



Ocena funkcji niezawodności linii kablowych 15 kV

Streszczenie. W referacie przedstawiono metodę oceny funkcji niezawodności elektroenergetycznych linii kablowych. Na podstawie zebranych danych empirycznych o niezawodności linii kablowych 15 kV wykonanych w izolacji polietylenowej, dokonano oceny rozkładu funkcji zawodności badanych linii kablowych. Wyznaczono również funkcję niezawodności i intensywności awarii linii w zależności od czasu eksploatacji.

Abstract. (Evaluation of reliability function for 15 kV cable lines) A method of reliability function evaluation for 15 kV power cable lines has been presented in the paper. The evaluation of unreliability function distribution for the 15 kV cable lines in polyethylene insulation has been performed on the base of empirical data on reliability collected for the examined lines. Both reliability function and failure intensity has been determined dependently on the exploitation time

Słowa kluczowe: niezawodność, ocena funkcji niezawodności, linie kablowe 15 kV, niezawodność linii kablowych.

Keywords: reliability, evaluation of reliability function, 15 kV cable lines, reliability of cable lines.

Wstęp

Ocena niezawodności elektroenergetycznych linii kablowych, w funkcji czasu eksploatacji, napotyka się następujące problemy [1,2,3,4]:

- Linii elektroenergetycznych nie można w sposób jednoznaczny podzielić na jednostkowe odcinki. Nie jest więc możliwe wyznaczenie liczby zainstalowanych elementów i przypisanie awarii do określonego z nich, jak to ma miejsce z elementami systemu elektroenergetycznego takimi jak transformator, wyłącznik, przełącznik itp.,
- Nie jest możliwe równoczesne wprowadzenie do eksploatacji dostatecznie dużej populacji linii i śledzenie ich zawodności, przez odpowiednio długi czas, w celu wyciągnięcia wiarygodnych wniosków statystycznych,
- Własności niezawodnościowe obiektów naprawialnych, jakimi są linie kablowe, charakteryzuje się rozkładami czasu do pierwszego uszkodzenia oraz czasu pomiędzy uszkodzeniami. Ponieważ linii nie można w sposób jednoznaczny podzielić na odcinki jednostkowe, do których można przypisać awarię, nie jest możliwe wyznaczenie takich rozkładów.
- Odnowa linii kablowej polega przeważnie na wymianie krótkiego odcinka kabla lub osprzętu na nim zainstalowanego. Zmienia się w ten sposób stan niezawodnościowy linii, ze stanu awarii do stanu gotowości do pracy, natomiast nie zmieniają się własności niezawodnościowe linii.
- Czas odnowy linii jest mały w porównaniu z czasem jej eksploatacji i dlatego przy analizie niezawodności można go pominąć przyjmując, że odnowa jest natychmiastowa.

Przedstawione problemy sprawiają że niezawodności linii kablowych nie można określić za pomocą parametrów charakteryzujących obiekty naprawialne.

W związku z faktem, że jednostkowa odnowa nie zmienia własności niezawodnościowych linii kablowych, można pominąć jej wpływ na proces starzenia i określić własności niezawodnościowe linii za pomocą funkcji niezawodności $R(t)$ [1,4,5,6]. Z tego punktu widzenia elektroenergetyczne linie kablowe podobne są do układów przesyłowych innych systemów energetycznych jak: ciepłowniczy, gazowy lub naftowy [1].

Metoda oceny funkcji niezawodności linii elektroenergetycznych

Metodę oceny funkcji niezawodności energetycznych układów przesyłowych, przedstawiono w [1,3,4]. Podstawowe założenia metody są następujące:

- Proces odnowy linii kablowej nie zmienia jej własności niezawodnościowych,
- Czas trwania odnowy jest mały i przy analizie niezawodności linii pomija się go, przyjmując, że odnowa jest natychmiastowa. Przy tym założeniu linia kablowa jest obiektem z zerowym czasem odnowy,
- Własności niezawodnościowe linii określane są przez funkcję niezawodności $R(t)$, charakteryzującą starzenie obiektu w czasie eksploatacji, oraz funkcje pochodne jak intensywność awarii $\lambda(t)$, funkcję zawodności $F(t)$ lub funkcję wiodącą (skumulowaną intensywność uszkodzeń) $A(t)$,
- Ocena funkcji niezawodności odbywa się poprzez analizę statystyczną populacji linii elektroenergetycznych znajdujących się w różnych latach eksploatacji.

Próba statystyczna, którą poddaje się badaniu, obejmuje linie o różnych okresach eksploatacji. W określonym roku badań j , ($j=1,2,3, \dots, n$), długość linii można przedstawić w postaci sumy długości odcinków linii znajdujących się w poszczególnych latach eksploatacji i ($i=1,2,3, \dots, k$).

$$(1) \quad l_j = l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_k$$

gdzie: l_j – sumaryczna długość linii w j -tym roku, $l_1, l_2, l_3, \dots, l_k$ – długość linii kablowych będących w $i = 1,2,3, \dots, k$ latach eksploatacji.

Liczba awarii linii, która wystąpi w roku j , składa się z sumy awarii linii o różnych okresach eksploatacji

$$(2) \quad m_j = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_k$$

gdzie: m_j – sumaryczna liczba awarii linii w j -tym roku badań, $m_1, m_2, m_3, \dots, m_k$ – liczby awarii linii znajdujących się w $i=1,2,3, \dots, k$ latach eksploatacji.

Gdy badania prowadzi się przez $j = 1, 2, 3, \dots, n$ lat to można określić zarówno sumaryczne długości linii l_i , będących w różnych okresach eksploatacji, jak również sumaryczne liczby awarii m_i , związane z tymi liniami jako:

$$(3) \quad l_i = l_{i1} + l_{i2} + l_{i3} + \dots + l_{ij}$$

$$(4) \quad m_i = m_{i1} + m_{i2} + m_{i3} + \dots + m_{ij}$$

przy czym: $i = 1, 2, 3, \dots, k$ – kolejne lata eksploatacji, $j = 1, 2, 3, \dots, n$ – kolejne lata prowadzenia badań.

Ponieważ proces odnowy nie powoduje zmiany długości linii elektroenergetycznej, estymator średniej intensywności uszkodzeń, linii znajdujących się w i -tym roku eksploatacji, jest równy [1,4]:

$$(5) \quad \lambda_i^* = \frac{2m_i}{l_i + l_{i+1}}$$

gdzie: $(l_i + l_{i+1})/2$ – jest zastępczą długością linii znajdujących się w i -tym roku eksploatacji, przy założeniu liniowych zmian długości linii w latach $i, i+1$ wynikających zarówno z wprowadzania nowych odcinków linii do eksploatacji jak również wymiany starych.

Metoda oceny nieznannej funkcji niezawodności linii elektroenergetycznych oparta jest na wykorzystaniu funkcji wiodącej $\Lambda(t)$ [1,2,4,5,8], określającej skumulowaną intensywność awarii.

$$(6) \quad \Lambda(t) = \int_0^t \lambda(\tau) d\tau$$

Estymatorem funkcji $\Lambda(t)$, dla i -tego roku eksploatacji linii, jest:

$$(7) \quad \Lambda_i^* = \sum_{i=1}^k \lambda_i^* \Delta t_i$$

a na podstawie związków pomiędzy $\Lambda(t)$ i $F(t)$ estymator funkcji zawodności $F(t)$, dla i -tego roku eksploatacji, określony jest zależnością [5]:

$$(8) \quad F_i^* = 1 - \exp(-\Lambda_i^*) = 1 - \exp\left(-\sum_{i=1}^k \lambda_i^* \Delta t_i\right)$$

Wyznaczone, za pomocą wzoru (8), wartości dyskretne F_i^* są empirycznymi realizacjami ciągłej funkcji zawodności $F(t)$, dla poszczególnych lat eksploatacji i .

Oszacowanie parametrów nieznannej funkcji $F(t)$ dokonuje się z dostateczną dokładnością, za pomocą siatek funkcyjnych [5,7].

Ponieważ nie jest znana liczba elementów mogących ulec awarii, weryfikacji hipotezy o rozkładzie nie można przeprowadzić za pomocą zazwyczaj stosowanych testów nieparametrycznych χ^2 Pearsona lub λ Kołmogorowa. Weryfikację taką można przeprowadzić za pomocą testów znaków lub testu Walda-Wolfowitza, zwanego inaczej testem serii [5,7].

Ocena funkcji niezawodności linii kablowych 15 kV

Wyniki badań zawodności linii kablowych 15 kV wykonanych w izolacji z polietylenu opracowane zostały na podstawie pięcioletniej analizy populacji linii znajdujących się w przedziale $i = 1 \div 26$ lat eksploatacji. Z próby statystycznej wyeliminowano uszkodzenia mechaniczne powstałe na skutek prowadzonych prac ziemnych. Liczebność próby, przyjętej do analizy, wynosiła 227 elementów.

W celu dobrania właściwej skali przebiegu dystrybuanty funkcji niezawodności $F(t)$ długości kabli podano w $1/100m \cdot a$. Za pomocą siatek funkcyjnych określono rozkład empirycznej dystrybuanty funkcji niezawodności linii. Otrzymano rozkład Weibulla, którego estymatory parametrów wynoszą: $b^* = 6,45$; $v^* = 1,28$.

Wartości empiryczne wyników badań potrzebne do obliczenia dystrybuanty funkcji niezawodności F_i^* przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań zawodności linii kablowych 15 kV wykonanych w izolacji z polietylenu

Rok	j=1		j=2		j=3		j=4		j=5		Razem	
i	l_i	m_i	l_i	m_i	l_i	m_i	l_i	m_i	l_i	m_i	Σl_i	Σm_i
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1,185	10	-	-	-	-	-	-	-	-	1,185	10
7	1,025	1	1,185	14	-	-	-	-	-	-	2,210	15
8	0,733	8	1,025	0	1,185	1	-	-	-	-	2,943	9
9	1,127	0	0,733	1	1,025	1	1,185	4	-	-	4,070	6
10	0,419	3	1,127	3	0,733	2	1,025	3	1,185	1	4,489	12
11	2,554	1	0,419	6	1,127	1	0,733	1	1,025	0	5,848	9
12	2,105	12	2,554	7	0,419	4	1,127	0	0,733	1	6,938	24
13	3,761	14	2,105	13	2,554	1	0,419	2	1,127	4	9,966	34
14	0,334	1	3,761	9	2,105	9	2,554	1	0,419	0	9,173	20
15	1,032	2	0,334	6	3,761	4	2,105	3	2,554	0	9,786	15
16	0,457	9	1,032	0	0,334	1	3,161	6	2,105	0	7,089	16
17	2,455	5	0,457	8	1,032	1	0,334	1	3,161	6	7,439	21
18	2,404	0	2,455	1	0,457	0	1,032	2	0,334	2	6,682	5
19	1,505	0	2,404	0	2,455	0	0,457	3	1,032	1	7,853	4
20	1,674	2	1,505	0	2,404	0	2,335	1	0,457	0	8,375	1
21	1,545	0	1,674	6	1,505	0	1,524	6	2,335	2	8,583	14
22	0,737	0	1,545	0	1,674	0	1,050	3	1,524	1	6,530	4
23			0,737	0	0,532	0	1,224	0	1,050	1	3,543	1
24					0,737	1	0	0	1,224	10	1,961	11
25							0,737	0	0	0	0,737	0
26									0,737	0	0,737	0

Tabela 2. Funkcja niezawodności F_i^* i intensywności awarii λ_i^* , linii kablowych 15 kV wykonanych w izolacji z polietylenu 15 kV

i	Σm_i	Σl_i	λ_i^*	Λ_i^*	F_i^*	F(t)	Znak testu	$\lambda(t)$	R(t)
1	-	-	-	-	-	0,088		0,188	0,912
2	-	-	-	-	-	0,200		0,143	0,800
3	-	-	-	-	-	0,313		0,160	0,687
4	-	-	-	-	-	0,419		0,174	0,581
5	-	-	-	-	-	0,514		0,185	0,486
6	10	11,85	0,589	0,589	0,445	0,598	-	0,194	0,402
7	15	22,10	0,583	1,172	0,690	0,671	+	0,203	0,329
8	9	29,43	0,257	1,429	0,760	0,732	+	0,211	0,268
9	6	40,70	0,140	1,569	0,792	0,784	+	0,218	0,216
10	12	44,89	0,232	1,801	0,835	0,827	+	0,224	0,173
11	9	58,48	0,141	1,942	0,857	0,861	-	0,230	0,139
12	24	69,38	0,284	2,226	0,892	0,891	+	0,236	0,109
13	34	99,66	0,355	2,582	0,924	0,913	+	0,241	0,087
14	20	91,73	0,211	2,793	0,939	0,933	+	0,247	0,067
15	15	97,86	0,178	2,970	0,949	0,947	+	0,251	0,053
16	16	70,89	0,220	3,191	0,959	0,958	-	0,256	0,042
17	21	74,39	0,297	3,488	0,969	0,968	+	0,260	0,032
18	5	66,82	0,069	3,568	0,971	0,975	-	0,265	0,025
19	4	78,53	0,049	3,606	0,973	0,981	-	0,269	0,019
20	1	83,75	0,012	3,618	0,975	0,986	-	0,272	0,014
21	14	85,83	0,185	3,803	0,978	0,989	-	0,266	0,011
22	4	65,30	0,079	3,883	0,979	0,992	-	0,280	0,008
23	1	35,43	0,036	3,919	0,980	0,994	-	0,283	0,006
24	11	19,61	0,815	4,734	0,991	0,995	-	0,287	0,005
25	0	7,37	0	4,734	0,991	0,996	-	0,290	0,004
26	0	7,37	0	4,734	0,991	0,997	-	0,293	0,003

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń dystrybuanty funkcji niezawodności empirycznej F_i^* i teoretycznej $F(t)$, wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie za pomocą testu znaków oraz wartości teoretyczne funkcji niezawodności $R(t)$ i intensywności awarii w funkcji czasu eksploatacji $\lambda(t)$ w $1/100m \cdot a$.

Rozkład Weibulla

Parametry rozkładu $b^* = 6,45$; $u^* = 1,28$.

Test znaków: $L = \min(L^+, L^-) = \min(9, 12) = 9$.

Dla $N = 21$ i $\alpha = 0,05$ $l_\alpha = 5$, [5,7]

$L = 9 > l_\alpha = 5$ – brak podstaw do odrzucenia hipotezy o zgodności teoretycznego rozkładu Weibulla o parametrach: $b = 6,45$; $u = 1,28$ z rozkładem empirycznym.

Na podstawie przeprowadzonej za pomocą testu znaków weryfikacji hipotezy o zgodności rozkładu empirycznego z rozkładem teoretycznym brak jest podstaw do odrzucenia zakładanej hipotezy na poziomie istotności $\alpha=0,05$.

Dystrybuanta rozkładu funkcji niezawodności, zwana inaczej funkcją zawodności, dla rozkładu Weibulla, wyrażona jest zależnością [5,7,8]:

$$(9) \quad F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^v\right]$$

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

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu Weibulla ma postać:

$$(10) \quad f(t) = \frac{v}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{v-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^v\right]$$

natomiast funkcja niezawodności

$$(11) \quad R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^v\right]$$

Funkcję intensywności uszkodzeń opisuje zależność

$$(12) \quad \lambda(t) = \frac{v}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{v-1}$$

W zależności od parametru kształtu v , rozkład Weibulla może opisywać intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$ monotonicznie rosnącą, monotonicznie malejącą lub stałą. Z tego powodu rozkład ten znalazł szerokie zastosowanie przy opisie rozkładu trwałości elementów podlegającym złożonym procesom wpływającym na trwałość obiektu, w tym procesom starzeniowym.

Wartość oczekiwana czasu do uszkodzenia jest równa

$$(13) \quad E(T) = b \Gamma\left(\frac{1}{v} + 1\right)$$

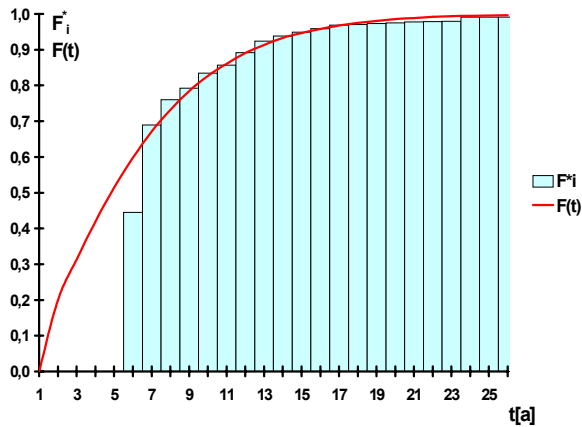
przy czym: $\Gamma(p)$ – funkcja gamma Eulera:

$$(14) \quad \Gamma(p, x) = \int_0^x u^{p-1} e^{-u} du$$

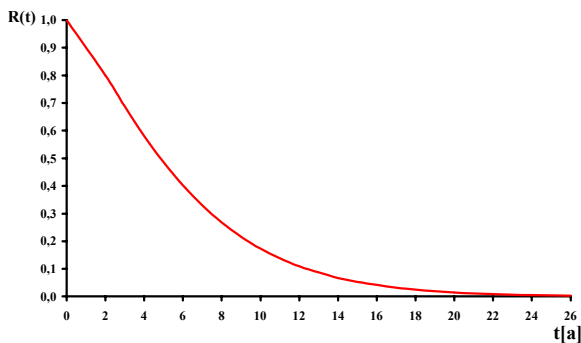
Przebiegi wartości dystrybuanty empirycznej funkcji niezawodności F_i^* oraz teoretycznej $F(t)$, dla poszczególnych lat eksploatacji i przedstawiono na rys. 1.

Przebiegi wartości teoretycznych funkcji niezawodności $R(t)$ przedstawiono na rys.2 natomiast na rys.3 przebieg teoretyczny funkcji intensywności awarii $\lambda(t)$.

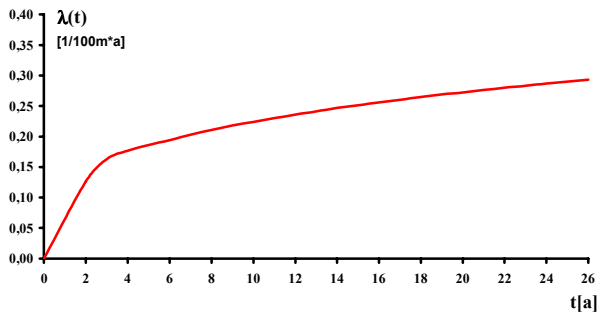
Wyznaczona za pomocą zależności (13) wartość oczekiwana czasu do uszkodzenia, dla parametrów $b = 6,45$ i $u = 1,28$ wynosi $E(T) = 9,63 a$.



Rys. 1. Wartości dystrybuanty empirycznej F_i^* oraz teoretycznej $F(t)$ funkcji niezawodności badanych linii



Rys. 2. Przebieg funkcji niezawodności $R(t)$ badanych linii kablowych



Rys. 3. Przebieg funkcji intensywności awarii $\lambda(t)$ badanych linii kablowych

Podsumowanie

Przedstawiona metoda oceny niezawodności linii kablowych pozwala na pełną identyfikację funkcji niezawodności $R(t)$ oraz funkcji pochodnych takich jak $F(t)$ oraz istotnej, z punktu widzenia optymalizacji ekonomicznej czasu eksploatacji kabli, funkcji intensywności awarii $\lambda(t)$. Tego typu podejście metodologiczne, uwzględniające zmianę intensywności awarii w czasie czasu eksploatacji, zawiera większą informację niż wartość średnia intensywności awarii linii.

Na podstawie przeprowadzonej oceny funkcji niezawodności badanych linii kablowych w izolacji polietylenowej, można stwierdzić, że:

- Niezawodność badanych linii opisać można, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, za pomocą rozkładu Weibulla o parametrach rozkładu $b = 6,45$; $v = 1,28$.
- Parametr kształtu rozkładu Weibulla $v > 1$ wskazuje na rosnącą intensywność uszkodzeń w funkcji czasu eksploatacji. Wzrost ten nie jest jednak silny, co występuje powyżej $v > 2$.

LITERATURA

- [1] Stępień J.C., Tytko J.: Modele niezawodności i odnowy linii elektroenergetycznych średniego napięcia, *VII Międzynarodowa Konferencja „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”*, Gdańsk - Jurata, 12÷14 czerwca 1995 r. t.III, s.221÷230
- [2] Stępień J.C.: Analiza niezawodności eksploatacyjnej linii kablowych 15 kV, *VIII Międzynarodowa Konferencja „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”*, Gdańsk - Jurata, 11÷13 czerwca 1997 r. t.II, s.243÷250
- [3] Stępień J.C.: Niezawodność linii kablowych 15 kV wykonanych w izolacji polietylenowej, *VI Symposium „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia EUI'97”*, Zakopane, 23÷25 października 1997r, s.363÷368
- [4] Stępień J.C.: Metodyka oceny niezawodności linii kablowych, *X Konferencja Szkoleniowo-Techniczna „Kabel 2003”*, Szklarska Poręba, 11-14 marca 2003r. s. 52-54
- [5] Firkowicz S.: Statystyczne badanie wyrobów. *WNT*, Warszawa 1975
- [6] Kowalski Z.: Niezawodność zasilania odbiorców energii elektrycznej, *Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej*, Łódź 1992.
- [7] Bobrowski D., Maćkowiak-Łybacka K.: Wybrane metody wnioskowania statystycznego, *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, Poznań 1982
- [8] Sozański J.: Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego, *WNT*, Warszawa 1990

Autor: prof. nadzw. dr hab. inż. Jan C. Stępień. Politechnika Świętokrzyska, Samodzielny Zakład Podstaw Energetyki, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: jstepien@tu.kielce.pl