



Ewa STRUŻEWSKA, Henryk PODHAJECKI

PSE – Operator S.A.

Projektowanie i budowa linii elektroenergetycznej 400 kV Tarnów – Krosno w kontekście wymagań nowej normy PN – EN 50341-1

Streszczenie. W publikacji omówiono założenia projektowe linii 400 kV relacji SE Tarnów – SE Krosno Iskrzynia, budowanej przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. w południowo – wschodniej części kraju. Zwrócono uwagę na sposób doboru mechanicznych obciążeń limitujących gabaryty i wytrzymałość konstrukcji wsporczych oraz na założenia projektowe fundamentów dla tych konstrukcji, według wymagań normy PN - EN 50341-1. Omówiono również układy izolacyjne linii 400 kV z izolatorami kompozytowymi. Scharakteryzowano badania napięciowe i zwarciovowe, które wykonano na łańcuchach izolacyjnych, w celu sprawdzenia ich wytrzymałości elektrycznej.

Abstract. (Design and construction Tarnów – Krosno 400 kV power line in context of new PN – EN 50341-1 standard requirements) In this paper a brief for design of 400 kV line from SE Tarnów to SE Krosno which has been built by PPGC in south-eastern part of Poland has been described. The authors presented the methodology of selection of mechanical loads for line's towers and the brief for design of the foundations. The overall dimensions and strength of these structures are imposed by mechanical load cases according to standard PN-EN 50341-1. The authors have also presented the brief for design of insulator strings and high voltage and short-circuit tests, that were performed on these strings in order to verify their electrical strength.

Słowa kluczowe: linia elektroenergetyczna NN, założenia projektowe, schematy mechanicznych obciążeń, konstrukcje słupów, układy izolacyjne, fundamenty.

Keywords: HV transmission line, brief for design, mechanical loads cases, structures of towers, insulator strings, foundations

Wstęp

W celu poprawy bezpieczeństwa elektroenergetycznego terenów południowo – wschodniej części kraju i eksportu energii, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. podjęły decyzję o budowie nowego połączenia elektroenergetycznego na napięciu 400kV pomiędzy SE Tarnów i SE Krosno. Założenia do projektu budowy nowej linii 400 kV relacji Tarnów - Krosno i dokumentacja przetargowa [1] zostały opracowane w latach 2000 – 2002 zgodnie z wymaganiami znowelizowanej w 1998 r. normy PN-E-05100-1 [2].

Jednakże, w latach 2002 i 2003 – w trakcie prac przygotowawczych do realizacji zadania inwestycyjnego – miały miejsce dwa niezależne zdarzenia, które w istotny sposób wpłynęły na założenia projektowe budowy tej linii.

1. W maju 2002 roku Polski Komitet Normalizacyjny przyjął metodą uznania (w języku oryginału) normę europejską EN 50341-1 [3] dotyczącą zagadnień związanych z projektowaniem i budową linii elektroenergetycznych za polską normę PN-EN 50341-1 2002 (U) [4]. Norma [3] została przyjęta do stosowania przez wszystkie kraje europejskie chociaż jest dokumentem dobrowolnym. Jednocześnie należy podkreślić, że przyjęte w tej normie zasady projektowania konstrukcji wsporczych dla napowietrznych linii NN różnią się pod niektórymi względami dość istotnie od wymagań normy PN-E-05100-1:1998, zwłaszcza w zakresie kryteriów doboru obciążeń limitujących gabaryty i wytrzymałość konstrukcji wsporczych.
2. W dniu 20-go lutego 2003 r. w nowej linii 400 kV Krosno Iskrzynia – Granica RP, załączonej pod napięcie w sierpniu 1998 roku, uległa całkowitemu zniszczeniu sekcja linii (odcinek linii od słupa nr 351 do słupa nr 355) wskutek obciążenia sadyż katastrofalną. Znaczne przekroczenia obciążeń sadyżowych zdarzały się na ww. linii już przedtem kilkakrotnie w sezonach zimowych lat: 1998, 1999, 2000, 2001 i 2002 co skutkowało wielokrotnymi wyłączeniami linii, miejscowymi zerwaniami bądź uszkodzeniami przewodów

odgromowych, łączników i elementów konstrukcji słupów [5]. Trasa linii Krosno Iskrzynia - Granica RP przebiega na terenach górzystych zbliżonych niejednokrotnie pod względem ukształtowania i klimatu do terenów projektowanej trasy linii 400 kV Tarnów - Krosno, głównie pod względem narażeń sadyżowych i wiatrowych.

W związku z ww. faktami, podjęto w PSE S.A. decyzję o zmianie założeń projektowych, zwłaszcza dla elementów decydujących o mechanicznej wytrzymałości linii. Uwzględniono wymagania normy [4] i zaktualizowanej oceny narażeń klimatycznych na terenach wzdłuż trasy linii [6]. Należy tu wspomnieć, że z uwagi na okres przejściowy obowiązywania obu norm (norma PN-E-05100-1 została wycofana w grudniu 2003 r.), projekt linii opracowano na podstawie tych właśnie dokumentów, przy czym jak już wspomniano, przyjęto ostrzejsze wymagania do obliczeń konstrukcji słupów wg normy PN-EN 50341-1. Wykonawcą projektu i budowy linii jest ELBUD Warszawa Sp. z o.o.

W referacie omówiono rozwiązania konstrukcyjne elementów linii 400 kV Tarnów – Krosno, koncentrując się na rozwiązaniach słupów i układów izolacyjnych oraz założeniach do projektu fundamentów.

Założenia projektowe w kontekście normy PN-EN 50341-1 Założenia ogólne

Linie 400 kV relacji Tarnów – Krosno tworzą dwa różne zaprojektowane odcinki: nowy obejmujący trasę - 75,3 km, wybudowany jako linia jednotorowa ze słupami kratowymi nowej serii W33, dostosowanymi do zawieszenia trzech przewodów fazowych 3xAFL 8 350 mm² w postaci wiązki trójprzewodowej i dwóch przewodów odgromowych oraz odcinek – istniejący jako tor II przy linii 400 kV relacji Tarnów – Rzeszów (o długości 6,7 km) - wybudowany w roku 1978 na słupach serii Y 52, z izolatorami ceramicznymi długopniowymi i wiązką dwuprzewodową 2x AFL 8 525 mm². Oba odcinki linii zostaną połączone na słupie nr 20/1.

W świetle wymagań normy [4] każda nowa linia powinna być zaprojektowana i wybudowana a następnie użytkowana tak, aby spełniała wymagania: bezpieczeństwa publicznego, trwałości eksploatacji, standardów środowiskowych i estetycznych. Realizując przedmiotowy projekt starano się uwzględnić powyższe zalecenia.

Przystępując do projektowania linii Tarnów – Krosno założono 50-letni okres jej użytkowania i 20 letni okres bezawaryjnej pracy.

Dla potrzeb oceny poziomu niezawodności projektowanej linii przyjęto, jako podstawę, doświadczenia eksploatacyjne z innych linii napowietrznych NN (zastosowano tzw. „podejście empiryczne”). Uwzględniono również tzw. „podejście statystyczne”, przyjmując pierwszy poziom niezawodności odpowiadający okresowi powrotu oddziaływań klimatycznych - T równe 50 lat [4]. Krytycznym czynnikiem wymiarującym obciążenie linii Tarnów - Krosno jest narażenie sadią katastrofalną.

Trasę linii podzielono na strefy oddziaływań klimatycznych: trzy strefy obciążenia sadią i oblodzeniem oraz dwie strefy obciążenia wiatrem. Strefy narażeń wiatrowych zostały określone zgodnie z warunkami podanymi w normie PN-E-5100-1 a strefy obciążeń sadiowych wg opracowania [6]. Na całej długości linii założono występowanie II strefy zabrudzeniowej.

Konstrukcje wsporcze zaprojektowano zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50341-1 i dokumentacji przetargowej, przyjmując, że wymiary słupów (wysokość, odstępy wzajemne przewodów) powinny być takie aby szerokość pasa ograniczonego użytkowania terenu (wynikająca z warunków ochrony środowiska) nie była większa niż 51m, a szerokość pasa linii nie większa niż 10,4m.

Konstrukcje wsporcze – wymagania techniczne

Zweryfikowane strefy oddziaływań klimatycznych, określające narażenie sadią i oblodzeniem wzdłuż trasy linii (oznaczone jako SI, SII i SIII), oraz narażenie wiatrem (oznaczone jako WI i WII) stanowiły podstawę do obliczeń wytrzymałości konstrukcji słupów i ich gabarytów.

Tabela 1. Niektóre wybrane przypadki obciążeń mechanicznych - założenia do projektowania słupów

Lp.	Przypadki obciążeń
1	Obciążenie od ciężaru konstrukcji
2	Obciążenie od ciężaru uzbrojenia słupa
3	Obciążenie od ciężaru przewodów
4	Obciążenie od ciężaru sadi normalnej na przewodach
5	Obciążenie od parcia wiatru na przewody w kierunku prostopadłym do linii
6	Obciążenie od parcia wiatru na konstrukcję w kierunku prostopadłym do linii
7	Obciążenie od parcia wiatru na uzbrojenie słupa w kierunku prostopadłym do linii
8	Obciążenie od parcia wiatru na konstrukcję w kierunku równoległym do linii
9	Obciążenie od parcia wiatru na uzbrojenie słupa w kierunku równoległym do linii
10	Obciążenie od naciągu podstawowego przewodów (-5°C + S _n)
11	Obciążenie od naciągu przewodów w temperaturze +10°C
12	Obciążenie od naciągów przewodów (-5°C + S _k)
13	Obciążenie od ciężaru oblodzenia na konstrukcji

Słupy projektowano uwzględniając przede wszystkim wymagania norm [2,4] dla przyjętych kombinacji oddziaływania sił obciążeniowych wg określonych schematów. Niektóre, przykładowe przypadki obciążeń

mechanicznych uwzględniane w obliczeniach i analizach podano w tablicy 1 dla zobrazowania złożoności zagadnienia. Do obliczeń przyjęto 35 kombinacji różnorodnych obciążeń, lub ich wielorakich kombinacji.

W efekcie wielomiesięcznych prac analityczno-projektowych, wykonanych przez zespół projektantów w firmie Elbud Warszawa, opracowano serię słupów W33, odpowiednio dostosowanych pod względem wytrzymałości mechanicznej do każdej ze stref klimatycznych. Zaprojektowano następujące sylwetki słupów:

- przelotowych: PI, PII, PIIIa;
- przelotowych leśnych: PLI, PLIIa;
- odciągowych: ON 170a, ON 150, ON 150a, ON 120, ON 120a oraz
- specjalnego wykonania: K 60.

Przykładowe sylwetki słupów pokazano na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Sylwetka słupa przelotowego – PI, posadowionego w dolinie rzeki Wisłok



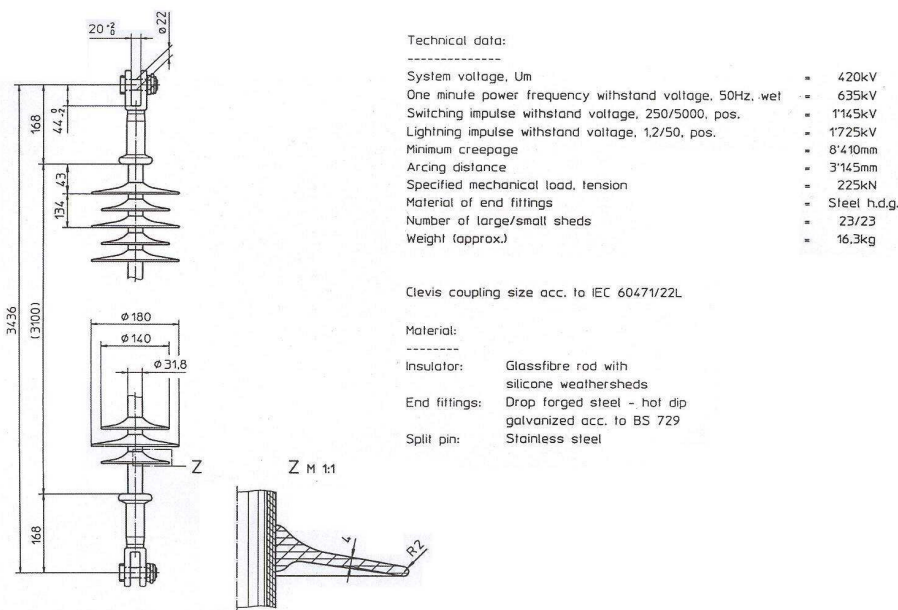
Rys. 2. Sylwetka słupa przelotowego P I+10 – na stacji prób

Zaprojektowane konstrukcje wsporcze wymagały szeregu sprawdzeń i testów oraz wielu korekt, zanim przystąpiono do próbnego montażu słupów. Wspomniane projekty opiniowali specjaliści z dwóch niezależnych firm tj. Instytutu Techniki Budowlanej w Warszawie i Energo-projektu Poznań.

Zgodnie z wymaganiami dokumentacji przetargowej przeprowadzono niszczące próby wytrzymałości konstrukcji trzech wytypowanych do badań słupów. Dla wybranych typów słupów: PI + 10, PII + 10 i ON 150 + 10 opracowano program badań wytrzymałościowych. Z uwagi na ostrzejsze warunki prób wytypowano sylwetki słupów podwyższonych. Szczegółowy opis badań mechanicznych nowych konstrukcji słupów zawiera artykuł [7]. Wykonane badania potwierdziły zgodność przyjętego matematycznego modelu obliczeniowego i założeń projektowych dla wybranych przypadków obciążeń z rzeczywistą wytrzymałością nowych konstrukcji słupów serii W33.

Układy izolacyjne – wymagania techniczne

W układach izolacyjnych linii 400 kV Tarnów – Krosno zastosowano po raz pierwszy w kraju izolatory kompozytowe dostosowane do poziomu napięcia - 400 kV. Charakteryzują się one następującymi znamionowymi parametrami technicznymi: rdzeń izolatora o średnicy 25 mm i długości 3436 mm wykonany z włókien szklanych typu E-CR, spojonych żywicą epoksydową posiada znamionową wytrzymałość mechaniczną na rozciąganie równą 225 kN. Obudowa i klosze izolatora zostały wykonane z gumy silikonowej HTV o jasno szarym kolorze, odpornej na narażenia zabrudzeniowe. Okucia izolatorów, typu widlastego wykonano ze stali kutej, cynkowanej na gorąco. Na całej długości linii zastosowano izolatory jednego typu, nie różnicując wytrzymałości mechanicznej dla zawieszonych przelotowych i odciągowych. Izolatory przed wysyłką do Polski przeszły próby kontrolno – odbiorcze u producenta z wynikiem pozytywnym. Na rysunku 3 pokazano konstrukcję zakupionego izolatora.



Rys.3. Izolator kompozytowy 400 kV – parametry techniczne

Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50341-1 układy izolacyjne w linii 400 kV powinny być tak zaprojektowane aby były spełnione zasady koordynacji izolacji (zachowanie właściwych odstępów izolacyjnych), przyjęte w Krajowym Systemie Energetycznym wg. [8].

Łańcuchy izolatorowe zaprojektowane dla linii Tarnów – Krosno służą podtrzymaniu (zawieszeniu) wiązki trzech przewodów fazowych w układzie trójkąta równobocznego o bokach 400 mm, zwróconego wierzchołkiem w dół, przy ich maksymalnym naprężeniu w linii wynoszącym 99 MPa.

Zaprojektowano następujące układy izolacyjne:

- łańcuch odciągowy – ŁO2 (podstawowy dla słupów mocnych),
- łańcuch odciągowy – ŁO3 (stosowany w warunkach obostrzeń),
- łańcuch przelotowy – ŁPV (podstawowy dla słupów przelotowych),
- łańcuch przelotowy – ŁPV2/1 (stosowany w warunkach obostrzeń),
- łańcuch podtrzymujący mostek prądowy – ŁPVM,

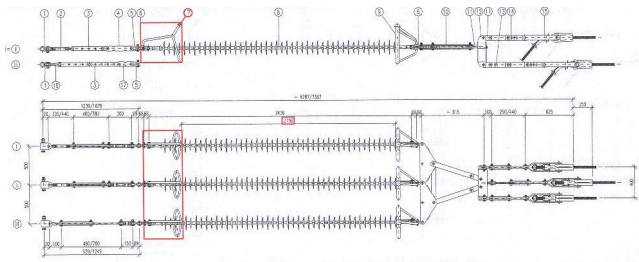
Łańcuchy izolacyjne wyposażono w mocowane na końcach izolatorów rurowe pierścienie łukoochronne, których wytrzymałość dostosowana jest do prądu zwarcia o wartości równej 31,5 kA. Osprzęt ochronny służy również wysterylizowaniu pola elektrycznego w węźle montażowym izolatora.

W celu sprawdzenia niezawodności projektowanych układów izolacyjnych oraz ich odporności na działanie przepięć, poddano wytypowane łańcuchy izolatorowe badaniom napięciowym i zwarciovym przed ich zainstalowaniem w budowanej linii. W ramach badań napięciowych – realizowanych w Instytucie Energetyki - wykonano próby napięciem udarowym, piorunowym i łączeniowym a także pomiary zakłóceń radioelektrycznych i wylądowań ulotowych osprzętu [9]. W ramach badań zwarciovych wykonano próbę odporności łukowej [10]. Z uwagi na ostrzejsze warunki próby badania realizowano na łańcuchach izolatorowych przeznaczonych do pracy w warunkach obostrzeń. Łańcuch odciągowy ŁO3 badano łącznie z łańcuchem podtrzymującym mostek prądowy - ŁPVM. Wszystkie próby zostały wykonane zgodnie z właściwymi normami przedmiotowymi. Badane układy izolacyjne przedstawiono na rysunkach 4 i 5.

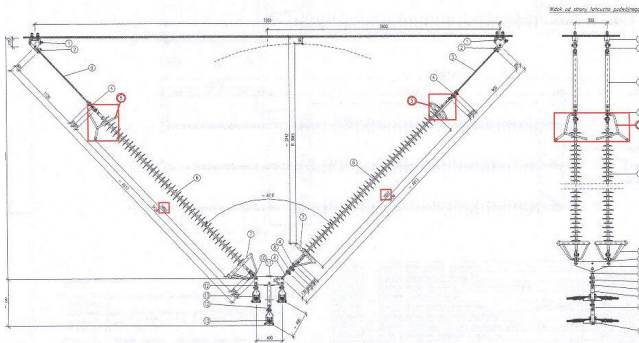
W trakcie prób okazało się, iż należy zweryfikować założenia projektowe w odniesieniu do górnego pierścienia łukoochronnego. Przekonstruowano ramię górnego różka, skracając jego długość z 50 cm na 40 cm oraz usunięto ekranujący pierścień toroidalny w łańcuchu ŁPV 2/1. Wprowadzone zmiany poprawiły (obniżyły) poziom zakłóceń radioelektrycznych oraz poziom wylądowań ulotowych osprzętu w łańcuchu ŁV2/1.

Pod względem wytrzymałości mechanicznej układy izolacyjne do linii Tarnów – Krosno dobrane zostały zgodnie z wymaganiami normy [11]. W przypadku łańcuchów wielorzędowych zrezygnowano z zawieszania wielopunktowego na rzecz zawieszania jednopunktowego z mocowaniem zawiasowym. W trakcie eksploatacji linii istnieje możliwość wystąpienia nierównomiernych obciążeń izolatorów w łańcuchu wielorzędowym, co przy znacznych długościach rdzeni szkło-epoksydowych i niewielkich ich średnicach mogłoby skutkować narażeniem na dodatkowe momenty gnące, na które izolatory liniowe długopniowe nie są projektowane.

Należy tu wspomnieć również o podatności izolatorów kompozytowych na uszkodzenia w trakcie prac montażowych, zarówno podczas składania łańcuchów jak i ich instalacji na słupach. Przed montażem izolacji w linii, firmy wykonawcze powinny być przeszkolone w zakresie instalacji izolatorów kompozytowych.



Rys.4. Łańcuch izolatorowy odciągowy ŁO3 – układ badany



Rys.5. Łańcuch izolatorowy przelotowy ŁPV2/1 – układ badany

Fundamenty – wymagania techniczne

Z uwagi na ograniczenia limitujące zakres publikacji jest niemożliwe odniesienie się do wszystkich elementów budowanej linii. Uznano jednak, że omówienie (nawet pokrótce) prac związanych z projektowaniem fundamentów słupów Linii Tarnów – Krosno wydaje się uzasadnione. Fundamenty przenoszą obciążenia ze słupów na podłoże oraz zabezpieczają je przed krytycznymi przemieszczeniami gruntu. Należy tu podkreślić, że teren, przez który przebiega trasa przedmiotowej linii jest w znacznej części pofalowany z dużymi różnicami wysokości pomiędzy stanowiskami słupów. Dla potrzeb prawidłowego zaprojektowania fundamentów linii Krosno – Tarnów należało dodatkowo rozpoznać podłoże gruntowe oraz warunki gruntowo - wodne na trasie linii w miejscach posadowienia słupów. Prace geotechniczne wykonano na 31 stanowiskach słupów gdzie wykluczono możliwość występowania powierzchniowych ruchów masowych gruntu (zsuwów, spływów lub osuwisk) oraz na 13 stanowiskach zlokalizowanych na obszarach potencjalnego występowania procesów osuwiskowych. Zaprojektowano fundamenty trzech rodzajów: prefabrykowane, terenowe i palowe. Fundamenty dobrano do poszczególnych rodzajów słupów na podstawie obliczeń wykonanych dla gruntu o uśrednionych parametrach. Fundamenty prefabrykowane z kotwą zawiasową zaprojektowano dla wszystkich stref narażenia sadzią i obłodem SI, SII i SIIa - tylko dla słupów przelotowych. Dobrano je na podstawie sił katalogowych podanych przez producenta - ELBUD Przemysł. Fundamenty terenowe tj. żelbetowe wylewane na mokro na budowie, z kotwą sztywną wykonane z betonu zbrojonego stalą, dobrano zgodnie z normą [12], poprzez przeliczenie ich na wciskanie i wyciąganie z gruntu. Fundamenty te zaprojektowano dla słupów mocnych i leśnych. Z kolei fundamenty słupów mocnych dla terenów o słabych warunkach geotechnicznych posadowienia jak np. tereny zalewowe rzeki Wisłok i Wisłoka lub grunty osuwiskowe zaprojektowano jako fundamenty palowe typu Pale Franki. Na gruntach słabych dla montażu tych fundamentów oraz na zboczach gór gdzie występują osuwiska gruntu jak i dla tych stanowisk gdzie nie jest możliwy dojazd urzędów „palownicy”, zaprojektowano fundamenty palowe składające się z mikro pali wykonywanych najnowszą ciśnieniową technologią.

Wielość projektów fundamentów i duże zróżnicowanie technologii ich wykonywania wynika z trudnych warunków górskich trasy linii oraz częściowej lokalizacji linii w strefach zalewowych rzek.

Wnioski

1. Norma PN-EN 50341-1 prezentuje odmienną (w stosunku do dotychczas stosowanej) metodologię projektowania konstrukcji wsporczych do linii NN a w związku z tym również inną filozofię doboru fundamentów słupów. Wymagania ww. normy zostały uwzględnione w projekcie budowy linii 400 kV relacji Tarnów – Krosno Iskrzynia.
2. Weryfikacja założeń projektowych w zakresie obciążeń limitujących gabaryty i wytrzymałość konstrukcji wsporczych oraz innych elementów linii była bezpośrednią przyczyną dostosowania projektu do warunków narażeń występujących na trasie linii 400 kV Tarnów – Krosno Iskrzynia, co istotnie opóźniło realizację ww. zadania inwestycyjnego.
3. Zaprojektowane układy izolacyjne z izolatorami kompozytowymi do linii 400 kV przeszły wszystkie próby napięciowe i prądowe z wynikiem dodatnim spełniając wymagania norm w zakresie wykonywanych prób.
4. W związku z zastosowaniem izolatorów kompozytowych w układach izolacyjnych linii Tarnów – Krosno należy zainteresować się nowymi metodami diagnostycznymi izolatorów w trakcie ich eksploatacji; sprawdzanie wytrzymałości elektrycznej izolatorów kompozytowych będzie koniecznością w przypadkach zastosowań techniki prac pod napięciem.

LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa, Dokumentacja przetargowa na realizację połączenia elektroenergetycznego 400 kV Tarnów Krosno Iskrzynia wraz z robotami towarzyszącymi, *Opracowanie PSE S.A.*, (2002)
- [2] Norma PN-E-050100-1, Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa, (1998)
- [3] Norma EN 50341-1, Overhead electrical lines exceeding AC 45. Part 1: General requirements - common specifications, (2001)
- [4] PN-EN 50341-1, Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne – wspólne specyfikacje, (2003)
- [5] Kurbiel W., Pawlicki R., Wyszogrodzki Z., Żebro J., Rumian J., Awaryjne linie w latach 1998-2003, *Raport techniczny EP Kraków nr X – 114223*, (2003)
- [6] Wyszogrodzki Z., Żebro J., Musiał T., Analiza narażeń klimatycznych w aspekcie normy europejskiej, *Opracowanie EP Kraków, nr X – 114828*, (2003)
- [7] Podhajecki H., Próby wytrzymałościowe i zniszczeniowe słupów dla linii Tarnów – Krosno, *Biuletyn Miesięczny PSE S.A.* 10, 160 (2004), nr 10, 5-10
- [8] Norma PN-EN60071-1, Koordynacja izolacji. Definicje, zasady i reguły, (1999)
- [9] Mikołajczyk J., Badania łańcuchów izolatorowych 400 kV projektowanych dla linii Tarnów – Krosno Iskrzynia przez ELBUD Warszawa sp. z o.o., *Opracowanie Instytutu Energetyki*, (2003), Nr EWN/86/E/03
- [10] Maziarz S., Próby zwarciowej odporności łukowej łańcuchów izolatorów typu ŁPV 2/1 i ŁO3 z izolatorami kompozytowymi produkcji SEFAG i osprzętem produkcji ZWSS BELOS S.A., *Opracowanie Instytutu Energetyki*, Nr EUR/25/E/2003-1, Nr EUR/25/E/2003-2
- [11] Norma PN-E 06313, Dobór izolatorów liniowych i stacyjnych pod względem wytrzymałości mechanicznej, (1988)
- [12] Norma PN-EN 61773, Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Budowa fundamentów konstrukcji wsporczych, (2000)

Autorzy: Ewa Strużewska, ewa.struzewska@pse-operator.pl, Henryk Podhajecki, henryk.podhajecki@pse-operator.pl, PSE-Operator S.A. Departament Infrastruktury Sieciowej