

POLITECHNIKA KRAKOWSKA  
im. Tadeusza Kościuszki

Vasyl Hudym, Adam St. Jagiełło

# ZASADY PROJEKTOWANIA I EKSPLOATACJI ELEKTROENERGETYCZNYCH LINII NAPOWIETRZNYCH

Podręcznik dla studentów kierunków  
Elektrotechnika i Energetyka



Kraków 2016

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ  
Tadeusz Tatara

PRZEWODNICZĄCY KOLEGIUM REDAKCYJNEGO  
WYDAWNICTW DYDAKTYCZNYCH  
Elżbieta Węclawowicz-Bilska

REDAKTOR SERII  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej  
Adam Warzecha

RECENZENCI  
Lesław Gołębiowski  
Valeriy Kuznetsov

SEKRETARZ SEKCJI  
I OPRACOWANIE REDAKCYJNE  
Agnieszka Filosek

SKŁAD I ŁAMANIE  
Anna Basista

ZDJĘCIE NA OKŁADCE  
Dimitris Vetsikas (pixabay.com)

© Copyright by Politechnika Krakowska

ISBN 978-83-7242-919-3

Wydawnictwo PK, ul. Skarżyńskiego 1, 31-866 Kraków; tel.: 12 628 37 25, fax: 12 628 37 60  
e-mail: [wydawnictwo@pk.edu.pl](mailto:wydawnictwo@pk.edu.pl) □ [www.wydawnictwo.pk.edu.pl](http://www.wydawnictwo.pk.edu.pl)  
Adres do korespondencji: ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

---

Druk i oprawę wykonano w Dziale Poligrafii Politechniki Krakowskiej  
Ark. wyd. 11,0

Nakład 200 egz.

Cena zł 31,50 z VAT

## Spis treści

Skróty i oznaczenia przyjęte w podręczniku .....	7
Przedmowa.....	9
 <b>1. BUDOWA LINII NAPOWIETRZNYCH</b>	
1.1. Funkcje linii napowietrznych i wymagania dla nich stawiane .....	11
1.2. Charakterystyka stref klimatycznych dla napowietrznych linii przesyłowych.....	16
1.3. Linie napowietrzne – główne pojęcia i definicje .....	20
1.4. Przewody linii napowietrznych – klasyfikacja, budowa i parametry .....	23
1.5. Klasyfikacja słupów linii napowietrznych i charakterystyka warunków pracy .....	28
1.6. Izolatory i osprzęt w liniach napowietrznych .....	30
1.7. Gabaryty podstawowe linii napowietrznych i obliczeniowe warunki klimatyczne...	39
1.8. Wpływ wiatru, oblodzenia i temperatury.....	47
Pytania do samokontroli .....	48
 <b>2. ZASADY TEORETYCZNE OBLICZEŃ PRZEWODÓW ROBOCZYCH I ODGROMOWYCH W LINIACH NAPOWIETRZNYCH</b>	
2.1. Wstęp .....	49
2.2. Charakterystyka obciążeń mechanicznych przewodów i linek linii napowietrznych .....	49
2.2.1. Obliczanie obciążenia właściwego przewodu .....	52
2.2.2. Obliczanie obciążenia pochodzącego od masy własnej przewodu i oblodzenia .....	53
2.2.3. Działanie wiatru na przewód bez oblodzenia i z oblodzeniem .....	54
2.2.4. Obciążenie właściwe sumaryczne działające na przewód .....	56
2.3. Zwis i długość przewodu pomiędzy słupami.....	57
2.4. Naprężenie materiału przewodu w różnych punktach przęsła.....	60
2.5. Równanie stanu krzywej zwisania przewodu w przęsle .....	62
2.6. Równanie przęsła krytycznego linii napowietrznej .....	64
2.7. Maksymalny zwis przewodu i temperatura krytyczna.....	66
2.8. Zasady teoretyczne obliczeń sił naciągu przewodu dla różnych wysokości jego zamocowań .....	68
2.9. Obliczenia przewodów o różnych wysokościach zamocowania .....	71
Pytania do samokontroli .....	74

### 3. ZASADY OBLICZEŃ PRZEWODÓW STAŁOWO-ALUMINIOWYCH

3.1. Obliczenia mechaniczne przewodów jednolitych .....	75
3.2. Obliczenia mechaniczne przewodów stalowo-aluminiowych .....	77
3.2.1. Podział sił pomiędzy częścią aluminiową i stalową przewodu .....	79
3.2.2. Współczynnik temperaturowy liniowego rozszerzania przewodu stalowo-aluminiowego .....	82
3.2.3. Naprężenie w przewodzie AFL w zależności od zmiany temperatury – rzeczywiste naprężenie w części aluminiowej i stalowej przewodu .....	85
3.2.4. Pręśło krytyczne z przewodem stalowo-aluminiowym z uwzględnieniem tylko wpływu temperatury .....	86
3.3. Przykłady rozwiązań zadań na obliczanie przewodów .....	88
Przykład 3.3.1 .....	88
Przykład 3.3.2 .....	90
Przykład 3.3.3 .....	90
Przykład 3.3.4 .....	96
Pytania do samokontroli .....	103

### 4. KONSTRUKCJE WSPORCZE I UKŁADY IZOLACYJNE W LINIACH NAPOWIETRZNYCH

4.1. Pojęcia ogólne, definicje i oznaczenia .....	105
4.2. Konstrukcje słupów i warunki ich pracy w linii elektroenergetycznej .....	106
4.3. Fundamenty słupów linii napowietrznych i stawiane im wymagania .....	115
4.4. Zasady teoretyczne oceny odkształcania się słupów linii napowietrznych .....	118
4.5. Współczynnik smukłości słupa – wysokość słupa przelotowego w linii napowietrznej .....	122
4.6. Rozkład sił pomiędzy żerdziami słupów typu $\pi$ .....	124
Przykład 4.1 .....	125
4.7. Izolatory – klasyfikacja, oznaczenia i parametry .....	127
4.8. Zasady doboru izolatorów liniowych oraz określenie długości łańcucha izolatorów i warunki ich równowagi .....	132
4.9. Warunki równowagi łańcuchów izolatorów .....	136
Pytania do samokontroli .....	137

### 5. PRACA LINII NAPOWIETRZNEJ W STANACH AWARYJNYCH

5.1. Sposoby rozmieszczenia przewodów roboczych i odgromowych linii napowietrznych na słupach .....	139
5.2. Stany pracy przewodów linii napowietrznych i przyczyny powstawania awarii ...	146
5.3. Naprężenie w przewodach linii napowietrznej po oberwaniu jednego z przewodów ....	149
5.4. Określenie sił rozciągających przewody, działających na słupy przy oberwaniu się przewodów z łańcuchami izolatorów .....	152
Przykład 5.1 .....	157

5.5. Siły naciągu w przewodach w przypadku oberwania się przewodów i zastosowania zacisków wypadających.....	161
5.6. Warunki równowagi łańcuchów izolatorów linii napowietrznych przy oberwaniu przewodu .....	162
Przykład 5.2 .....	163
Przykład 5.3 .....	170
Pytania do samokontroli .....	179

## **6. WYMAGANIA PROJEKTOWE I EKSPLOATACYJNE DLA LINII NAPOWIETRZNYCH**

6.1. Zadania i etapy projektowania linii napowietrznych .....	181
6.2. Zasady prowadzenia linii napowietrznych.....	183
6.3. Rozmieszczenie słupów wzdłuż trasy linii napowietrznych.....	184
Zadanie 6.1 .....	189
6.4. Zasady eksploatacji linii napowietrznych .....	191
6.5. Wymagania polskich norm do eksploatacji linii napowietrznych .....	193
6.5.1. Uwagi ogólne .....	193
6.5.2. Przeglądy ciągów linii napowietrznych i ocena stanu technicznego oraz prace doraźne.....	196
6.5.3. Tablice ostrzegawcze i identyfikacyjne elektroenergetycznych linii napowietrznych .....	198
Pytania do samokontroli .....	200

## **7. ZASTOSOWANIE TECHNIKI KOMPUTEROWEJ DO PROJEKTOWANIA LINII NAPOWIETRZNYCH**

7.1. Wstęp. Charakterystyka ogólna oprogramowania AutoCAD.....	201
7.2. Najważniejsze funkcje programu AutoCAD i tworzenie szablonu rysunku .....	204
7.3. Projektowanie i przygotowanie rysunków do wydruku w wymaganym formacie....	205
7.4. Przykłady rysunków elementów linii napowietrznych i całych konstrukcji wykonanych w oprogramowaniu AutoCAD .....	221
Pytania do samokontroli .....	222
Literatura.....	227



## Skróty i oznaczenia przyjęte w podręczniku

- $m$  – masa przewodu [kg];
- $S$  – przekrój przewodu [mm<sup>2</sup>];
- $p_0$  – obciążenie właściwe przewodu o długości 1 m [N/m mm<sup>2</sup>];
- $p_1$  – obciążenie właściwe od masy własnej przewodu [N/m mm<sup>2</sup>];
- $p_2$  – obciążenie właściwe oblodzenia [N/m mm<sup>2</sup>];
- $p_3$  – obciążenie właściwe zależne od masy własnej przewodu i oblodzenia [N/m mm<sup>2</sup>];
- $p_4$  – obciążenie właściwe od działania wiatru na przewód bez lodu [N/m mm<sup>2</sup>];
- $p_5$  – obciążenie właściwe zależne od wiatru działającego na przewód z oblodzeniem [N/m mm<sup>2</sup>];
- $p_6$  – obciążenie właściwe działające na przewód z oblodzeniem będący pod wpływem siły wiatru [N/m mm<sup>2</sup>];
- $\gamma_a$  i  $\gamma_s$  – masa właściwa, odpowiednio aluminium i stali [g/mm<sup>3</sup>];
- $S_a$  i  $S_s$  – powierzchnia przekrojów części aluminiowej i części stalowej przewodu stalowo-aluminiowego [mm<sup>2</sup>];
- $S$  – przekrój całkowity przewodu stalowo-aluminiowego [mm<sup>2</sup>];
- $\gamma_0 = 0,95$  g/m<sup>3</sup> – masa właściwa oblodzenia;
- $v$  – prędkość wiatru [m/s];
- $\theta_m$  – temperatura przewodu równa temperaturze otoczenia [C°];
- $p_m$  – obciążenie właściwe w temperaturze otoczenia [N/m mm<sup>2</sup>];
- $\sigma_m$  – naprężenie materiału przewodu przy przyjętych warunkach początkowych, które oznacza się indeksem ( $m$ ) [MPa];
- $\alpha$  – współczynnik wydłużenia liniowego materiału przewodu od temperatury [m/C°];
- $\alpha_a$  – współczynnik temperaturowy wydłużenia liniowego części aluminiowej przewodu [m/C°];
- $\alpha_s$  – współczynnik temperaturowy wydłużenia liniowego części stalowej przewodu [m/C°];
- $\beta = \frac{1}{E}$  – współczynnik sprężystego wydłużania materiału przewodu [mm<sup>2</sup>/kg];
- $E$  – moduł sprężystości [kg/mm<sup>2</sup>];
- $L_0$  – długość nieobciążonego przewodu ( $\sigma_0 = 0$ ) w temperaturze  $\theta = 15^\circ\text{C}$ ;
- $L_m$  – długość rozciągniętego przewodu o naprężeniu materiału  $\sigma_m$  w temperaturze  $\theta_m$ ;
- $L$  – długość rozciągniętego przewodu o naprężeniu materiału  $\sigma_p$  w temperaturze  $\theta$ ;
- $f$  – zwis przewodu w przeszle [m];

- $h_g$  – bezpieczna odległość przewodu od ziemi [m];
- $l_{kr}$  – długość przęsła krytycznego [m];
- $l$  – długość przęsła [m];
- $\sigma_{max}$  – naprężenie maksymalne [MPa];
- $p_{max}$  – obciążenie właściwe maksymalne [N/m mm<sup>2</sup>];
- $p_{min}$  – obciążenie właściwe minimalne [N/m mm<sup>2</sup>];
- $\theta_p$  – temperatura przy obciążeniu maksymalnym [C°];
- $\theta_{min}$  – temperatura otoczenia minimalna [C°];
- $\sigma_0$  – naprężenie rozciągające przewód w najniższym punkcie przęsła [MPa];
- $\sigma_n$  – tymczasowa wytrzymałość materiału drutu [N/mm<sup>2</sup>];
- $\sigma_{dop}$  – naprężenie dopuszczalne materiału [MPa];
- $\delta$  – wartość odchylenia góry słupa od położenia pionowego [m];
- $\sigma_a$  – naprężenie w części aluminiowej przewodu [MPa];
- $\sigma_{st}$  – naprężenie części stalowej przewodu [MPa];
- $\sigma_f$  – naprężenie zastępcze przewodu stalowo-aluminiowego [MPa];
- $\Delta l$  – wydłużenie względne materiału przewodu;
- $T_a$  – siła rozciągająca część aluminiową przewodu [N];
- $T_{st}$  – siła rozciągająca część stalową przewodu [N];
- $T$  – siła rozciągająca przewód stalowo-aluminiowy [N];
- $W$  – moment wytrzymałości słupa na zginanie;
- $M_{max}$  – moment maksymalny zginający słup na poziomie ziemi;
- $R_{pr}$  – obliczeniowa wytrzymałość betonu;
- $S_{ar}$  – przekrój sumaryczny uzbrojenia słupa [m<sup>2</sup>];
- $R_{ar}$  – obliczeniowa wytrzymałość uzbrojenia słupa na rozciąganie i ściskanie;
- $R_{pr}$  – obliczeniowa wytrzymałość betonu o kształcie pryzmy;
- $S_{sl}$  – przekrój sumaryczny słupa [m<sup>2</sup>];
- $W_p$  – moment wytrzymałości na skręcaniu;
- $r$  – promień słupa okrągłego [m];
- $J_p$  – moment bezwładności biegunowej [m<sup>4</sup>];
- $\tau_{dop}$  – naprężenie dopuszczalne materiału słupa w przypadku jego skręcania;
- $\tau_{max}$  – naprężenie maksymalne słupa;
- $\sigma_T$  – naprężenie powstałe w wyniku rozciągania stali;
- $U_{iz zn}$  – napięcie znamionowe izolatora;
- $p_{rujn}$  – obciążenie niszczące (odbierane z katalogu);
- $\lambda$  – długość łańcucha izolatorów [m];
- $n_{iz}$  – liczba szeregowo połączonych izolatorów w łańcuchu;
- $\lambda_{iz}$  – długość jednego izolatora [m];
- $G_{iz}$  – ciężar łańcucha izolatorów;
- $G_p$  – ciężar przewodu w sąsiednich z danym łańcuchem izolatorów w półprzęsłach;
- $h_0$  – minimalna odległość od przewodu do ziemi [m];
- $f_{max}$  – maksymalny zwis przewodów, który obliczamy bez uwzględnienia naporu wiatru [m].



## Przedmowa

Podręcznik *Zasady projektowania i eksploatacji linii napowietrznych* jest przeznaczony dla studentów kierunków: elektrotechniki i elektroenergetyki uniwersytetów technologicznych i składa się z siedmiu rozdziałów. Materiał podręcznika napisano zgodnie z programem dla przedmiotu „Konstrukcje linii napowietrznych przesyłowych i rozdzielczych”, który w ciągu ostatnich lat jest wykładany na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej. W podręczniku wykorzystano doświadczenie specjalistów z różnych krajów, a w dużym stopniu z Rosji i Ukrainy, gdzie bardzo rozwinięte są energetyczne linie napowietrzne. Pierwszy rozdział poświęcono budowie linii napowietrznych, jej elementów podstawowych oraz opisu ich funkcji z uwzględnieniem warunków pracy. W drugim rozdziale podano teoretyczne zasady obliczania przewodów roboczych i odgromowych, a w szczególności naprężeń w tych przewodach. Wyprowadzono równanie stanu przewodu w przęśle oraz wzory na obliczanie maksymalnego zwisu i długości przęsła. Trzeci rozdział poświęcono zasadom obliczeń przewodów stalowo-aluminiowych, w których odbywa się podział sił pomiędzy częścią stalową i aluminiową z uwzględnieniem wpływu temperatury. Podano przykłady obliczeń dla wybranych parametrów. W czwartym rozdziale opisane zostały konstrukcje wsporcze i izolacyjne. Omówiono warunki pracy dla konstrukcji wsporczych i teoretyczne zasady ich obliczania, a także dla izolatorów i łańcuchów izolatorów. Piąty rozdział został poświęcony analizie stanów pracy elementów linii napowietrznych w przypadkach awarii, takich jak oberwanie przewodów roboczych i odgromowych. Opisano sposoby rozmieszczenia przewodów roboczych i odgromowych na słupach oraz najważniejsze przyczyny powstawania awarii. W rozdziale szóstym podano materiały związane z projektowaniem linii napowietrznych i ich elementów oraz wymagania dotyczące eksploatacji linii napowietrznych. Rozdział siódmy zawiera informacje na temat wykorzystania programu AutoCAD przy projektowaniu linii napowietrznych.

Autorzy pracowali nad podręcznikiem wspólnie z równym udziałem, przy jednoczesnym uwzględnieniu wkładu pracy podczas przygotowywania podręcznika do wydruku.