DANUTA DYMEK, *d.dymek@energo.krakow.pl*
ELŻBIETA JASTRZĘBSKA, *e.jastrzebska@energo.krakow.pl*
WIESŁAW KURBIEL, *w.kurbiel@energo.krakow.pl*
Energoprojekt-Kraków SA

AWARIE LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH WYWOŁANE OBLODZENIEM

FAILURES OF OVERHEAD POWER LINESCAUSED BY ICING

Streszczenie Tematem referatu są awarie linii elektroenergetycznych 220 i 400 kV, które miały miejsce w styczniu 2010 r. na obszarze Jury Krakowsko-Częstochowskiej. Bezpośrednią przyczyną awarii było nadmierne oblodzenie przewodów prowadzące do przekroczenia dopuszczalnych obciążeń i w konsekwencji do zniszczenia elementów linii. Najczęściej występującym uszkodzeniem było zerwanie przewodów odgromowych prowadzące do kaskadowych awarii linii. Złamanych zostało 9 konstrukcji wsporczych, zniszczeniu uległy wieżyczki odgromowe i poprzeczniki słupów. Występujące w tym rejonie oblodzenie było znacznie większe niż określone w normach. Oszacowany ciężar sadzi stanowił około 2,5 krotność sadzi katastrofalnej wg normy PN-E-05100-1:1998 i około 1,7-krotność wg normy PN-EN-50341-3-22. Linie zostały odbudowane. Docelowo, po przeprowadzonej analizie, zaproponowano zwiększenie wytrzymałości linii poprzez wymianę przewodów odgromowych i wzmocnienie istniejących konstrukcji słupów.

Abstract The subject of the paper is failure of 220 and 400 kV overhead power lines, which took place in January 2010 in Jura Krakowsko-Czestochowska in Poland. The immediate cause of the crash was excessive icing of conductors leading to exceeding the permissible loads and, consequently, to the destruction of the line elements. The most common damage was broken conductors leading to cascading failures of the line. 9 tower structures were broken, earth wire peaks and crossarms also were destroyed. Icing occurring in this region was much greater than specified in the standards. The estimated weight of ice was about 2.5 times greater than the disastrous icing according to PN-E-05100-1:1998 and about 1.7 times according to PN-EN-50341-3-22. The lines have been rebuilt. Ultimately, after analyzing, it is proposed to increase the strength of the line through the exchange of ground wires and strengthening of existing tower structures.

1. Wprowadzenie

W styczniu 2010 r. na terenie Jury Krakowsko-Częstochowskiej na skutek ekstremalnych warunków atmosferycznych wystąpiły zniszczenia linii elektroenergetycznych o znacznej skali. Tylko na obszarze objętym działaniem ENION S.A. krytycznego dnia 10 stycznia uszkodzonych było m.in. 31 linii 110 kV i 148 linii średniego napięcia, co skutkowało brakiem dostaw energii elektrycznej dla około 112 tys. odbiorców.

Awarie wystąpiły również na 4 liniach 220 kV o łącznej długości 231 km. Odnotowano 17 przypadków zerwań przewodów odgromowych, 6 uszkodzeń przewodów fazowych, zniszczenie 17 wieżyczek i 9 poprzeczników oraz złamania 9 słupów. 3 przypadki zerwań przewodów odgromowych miały miejsce również na dwóch liniach 400 kV.

Na zlecenie właściciela tych linii, spółki PSE-Operator S.A., Energoprojekt-Kraków SA wykonał kompleksową ocenę stanu technicznego uszkodzonych linii 220 i 400 kV oraz określił zakres niezbędnych działań zwiększających docelowo ich niezawodność. Wykonał również projekty odbudowy linii po awariach.

2. Analiza uszkodzeń linii 220 i 400 kV

Najczęściej występującym uszkodzeniem było zerwanie przewodu odgromowego AFL-1,7 70 mm^2 (8 uszkodzeń), prowadzące do kaskadowych awarii linii. Analiza zniszczeń wskazuje, że zerwanie przewodów mogło wystąpić zarówno w rejonie uchwytu odciągowego, jak i w uchwycie przelotowym. W obu tych punktach występuje maksymalny naciąg w danym przęśle (naciąg w punkcie zawieszenia). Zauważono przypadek zniszczenia oplotu aluminiowego przewodu odgromowego w uchwycie przelotowym świadczący o nieprawidłowej współpracy oplotu z rdzeniem stalowym. Długotrwałe, duże obciążenie powodowało szybki proces wydłużania się przewodu (pełzanie) skutkujący powiększaniem się zwisów. Po przekroczeniu 80÷85% nominalnej siły zrywającej RTS proces pełzania przebiega coraz szybciej prowadząc do zerwania przewodu.

Uszkodzenie (zerwanie) przewodów odgromowych (jako pierwotne) powodowało kaskadowe zniszczenie wieżyczek i poprzeczników odgromowych słupów. W przypadku występujących w liniach słupów przelotowych serii Hc i H52 zniszczenie wieżyczki odgromowej mogło doprowadzić do utraty stabilności węzła poprzecznik-trzon, w konsekwencji prowadząc do zniszczenia poprzecznika, a nawet złamania całego słupa. Wyjątek stanowił słup nr 21 linii 220 kV Łośnice–Siersza, gdzie zniszczeniu uległ tylko zewnętrzny poprzecznik fazowy.

Rys. 1. Zniszczenie wieżyczki i poprzecznika, awaria kaskadowa linii

Rys. 2. Uszkodzenie (złamanie) słupa

3. Przyczyny uszkodzeń linii 220 i 400 kV

Bezpośrednią przyczyną uszkodzeń linii były ekstremalne warunki atmosferyczne, to jest nadmierne oblodzenie przewodów i nałożenie się na osadzony lód sadzi miękkiej. Opady marznącego śniegu z deszczem w ciągu tygodnia przy ujemnej temperaturze tworzyły warstwę lodu, następnie w ciągu kilku dni przy sprzyjającej wilgotności i temperaturze tworzyła się sadź. Gwałtowny spadek temperatury do -20°C utrwalił skutki tych zjawisk. Proces ten zachodził niekiedy przy silnym wietrze zwiększającym intensywność osadzania się mokrego śniegu na elementach linii.

Rys. 3. Oblodzenie przewodów, słupów i innych elementów linii 220 kV

Pośrednią przyczyną awarii było najczęściej zrywanie się zastosowanych w liniach typowych przewodów odgromowych oraz typ konstrukcji słupów. Linie 220 kV zaprojektowane i wybudowane były w latach 60. i 70. ubiegłego wieku zgodnie z obowiązującymi wówczas normami. Do budowy zastosowane zostały typowe elementy linii.

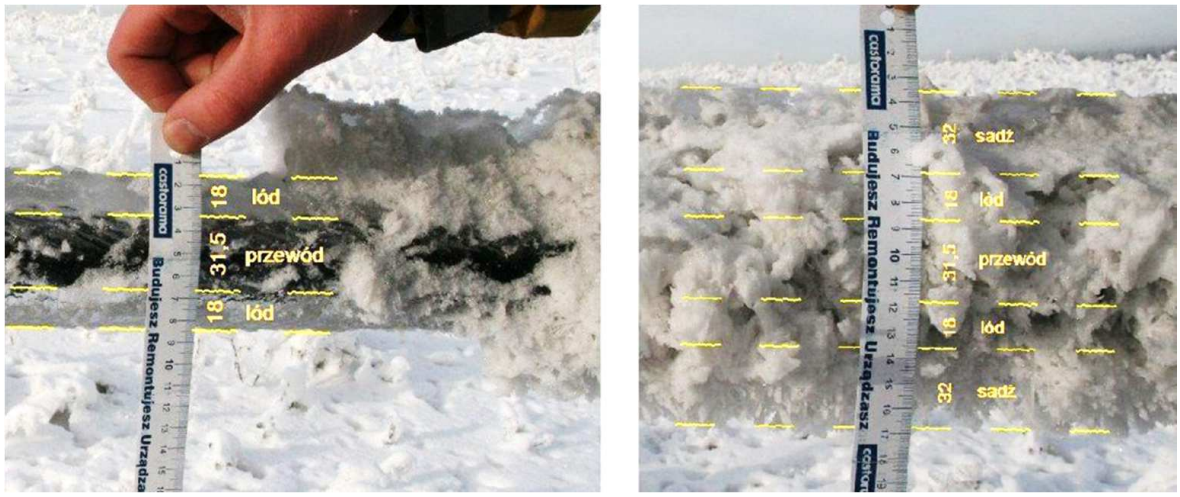
4. Ocena obciążeń sadziowych

Oceny obciążeń sadziowych dokonano 3 metodami:
- na podstawie pomiaru grubości ścianki sadzi,
- na podstawie zerwania przewodu odgromowego,
- na podstawie uszkodzenia poprzecznika fazowego słupa przelotowego serii H52.

Ocena na podstawie grubości ścianki sadzi

Osadzona sadź na przewodach, słupach i na innych elementach linii nie była jednorodna. Składała się z dwóch warstw:
- wewnętrznej (lodu) utworzonej z padającego deszczu (mżawki) przy minusowej temperaturze powietrza w początkowym okresie,
- zewnętrznej (sadzi miękkiej) utworzonej z pary wodnej (mgły) w późniejszym okresie.

Grubości tych warstw na jednym z uszkodzonych przewodów fazowych AFL-8 525 mm^2 wynosiły odpowiednio około 18 mm i 32 mm. Całkowita średnica przewodu z sadzią wynosiła zatem około 131 mm. Ciężar osadzonej sadzi na przewodzie przy przyjęciu uśrednionej gęstości 0,44 kg/dm^3 wyniósł około 55,26 N/m i stanowił 2,43-krotność ciężaru sadzi katastrofalnej wynikającego z normy [1] dla strefy sadziowej SI.



Rys. 4. Pomiar grubości lodu i sadzi na uszkodzonym przewodzie fazowym AFL-8 525 mm^2

Ocena na podstawie zerwania przewodu odgromowego

Założono, że zerwanie przewodu mogło nastąpić przy około 90% nominalnej siły zrywającej RTS. Na tej podstawie obliczono, że w chwili zerwania przewodu AFL-1,7 70 mm^2 ciężar sadzi na tym przewodzie wyniósł około 31 N/m przy uśrednionej grubości ścianki sadzi około 42 mm. Stanowiło to 2,5-krotność ciężaru sadzi katastrofalnej wynikającego z normy [1] dla strefy sadziowej SI.

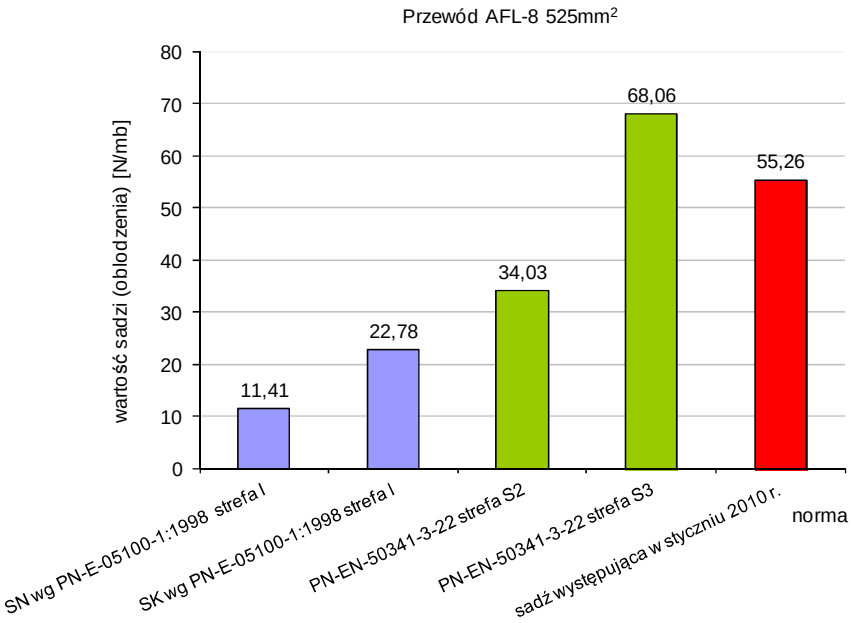
Ocena na podstawie uszkodzenia poprzecznika fazowego

Na linii 220 kV Łośnice–Siersza na słupie nr 21 typu H52 P wystąpiło uszkodzenie skrajnego poprzecznika fazowego. Środkowa część poprzecznika, wieżyczki odgromowe, jak

również cały słup nie zostały naruszone. Przyjęto, że uszkodzenie poprzecznika spowodowane było tylko ciężarem przewodu, łańcucha izolatorowego oraz sadzi na przewodzie i łańcuchu. Dla rzeczywistego przęsła między słupami 20–21 równego 420 m i między słupami 21–22 równego 380 m przeprowadzono obliczenia wytrzymałości poprzecznika skrajnego. Wg. obliczeń zniszczenie mogło wystąpić przy obciążeniu pionowym wynikającym z 2,7-krotności ciężaru sadzi katastrofalnej wg normy [1] dla strefy sadziowej SI.

Rys. 5. Uszkodzony poprzecznik słupa nr 21 (H52 P) na linii 220 kV Łośnice–Siersza

Przeprowadzona ocena ciężaru sadzi trzema różnymi metodami wykazała dużą zgodność co do oceny jej wartości. Należy przyjąć, że w chwili uszkodzeń elementów linii wartość ciężaru sadzi była około 2,5 razy większa od sadzi katastrofalnej określonej normą [1] dla strefy sadziowej SI. W odniesieniu do nowej normy [2], ciężar występującej sadzi stanowił około 1,7-krotność oblodzenia dla strefy S2 i zbliżył się do wartości jak dla strefy S3.



oznaczenia: SN – sadź normalna SK – sadź katastrofalna

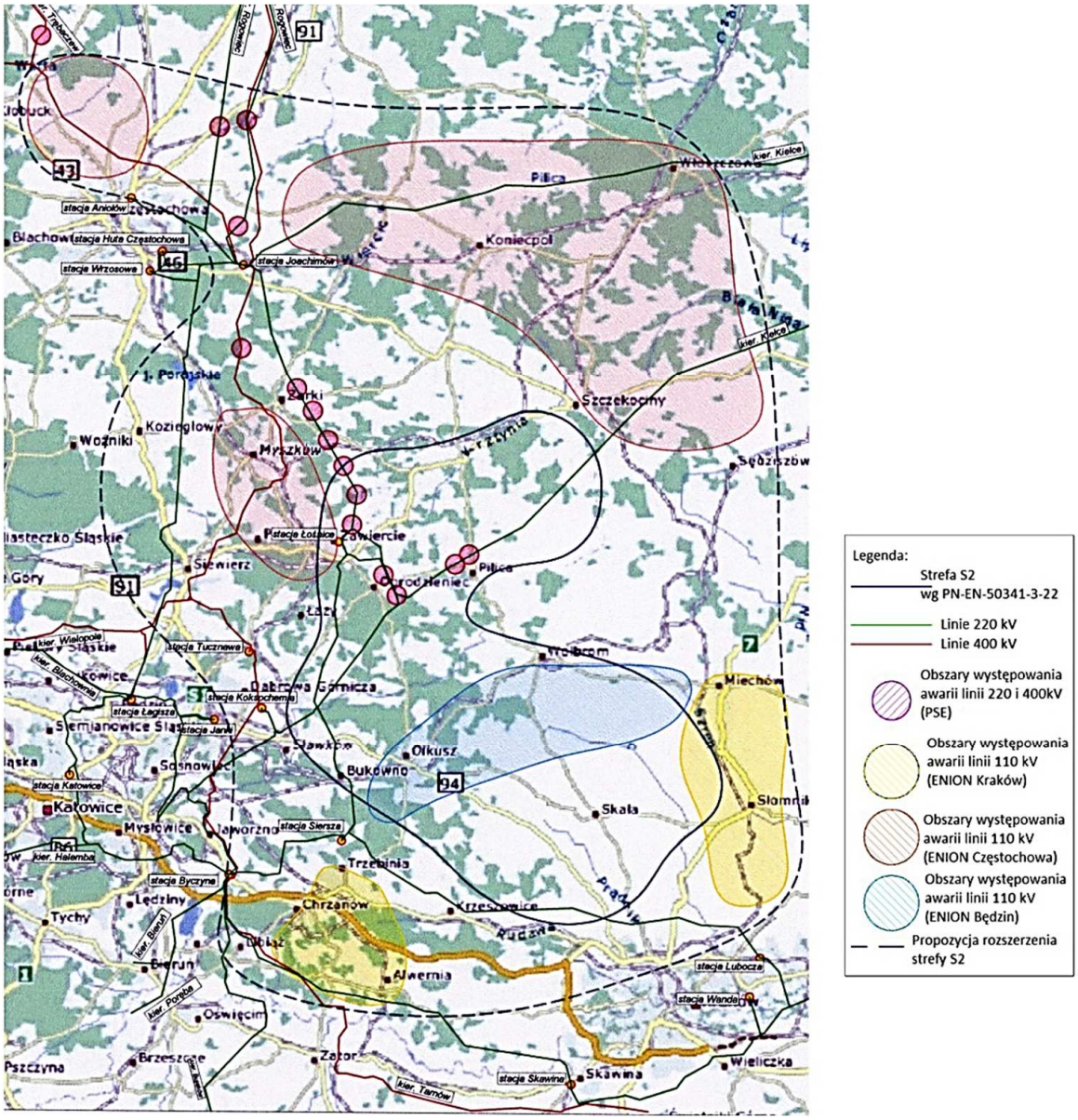
Rys. 6. Porównanie wartości oszacowanego ciężaru sadzi dla uszkodzonego przewodu AFL-8 525 mm^2 z wartościami normowymi

5. Analiza obszaru objętego ekstremalnymi warunkami

Zasięg awarii pokazano na rys. 7. Znaczna część tego obszaru – to jest w granicy po miasta Kraków, Miechów, Szczekociny, Zawiercie, Olkusz – zgodnie z normą PN-75/E-5100 i [1] zaliczona została do strefy I o zwiększonej sadzi. Zwiększenie to dotyczy jednak tylko przewodów roboczych o średnicach mniejszych od 12 mm, zatem nie dotyczy linii 220 i 400 kV. W przypadku projektowania i budowy linii 110, 220 i 400 kV wszystkie dotychczasowe normy obszar ten traktowały jako obszar o sadzi strefy I. Załącznik krajowy [2] zalicza już ten obszar do strefy S2 obciążenia oblodzeniem.

Wszystkie linie, które uległy zniszczeniu były zaprojektowane i wybudowane w latach 60. i 70. XX wieku. Oznacza to, że do projektowania i budowy przyjęto obciążenia wynikające ze strefy sadziowej SI.

W zaistniałej sytuacji obszar występowania sadzi był większy niż wyznaczony w cytowanych normach.



Rys. 7. Zasięg awarii i proponowany obszar strefy oblodzenia S2

6. Analiza wytrzymałości elementów linii

Analizę przeprowadzono przy założeniu gęstości średniej oblodzenia 0,44 kg/dm^3. Ciężar sadzi przyjęto o wartości 2,5-krotności ciężaru sadzi katastrofalnej wynikającego z normy [1] dla strefy sadziowej SI.

Przewody fazowe i odgromowe

Analiza wykazała, że obciążenie sadzią występującą w styczniu 2010 r. nie spowodowało przekroczenia dopuszczalnego wg normy [1] obciążenia przewodów fazowych wynoszącego 80% RTS. Analiza wykazała jednak przekroczenie dopuszczalnego obciążenia dla przewodów odgromowych, potwierdzając fakt zerwania się tych przewodów.

Słupy

Wykonano analizy wytrzymałościowe dla najczęściej występujących w liniach słupów jednotorowych serii H52 i Hc525. Dla każdej serii sprawdzono słup przelotowy oraz jeden ze słupów mocnych (H52 ON150, Hc525 ONI). Przyjęto katalogowe długości przęseł, kąty załomu 1800 dla słupów przelotowych i katalogowe dla słupów mocnych. Analizę wykonano w oparciu o normę [1] w nawiązaniu do wersji normy, według której słupy zostały zaprojektowane. Ograniczono się do przypadków obciążeniowych modelujących pracę słupów w zaistniałych ekstremalnych warunkach tj. do przypadków:

– wypadkowa naciągów przy zwiększonym oblodzeniu dla słupów przelotowych i mocnych,
– zerwanie przewodu odgromowego przy zwiększonym oblodzeniu dla słupów mocnych.

Przyjęto współczynnik konsekwencji zniszczenia równy 1,0. Przypadki potraktowano jako przypadki wyjątkowe. Analizę wykonano metodą elementów skończonych za pomocą programu do obliczeń konstrukcji wsporczych linii elektroenergetycznych TOWER, opracowanego przez Power Line Systems, Inc. University Bay Drive, Madison, USA. Konstrukcje słupów zostały policzone jako układ elementów kratowych i belkowych.

Poziom wykorzystania nośności elementów konstrukcji słupów był zróżnicowany w zależności od typu słupa oraz przypadku obciążeniowego. Tylko dla trzonów słupa przelotowego H52 i mocnego Hc525 (dla przypadku obciążenia wypadkową naciągów) poziom ten był mniejszy od 100%. Dla pozostałych elementów przekraczał 100% i wynosił:

– dla wieżyczek odgromowych od 137÷250%,
– dla poprzeczników fazowych od 109÷295%,
– dla trzonów słupów (podstawki, ramiona, trzon zbieżny) od 135÷198%.

7. Środki podwyższające wytrzymałość linii

Dla zwiększenia niezawodności całej linii zalecono m.in.:

– wymianę wszystkich przewodów odgromowych typu AFL-1,7 i AFL-6 na mocniejsze przewody AAFL o odpowiednim przekroju,
– wymianę zawieszonego na linii 220 kV Łośnice–Siersza przewodu odgromowego typu OPGW na przewód o większej wytrzymałości,
– wzmocnienie wieżyczek i poprzeczników odgromowych słupów,
– wzmocnienie poprzeczników fazowych słupów przelotowych,
– wzmocnienie trzonów słupów.

Podana kolejność działań wynika z analizy pierwotnej przyczyny powstania tak rozległych uszkodzeń. Działania te w zakresie wymiany przewodów odgromowych zapewnią odpowiednią wytrzymałość dla sadzi wynoszącej 3-krotność sadzi katastrofalnej strefy SI wg normy [1]. Dla konstrukcji słupów, zależnie od serii i typu, uzyskany możliwy stopień wzmocnienia wynosiłby od 1,5- do 3-krotności sadzi katastrofalnej.

Wnioski

1. Większość linii wysokiego napięcia w Polsce została zbudowana przed wprowadzeniem normy PN-EN-50341-1 i załącznika krajowego [2]. Wprowadzenie do projektowania tych norm przyczyni się do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa linii z uwagi na uwzględnienie w nich kombinacji oddziaływania wiatru i oblodzenia na przewody oraz uwzględnienie niezrównoważonego osadzania się oblodzenia na przewodach.
2. Na podstawie wykonanej analizy awarii linii 220 i 400 kV na terenie Jury Krakowsko-Częstochowskiej proponuje się zrewidowanie zapisów załącznika krajowego [2] w zakresie obszaru i wielkości występowania oblodzenia w tym rejonie. Proponuje się rozszerzenie strefy oblodzenia S2 jak pokazano na mapie (rys. 7.) oraz zwiększenie wartości oblodzenia przynajmniej do poziomu, który wystąpił w 2010 r. Rozszerzenie obszaru strefy zaproponowano analizując miejsca wystąpienia awarii lub zakłóceń w pracy linii 110, 220 i 400 kV pozyskane od operatorów z tego obszaru, to jest PSE-Operator S.A., Enion Będzin, Enion Częstochowa i Enion Kraków (obecnie TAURON).
3. Z uwagi na zachodzące zmiany klimatyczne i bardzo wysokie koszty awarii linii elektroenergetycznych niezbędnym staje się monitorowanie pojawiającego się na danym terenie oblodzenia. Każda awaria linii elektroenergetycznej spowodowana oblodzeniem powinna być przeanalizowana pod kątem wielkości oblodzenia przewodów i obszaru jej wystąpienia. Pozwoli to na weryfikację przyjętych do projektowania empirycznych wzorów na wyznaczenie obciążenia oblodzeniem.

Literatura

1. PN-E-05100-1:1998. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi
2. PN-EN-50341-3-22:2010. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych. Polska wersja EN 50341-3-22:2001