



Jan C. Stępień\*

## WŁASNOŚCI NIEZAWODNOŚCIOWE LINII NAWIETRZNYCH ŚREDNIEGO I WYSOKIEGO NAPIĘCIA

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono ocenę własności niezawodnościowych linii napowietrznych 15 i 110 kV. Przeprowadzono analizę przyczyn powstawania awarii linii, analizę uszkodzonych elementów linii, sezonowej zmienności uszkodzeń, opracowano modele niezawodnościowe czasów trwania awarii i przerw w dostawie energii elektrycznej oraz przeprowadzono ocenę współczynników niezawodności linii.

**Słowa kluczowe:** modele niezawodnościowe, elektroenergetyczne linie przesyłowe 110 i 15 kV

### 1. Wstęp

Linie elektroenergetyczne 110 kV zaliczane są obecnie coraz częściej do sieci rozdzielczej systemu elektroenergetycznego, podobnie jak linie 15 kV [4, 5]. Z tego powodu wydaje się zasadne porównanie ich własności niezawodnościowych.

Przedstawiona analiza obejmuje próbę statystyczną zakłóceń pracy linii napowietrznych 15 i 110 kV, zebraną na terenie jednego, wybranego zakładu energetycznego.

Próba statystyczna zakłóceń pracy linii napowietrznych 15 kV została zebrana za okres 3 lat, w których nastąpiło 206 zakłóceń, w tym 59 bez uszkodzenia, co stanowi 28,6% całkowitej liczby zakłóceń. Długość linii zmieniała się od 1104 km, na początku badań, do 1128 km, na końcu tego okresu.

Badania niezawodnościowe linii napowietrznych 110 kV przeprowadzono w okresie 6 lat. W tym czasie nastąpiło 189 zakłóceń, w tym 68 bez uszkodzenia, czyli

---

\* Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki, al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314 Kielce

36% wszystkich przypadków. Długość linii zmieniała się w tym czasie od 1449 km do 1457 km.

W zamieszczonej w referacie analizie nie wszystkie parametry niezawodnościowe linii mogą być między sobą porównywalne. Dotyczy to przede wszystkim klasyfikacji przyczyn powstawania awarii jak również uszkodzonych elementów. Linie 15 i 110 kV różnią się pod względem konstrukcyjnym i rodzajem zastosowanych do ich budowy elementów, stąd też różne są przyczyny powstawania ich awarii.

W referacie przeprowadzono analizę tych uszkodzeń, które związane były z awariami sieci, czyli takimi uszkodzeniami, w których następował proces odnowy.

## 2. Analiza przyczyn powstawania awarii

Częstość przyczyn powstawania awarii linii 15 i 110 kV, wyrażoną w procentach, przedstawiono w tabelach 1 i 2.

**Tabela 1.** *Przyczyny powstawania awarii linii napowietrznych 15 kV*

Przyczyna powstania awarii	$f_i$ [%]
Działanie żywiołów	43,4
Zjawiska zmęczeniowe i starzeniowe	17,9
Działania osób postronnych	7,1
Wady fabryczne i eksploatacyjne	6,6
Niewłaściwa eksploatacja	1,5
Inne	15,8
Nie wyjaśnione	7,7

**Tabela 2.** *Przyczyny powstawania awarii linii napowietrznych 110 kV*

Przyczyna powstania awarii	$f_i$ [%]
Wady fabryczne	34,9
Wichura	16,4
Burza	11,6
Działania osób postronnych	6,9
Gałęzie drzew	5,8
Ptaki	4,8
Zarzutki	3,8
Zjawiska zmęczeniowe i starzeniowe	2,6
Duże obciążenie	0,5
Pożar lasu	0,5
Nie wyjaśnione	12,2

Jak wynika z danych zamieszczonych w tabelach 1 i 2, przyczyny awarii analizowanych linii różnią się między sobą dlatego w tabelach 3 i 4 przedstawiono podział awarii ze względu na rodzaj uszkodzonego elementu linii.

**Tabela 3.** Podział awarii linii 15 kV ze względu na uszkodzony element

Uszkodzony element linii	$f_i$ [%]
Izolatory	70,8
Przewody robocze	12,1
Wiązalki	8,3
Mostki	6,8
Słupy	2,0

**Tabela 4.** Podział awarii linii 110 kV ze względu na uszkodzony element

Uszkodzony element linii	$f_i$ [%]
Izolatory	67,8
Przewody robocze	14,9
Przewody odgromowe	10,7
Konstrukcje wsporcze	6,6

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w przypadku linii 15 kV najczęściej awarii powoduje działanie żywiołów oraz zjawiska zmęczeniowe i starzeniowe. W przypadku linii 110 kV, największą przyczyną awarii są wady fabryczne, przede wszystkim układów izolacyjnych.

W obu rodzajach linii najbardziej zawodnymi elementami są izolatory (ok. 70% wszystkich przypadków awarii), a następnie przewody. Dane te powinny być wzięte pod uwagę przez konstruktorów i wykonawców elementów linii elektroenergetycznych.

### 3. Sezonowa zmienność uszkodzeń

Częstość uszkodzeń linii napowietrznych 15 i 110 kV, w poszczególnych miesiącach, przedstawiono w tabeli 5.

**Tabela 5.** Sezonowa zmienność uszkodzeń linii napowietrznych 15 i 110 kV, [%]

Linia	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
15 kV	12,6	5,3	12,1	4,9	6,8	9,7	9,7	10,2	4,9	5,3	7,3	11,2
110 kV	9,5	9,5	20,6	7,4	9,5	8,5	4,3	10,1	5,3	3,7	3,7	7,9

Dużą intensywność uszkodzeń obserwuje się w miesiącach zimowych oraz letnich, co wskazuje na sezonowy charakter uszkodzeń analizowanych linii.

### 4. Czas trwania awarii linii

Częstość empiryczną czasów trwania awarii linii 15 kV przedstawiono w tabeli 6 a linii 110 kV w tabeli 7.

**Tabela 6.** Częstość empiryczna czasu trwania awarii linii napowietrznych 15 kV

$t_a$ [h]	0÷4	4÷8	8÷12	12÷16	16÷20	20÷24	24÷28	28÷32
$f_i$ [%]	52,7	27,1	9,7	3,3	3,3	0,9	1,4	1,6

**Tabela 7.** Częstość empiryczna czasu trwania awarii linii napowietrznych 110 kV

$t_a$ [h]	0÷6	6÷12	12÷18	18÷24	24÷30	30÷36	36÷42	42÷48	48÷54	54÷60
$f_i$ [%]	29,6	28,6	14,9	11,1	9,0	2,6	1,1	1,1	1,5	0,5

Na podstawie danych empirycznych przedstawionych w tabelach 6 i 7, dokonano weryfikacji hipotezy o rozkładzie czasu trwania awarii linii napowietrznych 15 i 110 kV za pomocą testów  $\chi^2$  Pearsona i  $\lambda$  Kołmogorowa. Na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ , otrzymano dla linii 15 kV następujące wartości statystyk:  $\lambda = 0,909$ ;  $\lambda_\alpha = 1,358$ ;  $\chi^2 = 3,656$  i  $\chi_\alpha^2 = 9,488$  — co wskazuje, że brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy, że rozkład czasu trwania awarii linii napowietrznych 15 kV jest rozkładem wykładniczym o parametrze  $\lambda = 0,126 \text{ 1/h}$  i wartości średniej z rozkładu  $E(T_a) = 7,95 \text{ h}$ .

Postępując analogicznie otrzymano parametry rozkładu wykładniczego czasu trwania awarii linii napowietrznych 110 kV. Wartość parametru rozkładu wykładniczego  $\lambda = 0,075 \text{ 1/h}$ . Wartość średnia czasu trwania awarii linii  $E(T_a) = 13,3 \text{ h}$ . Wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie są następujące:  $\lambda = 0,909$ ;  $\lambda_\alpha = 1,358$  oraz  $\chi^2 = 10,680$ ;  $\chi_\alpha^2 = 11,070$ . Na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy, że rozkład czasu trwania awarii linii napowietrznych 110 kV jest rozkładem wykładniczym o parametrze  $\lambda = 0,075 \text{ 1/h}$ .

Przebieg funkcji gęstości prawdopodobieństwa obu rozkładów przedstawia zależność:

$$f(t_a) = \lambda \exp(-\lambda t_a) \quad (1)$$

gdzie:  $\lambda$  — parametr rozkładu wykładniczego.

Jak widać średni czas trwania awarii linii 110 kV jest prawie dwukrotnie większy od czasu awarii linii 15 kV. Wynika to z wartości czasu lokalizacji uszkodzenia jak również z zakresu prac przy usuwaniu awarii [1, 2, 3, 5, 6].

## 5. Czas przerwy w dostawie energii

Czas przerwy w dostawie energii elektrycznej jest to czas od chwili powstania przerwy w zasilaniu do chwili wznowienia zasilania odbiorców. Wartości empiryczne częstości czasu przerwy w dostawie energii elektrycznej, przy zasilaniu odbiorców z linii 15 kV, przedstawiono w tabeli 8, natomiast dla linii 110 kV w tabeli 9.

Przeprowadzono weryfikację hipotezy o rozkładach czasu trwania przerwy w dostawie energii elektrycznej odbiorców zasilanych z linii 15 i 110 kV. W obu przypadkach założono, że rozkłady tych czasów opisać można za pomocą rozkładów wykładniczych. Weryfikację przeprowadzono za pomocą testów  $\chi^2$  Pearsona i  $\lambda$  Kołmogorowa. Dla

**Tabela 8.** Częstość empiryczna czasu przerwy w dostawie energii elektrycznej przy zasilaniu odbiorców z linii 15 kV

$t_p$ [h]	0÷4	4÷8	8÷12	12÷16	16÷20	20÷24
$f_i$ [%]	56,3	27,4	7,9	3,6	3,9	0,9

**Tabela 9.** Częstość empiryczna czasu przerwy w dostawie energii elektrycznej przy zasilaniu odbiorców z linii 110 kV

$t_p$ [h]	0÷0,5	0,5÷1	1÷1,5	1,5÷2	2÷2,5	2,5÷3	3÷3,5	3,5÷4	4÷4,5	4,5÷5
$f_i$ [%]	40,4	19,1	8,6	6,4	10,6	4,3	2,1	2,1	2,1	4,3

próby statystycznej linii 15 kV otrzymano następujące wartości statystyk:  $\lambda = 0,581$ ;  $\lambda_a = 1,358$  i  $\chi^2 = 1,408$ ;  $\chi_a^2 = 7,815$ , natomiast dla próby linii 110 kV:  $\lambda = 0,535$ ;  $\lambda_a = 1,358$  oraz  $\chi^2 = 3,550$ ;  $\chi_a^2 = 7,815$ . Na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$  brak jest podstaw do odrzucenia hipotezy, że rozkład czasu trwania awarii linii napowietrznych 15 kV opisać można za pomocą rozkładu wykładniczego o parametrze  $\lambda = 0,198$  1/h i wartości średniej z rozkładu  $E(t_p) = 5,05$  h a linii napowietrznych 110 kV  $\lambda = 0,793$  1/h i  $E(t_p) = 1,26$  h.

## 6. Podsumowanie

W pracy przedstawione zostały, w formie tabelarycznej, wyniki empiryczne badań niezawodnościowych linii elektroenergetycznych 15 i 110 kV. Rozkłady czasów trwania awarii i przerwy w dostawie energii elektrycznej zostały określone poprzez podanie parametrów rozkładów oraz obliczonych statystyk testów nieparametrycznych  $\chi^2$  Pearsona i  $\lambda$  Kołmogorowa. Brak miejsca nie pozwolił na ilustrację graficzną otrzymanych wyników. Ponad to, wyznaczone zostały współczynniki zawodności obu rodzajów linii i średnie intensywności uszkodzeń, obliczone na 100 km długości linii.

W celu porównania otrzymanych wyników, w tabeli 10 zestawiono obliczone wartości.

**Tabela 10.** Porównanie wartości wielkości niezawodnościowych linii 15 i 110 kV

Parametr		linia 15 kV	linia 110 kV
$N_{sr}$	[1/100 km·a]	2,20	6,16
$E(t_a)$	[h]	13,3	7,95
$E(t_p)$	[h]	1,26	5,05
$q$	[1/100 km]	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^{-3}$

## Literatura

- [1] **Błachowski A., Stępień J. C., Cukrowski J. A.:** *Modele niezawodnościowe linii elektroenergetycznych eksploatowanych na obszarach górskich.* III Sympozjum „Metody matematyczne w elektroenergetyce”, Zakopane 1993, sekcja I, s. 51–54
- [2] **Horak J., Popczyk J.:** *Eksploatacja elektroenergetycznych linii rozdzielczych.* Warszawa, WNT 1985
- [3] **Kowalski Z.:** *Niezawodność zasilania odbiorców energii elektrycznej.* Łódź, Wyd. P. Ł. 1992
- [4] **Kujarczyk S. i in.:** *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze.* Warszawa, PWN 1994
- [5] **Popczyk J.:** *Modele probabilistyczne w sieciach elektroenergetycznych.* Warszawa, WNT 1991
- [6] **Sozański J.:** *Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego.* Warszawa, WNT 1990
- [7] **Stępień J. C., Tytko J.:** *Modele niezawodności i odnowy linii elektroenergetycznych średniego napięcia.* VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce”, Gdańsk-Jurata 1995, tom III, s. 223–230

### RELIABILITY CHARACTERISTICS OF MIDDLE AND HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINES

The appraisal of reliability characteristics of 15 and 110 kV overhead lines was presented in this paper. The lines failures rising reasons analysis was made. Downtimes and power failure time reliability models were worked out. The appraisal of lines reliability factors also was made.