

ROZDZIAŁ 1

BUDOWA LINII NAPOWIETRZNYCH

1.1. Funkcje linii napowietrznych i wymagania dla nich stawiane

Linia napowietrzna nazywa się urządzenia do przesyłu i rozdziału energii elektrycznej przewodami przebiegającymi w środowisku otwartym – powietrzu, przymocowanymi za pomocą izolatorów i osprzętu do słupów albo innych konstrukcji na obiektach inżynierskich (mostach i innych konstrukcjach).

Linie napowietrzne są podstawowym elementem sieci elektrycznych pozwalającym na przesył energii na duże odległości, są używane przy prądzie zmiennym lub stałym. Ograniczenia zastosowań linii napowietrznych do przesyłu prądu zmiennego wynikają z ograniczenia odległości przesyłu limitowanej stratami mocy i napięcia, które czynią przesył na bardzo duże odległości nieefektywnym ze względu na warunki stabilności statycznej i dynamicznej systemu elektroenergetycznego, którego elementami są te linie. Należy przy tym dodać, że obecnie kable elektroenergetyczne nie stanowią alternatywy dla przesyłu energii elektrycznej przy prądzie zmiennym na większe odległości ze względu na duże prądy pojemnościowe, prądy upływu izolacji i koszty. W Polsce, w związku z rozmiarem kraju, linie elektroenergetyczne nie są tak długie, aby przy częstotliwości przesyłu równej 50 Hz należało się spodziewać istotnego wpływu zjawisk wynikających z przesyłu energii na bardzo duże odległości. Jednak w krajach dużych, takich jak Rosja, Kanada, USA, Chiny, Brazylia, Australia czy Indie, zjawiska te przyczyniły się do budowy wielu niezależnych systemów elektroenergetycznych w obrębie jednego kraju.

Ogólnie rzecz ujmując, linie napowietrzne są to urządzenia naziemne przeznaczone do przesyłu energii elektrycznej, składające się z konstrukcji wsporczych, przewodów, izolatorów oraz osprzętu. W celu ograniczenia strat mocy czynnej w przewodach, zależnych od kwadratu modułu prądu, w liniach elektroenergetycznych służących do przesyłu dużej mocy stosuje się coraz wyższe napięcia. W przypadku zastosowania przewodów gołych nieizolowanych, izolację w takim układzie stanowi powietrze, co ogranicza wysokość napięcia ze względu na zjawiska zachodzące w dielektrykach gazowych.

Z punktu widzenia pełnionych funkcji linie elektroenergetyczne można podzielić na dwie grupy: linie przesyłowe i rozdzielcze. Istnieją również inne podziały klasyfikujące linie systemu elektroenergetycznego na trzy podstawowe warstwy w zależności od mocy przesyłanej tymi liniami oraz poziomu napięcia. Podstawowe poziomy napięcie w krajowym systemie elektroenergetycznym to: 400 i 220 kV dla sieci przesyłowej oraz 110 i 15 kV dla sieci rozdzielczej. W wyżej wymienionych krajach używane są linie o napięciu wysokim: 110, 150, 225, 275, 330, 500 kV, a na poziomie napięć średnich są to: 75, 63, 35, 30 i 20 kV – stosowane jeszcze w systemowych sieciach rozdzielczych – oraz 10,5 kV, 6 kV, i niskich 0,66 kV czy też 0,4 kV – stosowane na poziomie sieci rozdzielczych zakładów pracy.

Podstawowe zadania linii napowietrznych to przesył energii elektrycznej z wielkich elektrowni do położonych blisko miast sieci rozdzielczych zasilających wielkie aglomeracje miejskie i miejsko-przemysłowe. Oprócz tego linie te zapewniają przesył energii z obszarów, w których występuje nadwyżka wytwarzanej energii do obszarów wielkiego zużycia (deficytowych), rozprowadzenie energii wiąże się z włączeniem do pracy równoległej wielkich elektrowni i tworzeniem państwowych systemów elektroenergetycznych.

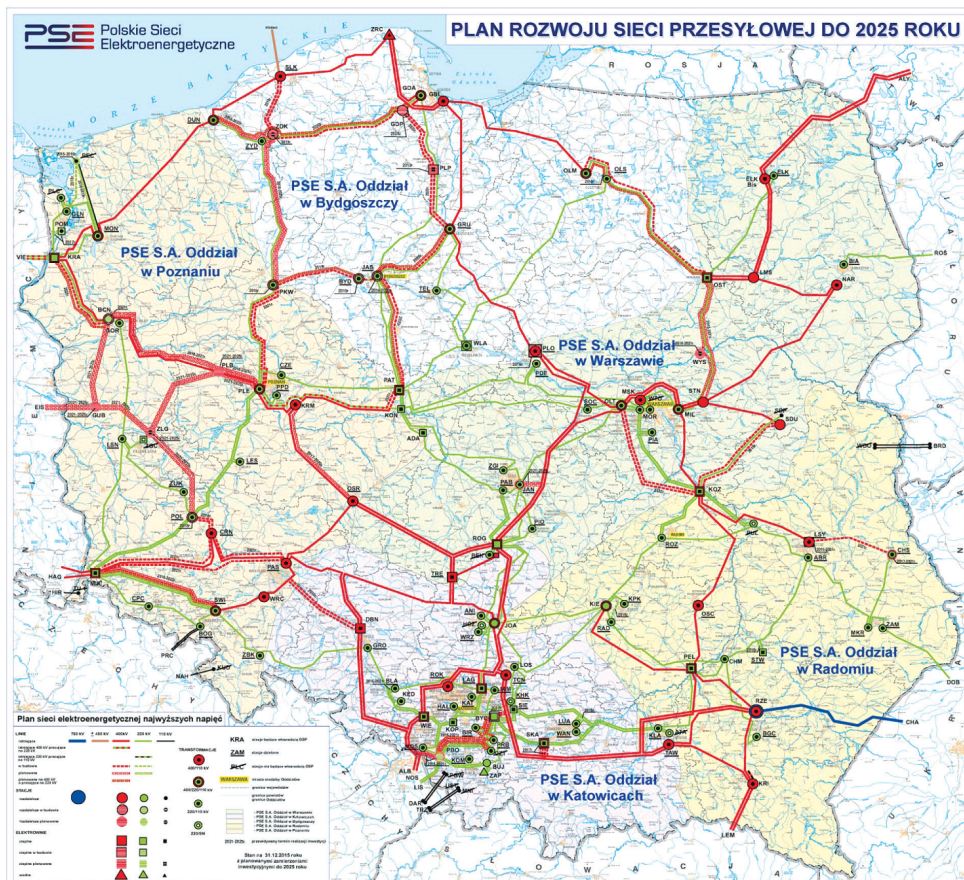
Polska sieć przesyłowa prądu zmiennego składa się z 218 linii o napięciach 750, 400 i 220 kV (rys. 1.1), w tym (stan na 31.12.2015 r.):

- 89 linii o napięciu 400 kV o łącznej długości 5984 km,
- 167 linii 220 kV o łącznej długości 7971 km.

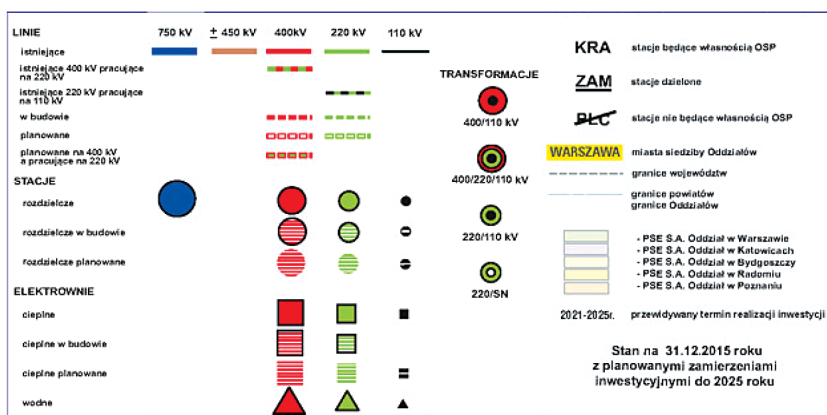
Na rysunku 1.1 podano mapę sieci przesyłowych polskiego systemu elektroenergetycznego składającego się z linii o napięciach 110, 220, 400 i 750 kV. Liniami kreskowanymi pokazano trasy linii, które są przewidziane do budowy.

Klasyfikację sieci elektroenergetycznych można również przeprowadzić według rodzaju napięcia i jego poziomu: sieci prądu stałego, zmiennego lub hybrydowe (mieszane), sieci Najwyższych Napięć NN, sieci Wysokich Napięć WN, sieci Średnich Napięć SN, sieci niskich napięć nN, oraz według znaczenia linii (systemowa – okręgowa – rejonowa – miejska – wiejska – przemysłowa itp.). Zależnie od struktury można przeprowadzić podział sieci na: sieci otwarte (promieniowe, magistralne); sieci zamknięte (pętlicowe, kłosowe, wrzecionowe, dwuliniowe zamknięte, kratowe).

Podstawowe wymagania stawiane elektroenergetycznym liniom napowietrznym zostały określone już na etapie projektowania przez Polską Normę [PN-EN 50341] wraz z późniejszymi dodatkami, która jest ekwiwalentem norm europejskich poszerzonych o normatywne warunki krajowe (NNA). NNA zawierają zwykle odchylenia od normy będące wynikiem dotychczasowych przepisów krajowych lub praktyk przyjętych w danym kraju.



Rys. 1.1a. Mapa sieci przesyłowej systemu elektroenergetycznego Polski [42]



Rys. 1.1b. Legenda do rysunku 1.1a

Przedstawiona wyżej norma stanowi, że elektroenergetyczną linię napowietrzną należy zaprojektować i zbudować w taki sposób, aby w przewidywanym okresie użytkowania:

- spełniała swoją funkcję dla określonego zbioru warunków, z akceptowalnymi poziomami niezawodności w sposób ekonomiczny – odnosi się to do wymagań niezawodności,
- nie była narażona na katastrofę postępującą (zjawisko kaskadowe), jeśli uszkodzenie powstało w określonym podzespole – odnosi się to do wymagań pewności (asekuracji),
- nie narażała ludzi na obrażenia lub utratę życia podczas budowy i utrzymania – odnosi się to do wymagań bezpieczeństwa.

Linia napowietrzna powinna być również zaprojektowana, zbudowana i eksploatowana z uwzględnieniem aspektów bezpieczeństwa publicznego, trwałości, odporności, utrzymania, estetyki i względów środowiskowych.

Wymaganie niezawodności jest ściśle związane ze sposobem zaprojektowania linii przy założeniu pewnych określonych zjawisk atmosferycznych mogących wystąpić na danym obszarze. W tym celu komitety normalizacyjne poszczególnych krajów Unii Europejskiej mogą zdecydować o przyjęciu pewnych poziomów bezpieczeństwa odpowiadających co najmniej poziomowi 1 określonemu w tablicy 1.

Tablica 1.1

Poziomy niezawodności pracy linii napowietrznej

Poziom niezawodności	Okres powrotu T oddziaływań klimatycznych
1	50 lat
2	150 lat
3	500 lat

UWAGA: Roczna niezawodność linii napowietrznej odnosi się w przybliżeniu do okresu powrotu T oddziaływania klimatycznego i mieści się w przedziale od $1-1/27$ do $1-1/T$. Należy ją uważać za wartość minimalną.

Gdy nie ma szczegółowo określonych poziomów niezawodności, stosuje się podejście statystyczne. Dla linii napowietrznych można rozważyć w ogólności trzy różne poziomy niezawodności, jak podano w tablicy 1.1. Dalsze informacje na temat niezawodności linii energetycznej można znaleźć w IEC 60826.

W warunkach rzeczywistych absolutna niezawodność linii napowietrznej jest trudna do realizacji i określenia. Dlatego też niezawodność poziomu nr 1 traktuje się jako niezawodność odniesienia, a inne poziomy podaje się w stosunku do tego poziomu bazowego.

We wszystkich krajach świata używane są linie napowietrzne prądu przemiennego, niemniej jednak w wielu krajach stosuje się również linie prądu stałego. Przykładem stosowania linii napowietrznych prądu stałego są linie dla połączenia systemów elektroenergetycznych o różnych częstotliwościach, mianowicie 50 Hz i 60 Hz (Rosja–Norwegia).

W trakcie eksploatacji linii możliwe są awarie występujące z powodów niemożliwych do przewidzenia, jak np.: ukryte wady materiałowe, ruchy tektoniczne czy nadzwyczajne warunki klimatyczne, niespodziewane na danym terenie. Wymaganie pewności działania nakłada obowiązek takiego projektowania lub modernizacji linii, aby w przypadku tego typu awarii maksymalnie ograniczyć obszar objęty daną awarią, przykładowo poprzez wstawianie tak zwanych mocnych słupów (słupów odporowych) w określonych odstępach, aby zapobiec katastrofie polegającej na lawinowym niszczeniu standardowych słupów przelotowych. Norma PN-EN 50341 przewiduje w fazie projektowej symulację pewnych oddziaływań i obciążeń większych niż rzeczywiste możliwe obciążenia linii. W rzeczywistości w trakcie projektowania linii podmiot, który będzie ją eksploatował, często decyduje się na obniżenie standardów jej budowy w celu obniżenia kosztów, jeżeli wartość oczekiwana kosztów awarii jest stosunkowo niska (dotyczy to głównie linii niskich i średnich napięć).

Wymagania dotyczące bezpieczeństwa według obowiązującej normy są stworzone po to, aby budowa i utrzymanie linii nie powodowały niebezpiecznego ryzyka dla ludzi, którzy mogą znajdować się pod przewodami linii napowietrznej. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa w normie [30] zawierają zastrzeżenia co do podzespołów linii, a w szczególności konstrukcji wsporczych, które muszą być zaprojektowane tak, aby wytrzymywały obciążenia specjalne zdefiniowane w tej normie. Z warunkami bezpieczeństwa norma wiąże takie pojęcia jak: koordynacja nośności, dodatkowe okoliczności, obliczeniowy okres użytkowania, trwałość, zapewnienie jakości.

Linia napowietrzna z punktu widzenia mechaniki może być traktowana jako system wzajemnie powiązanych elementów, w którym wytrzymałość linii (wielkość obciążeń granicznych) jest zależna od wytrzymałości najsłabszego elementu. Bardzo ważnym problemem jest taka koordynacja wytrzymałości poszczególnych elementów (nośności), aby w warunkach awaryjnych pewne elementy (np. konstrukcje wsporcze lub przewody) pozostały nieuszkodzone (oczywiście możliwe to jest tylko z pewnym stopniem pewności – pewnym prawdopodobieństwem).

Dodatkowe okoliczności, które muszą być brane pod uwagę przy projektowaniu linii, to warunki atmosferyczne i środowiskowe oraz wymagania specjalne podane w normach krajowych NNA.

Podczas projektowania linii napowietrznych używa się pojęcia obliczeniowego okresu użytkowania linii – to jest takiego okresu, przez który linia napowietrzna powinna być użytkowana w celu spełnienia założonych funkcji bez konieczności większych napraw. Oznacza to, że w tym czasie będą spełnione warunki nośności

w szczególności dla konstrukcji wsporczych, łańcuchów izolatorów i przewodów linii, co powiązane jest z pojęciem trwałości elementów. Zwykle w procesie projektowania przyjmuje się średnio 50-letni okres użytkowania linii, choć czas ten waha się od 30 do 80 lat.

Norma [30] operuje również pojęciami stanów granicznych dla danej konstrukcji linii. Stany graniczne użytkowania linii mogą obejmować następujące elementy: odkształcenia lub przemieszczenia konstrukcji linii, które wpływają na jej pracę, w tym na zmniejszenie odstępów izolacyjnych, trwałe uszkodzenia konstrukcji (np. pęknięcia), które wpływają niekorzystnie na pracę bądź trwałość linii, oraz wibracje i drgania powodujące uszkodzenie elementów linii.

1.2. Charakterystyka stref klimatycznych do napowietrznych linii przesyłowych

Podczas obliczania elementów linii napowietrznych przy projektowaniu należy uwzględniać warunki klimatyczne terenów, przez które przebiega linia. Linia napowietrzna w porównaniu z liniami kablowymi odnosi się do obiektów otwartych i zawsze jest pod wpływem zmian parametrów atmosferycznych. Najistotniejszymi parametrami klimatycznymi, które wpływają na wszystkie elementy linii, są: wiatr i zmiana jego parametrów (prędkości, kierunku, porywów), temperatura powietrza, która zależy od pory roku i może zmieniać się w granicach od -40°C do $+40^{\circ}\text{C}$. Te temperatury przyjęto jako średnioważone. Wiadomo, że chwilowo wysoka temperatura może osiągać $42\div 45^{\circ}\text{C}$, a niska $(-30^{\circ}\text{C})\div(-45^{\circ}\text{C})$ zależnie od miejscowości. Oprócz wiatru i temperatury na linie wpływają: deszcz, śnieg, mgła i sadz. Tutaj ważnymi parametrami deszczu są jego intensywność, gęstość, wymiary kropli, nachylenie strumienia deszczu i inne. Do parametrów śniegu zaliczamy mokry śnieg, suchy, mały, krupiasty, intensywne opady śniegu, śnieg z deszczem. Wszystkie te parametry w pewien sposób wpływają na parametry linii napowietrznych (przewody, słupy, linki, poprzeczniki).

Zależnie od warunków klimatycznych powierzchnia każdego kraju podzielona jest na strefy dwóch rodzajów:

- strefy wiatrowe,
- strefy sadowe.

Na terenie Polski mamy trzy strefy wiatrowe: strefa I, strefa II, i strefa III. Strefa I obejmuje praktycznie całą Polskę, podczas gdy strefa II znajduje się w pasie brzegu Morza Bałtyckiego, a strefa III w górskich miejscowościach na granicach z Czechami i Słowacją. W strefie wiatrowej I prędkość wiatru jest mniejsza niż w strefie II i w strefie wiatrowej III. Na rysunku 1.2 pokazana jest mapa terenów Polski, na której strefa wiatrowa I jest niezakreskowana, natomiast strefa wiatrowa II jest zakreskowana przeciwnie niż strefa wiatrowa III (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Strefy klimatyczne; granice stref obciążeń wiatrem [10]

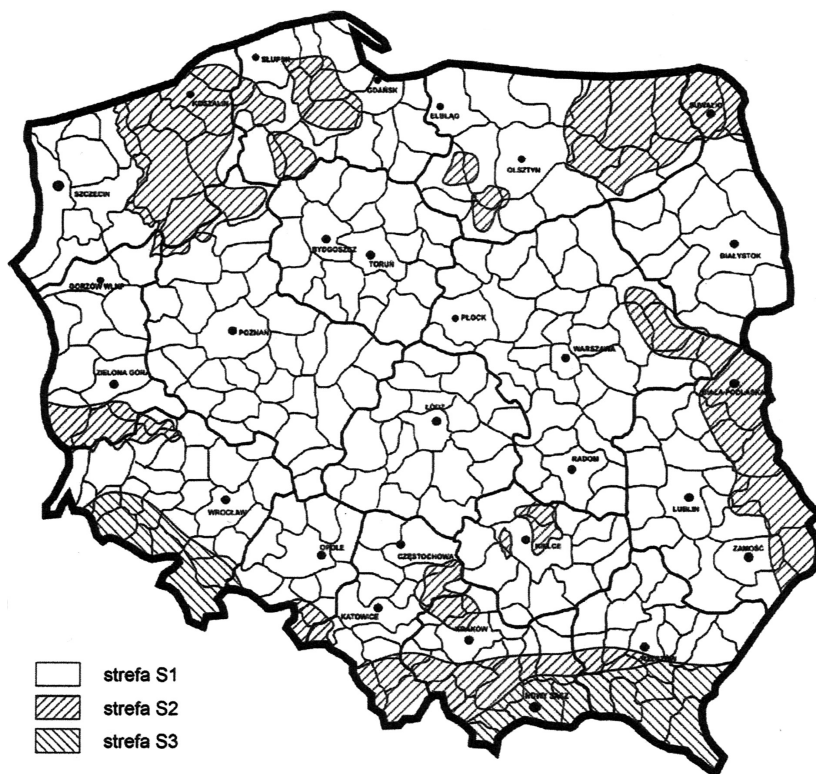
Tereny Polski są podzielone na cztery strefy obciążenia sadią, to jest S1, S2, S3 i S_{spec} . Na rysunku 1.3 pokazano mapę stref sadiowych na terenie kraju, które oznaczono poprzez różny sposób zakreskowania lub jego brak. Strefa specjalna S_{spec} na mapie nie jest wydzielona i ustalana jest przez projektanta.

Podsumowując obciążenie sadią, największa powierzchnia kraju odnosi się do strefy S1 (powierzchnia niezakreskowana), potem mamy dość dużą powierzchnię ze strefą S2. Strefa S3 znajduje się na południu kraju, blisko granicy z Czechami i Słowacją, to jest w górskiej części kraju, gdzie mamy opady w postaci mokrego śniegu.

W innych krajach świata sytuacja jest zwykle inna niż w Polsce, ponieważ kraje te mogą być położone pomiędzy morzami, znajdując się w strefie dużych i ciągłych strumieni wiatrów (Norwegia, Finlandia, Wielka Brytania, Australia). W tych krajach strefy są podzielone w inny sposób, choć parametry atmosferyczne są takie same jak w krajach europejskich.

Zgodnie z normą [EN 50341-3-22-2001] gęstość oblodzenia (sadi) należy przyjmować równą wartości $0,7 \text{ t/m}^3$. Obliczone obciążenia stanowią bazowe dane do określenia obciążeń konstrukcji wsporczych, przewodów, osprzętu oraz łańcuchów izolatorów.

Miejscowości, gdzie grubość lodu na przewodzie może osiągać wartość powyżej 20 mm, odnosimy do szczególnego przypadku d (średnica).



Rys. 1.3. Strefy klimatyczne; granice stref obciążeń sadyż [10]

Obliczanie linii napowietrznej III klasy z napięciem do 1 kV przeprowadza się dla normalnego układu obciążeń, natomiast w przypadku linii klasy I oraz II z uwzględnieniem kombinacji obciążeń spowodowanych oblodzeniem i wiatrem norma [EN 50341-3-22]:

- stan normalny, kiedy przewody i linki nie są przerwane;
- stan awaryjny, gdy część przewodów albo linek jest zerwana;
- na zbliżenie się przewodów do elementów konstrukcji linii i budowli:
 - przy napięciu roboczym,
 - przy przepięciach wewnętrznych i atmosferycznych.

Zgodnie z normą [EN 50341-3-22] wyróżniamy następujące przypadki atmosferyczne podczas występowania wiatru i oblodzenia (sadyż):

- duże obciążenie oblodzeniowe, które równa się $\psi_1 \cdot Q_{1K}$ w kombinacji z umiarkowanym naporem wiatru $\psi_W \cdot Q_{WK}$;
- umiarkowane obciążenie sadyż $\psi_1 \cdot Q_{1K}$ w kombinacji z dużym obciążeniem od naporu wiatru $\psi_W \cdot Q_{WK}$.

Podczas doboru parametrów przewodów do linii napowietrznych bardzo ważne jest uwzględnienie układu obciążeń, który wpływa na naciąg przewodu. Najbardziej spotykane układy obciążeń, uwzględniające naciąg przewodów, podane w normie [EN 50341-3-22], to układy normalne, które:

- obejmują przy temperaturze -5° ciężar własny przewodów oraz 50% charakterystycznego obciążenia oblodzeniem (sadzią);
- obejmują przy temperaturze -5° ciężar własny przewodów oraz charakterystyczne obciążenia oblodzeniem;
- obejmują przy temperaturze -25° ciężar własny przewodów;
- obejmują przy temperaturze $+10^{\circ}$ ciężar własny przewodów oraz maksymalne obciążenie wiatrem;
- obejmują przy temperaturze $+40^{\circ}$ ciężar własny przewodów;
- obejmują przy temperaturze -5° ciężar własny przewodów ($\psi_G = 1,0$) z dużym obciążeniem oblodzeniem (sadzią) ($\psi_I = 1,0$) oraz umiarkowane obciążenie wiatrem ($\psi_W = 0,4$);
- obejmują przy temperaturze -5° ciężar własny przewodów ($\psi_G = 1,0$) z umiarkowanym obciążeniem sadzią ($\psi_I = 0,35$) oraz dużym obciążeniem wiatrem ($\psi_W = 0,7$).

W tabelicy 1.2 podano charakterystyczne obciążenia oblodzeniem na jednostkę długości przewodu [10] w zależności od stref obciążenia sadzią i średnicy przewodów. Intensywność odkładania sadzi na przewodach i linkach zależy od strefy obciążenia oblodzeniem, a w szczególności od intensywności opadów śniegu i deszczu, temperatury i prędkości wiatru.

Tabela 1.2

Charakterystyczne obciążenia oblodzeniem na jednostkę długości przewodu [10]

Strefa obciążenia oblodzeniem (sadzią)	Charakterystyczne obciążenie oblodzeniem (sadzią) [N/m]
S1	$4,1 + 0,41 d$ lub wg specyfikacji projektowej
S2	$8,2 + 0,82 d$ lub wg specyfikacji projektowej
S3	$16,4 + 0,82 d$ lub wg specyfikacji projektowej
S_{spec}	Wyłącznie według danych meteorologicznych dla terenu, przez który przebiega linia, lub według specyfikacji projektowej

gdzie: d – średnica przewodu w [mm].

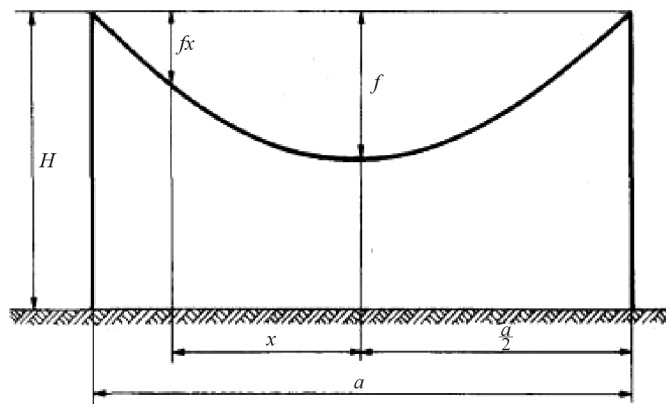
Powyższe dane podano na podstawie normy [10].

1.3. Linie napowietrzne – główne pojęcia i definicje

Linie napowietrzne składają się z różnych elementów konstrukcyjnych, które charakteryzują się parametrami: geometrycznymi, elektrycznymi i mechanicznymi, powiązanych ze szczegółami trasy, budowy i warunkami pracy. Najważniejszymi elementami linii napowietrznych są przewody robocze i odgromowe, konstrukcje wsporcze, izolatory oraz osprzęt do mocowania przewodów, izolatorów i inne [3, 20].

Przewód linii napowietrznej (przewód) – element służący do przekazywania energii elektrycznej na odpowiednią odległość. Przewody są zawieszone na konstrukcjach wsporczych, które znajdują się w pewnych odległościach na przęsłach.

Przęsło linii napowietrznych – część linii zawarta między sąsiednimi konstrukcjami wsporczymi.

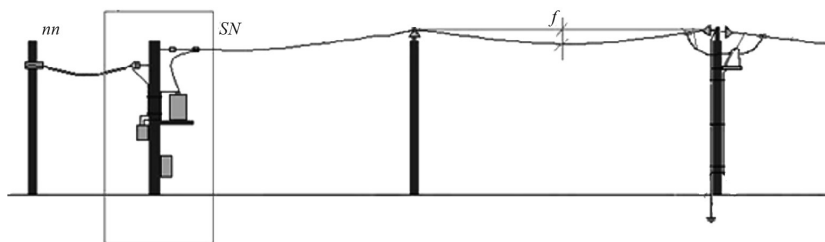


Rys. 1.4. Przęsło linii napowietrznych

Przęsła linii na trasie zależne są od ukształtowania terenu, na którym zlokalizowana jest dana linia napowietrzna, warunków klimatycznych i od usytuowania obiektów już istniejących, na tej podstawie rozróżnia się:

- przęsło nominalne,
- przęsło wiatrowe,
- przęsło ciężarowe,
- przęsło gabarytowe,
- przęsło specjalne,
- przęsło skrzyżowaniowe,
- podprzęsło.

Każde przęsło linii napowietrznej charakteryzuje się określoną rozpiętością zależnie od czynników zewnętrznych.



Rys. 1.5. Elementy i parametry geometryczne linii napowietrznej

Rozpiętość przęsła – pozioma odległość między osiami sąsiednich konstrukcji wsporczych (rys. 1.5).

Rozpiętość przęsła nominalnego – rozpiętość przęsła, którą przyjmuje się do ustalenia w terenie płaskim podstawowej wysokości konstrukcji wsporczych tak, aby podtrzymywane przez nie przewody znajdowały się nad ziemią, w środku przęsła – w odległości nie mniejszej niż określona normą PN-E-05100-1.

Rozpiętość przęsła wiatrowego – rozpiętość przęsła, którą przyjmuje się do ustalenia obciążenia konstrukcji wsporczej przez parcie wiatru na przewody. Rozpiętość przęsła wiatrowego jest średnią arytmetyczną rozpiętości przęseł sąsiadujących na konstrukcji wsporczej.

Rozpiętość przęsła ciężarowego – rozpiętość przęsła, którą przyjmuje się do ustalenia obciążenia pionowego konstrukcji wsporczej, izolacji i przewodów.

Rozpiętość przęsła gabarytowego – rozpiętość przęsła, którą przyjmuje się do ustalenia odległości między przewodami i przewodów roboczych od konstrukcji słupa.

Rozpiętość przęsła specjalnego – rozpiętość przęsła większa co najmniej o 100% od rozpiętości przęsła nominalnego lub rozpiętość przęsła ograniczonego słupami o wysokości większej o 100% od wysokości słupów ograniczających przęsło o rozpiętości przęsła nominalnego, w terenie płaskim bez skrzyżowań.

Rozpiętość przęsła skrzyżowaniowego – odległość między osiami słupów ograniczających przęsło, w którym linia krzyżuje inny obiekt.

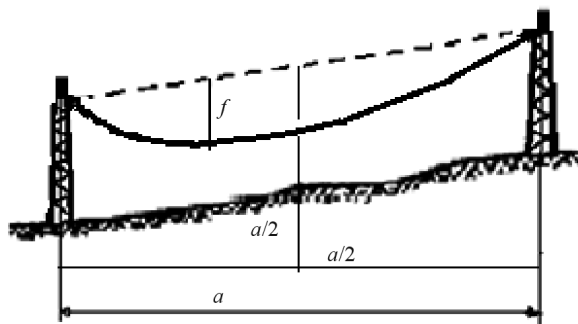
Rozpiętość podprzęsła – odległość między odstępnikami wiązki przewodowej lub osiami ich zestawów na wiązkach przewodowych.

Odcinek skrzyżowaniowy – część linii ograniczona słupami mocnymi, obejmująca jedno lub kilka przęseł, w której przynajmniej jedno przęsło jest przęsłem skrzyżowaniowym.

Przylącze – część linii zasilającej odbiorcę energii elektrycznej, ograniczona z jednej strony słupem linii, a z drugiej strony konstrukcją znajdującą się na zasilanym obiekcie, do której to konstrukcji są zamocowane końce przewodów dochodzących od linii.

W zależności od wartości rozpiętości przęsła, jego konstrukcji oraz parametrów geometrycznych, przewód linii pod ciężarem własnym tworzy odpowiedni zwis.

Zwis przewodu – odległość pionowa między przewodem a prostą łączącą punkty zawieszenia przewodu, w środku rozpiętości przęsła (rys. 1.4).



Rys. 1.6. Schemat przęsła nachylonego linii napowietrznej

Przewody linii napowietrznej są zawieszone nad powierzchnią ziemi na konstrukcji wsporczej, która przeznaczona jest do podtrzymywania przewodów na pewnej wysokości nad ziemią.

Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych – słupy przeznaczone do zawieszania przewodów na określonej wysokości nad powierzchnią ziemi.

Zależnie od stanów pracy przewodów i warunków atmosferycznych rozróżnia się następujące wartości zwisów:

- **największy zwis normalny** – największy z następujących zwisów przewodów:
 - a) zwis występujący przy obciążeniu przewodu sadzią normalną, przy temperaturze przewodu -5°C i przy bezwietrznej pogodzie – uwzględniany w każdej linii napowietrznej,
 - b) zwis występujący przy temperaturze granicznej roboczej przewodu roboczego $+40^{\circ}\text{C}$ – uwzględniany w linii napowietrznej o napięciu niższym niż 110 kV,
 - c) zwis przewodu występujący przy roboczej temperaturze granicznej przewodu roboczego ustalonej przy projektowaniu linii napowietrznej o napięciu roboczym 110 kV i wyższym;
- **zwis katastrofalny** (f_k) – zwis występujący przy obciążeniu przewodu sadzią katastrofalną przy temperaturze przewodu -5°C i bezwietrznej pogodzie.

Sadź – osad śniegu, szronu lub lodu występujący na przewodach linii napowietrznych w sprzyjających temu zjawisku warunkach meteorologicznych. W obliczeniach przyjmuje się, że sadź jest rozłożona równomiernie na całej długości przewodu i ma określony ciężar (G_s), wyrażony w niutonach na metr długości przewodu; rozróżnia się sadź normalną i sadź katastrofalną (norma [10]).

Największe dopuszczalne naprężenie przewodów (σ_d) – naprężenie, które nie może być przekroczone w żadnym punkcie zawieszonego przewodu, zgodnie z normą rozróżnia się największe dopuszczalne naprężenia przewodu:

- a) normalne σ_{dn} – które może występować w przewodzie o temperaturze -25°C bez sadzi lub o temperaturze przewodu -5°C z sadią normalną,
- b) zmniejszone σ_{dz} – które może występować w przewodzie o temperaturze -25°C bez sadzi lub o temperaturze przewodu -5°C z sadią normalną, w sekcjach odciągowych, w których zastosowane obostrzenie wymaga zwiększenia mechanicznej pewności przewodu,
- c) normalne katastrofalne σ_{dnk} – które może występować w przewodzie o temperaturze -5°C i sadi katastrofalnej, gdy przewód jest zawieszony z naprężeniem normalnym,
- d) zmniejszone katastrofalne σ_{dzk} – które może występować w przewodzie o temperaturze -5°C i sadi katastrofalnej, gdy przewód jest zawieszony z naprężeniem zmniejszonym.

UWAGA: W warunkach krajowych pomija się wpływ wiatru na wielkość naprężenia w przewodzie. Największe dopuszczalne naprężenie przewodów podano w normie [10].

1.4. Przewody linii napowietrznych – klasyfikacja, budowa i parametry

Jednym z najważniejszych elementów linii napowietrznej są przewody przeznaczone do przesyłu prądu.

Przewód linii (przewód) – element służący do przekazywania energii elektrycznej na odpowiednią odległość. W zależności od wypełnianych funkcji, przewody linii napowietrznych dzielą się na:

Przewód roboczy – przewód służący do przesyłu energii elektrycznej, nieuziemiający, który może być przewodem pojedynczym lub wiązką przewodów, składającą się z dwóch lub więcej przewodów pojedynczych (przewód ochronno-neutralny uważa się za przewód roboczy);

Przewód fazowy – przewód roboczy linii napowietrznej prądu przemiennego, połączony z określoną fazą systemu przesyłowego i przeznaczony do przesyłu prądu fazowego do odbiorników;

Przewód zabezpieczający – zabezpiecza przewód roboczy linii przed opadnięciem. Przewód zabezpieczający jest to przewód dodatkowy, wykonany z tego samego materiału i o tym samym przekroju co zabezpieczany przewód roboczy, nie odciążający zabezpieczanego przewodu roboczego dopóki ten się nie zerwie, przymocowany jest do zabezpieczanego przewodu roboczego;

Przewód odgromowy – przewód uziemiony chroniący przewody robocze przed bezpośrednimi wyładowaniami atmosferycznymi; może być wykorzystany również do innych celów, jak zamykanie obwodu zwarcia doziemnego, ograniczanie oddziaływania zwarć na urządzenia telekomunikacji, prowadzenia światłowodów itp.;

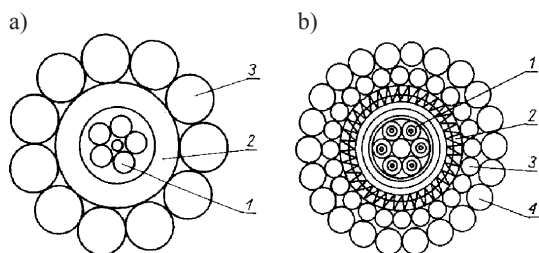
Przewód uziemiający – przewód linii napowietrznej łączący element wymagający uziemienia z uziomem lub uziemionym słupem; np. uziemienie przewodu odgromowego lub zerowego;

Przewód ekranujący – przewód uziemiony służący do zmniejszania natężenia pola elektrycznego pochodzącego od przewodów roboczych. Przewód ekranujący zawieszany się między przewodami roboczymi a ziemią lub pomiędzy przewodami roboczymi i chronionymi obiektami.

Na słupach niektórych konstrukcji (narożny, odporowy, odporowo-narożny, krańcowy), na których występują połączenia końcowe przewodów lub położenie przewodu znajduje się poza elementami konstrukcji wsporczych, stosuje się mocowania:

- a) złączkami w dwóch punktach znajdujących się po przeciwnych stronach izolatora stojącego, podtrzymującego przewód roboczy – w przypadku zawieszenia przelotowego,
- b) złączkami z jednej strony izolatora, do którego mocowany jest zabezpieczony przewód roboczy – w przypadku zawieszenia odciągowego.

Przewody robocze linii napowietrznych mogą być wykonywane w postaci drutów, linek lub linek z rdzeniem nośnym, natomiast przewody odgromowe są wykonywane obecnie jako linki stalowe z wkomponowanym w spłot światłowodem lub linki stalowe z wkomponowanym światłowodem pokryte warstwą aluminium (warstwą z drutów aluminiowych skręconą prawoskrętnie). Parametry tych przewodów nie są precyzyjnie określone przez normę [31]. Jedynymi narzuconymi przez nią ograniczeniami jest zalecenie, aby dla przewodów aluminiowych o przekroju większym od 50 mm^2 średnica drutów okrągłych w warstwie zewnętrznej nie była mniejsza od 2,33 mm, a specyfikacje materiałów użytych do produkcji przewodów spełniały warunki szczegółowych norm i NNA. Specyfikacja produktu musi być uzgodniona przez nabywcę oraz dostawcę i być zgodna z projektem. Wymagania te są powiązane z charakterystykami fizyczno-mechanicznymi, tj. współczynnikiem wydłużenia liniowego, naprężeniem dopuszczalnym mechanicznym materiałów przewodów i innymi.



Rys. 1.7. Konstrukcja przewodów wielodrutowych odgromowych

Oznaczenia do rys. 1.7: (1.7.a) 1 – kabel światłowodowy z pięcioma włóknami, 2 – powłoka aluminiowa gładka, 3 – warstwa drutów aluminiowych; (1.7.b) 1 – kabel światłowodowy z sześcioma włóknami, 2 – powłoka aluminiowa, 3 – warstwa drutów stalowych ocynkowanych, 4 – warstwa drutów aluminiowych

Gołe przewody elektryczne, stalowo-aluminiowe, przeznaczone do budowy linii napowietrznych wysokich i najwyższych napięć wykonywane są zgodnie z wymogami polskich norm [32] lub [33] oraz norm zagranicznych, takich jak np.: [34–37]. Norma [33] wskazuje, że możliwe są wykonania w klasie (stref wiatrowych i sadytowych) W1/S1, W2/S2 i innych (wyższe parametry mechaniczne). Polskie Sieci Elektroenergetyczne PSE jako główny odbiorca przewodów dla sieci NN i WN opracował w 2008 r. standardową specyfikację techniczną dla przewodów używanych w sieciach przesyłowych (w tablicy 1.3 pokazano przykładowe wymagania dla przewodu 350 mm²), a także określił rodzaj i liczbę prób, którym muszą zostać poddane przewody przed dopuszczeniem do użytkowania.

Tablica 1.3

Parametry konstrukcyjne przewodów stalowo-aluminiowych

Lp.	Parametry techniczne	Jednostka	Wymagana wartość
1	Liczba drutów stalowych	szt.	7
2	Średnica znamionowa drutów stalowych	mm	2,9
3	Średnica obliczeniowa rdzenia stalowego	mm	8,7
4	Przekrój obliczeniowy rdzenia stalowego	mm ²	46,24
5	Liczba drutów aluminiowych	szt.	54
6	Średnica znamionowa drutów aluminiowych	mm	2,9
7	Przekrój obliczeniowy części aluminiowej	mm ²	356,7
8	Średnica obliczeniowa całego przewodu	mm	26,1
9	Przekrój obliczeniowy całego przewodu	mm ²	402,9
10	Stosunek przekroju obliczeniowego aluminium do przekroju obliczeniowego rdzenia		7,71
11	Obliczeniowa siła zrywająca przewód	kN	> 113
12	Rezystancja obliczeniowa 1 km przewodu w temperaturze 20°C	Ohm/km	< 0,0821
13	Masa obliczeniowa rdzenia	kg/km	370
14	Masa obliczeniowa części aluminiowej	kg/km	982
15	Masa obliczeniowa całego przewodu [bez smaru]	kg/km	1352

W tablicy 1.4 podano normy, którym powinny odpowiadać konstrukcje najczęściej używanych przewodów do budowy linii napowietrznych.

Warunki pracy przewodów:

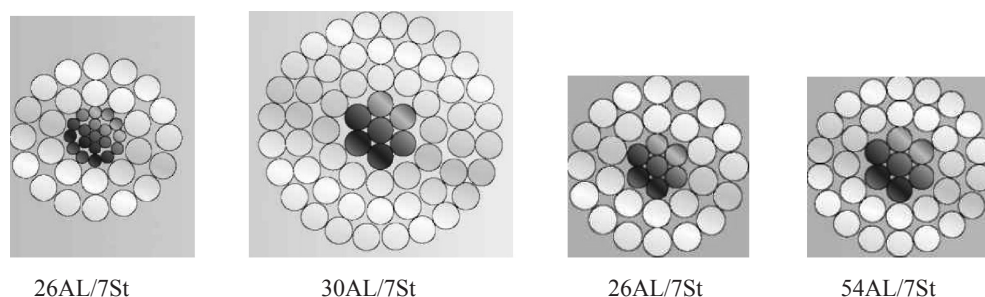
- maksymalna temperatura otoczenia linii napowietrznych +40°C;
- minimalna temperatura otoczenia linii napowietrznych –35°C;
- graniczna ustalona temperatura pracy przewodu +80°C;
- graniczna temperatura przewodu przy zwarciu +200°C.

Normy, które powinien spełniać dostarczany przewód

PN-EN 50182:2002	Przewody do linii napowietrznych – Przewody z drutów okrągłych skręconych współosiowo
PN-EN 50189:2002	Przewody do linii napowietrznych – Przewody stalowe ocynkowane
PN-EN 50326:2003	Przewody do linii napowietrznych – Właściwości smarów
PN-EN 60889:2002	Przewody aluminiowe do linii napowietrznych ciągnięte na zimno

Zgodnie z wymaganiami normy [31] producent przewodu powinien przedstawić obliczenia znamionowej wytrzymałości przewodu na rozciąganie, a dostawca przewodów powinien wykonać badania typu, przy czym każda dostarczona partia przewodu może być powtórnie zbadana w obecności przedstawicieli PSE.

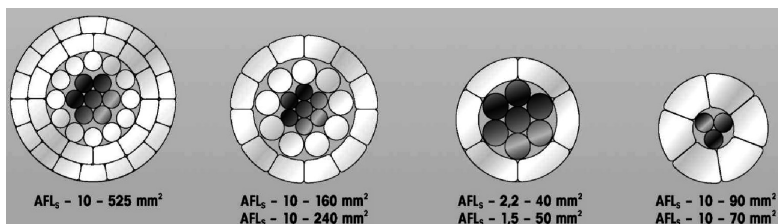
Przewody stalowo-aluminiowe składają się zwykle z drutów aluminiowych o zawartości maksymalnej Al ok. 99,5% oraz rdzenia wykonanego z drutu lub drutów stalowych ocynkowanych (do wyboru w klasie S1, S2 lub S3). Klasa rdzenia przewodu decyduje o jego wytrzymałości na rozciąganie oraz o jego rozszerzalności cieplnej, co ma duże znaczenie przy obliczaniu zwisów przewodów. Druty aluminiowe skręcone wokół rdzenia tworzą jedną warstwę lub kilka warstw zewnętrznych przewodu. Sąsiednie warstwy w stosunku do siebie skręcane są w przeciwnych kierunkach w taki sposób, że kierunek skrętu zewnętrznej warstwy jest „prawy”.



Rys. 1.8. Przekroje przewodów stalowo-aluminiowych

Elektryczne przewody gołe stalowo-aluminiowe segmentowe (rys. 1.9) wielodrutowe przeznaczone są do linii napowietrznych. One zastępują tradycyjne przewody stalowo-aluminiowe, pozwalając na zmniejszenie średnicy przewodu przy jednoczesnym zachowaniu własności elektrycznych i mechanicznych przewodu.

Elektryczne przewody gołe aluminiowe przeznaczone są do budowy linii napowietrznych o napięciu do 30 kV. Przewody wykonywane są zazwyczaj z aluminium ciągniętego, a następnie skręcanego przy zawartości aluminium ok. Al 99,5%.



Rys. 1.9. Przekroje przewodów segmentowych

Elektryczne przewody aluminiowe gołe z aluminium stopowego (Al-Mg-Si) przeznaczone są do budowy linii napowietrznych w zakresie niskich, średnich i wysokich napięć. Odpowiednie właściwości drutów Al-Mg-Si są osiągnięte przez połączenie obróbki plastycznej i cieplnej. W tabelicy 1.5 podano parametry robocze przewodów stalowo-aluminiowych.

Tabela 1.5

Parametry przewodów stalowo-aluminiowych

Przekrój przewodu	$\frac{S_{AL}}{S_{Fe}}$	Przekrój obliczeniowy przewodu	Średnica zewnętrzna	Ciężar przewodu	Obliczeniowa siła zrywająca przewód	Rezystancja przewodu w 20°C	Standardowa dostawa		
							Długość odcinka na bębnie	Ilość odcinków na bębnie	Masa netto przewodu na bębnie
mm ²	Mm	mm ²	mm	kg/km	kN	$\frac{\Omega}{\text{km}}$	m	–	kg
16	7/1,71	16,07	5,13	44,3	2,720	1,822	5500	2	490
25	7/2,13	24,94	6,39	68,7	4,060	1,174	3600	2	500
35	7/2,52	34,91	7,56	96,1	5,430	0,8358	4500	2	865
50	7/3,01	49,48	9,00	136	7,370	0,5917	3200	2	870
70	19/2,17	70,27	10,85	194	11,450	0,4166	4400	1	850
95	19/2,52	94,76	12,60	261	14,740	0,3090	3300	1	860
120	19/2,80	117,00	14,00	322	17,770	0,2502	3800	1	1220
150	37/2,26	148,40	15,82	409	23,640	0,1973	2900	1	1190
185	37/2,52	184,50	17,64	508	28,700	0,1586	2400	1	1220
240	37/2,88	241,00	20,16	664	36,360	0,1215	2800	1	1860
300	61/2,50	299,40	22,50	825	45,190	1,0977	2300	1	1900

Przewody linii napowietrznych są zawieszone na konstrukcjach wsporczych nad powierzchnią ziemi na określonej wysokości, wartość której zależy od napięcia roboczego linii. Zawieszenie przewodu jest to zamocowanie przewodu na konstrukcji wsporczej i bywa: przelotowe, odciągowe, przelotowo-odciągowe, bezpieczne przelotowe na dwóch lub jednym izolatorze oraz na łańcuchu izolatorów.

Zawieszenie przelotowe przewodu podtrzymuje go, gdy siły naciągu przewodu są z obu stron zawieszenia jednakowe lub gdy różnica tych sił z obu stron zawieszenia nie przekracza dopuszczalnej wartości podanej w normie.

Zawieszenie odciągowe przewodu roboczego czy odgromowego przenosi określone wartości naciągu w przeszłe przez izolatory lub łańcuch izolatorów.

Zawieszenie przelotowo-odciągowe przewodu podtrzymuje przewód roboczy w normalnych warunkach pracy oraz przenosi określoną wielkość naciągu w przeszłe obostrzonym, gdy przewód roboczy zerwie się w przeszłe sąsiednim.

Zawieszenie bezpieczne przewodu na izolatorach stojących wymaga zastosowania przewodu zabezpieczającego.

Zawieszenie bezpieczne przewodu na dwóch izolatorach stojących wymaga, aby przewód zabezpieczający był zamocowany do dodatkowego izolatora, znajdującego się obok lub powyżej izolatora głównego, na którym jest zamocowany zabezpieczany przewód roboczy.

Zawieszenie bezpieczne przelotowe na jednym izolatorze jest to zawieszenie przewodu na izolatorze stojącym, tak aby przewód zabezpieczający oraz zabezpieczany przewód roboczy był zamocowany do tego samego izolatora po przeciwnych stronach.

Zawieszenie bezpieczne przewodu na łańcuchu izolatorowym jest zawieszeniem zapobiegającym opadnięciu przewodu roboczego, w przypadku gdy zerwie się jeden rząd łańcucha izolatorowego. Polega ono na zastosowaniu wielorzędkowego łańcucha izolatorowego o liczbie rzędów większej o jeden niż wymagana przy zawieszeniu normalnym przewodu na jednorzędowym lub dwurzędowym łańcuchu izolatorowym (zawieszenie przewodu na trzech lub więcej rzędach izolatorów przyjmuje się za odpowiadające warunkowi bezpiecznego zawieszenia i nie wymaga stosowania dodatkowego rzędu izolatorów).

1.5. Klasyfikacja słupów linii napowietrznych i charakterystyka warunków pracy

Słupy linii napowietrznych są konstrukcjami wsporczymi mającymi na celu utrzymywanie przewodów linii napowietrznych w odpowiedniej odległości od siebie oraz w odpowiedniej odległości od ziemi. Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych obejmują słupy i wsporniki, przy czym te ostatnie są mocowane do innych budowli na liniach niskiego napięcia.

Wymiary słupów są podyktowane szeregiem czynników, do których należą: wysokość napięcia znamionowego linii napowietrznej, ukształtowanie terenu, strefa klimatyczna i wymagana minimalna wysokość zawieszenia przewodów nad: trakcjami kolejowymi, rzekami, drogami, powierzchnią gruntu oraz liczba równoległych torów linii na słupie (tory te mogą być torami o tych samych lub różnych napięciach). Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych powinny być zaprojektowane z uwzględnieniem obciążeń statycznych i dynamicznych, takich jak: naprężenia pochodzące od przewodów fazowych i odgromowych zmieniające się wraz z temperaturą przewodu, parcie wiatru, zmiany sił działających na przewody pokryte sadzią (w przypadku sadzi zmieniają się nie tylko naprężenia wynikające z ciężaru przewodu, ale także siły związane z parciem wiatru, wibracją i kołysaniem). Producent słupa w swojej specyfikacji podaje rozpiętość przęsła ciężarowego, jak również rozpiętość przęsła wiatrowego dla danego słupa i dla danego przewodu lub wiązki przewodów na słupie. Należy przy tym podkreślić, że w terenach górskich przęsło ciężarowe może być dłuższe od przęsła wiatrowego, które jest zazwyczaj określane jako suma długości połówek przęseł wychodzących z danego słupa w dwóch kierunkach. Dane te pozwalają w procesie projektowania linii dla danej trasy określić położenie i typ słupów.

W związku z tym, że w liniach napowietrznych głównym materiałem izolacyjnym jest powietrze, przy projektowaniu linii należy brać pod uwagę wytrzymałość elektryczną powietrza oraz określić amplitudę drgań swobodnych przewodów. Konstrukcja słupa w większości przypadków składa się z fundamentu, trzonu i głowicy. O wysokości trzonu decyduje wysokość zamocowania linii nad poziomem gruntu oraz długość ewentualnego przęsła linii pomiędzy słupami. Głowica słupa musi być tak zbudowana, aby zapewnić rozmieszczenie wszystkich przewodów w odpowiedniej odległości od siebie. Minimalna odległość pomiędzy przewodami linii jest zależna od wartości napięcia roboczego, a to z kolei wymusza rozmiar głowicy słupa.

W zależności od zadania, jakie spełniają słupy w linii, możemy je podzielić w następujący sposób:

1. Słupy przelotowe (P) – przeznaczone do podtrzymywania przewodów bez przejmowania naciągu lub przejmujące nieznaczny naciąg, są ustawione na prostym szlaku lub na załomie nieprzekraczającym 5° .
2. Słupy narożne (N) – przeznaczone do podtrzymywania przewodów i przejmowania wypadkowej siły naciągu, wynikającej z kąta załomu, na którym jest ustawiony.
3. Słupy odporowe (O) – przeznaczone do przejmowania siły naciągu i do zmniejszania zakłóceń mechanicznych, ustawiane są na szlaku prostym lub na załomie nieprzekraczającym 5° . Ustawia się je w odległościach nie większych niż 3 km, a ich wytrzymałość wynosi $2/3$ naciągu przewodów z jednej strony słupa.
4. Słupy krańcowe (K) – przeznaczone do przejmowania siły naciągu jednostronnego przewodów, są zwykle ustawione na zakończeniu linii.

5. Słupy odporowo-narożne (ON) – przeznaczone do przejmowania siły naciągu i zmniejszania zakłóceń mechanicznych oraz podtrzymywania przewodów i przejmowania wypadkowej siły naciągu.
6. Słupy rozgałęźne (R) – są ustawione w punktach rozgałęzienia linii i w zależności od spełnianej funkcji łączą w sobie cechy różnych słupów, na przykład rozgałęźny przelotowo-krańcowy jest dla linii głównej słupem przelotowym, a dla odgałęzienia – krańcowym.

Rodzaj słupa zależy od:

- napięcia znamionowego,
- typu linii (jedno- lub dwutorowa),
- rozpiętości przęsła,
- rodzaju konstrukcji wsporczych (materiał),
- rodzaju zastosowanych izolatorów.

W liniach o napięciu do 1 kV przewody rozmieszczamy na izolatorach, które mocuje się bezpośrednio do słupa na poprzecznikach.

Zależnie od materiału, z którego wyprodukowany jest słup, słupy można podzielić na:

- drewniane,
- żelbetonowe,
- stalowe.

W wielu krajach, bogatych w obszary zalesione, często są używane do budowy linii napowietrznych o napięciu do 1 kV, a w niektórych przypadkach dla linii 6 kV czy 10 kV – słupy drewniane przesycane antyseptykiem w celu podwyższenia odporności na wilgoć. Słupy te są mocowane na szczudłach, dlatego czas eksploatacji takich słupów sięga kilkunastu lat. W ostatnich latach słupy drewniane zostały w większości krajów zamienione na żelbetonowe, stosowane nawet dla linii do 1 kV, a wszędzie używane dla linii o napięciu średnim, a nawet 110 kV, jako słupy przelotowe.

W liniach napowietrznych o napięciu 220 kV i wyższym są stosowane słupy stalowe o konstrukcji zwykłej i wzmocnionej. Dla posadowienia wymienionych słupów wymagana jest budowa fundamentów, dlatego są one najbardziej kosztowne, jednak z punktu widzenia okresu eksploatacji – najwygodniejsze.

1.6. Izolatory i osprzęt w liniach napowietrznych

Główne zadanie izolatorów polega na tym, żeby niezawodnie izolować przewody linii napowietrznych od konstrukcji wsporczych i pomiędzy sobą. Oprócz izolowania izolatory muszą wytrzymywać siły naciągu przewodów oraz ich ciężar razem z obciążeniem sadią lub wiatrem. Materiał izolacyjny do produkcji izolatorów musi być: nienasiąkliwy, odporny na wpływy atmosferyczne oraz chemiczne, stłuczenia

i nagłe zmiany temperatury, musi mieć dużą rezystancję i wytrzymałość elektryczną oraz znaczną rezystancję powierzchniową. Wyżej wymienionym wymaganiom odpowiadają: porcelana elektrotechniczna, szkło (szczególnie hartowane) i niektóre tworzywa sztuczne [19].

W zależności od sposobu mocowania, izolatory można podzielić na: stojące, szpulowe i wiszące. W liniach napowietrznych o napięciu do 1 kV najczęściej stosowane są izolatory stojące z jednym albo dwoma rowkami – porcelanowe oraz szklane. Jednak na słupach, gdzie występują duże siły naciągu (słupy krańcowe lub narożne), najczęściej wykorzystywane są izolatory szpulowe. W liniach o napięciu powyżej 1 kV do 30 kV stosuje się izolatory stojące, a w liniach o napięciu powyżej 30 kV – izolatory wiszące. W liniach wysokiego napięcia i najwyższych napięć używane są łańcuchy izolatorów jednorzędowe lub wielorzędowe. Izolatory, wyprodukowane z tworzyw sztucznych są używane jako izolatory i osprzęt do przewodów.

Zasadniczo jako izolację należy stosować izolatory kompozytowe. W uzasadnionych przypadkach dopuszcza się stosowanie izolatorów porcelanowych.

Droga upływu a_u – najkrótsza odległość między okuciami mierzona po powierzchni izolatora,

Droga przeskoku a_s – najkrótsza odległość w powietrzu między okuciami izolatora.

Droga przebicia a_{pb} – najkrótsza odległość w materiale izolacyjnym między okuciami izolatora.

Izolatory energetyczne są stosowane w elektroenergetyce do podwieszenia i izolowania elementów przewodzących. Izolacja ta zapewnia elementom linii napowietrznej niezawodną eksploatację.

Najczęściej spotykane izolatory w elektroenergetyce to:

- izolatory liniowe stojące,
- izolatory liniowe wiszące,
- izolatory stacyjne wsporcze,
- izolatory przepustowe.

Ze wszystkich wymienionych izolatorów w liniach napowietrznych są stosowane izolatory liniowe, które dzielą się na dwie grupy: stojące i wiszące. Izolatory stojące zawsze stosuje się dla linii o napięciu do 1 kV i niekiedy do linii napięcia 30 kV włącznie.

Izolatory liniowe stojące to rodzaj izolatorów stosowanych w liniach napowietrznych o napięciu od 1 kV do 30 kV. Główne ich obciążenie mechaniczne to ściskanie i zginanie, które uwzględnia się w czasie ich projektowania i doboru. Najczęściej spotykane typy izolatorów stojących to deltowe LSD (posiadają niezbyt korzystny kształt oraz są podatne na występowanie wyładowań niezupełnych), szerokokłosowe (w których szerszy kłosz górny jest bardziej niewrażliwy na przeskoki) i powszechnie stosowane izolatory pniowe LSP (posiadające znaczną odporność na uderzenia i dobrą wytrzymałość elektryczną przy zanieczyszczeniach).

Izolatory pniowe o długości pnia co najmniej trzy razy większej od średnicy nazywane są *izolatorami długopniowymi*. W przypadku gdy wewnątrz izolatora pniowego nie zawiera szczeliny powietrznej (jest pełne), mówimy o *izolatorach pełnopniowych*.

Izolatory liniowe wiszące to rodzaj izolatorów stosowanych w liniach elektroenergetycznych średniego napięcia, a głównie wysokiego i najwyższego napięcia, przeznaczone są do przejmowania sił rozciągających pochodzących od podwieszonego przewodu. Najczęściej spotykane izolatory wiszące są typu łańcuchowego.

Obliczeniowymi obciążeniami izolatorów stojących przyjmuje się siły zginające. Izolatory stojące wyprodukowane z porcelany używane są również jako wyposażenie słupów w liniach napowietrznych o napięciu do 30 kV. Najważniejszymi parametrami elektrycznymi są tu wartości napięcia pochodzące od wyładowań piorunowych oraz wyładowań wewnętrznych.

Podczas eksploatacji izolatory znajdują się jednocześnie pod obciążeniem elektrycznym i mechanicznym, dlatego ich badania przeprowadza się przy doprowadzaniu 75–80% wartości napięcia przebicia suchego izolatora przy liniowym podwyższaniu obciążenia mechanicznego. Obciążenie mechaniczne, przy którym izolator jest przebity, nazywa się obciążeniem elektromechanicznym rujnującym (przebijającym).

Badania charakterystyk izolatorów w strefach z opadami przemysłowymi wykazały, że głównym czynnikiem określającym niezawodność izolacji w warunkach zabrudzeń jest nominalna długość drogi upływu prądu po powierzchni izolatora przy napięciu o wartości 1 kV.

Do oznaczania izolatorów dla linii napowietrznych w elektroenergetyce stosuje się symbole:

- L – izolatory liniowe,
- S – izolatory stojące,
- W – izolatory wsporcze,
- K – izolatory kołpakowe,
- G – izolatory odciągowe,
- Z – izolatory przeciw zabrudzeniowe,
- D – izolatory o konstrukcji w kształcie litery delta (deltowe),
- P – izolatory o konstrukcji pniowej (nieprzebijalne).

Na słupach linii wysokich i średnich napięć najczęściej spotykane są łańcuchy izolatorów, których struktura uzależniona jest od wielu czynników: wysokości napięcia linii, rodzaju obciążeń oddziałujących na słup, strefy zabrudzeniowej itp.

Najczęściej spotykanymi konfiguracjami łańcuchów izolatorów są:

- słupy przelotowe: łańcuchy wiszące ŁP i ŁP2 oraz ŁPV i ŁPV2,
- słupy mocne: łańcuchy odciągowe ŁO, ŁO2, ŁO3,
- IV strefa zabrudzeniowa na słupach przelotowych: specjalne łańcuchy ŁPA, ŁPY, ŁPX lub ŁPX2, (PN-E-06303).

Dla podwieszania przewodów na słupach mocnych w przypadku zmiany kierunku trasy używa się układu izolatorów wiszących typu V, pokazanego na rysunku 4.24, który pozwala ograniczyć zbliżenie przewodu do słupa.

Na świecie coraz częściej stosowane są też izolatory z kauczuku silikonowego ze względu na około 20% niższą cenę od porcelanowych, mniejszą wagę i większą odporność na uszkodzenia mechaniczne.

Do podwieszania przewodów linii napowietrznych o napięciu wysokim i najwyższym na słupach mocnych w miejscach skrzyżowań stosuje się łańcuchy izolatorów jedno- i wielorzędowe.

- jednorzędowy – złożony z jednego lub więcej izolatorów wiszących połączonych szeregowo,
- wielorzędowy – zespół dwóch lub więcej takich samych łańcuchów izolatorowych jednorzędowych połączonych równolegle,
- złożony – zespół dwóch lub więcej jednorzędowych albo wielorzędowych łańcuchów izolatorowych w układzie zapewniających określone właściwości elektryczne lub mechaniczne, np. układy typu V i Y.

Najczęściej na liniach o napięciu 110, 220 i 400 kV stosuje się izolatory długopniowe ceramiczne lub kompozytowe (LP) oraz izolatory kołpakowe szklane (LK). Izolatory te zawieszane są w typowych układach izolacyjnych.

Podstawowe parametry charakteryzujące izolatory elektroenergetyczne:

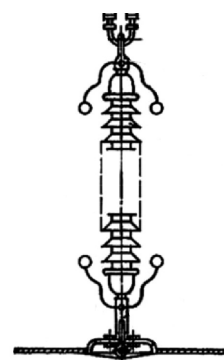
- napięcie znamionowe (kV),
- droga upływu (cm),
- droga przeskoku (cm),
- droga przebicia (cm),
- napięcie probiercze 50 Hz pod deszczem (kV),
- napięcie probiercze udarowe o kształcie 1,2/50 μ s (kV),
- napięcie przeskoku 50 Hz na sucho (kV),
- napięcie przeskoku 50 Hz pod deszczem (kV),
- obciążenie probiercze (kN),
- wytrzymałość mechaniczna (kN),
- wytrzymałość elektromechaniczna (kN).

Na rysunku 1.10 pokazano przewód linii 110 kV zawieszony na izolatorze wiszącym, na końcach którego przymocowane są różki przeznaczone do wyrównywania pola elektrycznego wzdłuż izolatora.

Izolatory powinny spełniać wymagania odpowiednich norm wyrobów, tzn. izolatory kompozytowe powinny być zgodne w szczególności z normą [26], a izolatory długopniowe porcelanowe być zgodne z normą [27, 28].

Osprzęt, który stosuje się do mocowania przewodów w łańcuchach izolatorów, można podzielić na pięć grup:

- zaciski służące do przymocowywania przewodów oraz linek dzieli się na podtrzymujące, podwieszające na słupach przelotowych i naciągających, stosowane także na słupach końcowych,



Rys. 1.10. Przykład zawieszania przewodu na izolatorze

- osprzęt łączący (szekle, okucia, orczyki, łączniki itp.) służący do łączenia zacisków z izolatorami, do podwieszania łańcuchów na słupach i złączania wielorzędowych łańcuchów pomiędzy sobą,
- sprzęt ochronny (pierścienie i rożki), przymocowane z obu końców łańcuchów i przeznaczone do rozłożenia natężenia pola elektrycznego pomiędzy oddzielnymi izolatorami łańcucha oraz do ochrony od przeskoków łuku i uszkodzenia oddzielnych izolatorów,
- osprzęt łączący, który stosuje się do łączenia przewodów i linek w przęsle, oraz do złączania przewodów na słupach końcowych,
- odstępniki, stosowane do mocowania przewodów wiązkowych i zapewnienia stałej odległości pomiędzy nimi.

W tablicy 1.6 został wyszczególniony osprzęt wraz z parametrami, który stosuje się do budowy linii napowietrznych.

Na rysunku 1.11. pokazano zacisk sztywny, którego wytrzymałość złącza osiąga 30–90% naprężenia granicznego przewodów aluminiowych i 20–30% naprężenia granicznego przewodów stalowych.

W przypadku takiego połączenia, przy oberwaniu przewodu i linki w jednym z przęseł, nie wyciągają się one zwykle z zacisku, a naprężenia pozostałych nieoberwanych przewodów i linek przenoszą się na słup przelotowy.

Zaciski wypuszczające przewód wypuszczają wraz z nim również łożysko na ziemię w przypadku odchylenia łańcucha izolatorów o kąt około 40° w przypadku oberwania przewodu w jednym z przęseł, a naprężenie od pozostałego nieoberwanego przewodu nie przekazuje się na słup przelotowy.

Zaciski o ograniczonej sile zamocowania przewodu i sile naciągu złącza od 6 do 8 kN stosuje się do przewodów linii o napięciu do 500 kV. W przypadku oberwania przewód wyskakuje z zacisku razem z łożyskiem, jednak nie spada na ziemię. Takie zaciski obniżają obciążenia podłużne przekazywane na słupy przelotowe w przypadku oberwania przewodu wiązkowego.

Naciągacz wielorolkowy (rys. 1.12) stosuje się do mocowania przewodów o przekroju powyżej 300 mm^2 i linek na słupach przelotowych długich przęseł, co pozwala na swobodne przemieszczanie się przewodów w przypadku powstania różnicy naciągów w sąsiednich przęsłach. Ochronę przewodów stalowo-aluminiowych zapewnia się przez zastosowanie specjalnych muf elastycznych, naciągniętych na odcinki przewodów, które przemieszczają się po rolkach.

Zaciski naciągające dzielą się na trzy typy: śrubowe, zaprasowywane i klinowe.

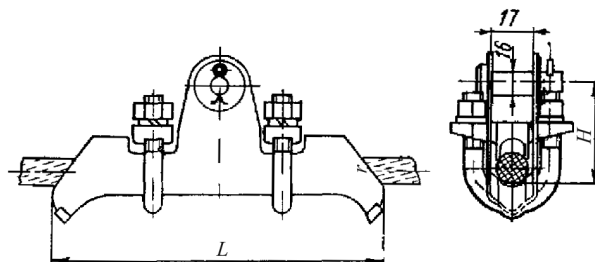
Zaciski naciągające śrubowe (rys. 1.13) stosuje się do montażu przewodów o przekroju od 35 mm^2 do 300 mm^2 . Pozwalają one naciągać przewody i linki podczas montażu i eksploatacji dla zapewnienia właściwych wymiarów geometrycznych oraz zwisów przewodów.

Zaciski zaprasowywane (rys. 1.14) stosuje się do montażu przewodów o przekroju powyżej 300 mm^2 . Główną wadą zacisków tego typu jest potrzeba rozcinania przewodu do jego zaprasowania, jednak nowoczesne zaciski przejściowe składają się z mufy do zaprasowania przewodu i części do podwieszania mufy na łańcuchu.

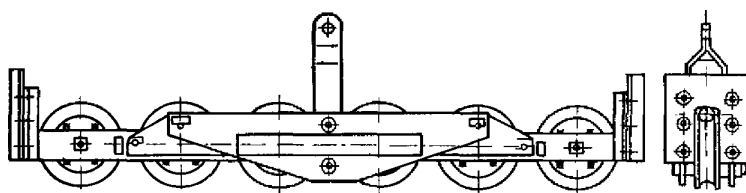
Tablica 1.6

Parametry osprzętu do linii napowietrznych

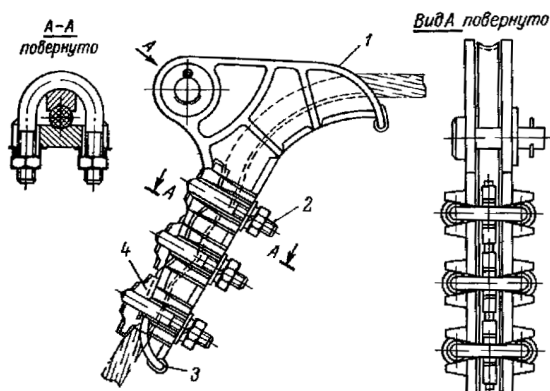
Pozycja	Numer katalogowy	Producent	Nazwa	Ilość, szt.	Długość, mm	Masa, kg	
1	41141A	BELOS	Wieszak śrubowo-kabłakowy	1	90	1,14	
2	35511		Łącznik dwuuchowy z uszami okrągłymi i owalnymi – skręconymi	1	130	1,6	
3	73094		Sworzeń śrubowy kompletny	2	47	0,22	
4	32010		Rożek ochronny	2	90	1,48	
5	0111112	ZAPEL	Izolator kompozytowy CS120C19L 550/3230	1	1270	4,7	
	Izolator kompozytowy CS120C19L 550/3230		1130		4,3		
	Izolator kompozytowy CS120C19L 550/3230		1270		4,0		
6	3532	BELOS	Łącznik dwuuchowy z uchem okrągłym – skręconym	1	70	0,6	
7	3817		Łącznik kabłakowy z kabłąkiem kwadratowym		89	1,17	
8	216961		Uchwyt przelotowy wahlwy ciągłowy		AFL-6-120mm ²	110	2,04
	AFL-6-185mm ²				135	3,04	
	AFL-6-240mm ²	165		4,4			



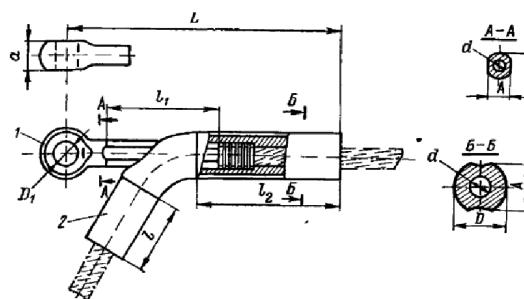
Rys. 1.11. Konstrukcja zacisku sztywnego



Rys. 1.12. Naciągacz wielorolkowy

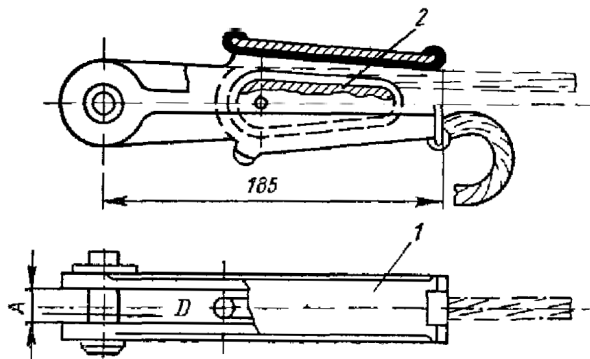


Rys. 1.13. Śrubowy zacisk naciągający



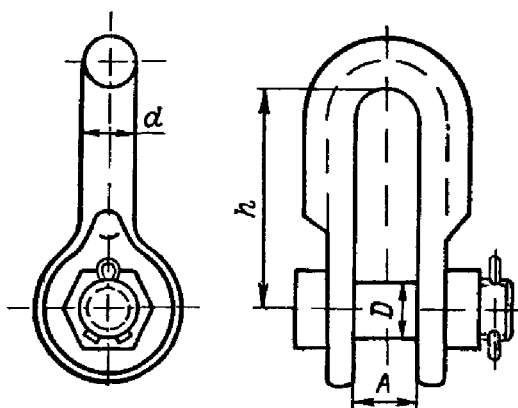
Rys. 1.14. Zacisk naciągający zaprasowywany

Zaciski klinowe (rys. 1.15) stosuje się do podwieszania linek stalowych, w których klin przyciska linkę do obudowy i zapewnia jej niezawodne zamocowanie.



Rys. 1.15. Zaciski klinowe przewodów

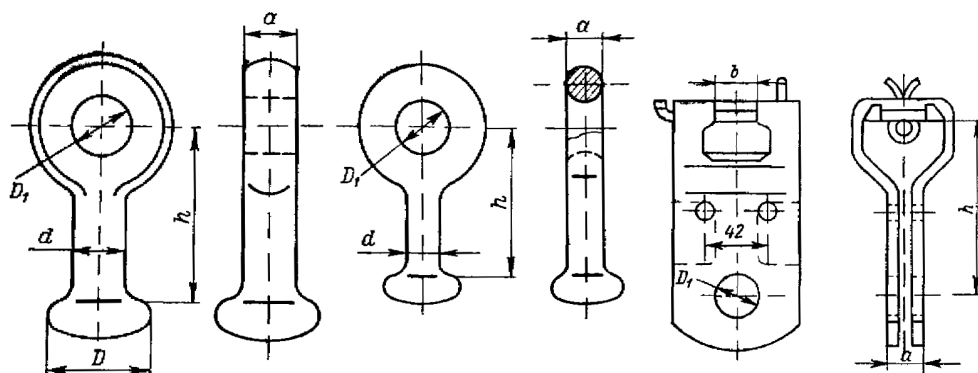
Szkle łączące (rys. 1.16) stosuje się w celu przymocowania łańcuchów izolatorów do słupów lub poprzeczników albo części znajdujących się na słupach.



Rys. 1.16. Szekla do zawieszania łańcuchów izolatorów

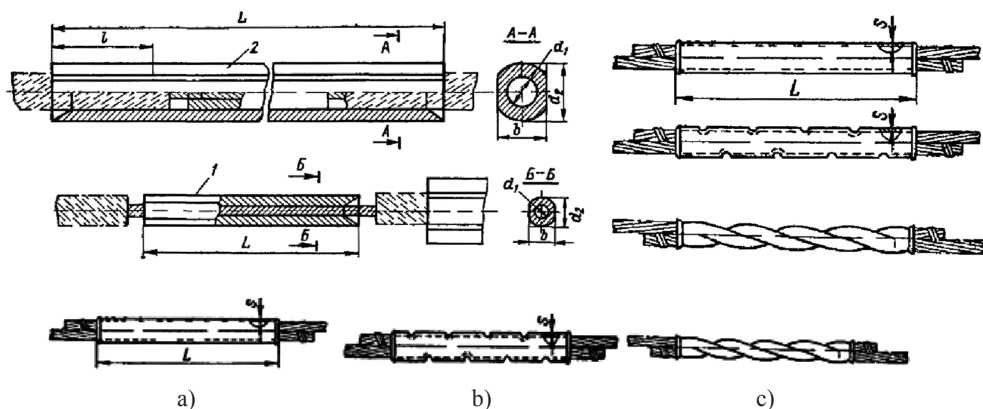
Okucia są przeznaczone do łączenia z jednej strony części na słupach albo szekli z głowicami izolatorów z drugiej strony (rys. 1.17) – do złączenia rdzenia izolatora z zaciskami lub innymi częściami łańcucha ze strony przewodu.

Do osprzętu ochronnego izolatorów zaliczają się pierścienie i rożki, które w ostatnim czasie są zamieniane na specjalne zaciski, zapewniające rozmieszczenie przewodów na poziomie dolnej części izolatora całego łańcucha. Na łańcuchach izolatorów odciągających stosuje się pierścienie zamknięte, a dla wielorzędowych łańcuchów stosuje się $\frac{3}{4}$ czy $\frac{1}{4}$ części pierścienia.



Rys. 1.17. Konstrukcje okuć

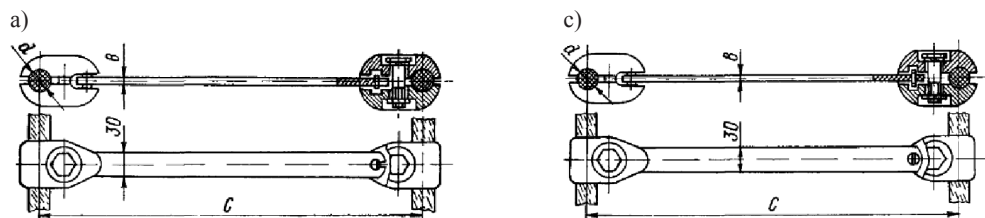
Połączenia końców przewodów można wykonać przy użyciu złączek owalnych (rys. 1.18a i 1.18b), w których przewody układają się równoległe i obciskane są za pomocą specjalnych kleszczy. Złączka zbudowana jest z binarnej rurki (wewnętrzna stalowa, a zewnętrzna aluminiowa). Stalowa rurka obciska część stalową, a rurka aluminiowa obciska część aluminiową przewodu.



Rys. 1.18. Sposoby łączenia przewodów

Drugim sposobem połączenia przewodów jest pokazane na rysunku 1.19c złączenie przewodów poprzez skrócenie obydwóch końców łączonych przewodów z późniejszym ich bandażowaniem za pomocą miękkiego drutu.

Odstępnik (rys. 1.19) stosuje się do przewodów wiązkowych w celu zapewnienia wymaganego odstępu między oddzielnymi przewodami fazy linii.



Rys. 1.19. Odstępniki do przewodów linii napowietrznych

Odstępniki składają się z rdzenia i okuć, przymocowanych za pomocą przegubu kulowego na końcach rdzenia, w który układa się przewody. Nowoczesne odstępniki produkuje się z uszkami przymocowanymi w sposób sztywny do końców rdzenia.

1.7. Gabaryty podstawowe linii napowietrznych i obliczeniowe warunki klimatyczne

W liniach napowietrznych można stosować różne sposoby rozmieszczania przewodów na słupach, mianowicie na jednym, dwóch albo trzech poziomach. Rozmieszczenie przewodów na konstrukcjach wsporczych w zależności od napięcia roboczego, warunków klimatycznych, liczby torów i charakterystyki strefy może być poziome, pionowe i kombinowane.

Natomiast dla 3 rejonu sadzi (grubość ścianki 15–20 mm) zaleca się poziome rozmieszczenie przewodów, choć dopuszczalne jest również rozmieszczenie trójkątne. W rejonach z podwyższonym ryzykiem wystąpienia sadzi (o grubości ścianki ponad 20 mm) wymaga się poziomego rozmieszczenia przewodów. Pionowe rozmieszczenie przewodów stosuje się tylko w liniach o napięciu do 30 kV. W rejonach, w których ryzyko wystąpienia sadzi jest nieduże, stosuje się trójkątne rozmieszczenie przewodów.

W ostatnich latach zaczęto budować linie czterotorowe o różnych wartościach napięć (na przykład dwie linie 110 kV i dwie linie 30 kV albo 15 kV). Dla linii napowietrznej klasy I z pionowym rozmieszczeniem przewodów zaleca się montowanie przewodów w układzie poziomym. Odległości pomiędzy przewodami linii napowietrznych są uzależnione od warunków ich pracy w przeszłości przy uwzględnieniu dopuszczalnych odstępów izolacyjnych pomiędzy przewodami a elementami słupów. Najmniejsze odległości pomiędzy przewodami podane są w tablicach 1.7 i 1.8. Przykładowo dla linii napowietrznych dwutorowych o napięciu powyżej 1000 V odległości pomiędzy najbliższymi przewodami różnych torów na słupie powinny być nie mniejsze niż:

- 3 m – linie 30 kV;
- 4 m – linie 110 kV;
- 5 m – linie 150 kV;
- 6 m – linie 220 kV.

Dla linii nN (o napięciu do 1000 V) w I i II rejonie sady odległości pomiędzy przewodami należy dobrać nie mniejsze niż:

- 0,4 m w przypadku rozmieszczenia przewodów pionowo;
- 0,3 m w przypadku rozmieszczenia przewodów poziomo, gdy długość przęsła wynosi ponad 30 m;
- 0,2 m w przypadku rozmieszczenia przewodów poziomo, gdy długość przęsła wynosi do 30 m.

Dla linii napowietrznych odległości pomiędzy przewodami powinny wynosić 0,6 m w 3 rejonie sady.

W tablicy 1.7 podano odległości pomiędzy przewodami linii napowietrznych w zakresie napięć od 30 kV do 400 kV w rejonach oblodzenia od I do IV dla różnych wartości przęsła.

Tablica 1.7

Najmniejsze odległości między przewodami linii napowietrznych I klasy
przy rozmieszczeniu poziomym

Napięcie linii [kV]	Rejon sady	Najmniejsze odległości pomiędzy przewodami [m], przy odległościach pomiędzy słupami							
		150 m	175 m	200 m	250 m	300 m	350 m	400 m	450 m
30	I–II	2,5	2,75	3,0	3,25	3,5	3,5	–	–
	III–IV	3,0	3,25	3,5	3,75	4,0	4,0	–	–
110	I–II	–	–	3,5	3,5	4,0	4,0	4,5	4,5
	III–IV	3,5	3,5	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	5,0
220	I–II	–	–	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	5,0
	III–IV	4,0	4,0	4,5	4,5	5,0	5,0	5,5	5,5
400	I–II	5,5	5,5	6,0	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
	III–IV	6,0	6,0	6,5	6,5	7,5	7,5	8,5	8,5

W tablicy 1.8 podano minimalne odległości pomiędzy przewodami linii napowietrznych I klasy niezależnie od rejonu oblodzenia i długości przęsła.

Tablica 1.8

Minimalne odległości pomiędzy przewodami linii napowietrznych
I klasy

Napięcie linii napowietrznej, [kV]	Minimalna odległość między przewodami pionowo, [m]	Przesunięcie poziome przewodów sąsiednich na słupie, [m]
30	2,25	0,5
110	3,0	0,7
220	5,0	1,5
400	8,0	2,5

Odległość między przewodami wymaga dodatkowego sprawdzania, w tym celu dla rejonów I i II sady stosujemy wzór:

$$d = 1,0 + \frac{U}{110} + 0,6\sqrt{f} \quad (1.1)$$

gdzie:

U – napięcie znamionowe linii,

f – największy zwis, który odpowiada przęsłu gabarytowemu linii albo przęsłu faktycznego skrzyżowania.

W rejonach sady III odległości ulegają dodatkowemu sprawdzeniu zgodnie ze wzorem:

$$d = 1,0 + \frac{U}{110} + 0,6\sqrt{f} + 0,15b \quad (1.2)$$

gdzie:

b – odległość pionowa między przewodami; pozostałe wielkości jak we wzorze (1.1).

Najmniejsze odległości izolacyjne dla linii napowietrznych pomiędzy przewodami oraz częściami uziemionymi słupów powinny być nie mniejsze niż podano w tablicy 1.9.

Określenie odległości pomiędzy przewodami linii, które w normalnym stanie pracują pod napięciem, oraz elementami słupów wykonuje się zarówno w stanie normalnej pracy przewodów, jak i w przypadku odchylenia przewodów pod wpływem wiatru. W przypadku obliczonej prędkości wiatru nie większej niż 25 m/s określenie odległości pomiędzy przewodami należy wykonać z uwzględnieniem przepięć piorunowych, a dla obliczonej prędkości wiatru powyżej 25 m/s należy wykonywać

obliczenia z uwzględnieniem wyładowań piorunowych oraz przepięć wewnętrznych, przy czym z otrzymanych wartości należy wybrać większą wartość. Dla prędkości wiatru równej 35 m/s i większej określenie odległości pomiędzy przewodami wylicza się tylko z uwzględnieniem przepięć wewnętrznych.

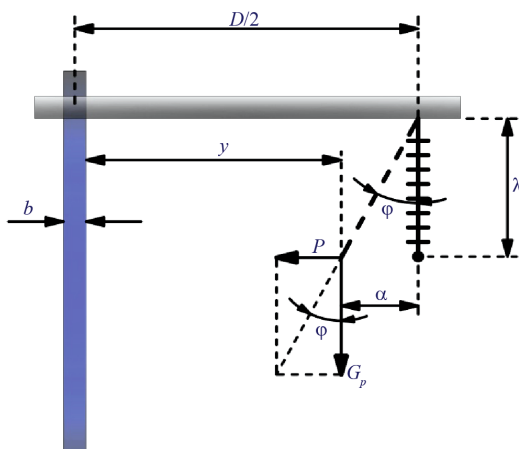
Tablica 1.9

Minimalne odległości izolacyjne dla linii napowietrznych

Warunki obliczeniowe	Minimalne odległości [m] przy napięciu					
	6 kV	10 kV	20 kV	30 kV	110 kV	220 kV
Przepięcia piorunowe	0,15	0,20	0,35	0,45	1,15	2,1
Przepięcia wewnętrzne	–	–	0,15	0,3	0,8	1,7
Maksymalne napięcie robocze	–	–	–	0,1	0,25	0,55

Sprawdzanie odległości pomiędzy przewodami z uwzględnieniem wartości napięcia znamionowego odbywa się tylko dla słupów specjalnych. Wynika z tego, że na wybór wartości odległości pomiędzy przewodami linii napowietrznych oraz między przewodem a elementami konstrukcji słupa wpływają dwa główne warunki:

1. Możliwość zbliżania się przewodów na odcinku przęsła dla przypadku ich kołysania pod działaniem wiatru;
2. Możliwość zbliżania się przewodu przymocowanego do końca łańcucha izolatora pod działaniem wiatru na odległość mniejszą niż y (rys. 1.20), której minimalna wartość podana została w tablicy 1.12.



Rys. 1.20. Zbliżanie przewodów do słupa

Wartość odchylenia łańcucha izolatorów razem z przewodem określa się ze wzoru $\alpha = \lambda \sin \varphi$, przy czym $\sin \varphi$ wyznaczany jest:

- albo przez $\operatorname{tg} \varphi$, kiedy pomija się masę izolatorów oraz działania wiatru na izolatory i wtedy (rys. 1.20):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P}{G_p} = \frac{p_4 S \cdot l}{p_1 S \cdot l} = \frac{p_4}{p_1} \quad (1.3)$$

gdzie:

$P = p_4 S \cdot l$ – siła naporu wiatru na całe przęsło przewodu (na odległości połowy przęsła z obu stron);

$G_p = p_1 S \cdot l$ – całkowity ciężar przewodu w przęsle;

- albo po wprowadzeniu sumarycznego obciążenia właściwego p_6 (patrz wzór (2.17)) bezpośrednio jako:

$$\sin \varphi = \frac{p_4}{p_6} \quad (1.4)$$

gdzie:

S – przekrój poprzeczny przewodu,

l – długość przewodu w przęsle.

Najmniejsza odległość punktu przymocowania łańcucha izolatorów od osi słupa (patrz rys. 1.20):

$$\frac{D}{2} - \alpha = y + \frac{b}{2} \quad (1.5)$$

gdzie:

b – grubość żerdzi słupa.

Odległość minimalna pomiędzy przewodami w przypadku przybliżania przewodu do słupa powinna być nie mniejsza niż:

$$D = 2\lambda \sin \varphi + 2y + b \quad (1.6)$$

Dla linii napowietrznych na słupach drewnianych odległości pomiędzy przewodami a słupem – ze względu na ochronę przed wyładowaniami piorunowymi – należy przyjmować nie mniejsze niż podane wartości w tablicy 1.10.

Linie napowietrzne 110–220 kV na słupach stalowych i żelbetonowych powinny być, z wyjątkiem przypadków szczególnych opisanych w przepisach, chronione przed wyładowaniami atmosferycznymi za pomocą przewodów odgromowych, uziemionych wzdłuż całej linii.

Tablica 1.10

Odległość między przewodami zależne od napięcia znamionowego linii

Odległość pomiędzy przewodami, [m]	6,5	5	4	3	2	1
Napięcie linii napowietrznej, [kV]	400	220	110	30	15	10

Linii napowietrznych od 20 do 110 kV na słupach drewnianych nie trzeba wyposażać w przewody odgromowe. Oddzielne odcinki takich linii z obniżoną izolacją chroni się za pomocą ograniczników przepięć. Takie samo rozwiązanie stosuje się do linii o napięciu 30 kV ze słupami metalowymi i żelbetonowymi w sieciach z punktem neutralnym izolowanym albo kompensowanym, jednak słupy tych linii powinny być uziemione.

Z punktu widzenia ekonomii zaleca się stosowanie słupów z jednym przewodem odgromowym ze strefą ochrony nie większą niż 30° (patrz rys. 1.21). W przypadku ochrony linii napowietrznych dwoma przewodami odgromowymi odległość pomiędzy nimi powinna być nie większa niż 5-krotna wartość Δh , która odpowiada odległości pomiędzy przewodami roboczymi a odgromowymi, a kąt ochrony nie większy niż $\alpha = 20^\circ$. Dla linii napowietrznych ze słupami żelbetonowymi pozwala się zwiększyć kąt ochrony do 30° .

Odległość pomiędzy linką a przewodem linii napowietrznej w środku przęsła bez uwzględnienia odchylenia ich wiatrem powinna być nie mniejsza od podanych w tablicy 1.11.

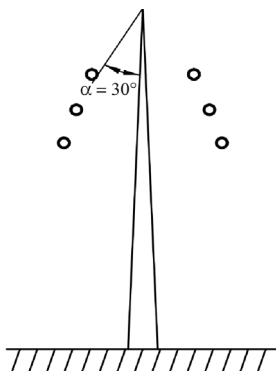
Tablica 1.11

Odległość między przewodami w zależności od długości przęsła

Długość przęsła l , [m]	150	200	300	400	500
Minimalna odległość między przewodami roboczymi i odgromowymi, [m]	3,2	4	5,5	7	8,5

Dopuszczalne odległości przewodów od powierzchni ziemi, budowli, drzew oraz innych roślin czy obiektów należy określać bez uwzględnienia działania wiatru przy normalnym stanie pracy linii napowietrznych o napięciu powyżej 1000 V dla najwyższej temperatury (θ_{\max}) oraz w stanie awaryjnym dla przypadku występowania sady (θ_{so}).

Dla linii napowietrznych o napięciu do 1000 V rozpatruje się tylko stan pracy normalny przy temperaturze maksymalnej i przy temperaturze wystąpienia sady. Uwzględnia się największą wartość zawieszania, która może wystąpić w jednym z podanych przypadków obliczeniowych.



Rys. 1.21. Słup z jednym przewodem odgromowym

Odległości przewodów linii napowietrznej od ziemi, pod warunkiem największej wartości zawieszania przewodów bez nagrzewania ich prądem, powinny być nie mniejsze niż podane w tablicy 1.12.

Tablica 1.12

Najmniejsze odległości przewodów linii napowietrznych od ziemi [m]

Warunki pracy linii napowietrznej	Charakterystyka obszaru	do 1 kV	do 20 kV	30–110 kV	220 kV
W normalnym stanie pracy	zasiedlony	6	7	7	8
	niezasiedlony	5	6	6	7
	trudno dostępny	4	4,5	5	6
	skały, góry, niedostępne tereny, spady terenu	1	2,5	3	4
W przypadku oderwania przewodu w sąsiednim prześle	miejsowość zasiedlona	–	4	4	5

Miejscowościami zasiedlonymi nazywane są tereny miast, wsi, zakładów przemysłowych, portów, stacji PKP, parków, bulwarów, obszarów w granicach ich rzeczywistego rozwoju.

Miejscowościami niezasiedlonymi nazywa się tereny niezabudowane (choć często bywają tam ludzie), dostępne dla dojazdu oraz techniki rolniczej, ogrody, sady, tereny z rzadko zabudowanymi budynkami i budowlami.

Miejscowość jest trudno dostępna, gdy nie ma dostępu do dojazdu oraz techniki rolniczej.

W liniach jednotorowych średniego napięcia (do 30 kV) przewody rozmieszcza się w układzie trójkątowym lub płaskim, a w liniach dwutorowych w taki sposób, aby każdy tor prowadzony był po innej stronie osi symetrii słupa.

W linach jedno- i dwutorowych wysokich napięć, w których są tylko izolatory wiszące, przewody rozmieszcza się w układach trójkątowych, płaskich lub pionowych.

Zgodnie z wymaganiami do projektowania linii napowietrznych [10] obliczenia przewodów, linek, izolatorów i osprzętu wykonuje się zgodnie z metodą naprężeń dopuszczalnych. W tym przypadku obciążenia na elementach linii przyjmuje się takie, które odpowiadają warunkom eksploatacji i są nazwane normalnymi. Obliczanie słupów i fundamentów wykonuje się metodą stanów granicznych, a takie obciążenia nazywamy obliczeniowymi. Wynikają one z pomnożenia wartości unormowanych obciążeń przez współczynniki przeciążeń.

W celu zapewnienia niezawodnej pracy linii napowietrznej, podczas obliczeń konieczne jest uwzględnienie siły parcia wiatru, odkładania na przewodach sadzi (w postaci oblodzenia i śniegu) oraz zmiany temperatury w ciągu całego roku. Do obliczeń przyjmuje się średnią wartość siły parcia wiatru. W strefach zabudowy obniża się napór wiatru o 30%, a w miejscowościach silnych wiatrów (brzegi rzek, jezior i basenów wodnych) prędkość wiatru rośnie w miarę zwiększania wysokości zawieszenia przewodu. W ogólnym przypadku wysokość najniższego punktu przewodu dla przęsła gabarytowego oblicza się wg wzoru:

$$h_{sr} = \frac{h_1 + h_2}{2} - \frac{2}{3}f \quad (1.7)$$

gdzie:

h_1, h_2 – wysokości przymocowania przewodów lub linek od łańcuchów izolatorów na słupach do ziemi [m];

f – zwis przewodu roboczego lub odgromowego [m].

Dla odcinka linii, który składa się z kilku przęseł, siłę parcia wiatru przyjmuje się jednakową dla wszystkich przewodów. Za wysokość obliczeniową przyjmuje się wartość średnioważoną, którą określa się ze wzoru:

$$h_r = \frac{h_1 l_1 + h_2 l_2 + \dots + h_i l_i}{l_1 + l_2 + \dots + l_i} \quad (1.8)$$

gdzie:

h_1, h_2, \dots, h_i – wartości średnie wysokości zamocowania przewodów do końców łańcuchów izolatorów kolejnych przęseł na słupach mierzona od ziemi [m];

l_1, l_2, \dots, l_i – długości kolejnych przęseł linii [m].

1.8. Wpływ wiatru, oblodzenia i temperatury

Przez oblodzenie i sadz na przewodach i linkach należy rozumieć lód, mokry śnieg oraz ich kombinacje. Podczas obliczeń zakłada się, że oblodzenie i sadz tworzą się na przewodach roboczych i odgromowych równomiernie, w postaci cylindra ze ściankami jednakowej grubości na całej długości przewodu [1, 4].

W trakcie pracy linii napowietrznej przewody robocze i odgromowe mogą znajdować się w następujących temperaturach, które należy uwzględnić podczas obliczeń:

- wyższa temperatura t_{\max} , przy której przewód najbardziej rozciąga się, a zwisy osiągają największe wartości;
- niższa temperatura t_{\min} , przy której długość przewodu najbardziej ulega skróceniu, a naprężenia termiczne osiągają największe wartości;
- temperatura średnioroczna t_{sr} , przy której określa się niezawodność przewodu dla przypadku drgań;
- temperatura, przy której występuje największa prędkość wiatru t_w i tworzy się sadz t_{sol} , a której wartość przyjmuje się na poziomie -5°C ;
- temperatura $t = +15^{\circ}\text{C}$, dla której określa się odległości pomiędzy przewodami roboczymi i odgromowymi oraz od elementów słupów.

Drgania przewodów wywołane są działaniem strumienia powietrza skierowanego prostopadle do osi przewodu lub linki albo pod kątem bliskim 90° . W tych przypadkach następuje zawirowanie wiatru i tworzy się zróżnicowane ciśnienie wokół przewodu, co wywołuje zróżnicowany nacisk siły wiatru na przewód z różnych stron. Jeśli częstotliwości efektów zmiany siły nacisku strumienia wiatru i drgań swobodnych przewodów lub linek zgadzają się, przewód zaczyna drgać z amplitudą od 2 do 35 mm i długością fali od 1 do 10 m oraz częstotliwością od 5 do 60 Hz. Doświadczenia wykazują, że drgania przewodów najczęściej występują w przypadku prędkości wiatru od 0,6 do 12 m/s, kiedy linia ułożona jest na równinach, przebiega przez duże rzeki i przestrzenie wodne. Oprócz tego drgania przewodów pojawiają się w przypadku pręseł o długości powyżej 120 m i osiągają wartości niebezpieczne przy długościach przewodów około 500 m.

Niebezpieczeństwo od drgań przewodów polega na tym, że ulegają uszkodzeniu oddzielne druty przewodów roboczych lub odgromowych w miejscach ich wyjścia z zacisków wskutek ich cyklicznego zginania. W celu tłumienia drgań stosuje się ciężary antywibracyjne albo tłumiki wibracji.

Oprócz wibracji w praktyce eksploatacji linii napowietrznych może wystąpić zjawisko tzw. tańca przewodów, kiedy amplituda drgań osiąga 12–14 m z dużą falą albo występuje fala stojąca. Takie efekty powstają podczas nierównomiernego oblodzenia przewodów. Podczas tańca przewodów mają miejsce wyraźne zbliżenia do siebie przewodów różnych faz, które mogą prowadzić do iskrzenia i pojawienia się

łuku. Na skutek tego zjawiska następuje topienie się przewodów spowodowane wysoką temperaturą łuku i kolejne oberwania. Jedynym sposobem zapobiegania takim zbliżeniom (a nawet kontaktom) jest zwiększenie odstępów pomiędzy przewodami.

Pytania do samokontroli

1. Jakie funkcje pełnią linie napowietrzne?
2. Jakim najważniejszym wymaganiom powinny odpowiadać linie napowietrzne?
3. Z jakich podstawowych elementów składa się linia napowietrzna?
4. Jakimi geometrycznymi parametrami charakteryzuje się linia napowietrzna?
5. Z jakich materiałów są wykonywane słupy do linii napowietrznych?
6. Podać klasyfikację słupów dla linii napowietrznych.
7. Jakie wymagania powinny spełniać konstrukcje słupów stosowane w liniach napowietrznych?
8. Jakie funkcje spełniają izolatory?
9. Jakie elementy odnoszą się do osprzętu?
10. W jaki sposób mogą być rozmieszczone przewody na słupach?
11. Jakie warunki klimatyczne powinny być uwzględniane w obliczeniach?