niej przyłączony. Według ogólnego podziału wyróżnia się przyłącza jedno- i trójfazowe, napowietrzne (stojakowe lub dościenne) i kablowe [7].

O tym, czy przyłącze będzie napowietrzne czy kablowe decyduje głównie sieć rozdzielcza [10]. Przyłącza napowietrzne są stosowane wówczas, gdy zaistnieją następujące warunki: zasilanie odbiorcy będzie następować z sieci napowietrznej oraz nie występują żadne przeciwwskazania w poprowadzeniu przewodów takiego przyłączy [2]. Wśród nich wyróżnić można dwa typy: tzw. gołe i izolowane [10].

Stosowanie przewodów gołych jest najstarszym rozwiązaniem, występującym tylko w liniach napowietrznych. W ciągu ostatnich lat przy wykonywaniu napraw i remontów sieci niskiego napięcia, zwłaszcza na terenach wiejskich, rozpoczęto wymianę przewodów gołych na izolowane przewody samonośne wielożyłowe. Takie rozwiązanie jest korzystniejsze ze względu na znacznie mniejszą możliwość zwarcia doziemnych występujących na skutek wrastających w linie gałęzi drzew oraz zwarcie wynikających ze zbyt małych naciągów przewodów i ich stykania się podczas wietrznej pogody. Dzięki zastosowaniu przewodów izolowanych wyeliminowano także częste awarie izolatorów oraz zmniejszono zagrożenie porażeniowe. Przewody izolowane mają jednak swoje wady. Jedną z nich jest wrażliwość na przepięcia atmosferyczne. Skutkuje to koniecznością stosowania specjalnego połączenia żył przewodu przyłączy z przewodami linii nn lub zastosowaniem odgromników

(ograniczników przepięć) na słupach przyłączowych, które dzięki obniżeniu napięcia udarowego chronią izolację przed uszkodzeniem [7]. Obecnie przy podłączaniu odbiorców do sieci stosuje się tylko przyłącza izolowane, niezależnie od tego, czy przewody zasilającej linii napowietrznej są izolowane czy gołe [10].

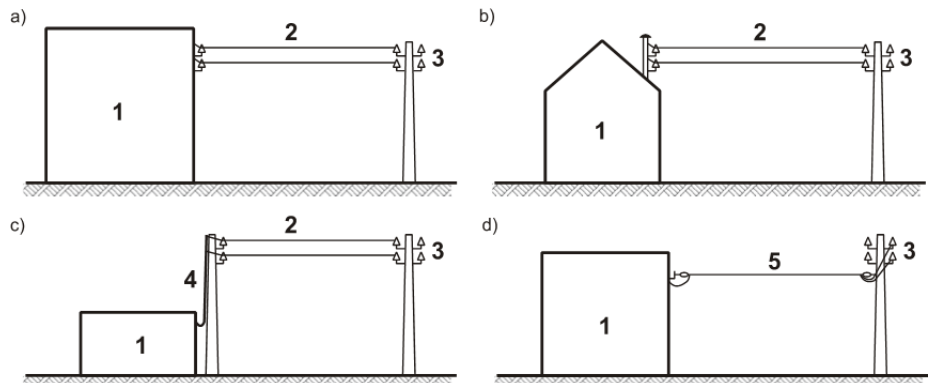
Zgodnie z PN-E-05100-1 [13] w przyłączach napowietrznych w przypadku przewodów gołych, zaleca się ich zawieszanie na izolatorach umieszczonych na wsporniku ściennym lub na stojaku dachowym. Przy stosowaniu drugiego rozwiązania należy pamiętać o specjalnym zamocowaniu stojaka, aby część przewodów znajdujących się ponad budynkiem była możliwie najkrótsza. Prowadzenie przewodów przyłącza ponad kominem jest zabronione. 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 izolowany lub kabel, ewentualnie przeznaczone do tego celu przewody kabelkowe.

Zawieszanie przyłączy izolowanych powinno odbywać się przy użyciu haków, wsporników ściennych lub stojaków dachowych. Minimalna wartość kąta zawartego między przewodami prowadzonymi od słupa linii do budynku, a licem zasilanego obiektu wynosi 20° . W przypadku przyłączy gołych kąt ten nie może być mniejszy niż 30° [13]. Długość przyłączy napowietrznych nie powinna być większa niż 35 m tak, aby napięcie przewodów nie byłoby zbyt duże. Niekiedy istnieje konieczność zastosowania dłuższego przyłącza. Problem ten rozwiązywany jest poprzez ustawienie słupów pośrednich, jak w linii nn [7]. W przypadku przyłącza napowietrzego należy również pamiętać, by długość jego przewodów ułożonych na ścianach zasilanego budynku od miejsca zamocowania do złącza była możliwie najkrótsza i jak najbardziej zbliżona do układu pionowego [5].

Standardowe przyłącza izolowane wykonywane są przewodem oznaczanym symbolem AsXS_n – samonośnym, aluminiowym, którego izolację stanowi polietylen sieciowany niepodtrzymujący palenia lub przewodem o symbolu AsXS – samonośnym, aluminiowym o izolacji z polietylenu sieciowanego uodpornionego na działanie promieni słonecznych. Charakterystyczną cechą przewodów samonośnych (czteroprzewodowych) jest brak linki nośnej. Jednakowe izolowane przewody robocze przenoszą całe obciążenie mechaniczne [3, 11].

Różne rodzaje przyłączy napowietrznych zostały przedstawione na rysunku 1.

W przypadku, gdy nie jest możliwe zastosowanie przyłącza napowietrzego lub jego użycie zmniejszy walory estetyczne danego terenu, podłączenie odbiorcy do sieci wykonuje się poprzez przyłącze kablowe. Realizacja takiego przyłącza nie wymaga zasilania z sieci kablowej. Istnieje możliwość poprowadzenia go z linii napowietrznej. Wówczas w celu uniknięcia uszkodzeń kabla w części nadziemnej stosuje się rurę stalową osłaniającą go, natomiast część kabla umieszczoną w ziemi chroni się za pomocą warstwy cegieł, piasku i ziemi o odpowiednich grubościach.



Rys. 1. Przyłącza napowietrzne niskiego napięcia: a) dościenne, b) ze stojakiem dachowym (sztycą), c) ze słupem przy budynku i podejściem wykonanym przewodem izolowanym lub 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 izolowanym lub kablem, 5 – samonośna linia napowietrzna izolowana)

Wprowadzenie kabla do budynku należy wykonywać z zastosowaniem rury z tworzyw sztucznych, stalowej, kamionkowej lub betonowej w celu zabezpieczenia go przed uszkodzeniem mechanicznym. Rurę tę należy umieścić na całej grubości ściany w taki sposób, aby jej spadek skierowany był ku zewnętrznej stronie budynku. Osłona ta musi posiadać odpowiednie wymiary. Jej wewnętrzna średnica nie może być mniejsza niż 1,5 - krotności zewnętrznej średnicy prowadzonego przez nią kabla.

Podstawowe funkcje niezawodnościowe

Niezawodność urządzenia lub obiektu wyraża jego zdolność do wykonania określonych funkcji w określonym przedziale czasowym oraz w zadanych warunkach [3, 6, 15]. W sensie matematycznym niezawodność jest prawdopodobieństwem warunkowym, że urządzenie będzie pracowało bez uszkodzenia od chwili jego uruchomienia do chwili t , pod warunkiem, że w chwili włączenia ($t = 0$) urządzenie było sprawne [1, 3, 8, 15]:

$$(1) \quad R(0, t) = P\{S(\tau) = S; 0 < \tau \leq t, S(0) = S\}$$

gdzie: $S(\tau)$ – stan obiektu w chwili czasu τ , S – stan zdatności obiektu.

Powyżej przedstawiona funkcja nosi nazwę funkcji niezawodności lub inaczej funkcji życia urządzenia [15].

Biorąc pod uwagę, iż $R(0) = 1$, czyli że urządzenie w chwili uruchomienia było zdadne, można zapisać:

$$(2) \quad R(t) = P\{S(\tau) = S; 0 \leq \tau \leq t\}$$

Funkcja zawodności $F(t)$ określona jest następującym zapisem:

$$(3) \quad F(t) = P\{S(\tau) = \bar{S}; 0 < \tau \leq t\}$$

gdzie: \bar{S} – stan uszkodzenia urządzenia.

Jest to więc prawdopodobieństwo warunkowe uszkodzenia się obiektu do chwili czasu t , pod warunkiem, że urządzenie w chwili uruchomienia było zdadne ($F(0) = 0$). Prawdopodobieństwo to nazywane jest również rozkładem trwałości.

Pochodna funkcji zawodności po czasie jest funkcją gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia:

$$(4) \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

Bardzo ważnym pojęciem jest trwałość obiektu, nazywana także czasem życia obiektu. Ponieważ zmienna losowa t posiada funkcję gęstości prawdopodobieństwa $f(t)$, jej wartość oczekiwana określona jest zależnością:

$$(5) \quad E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Bardzo ważna w teorii niezawodności jest funkcja intensywności uszkodzeń, którą definiuje się jako stosunek prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu w przedziale czasu od t do $t + \Delta t$ do wielkości tego przedziału przy $\Delta t \rightarrow 0$, przy założeniu, iż do chwili t uszkodzenie elementu nie nastąpiło:

$$(6) \quad \lambda(t) = \frac{F'(t)}{1 - F(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

Zatem intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$ charakteryzuje w każdej chwili t względne pogorszenie się niezawodności obiektu przypadające na jednostkę czasu $\Delta t = 1$. Dla porównania gęstość prawdopodobieństwa $f(t)$ wyraża bezwzględne pogorszenie niezawodności obiektu przypadające na jednostkę czasu [9, 15].

Kolejną funkcją charakteryzującą niezawodność obiektu jest skumulowana intensywność uszkodzeń, zwana także funkcją wiodącą [3, 9, 15]:

$$(7) \quad \Lambda(t) = \int_0^t \lambda(u) du$$

Jest ona miarą wyczerpywania się zapasu możliwości wykonania przez obiekt postawionego mu zadania.

Niezawodność obiektu można także scharakteryzować, poprzez określenie funkcji oczekiwanego pozostałego czasu zdatności:

$$(8) \quad r(t) = \int_t^{\infty} \frac{R(s)}{R(t)} ds$$

Ocena funkcji niezawodnościowych napowietrznych przyłączy elektroenergetycznych nn wykonanych przewodami gołymi

Próba statystyczna przyłączy elektroenergetycznych nn jest z punktu widzenia badań niezawodnościowych próbą dynamiczną, czyli obejmuje przyłącza będące w różnych latach eksploatacji. W związku z powyższym oceny funkcji niezawodnościowych dokonano wykorzystując metodę próby losowej dynamicznej [3, 15]. Na podstawie danych z eksploatacji przyłączy napowietrznych wykonanych przewodami gołymi obliczone zostały wartości empiryczne intensywności uszkodzeń $\hat{\lambda}_i$, częstości uszkodzeń f_i^* , funkcji niezawodności R_i^* oraz zawodności (trwałości) F_i^* . Wyniki obliczeń przedstawione zostały w tabeli 1. Empiryczną intensywność uszkodzeń przyłączy napowietrznych wykonanych przewodami gołymi zaprezentowano na rysunku 2.

Wyznaczenie funkcji intensywności awarii, zawodności, czy też niezawodności, nie rozwiązuje problemu estymacji parametrów niezawodnościowych. Ważna jest również analiza zgodności rozkładu empirycznego z wybranym rozkładem teoretycznym. Analizę taką wykonuje się według zasad estymacji nieparametrycznej. W wielu przypadkach oszacowania parametrów nieznannej funkcji można dokonać z wystarczającą dokładnością za pomocą siatek funkcyjnych [9, 15]. Weryfikacja hipotezy o rozkładzie może zostać przeprowadzona za pomocą testu znaków, testu λ Kołmogorowa, testu χ^2 Pearsońa lub testu Walda-Wolfowitza, zwanego także testem serii [9, 15, 16].

Tabela 1. Wyniki obliczeń statystycznych intensywności, częstości uszkodzeń, rozkładu trwałości oraz rozkładu niezawodności dla przyłączy napowietrznych nn wykonanych przewodami gołymi

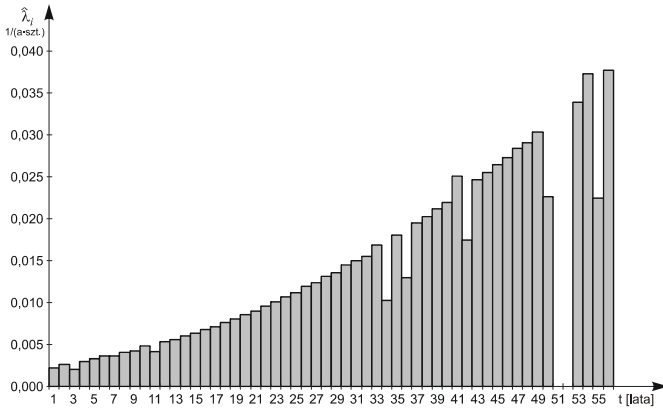
Rok eksploatacji	$\hat{\lambda}_i$	f_i^*	F_i^*	R_i^*
	$\frac{1}{a \cdot szt.}$	---	---	---
1	0,0022	0,0022	0,0022	0,9978
2	0,0026	0,0026	0,0048	0,9952
3	0,0020	0,0020	0,0068	0,9932
4	0,0029	0,0029	0,0097	0,9903
5	0,0033	0,0033	0,0130	0,9870
6	0,0036	0,0036	0,0166	0,9834
7	0,0037	0,0036	0,0202	0,9798
8	0,0041	0,0040	0,0242	0,9758
9	0,0042	0,0041	0,0284	0,9716
10	0,0048	0,0047	0,0331	0,9669
11	0,0042	0,0040	0,0371	0,9629
12	0,0053	0,0051	0,0422	0,9578
13	0,0056	0,0053	0,0475	0,9525
14	0,0060	0,0057	0,0532	0,9468
15	0,0063	0,0060	0,0592	0,9408
16	0,0068	0,0064	0,0656	0,9344
17	0,0072	0,0067	0,0723	0,9277
18	0,0077	0,0071	0,0794	0,9206
19	0,0080	0,0074	0,0867	0,9133
20	0,0085	0,0078	0,0945	0,9055
21	0,0090	0,0081	0,1027	0,8973
22	0,0096	0,0086	0,1113	0,8887
23	0,0100	0,0089	0,1202	0,8798
24	0,0106	0,0094	0,1295	0,8705
25	0,0112	0,0097	0,1393	0,8607
26	0,0119	0,0103	0,1495	0,8505
27	0,0123	0,0105	0,1600	0,8400
28	0,0131	0,0110	0,1710	0,8290
29	0,0136	0,0113	0,1823	0,8177
30	0,0145	0,0118	0,1942	0,8058
31	0,0150	0,0121	0,2063	0,7937
32	0,0155	0,0123	0,2186	0,7814
33	0,0169	0,0132	0,2318	0,7682
34	0,0102	0,0079	0,2396	0,7604
35	0,0180	0,0137	0,2533	0,7467
36	0,0130	0,0097	0,2630	0,7370
37	0,0195	0,0144	0,2774	0,7226
38	0,0203	0,0147	0,2921	0,7079
39	0,0212	0,0150	0,3070	0,6930
40	0,0220	0,0152	0,3223	0,6777
41	0,0251	0,0170	0,3393	0,6607
42	0,0175	0,0115	0,3508	0,6492
43	0,0246	0,0160	0,3668	0,6332
44	0,0255	0,0161	0,3829	0,6171
45	0,0265	0,0163	0,3993	0,6007
46	0,0273	0,0164	0,4157	0,5843
47	0,0284	0,0166	0,4323	0,5677
48	0,0291	0,0165	0,4488	0,5512
49	0,0303	0,0167	0,4655	0,5345
50	0,0226	0,0121	0,4776	0,5224
51	0,0000	0,0000	0,4776	0,5224
52	0,0000	0,0000	0,4776	0,5224
53	0,0452	0,0236	0,5012	0,4988
54	0,0000	0,0000	0,5012	0,4988
55	0,0000	0,0000	0,5012	0,4988
56	0,0377	0,0188	0,5200	0,4800

Autorzy dokonali analizy zgodności typu rozkładu empirycznego z wybranymi rozkładami teoretycznymi intensywności awarii. Na podstawie szczegółowej analizy otrzymanych wyników przyjęto, iż funkcja intensywności awarii przyłączy napowietrznych nn wykonanych

przewodami gołymi podlega rozkładowi Weibulla. Funkcja intensywności awarii dla tego rozkładu opisana jest zależnością [3, 15]:

$$(9) \quad \lambda(t) = \frac{\nu}{b} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{\nu-1}$$

gdzie: ν – parametr kształtu rozkładu Weibulla, b – parametr skali rozkładu Weibulla.



Rys. 2. Empiryczna intensywność uszkodzeń napowietrznych przyłączy nn wykonanych przewodami gołymi

Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica oraz Excela wartości parametrów rozkładu (9) wynoszą: $\nu = 2,4$ oraz $b = 60,4$.

Po podstawieniu wyznaczonych wartości do zależności (9) teoretyczna funkcja intensywności awarii przyjmuje postać:

$$(10) \quad \lambda(t) = 127,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1,4}$$

Teoretyczną funkcję intensywności awarii przyłączy napowietrznych wykonanych przewodami gołymi przedstawia rysunek 5.

Weryfikacja hipotezy o rozkładzie została przeprowadzona za pomocą testu znaków. W wyniku jego zastosowania otrzymano: $l_0 = \min(L^+, L) = \min(28, 28) = 28$; $l_0 = 28 > 21 = l_\alpha$. Tak więc, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, nie ma podstaw do odrzucenia postawionej hipotezy o postaci funkcyjnej intensywności awarii.

Wykorzystując zależności między funkcją $\lambda(t)$, a funkcjami $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$ i $r(t)$, można wyznaczyć postać teoretyczną tych funkcji dla przyłączy napowietrznych wykonanych przewodami gołymi:

➤ Funkcja niezawodności:

$$(11) \quad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{60,4}\right)^{2,4}}$$

➤ Funkcja zawodności:

$$(12) \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{60,4}\right)^{2,4}}$$

➤ Funkcja gęstości prawdopodobieństwa:

$$(13) \quad f(t) = 127,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1,4} \cdot e^{-53,2 \cdot 10^{-6} \cdot t^{2,4}}$$

➤ Skumulowana intensywność awarii:

$$(14) \quad \Lambda(t) = 53,2 \cdot 10^{-6} \cdot t^{2,4}$$

➤ Oczekiwany pozostały czas zdatości:

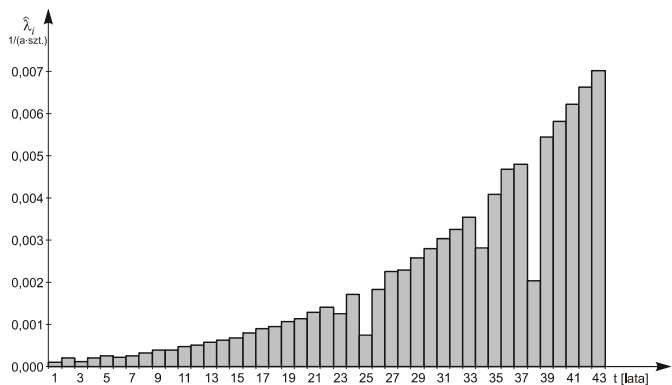
$$(15) \quad r(t) = \int_t^\infty e^{-\left(\frac{t}{60,4}\right)^{2,4}} - \left(\frac{s}{60,4}\right)^{2,4} ds$$

Teoretyczne funkcje $R(t)$ oraz $F(t)$ dla przyłączy napowietrznych wykonanych przewodami gołymi przedstawia rysunek 6.

Na podstawie zależności (5) wyznaczona została wartość oczekiwana czasu poprawnej pracy przyłączy napowietrznych nn wykonanych przewodami gołymi. Wartość ta wynosi 53,5 a.

Ocena funkcji niezawodnościowych napowietrznych izolowanych przyłączy elektroenergetycznych nn

Na podstawie danych z eksploatacji przyłączy napowietrznych izolowanych obliczone zostały wartości empiryczne intensywności uszkodzeń $\hat{\lambda}_i$, częstości uszkodzeń f_i^* , funkcji niezawodności R_i^* oraz zawodności (trwałości) F_i^* . Wyniki obliczeń przedstawione zostały w tabeli 2. Empiryczną intensywność uszkodzeń przyłączy napowietrznych wykonanych przewodami izolowanymi zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Empiryczna intensywność uszkodzeń napowietrznych izolowanych przyłączy nn

Przeprowadzona została analiza zgodności rozkładu empirycznego z wybranym rozkładem teoretycznym intensywności awarii. Na podstawie szczegółowej analizy otrzymanych wyników przyjęto, iż funkcja intensywności awarii przyłączy napowietrznych izolowanych nn podlega rozkładowi Weibulla i wyraża się zależnością (9). Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica oraz Excela wartości parametrów rozkładu (9) wynoszą dla przyłączy napowietrznych izolowanych: $\nu = 3,3$ oraz $b = 89,0$.

Po podstawieniu wyznaczonych wartości do zależności (9) teoretyczna funkcja intensywności awarii przyjmuje postać:

$$(16) \quad \lambda(t) = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot t^{2,3}$$

Teoretyczną funkcję intensywności awarii przyłączy napowietrznych izolowanych przedstawia rysunek 5.

Weryfikacja hipotezy o rozkładzie została przeprowadzona za pomocą testu znaków. W wyniku jego zastosowania otrzymano: $l_0 = \min(L^+, L) = \min(21, 22) = 21$; $l_0 = 21 > 15 = l_\alpha$. Tak więc, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, nie ma podstaw do odrzucenia postawionej hipotezy o postaci funkcyjnej intensywności awarii.

Wykorzystując zależności między funkcją $\lambda(t)$, a funkcjami $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$ i $r(t)$, można wyznaczyć postać teoretyczną tych funkcji dla przyłączy napowietrznych wykonanych przewodami izolowanymi:

Tabela 2. Wyniki obliczeń statystycznych intensywności, częstości uszkodzeń, rozkładu trwałości oraz rozkładu niezawodności dla izolowanych przyłączy napowietrznych nn

Rok eksploatacji	$\hat{\lambda}_i$	f_i^*	F_i^*	R_i^*
	$\frac{1}{a \cdot szt.}$	---	---	---
1	0,0001	0,0001	0,0001	0,9999
2	0,0002	0,0002	0,0003	0,9997
3	0,0001	0,0001	0,0004	0,9996
4	0,0002	0,0002	0,0006	0,9994
5	0,0003	0,0003	0,0009	0,9991
6	0,0002	0,0002	0,0011	0,9989
7	0,0003	0,0003	0,0014	0,9986
8	0,0003	0,0003	0,0017	0,9983
9	0,0004	0,0004	0,0021	0,9979
10	0,0004	0,0004	0,0024	0,9976
11	0,0005	0,0005	0,0029	0,9971
12	0,0005	0,0005	0,0034	0,9966
13	0,0006	0,0006	0,0040	0,9960
14	0,0006	0,0006	0,0046	0,9954
15	0,0007	0,0007	0,0053	0,9947
16	0,0008	0,0008	0,0061	0,9939
17	0,0009	0,0009	0,0070	0,9930
18	0,0009	0,0009	0,0079	0,9921
19	0,0011	0,0011	0,0090	0,9910
20	0,0011	0,0011	0,0101	0,9899
21	0,0013	0,0013	0,0113	0,9887
22	0,0014	0,0014	0,0127	0,9873
23	0,0013	0,0012	0,0140	0,9860
24	0,0017	0,0017	0,0156	0,9844
25	0,0007	0,0007	0,0164	0,9836
26	0,0018	0,0018	0,0182	0,9818
27	0,0023	0,0022	0,0204	0,9796
28	0,0023	0,0022	0,0226	0,9774
29	0,0026	0,0025	0,0252	0,9748
30	0,0028	0,0027	0,0279	0,9721
31	0,0030	0,0029	0,0308	0,9692
32	0,0033	0,0032	0,0340	0,9660
33	0,0035	0,0034	0,0374	0,9626
34	0,0028	0,0027	0,0401	0,9599
35	0,0041	0,0039	0,0440	0,9560
36	0,0047	0,0045	0,0485	0,9515
37	0,0048	0,0046	0,0530	0,9470
38	0,0020	0,0019	0,0550	0,9450
39	0,0054	0,0051	0,0601	0,9399
40	0,0058	0,0055	0,0655	0,9345
41	0,0062	0,0058	0,0714	0,9286
42	0,0066	0,0061	0,0775	0,9225
43	0,0070	0,0065	0,0840	0,9160

➤ Funkcja niezawodności:

$$(17) \quad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{89,0}\right)^{3,3}}$$

➤ Funkcja zawodności:

$$(18) \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{89,0}\right)^{3,3}}$$

➤ Funkcja gęstości prawdopodobieństwa:

$$(19) \quad f(t) = 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot t^{2,3} \cdot e^{-0,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^{3,3}}$$

➤ Skumulowana intensywność awarii:

$$(20) \quad \Lambda(t) = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^{3,3}$$

Oczekiwany pozostały czas zdadności:

$$(21) \quad r(t) = \int_t^{\infty} e^{-\left(\frac{t}{89,0}\right)^{3,3}} - \left(\frac{s}{89,0}\right)^{3,3} ds$$

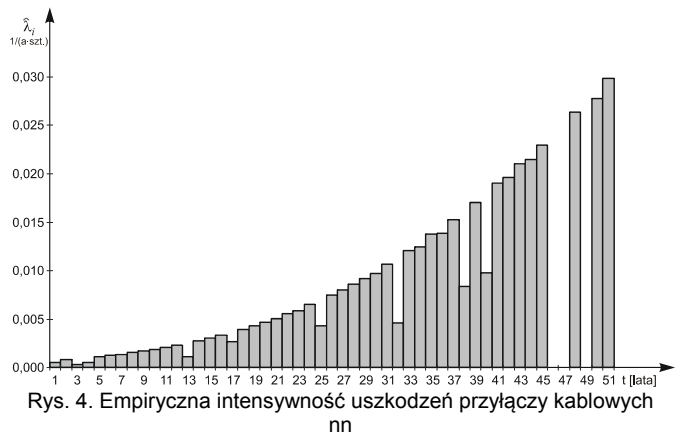
Teoretyczne funkcje $R(t)$ oraz $F(t)$ dla przyłączy napowietrznych izolowanych przedstawia rysunek 6.

Na podstawie zależności (5) wyznaczona została wartość oczekiwana czasu poprawnej pracy przyłączy napowietrznych izolowanych nn. Wartość ta wynosi 79,9 a.

Ocena funkcji niezawodnościowych kablowych przyłączy elektroenergetycznych nn

Na podstawie danych z eksploatacji przyłączy kablowych obliczone zostały wartości empiryczne intensywności uszkodzeń $\hat{\lambda}_i$, częstości uszkodzeń f_i^* , funkcji niezawodności R_i^* oraz zawodności (trwałości) F_i^* . Wyniki obliczeń przedstawione zostały w tabeli 3. Empiryczną intensywność uszkodzeń przyłączy kablowych zaprezentowano na rysunku 4.

Przeprowadzona została analiza zgodności typu rozkładu empirycznego z wybranym rozkładem teoretycznym intensywności awarii. Na podstawie szczegółowej analizy otrzymanych wyników przyjęto, iż funkcja intensywności awarii przyłączy kablowych nn podlega rozkładowi Weibulla i wyraża się zależnością (9). Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica oraz Excela wartości parametrów rozkładu (9) wynoszą dla przyłączy kablowych: $\nu = 2,9$ oraz $b = 64,8$.



Rys. 4. Empiryczna intensywność uszkodzeń przyłączy kablowych nn

Po podstawieniu wyznaczonych wartości do zależności (9) teoretyczna funkcja intensywności awarii przyjmuje postać:

$$(22) \quad \lambda(t) = 15,0 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1,9}$$

Teoretyczną funkcję intensywności awarii przyłączy kablowych przedstawia rysunek 5.

Weryfikacja hipotezy o rozkładzie została przeprowadzona za pomocą testu znaków. W wyniku jego zastosowania otrzymano: $l_0 = \min(I^+, I) = \min(26, 26) = 26$; $l_0 = 26 > 19 = l_{\alpha}$. Tak więc, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, nie ma podstaw do odrzucenia postawionej hipotezy o postaci funkcyjnej intensywności awarii.

Wykorzystując zależności między funkcją $\lambda(t)$, a funkcjami $R(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$ i $r(t)$, można wyznaczyć postać teoretyczną tych funkcji dla przyłączy kablowych:

➤ Funkcja niezawodności:

$$(23) \quad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{64,8}\right)^{2,9}}$$

Tabela 3. Wyniki obliczeń statystycznych intensywności, częstości uszkodzeń, rozkładu trwałości oraz rozkładu niezawodności dla przyłączy kablowych nn

Rok eksploatacji	$\hat{\lambda}_i$	f_i^*	F_i^*	R_i^*
	$\frac{1}{a \cdot szl.}$	---	---	---
1	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
3	0,0003	0,0003	0,0003	0,9997
4	0,0005	0,0005	0,0009	0,9991
5	0,0011	0,0011	0,0020	0,9980
6	0,0013	0,0013	0,0032	0,9968
7	0,0014	0,0014	0,0046	0,9954
8	0,0016	0,0016	0,0062	0,9938
9	0,0017	0,0017	0,0079	0,9921
10	0,0019	0,0019	0,0097	0,9903
11	0,0021	0,0021	0,0118	0,9882
12	0,0023	0,0023	0,0141	0,9859
13	0,0011	0,0011	0,0152	0,9848
14	0,0028	0,0028	0,0180	0,9820
15	0,0030	0,0030	0,0209	0,9791
16	0,0034	0,0033	0,0242	0,9758
17	0,0027	0,0026	0,0268	0,9732
18	0,0040	0,0039	0,0307	0,9693
19	0,0043	0,0042	0,0349	0,9651
20	0,0047	0,0046	0,0394	0,9606
21	0,0051	0,0049	0,0443	0,9557
22	0,0055	0,0053	0,0496	0,9504
23	0,0059	0,0056	0,0552	0,9448
24	0,0077	0,0072	0,0625	0,9375
25	0,0043	0,0041	0,0665	0,9335
26	0,0084	0,0078	0,0743	0,9257
27	0,0080	0,0074	0,0817	0,9183
28	0,0086	0,0079	0,0896	0,9104
29	0,0092	0,0084	0,0980	0,9020
30	0,0116	0,0105	0,1085	0,8915
31	0,0107	0,0096	0,1180	0,8820
32	0,0046	0,0041	0,1221	0,8779
33	0,0121	0,0106	0,1328	0,8672
34	0,0124	0,0108	0,1435	0,8565
35	0,0138	0,0118	0,1553	0,8447
36	0,0138	0,0117	0,1670	0,8330
37	0,0153	0,0127	0,1797	0,8203
38	0,0084	0,0069	0,1866	0,8134
39	0,0170	0,0138	0,2005	0,7995
40	0,0098	0,0078	0,2083	0,7917
41	0,0190	0,0151	0,2234	0,7766
42	0,0196	0,0152	0,2386	0,7614
43	0,0211	0,0160	0,2546	0,7454
44	0,0215	0,0160	0,2707	0,7293
45	0,0230	0,0168	0,2874	0,7126
46	0,0000	0,0000	0,2874	0,7126
47	0,0000	0,0000	0,2874	0,7126
48	0,0263	0,0188	0,3062	0,6938
49	0,0000	0,0000	0,3062	0,6938
50	0,0278	0,0193	0,3255	0,6745
51	0,0298	0,0201	0,3456	0,6544
52	0,0000	0,0000	0,3456	0,6544

➤ Funkcja zawodności:

$$(24) \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{64,8}\right)^{2,9}}$$

➤ Funkcja gęstości prawdopodobieństwa:

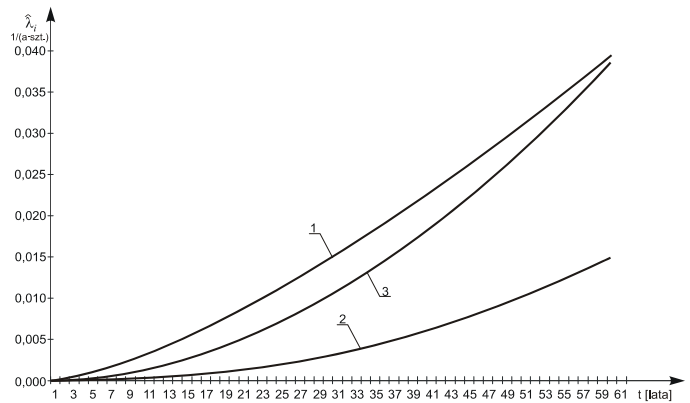
$$(25) \quad f(t) = 16,2 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1,9} \cdot e^{-5,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^{2,9}}$$

➤ Skumulowana intensywność awarii:

$$(26) \quad \Lambda(t) = 5,1 \cdot 10^{-6} \cdot t^{2,9}$$

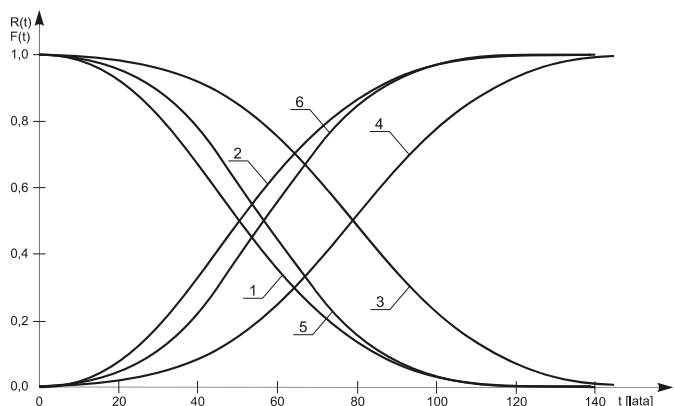
➤ Oczekiwany pozostały czas zdadności:

$$(27) \quad r(t) = \int_t^{\infty} e^{-\left(\frac{t}{64,8}\right)^{2,9} - \left(\frac{s}{64,8}\right)^{2,9}} ds$$



Rys. 5. Teoretyczne funkcje intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ przyłączy niskiego napięcia: 1 – przyłącza napowietrzne, 2 – przyłącza napowietrzne izolowane, 3 – przyłącza kablowe

Teoretyczne funkcje $R(t)$ oraz $F(t)$ dla przyłączy kablowych przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Teoretyczne funkcje niezawodności $R(t)$ i zawodności $F(t)$ przyłączy niskiego napięcia: 1 – funkcja niezawodności przyłączy napowietrznych gołych, 2 – funkcja zawodności przyłączy napowietrznych gołych, 3 – funkcja niezawodności przyłączy napowietrznych izolowanych, 4 – funkcja zawodności przyłączy napowietrznych izolowanych, 5 – funkcja niezawodności przyłączy kablowych, 6 – funkcja zawodności przyłączy kablowych

Na podstawie zależności (5) wyznaczona została wartość oczekiwana czasu poprawnej pracy przyłączy kablowych nn. Wartość ta wynosi 57,8 a.

Podsumowanie

Przyłącza elektroenergetyczne nn są końcowym elementem sieci dystrybucyjnych. Ich awaryjność wpływa bezpośrednio na ciągłość dostaw energii do odbiorców ze względu na fakt, iż nie są one zazwyczaj rezerwowane. Ważne jest więc stałe nadzorowanie ich pracy. Znajomość podstawowych funkcji niezawodnościowych pozwala ustalić okres pracy przyłącza, w którym z dużym prawdopodobieństwem będzie ono działało poprawnie, a więc nie będzie powodowało przerw w zasilaniu odbiorców.

W artykule przedstawiono wyniki analizy dotyczącej funkcji niezawodnościowych przyłączy elektroenergetycznych nn napowietrznych gołych, napowietrznych izolowanych oraz kablowych. Przyłącza napowietrzne występują zazwyczaj w sieciach napowietrznych, a więc są charakterystyczne przede wszystkim dla sieci terenowych. Przyłącza kablowe realizowane są głównie w sieciach kablowych nn, ale także coraz częściej jako zejście z konstrukcji wsporczej sieci napowietrznej.

Autorzy wyznaczyli i zaprezentowali w artykule empiryczne funkcje intensywności, funkcje niezawodności oraz funkcje zawodności przyłączy. Funkcje intensywności dla wszystkich rodzajów przyłączy nn wykazują stały wzrost intensywności w kolejnych latach eksploatacji.

W referacie określono także przebiegi teoretyczne funkcji niezawodnościowych. Rozkład teoretyczny intensywności awarii jest dla wszystkich rodzajów przyłączy nn rozkładem Weibulla o współczynniku kształtu $\nu > 1$. Podobne analizy były już wykonywane w przeszłości. Ich wyniki zaprezentowano w [4]. Zaprezentowane wówczas teoretyczne funkcje intensywności awarii przyłączy były rozkładami normalnymi. Analiza, której wyniki zaprezentowano w niniejszej publikacji, wykazała jednak, iż znacznie lepsze dopasowanie rozkładu teoretycznego do danych empirycznych występuje w przypadku rozkładu Weibulla.

Wyznaczone funkcje mogą zostać wykorzystane w wielu analizach technicznych oraz ekonomiczno-gospodarczych, w tym między innymi do oceny ekonomicznie opłacalnego okresu eksploatacji przyłączy.

Wyznaczony został także oczekiwany czas poprawnej pracy przyłączy niskiego napięcia. Jego wartość wynosi 53,5 a dla przyłączy napowietrznych gołych, 79,9 a dla przyłączy napowietrznych izolowanych oraz 57,8 a dla przyłączy kablowych.

Autorzy: mgr inż. Agnieszka Kamila Gad, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Zakład Podstaw Energetyki, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: agnieszka-gad@o2.pl, dr hab. inż. Andrzej Ł. Chojnacki, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Zakład Podstaw Energetyki, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail: a.chojnacki@tu.kielce.pl

LITERATURA

- [1] Barra J. R.: Matematyczne podstawy niezawodności. PWN, Warszawa 1982
- [2] Bartodziej G., Kałuża E.: Aparaty i urządzenia elektryczne, WSiP, wyd. VI, Warszawa 1984
- [3] Chojnacki A. Ł.: Analiza niezawodności eksploatacyjnej elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2013
- [4] Chojnacki A. Ł.: Reliability functions of low voltage electrical terminals made from bare wires, insulated and cables. Przegląd elektrotechniczny Nr 2/2016, s. 115 – 120
- [5] http://sicame.pl/docs/Katalog_przylaczy_light2.pdf – Album projektowy przyłączy napowietrznych i kablowych niskiego napięcia wykonanych przewodami izolowanymi (AsXSn) oraz kablami (YKY, YKXS, YAKY, YAKXS) pod Patronatem Technicznym Stowarzyszenia SEP, Bielsko – Biala, 2014
- [6] Kowalski Z.: Niezawodność zasilania odbiorców energii elektrycznej. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1992
- [7] Krakowiak - Wiśniowska I.: Instalacje elektryczne na terenach wiejskich, Izba Rzecznawców Stowarzyszenia Elektryków Polskich, Warszawa 2006
- [8] Maksymiuk J.: Niezawodność maszyn i urządzeń elektrycznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
- [9] Migdalski J. red.: Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne. Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa 1982
- [10] Musiał E.: Instalacje i urządzenia elektroenergetyczne, WSiP, Warszawa 1998
- [11] N SEP-E-003 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami pełnoizolowanymi oraz z przewodami niepełnoizolowanymi
- [12] Paol M.: Analiza poziomu niezawodności zasilania odbiorców w elektroenergetycznych sieciach dystrybucyjnych, Przegląd elektrotechniczny Nr 3/2017, s. 1 – 6
- [13] PN-E-05100-1 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami gołymi
- [14] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci
- [15] Sozański J.: Niezawodność zasilania energią elektryczną. WNT, Warszawa 1982
- [16] Wróblewski Z., Siwak P.: Analiza trwałości eksploatacyjnej transformatorów o mocach od 25 kVA do 100 MVA. Energetyka Nr 11/ 2008, s. 770-774