

# Analiza porównawcza nośności wyznaczanych na podstawie norm PN-B/ PN-E i PN-EN oraz badań w skali rzeczywistej słupów kratowych linii elektroenergetycznych

Prof. nadzw. dr hab. inż. Paweł Lewiński, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa  
mgr inż. Robert Czyż, mgr inż. Piotr Wojciechowski, Elbud-Projekt Warszawa

## 1. Standardowe specyfikacje techniczne dla słupów kratowych

Elektroenergetyczne słupy stalowe o konstrukcji kratowej są przedmiotem nowych Standardowych Specyfikacji Technicznych dla linii napowietrznych 400 kV i 220 kV opracowanych przez Instytut Techniki Budowlanej w Warszawie dla Polskich Sieci Elektroenergetycznych Operator S.A. w celu wdrożenia do projektowania takich słupów wsporczych norm europejskich [1]. Specyfikacje te na nowo regulują poziom bezpieczeństwa i niezawodności linii.

W przypadku konstrukcji stalowych podpór linii elektroenergetycznych, wartości współczynników częściowych do oddziaływań są znacznie niższe niż w systemie Eurokodów, a tym samym odbiegają one od przyjętych tam założeń dotyczących konstrukcji stalowych w budynkach, gdyż np.: współczynnik do obciążenia wiatrem wg PN-EN 1991-1-4 [10] wynosi 1,5, a wg PN-EN 50341-3-22 [3] wynosi: 1,3. Oprócz obciążeń wielokrotnie zmiennych, konstrukcje podpór linii elektroenergetycznych narażone są na korozję oraz negatywne działania ze strony osób trzecich. Z tego względu nie można konstrukcji podpór tych linii projektować wg odpowiednich części EC3

bez wprowadzenia dodatkowych zastrzeżeń, co do współczynnika częściowego  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1}$ . W związku z powyższym należy w rozpatrywanym przypadku w sposób bardziej rygorystyczny uwzględniać wymagania w zakresie nośności podpór, zarówno zawarte w Eurokodach serii EN 1993, jak i w normach serii EN 50341. Konstrukcje podpór linii elektroenergetycznych są poddawane obciążeniom wielokrotnie zmiennym nie tylko w postaci oddziaływania wiatru, ale i oddziaływań termicznych, a zatem uzasadnione jest uwzględnienie ich wytrzymałości zmęczeniowej. Uznano za konieczne, aby (bez przeprowadzania obliczeń zmęczeniowych) zapewnić przynajmniej spełnienie warunku stosowności reguł normy PN-EN 1993-1-9:2007 [7] w odniesieniu do konstrukcji mogących ulec zniszczeniu przy obciążeniach wysokocyklowych. Przez analogię do wymagań dotychczasowej normy [8], za warunek taki uznano pierwszą część warunku normowego (8.1) [7], ograniczającego nominalne zakresy zmienności naprężeń od obciążeń częstych, co zapewniałoby zabezpieczenie konstrukcji przed zniszczeniem przy obciążeniu niskocyklowym. Wieloletnie doświadczenia w projektowaniu konstrukcji podpór linii elektroenergetycznych wskazują na to, że duży zakres zmienności

naprężeń w cyklu naprzemiennym jest możliwy w tego typu konstrukcjach, zwłaszcza w przypadku elementów skratowań bocznych, które jednakże warunkują nośność wieży kratowej. Uwzględniając występujące tam zakresy naprężeń oraz biorąc pod uwagę współczynniki częściowe po stronie materiałów według EC3:  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ , wywnioskowano, że w pewnych warunkach takie niebezpieczeństwo istnieje. W wyniku analizy stwierdzono, że aby warunek normowy (8.1) nie był przekroczony, konieczne jest niewielkie (nieco poniżej 5%) zwiększenie wartości współczynników częściowych  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1}$ , przy równoczesnym przyjęciu, że współczynniki te zgodnie z PN-EN 50341-1:2005 [2], p. 7.3.5.1.1 powinny wynosić co najmniej 1,1. A zatem współczynniki częściowe po stronie nośności kratowych słupów wsporczych, spełniające równocześnie wymagania normy PN-EN 50341-1:2005 [2] oraz warunek (8.1) normy PN-EN 1993-1-9:2007 [7], powinny wynosić [1]:

- $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,15$  – współczynnik nośności przekroju poprzecznego elementu ( $\gamma_{M0}$ ) i nośności elementu z uwzględnieniem wybożenia ( $\gamma_{M1}$ ),
- $\gamma_{M2} = \gamma_{Mj} = 1,25$  – współczynnik nośności przekroju poprzecznego elementu osłabionego otworami ( $\gamma_{M2}$ ) i nośności połączeń śrubowych lub spawanych ( $\gamma_{Mj}$ ).

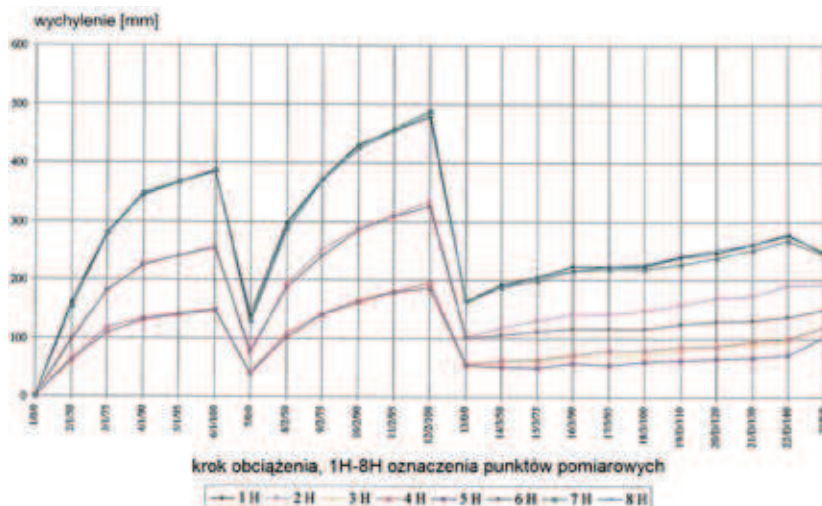
## 2. Badania doświadczalne słupów

Badania doświadczalne 3 typów słupów przeprowadzono na poligonie badawczym w Żylinie (Słowacja) w okresie listopad 2011 – luty 2012 r. Na podstawie norm [4] i [5] opracowano dla badanych słupów tzw. drzewa obciążeń, a następnie po ich szczegółowej analizie wyznaczono dla każdego z typów słupów po 2 kombinacje obciążeń dla SGN i po 1 dla SGU. Jedną z kombinacji dla SGN została wytypowana jako kombinacja niszcząca przewidziana do badania do poziomu 160% obciążeń kombinacji obliczeniowej. Badania doświadczalne dotyczyły słupów realnie występujących na linii, a układy obciążeń realizowane były poprzez odpowiednie układy olinowania. Poszczególne kombinacje obciążeń przykładane były w kolejnych krokach obejmujących odpowiednio: 50, 75, 90, 95 i 100% obciążeń obliczeniowych lub charakterystycznych. Kombinacja niszcząca SGN realizowana była powyżej 100% obciążeń obliczeniowych krokami co 10%, aż do osiągnięcia zniszczenia słupa lub stanu obciążenia w 160%. W wyniku przeprowadzonych prób wytrzymałości wszystkich badanych słupów nie stwierdzono przekroczenia SGU dla 100% wartości kombinacji związanych z tymi stanami ani przekroczenia SGN dla 100% wartości kombinacji z nimi związanych. Różnice wartości ugięć uzyskanych na drodze obliczeń i badań przedstawiono w tabeli 1.

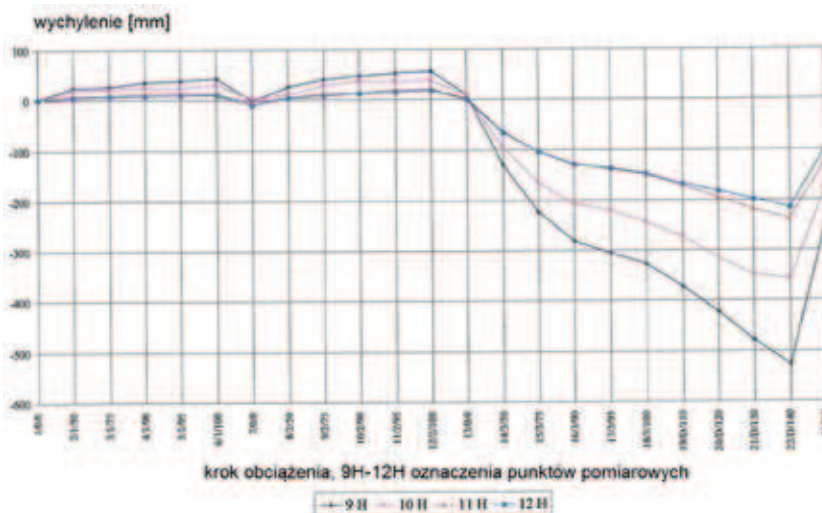
W trakcie badania słupa typu ON150w (M3w) zniszczenie słupa polegające na wyboczeniu ściskowego krawężnika w strefie podporowej nastąpiło dla wartości pomiędzy 140% i 150% obciążeń kombinacji niszczącej (schemat 2/3 jednostronnych naciągów – kombinacja 4a normy [3]). Zniszczenie nastąpiło w konstrukcji mocującej zaprojektowanej analogicznie jak dolny człon słupa. Obliczeniowo wykorzystanie nośności krawężnika tej konstrukcji było takie samo jak krawężnika trzonu słupa. Rysunek 3 przedsta-

Tabela 1. Różnice wartości ugięć uzyskanych z obliczeń i z badań

Typ słupa	Deformacja wierzchołka wyznaczona analitycznie	Deformacja wierzchołka wyznaczona doświadczalnie	Różnica ugięć
	[cm]	[cm]	[%]
ON150	24,7	26,4	7
P	34,4	32,7	5
PL	63,4	56,7	12



Rys. 1. Słup 220 kV ON150w. Graficzne przedstawienie przemieszczeń poziomych konstrukcji. Symbole 1 H ÷ 8 H – oznaczenia tarcz pomiarowych. Pomiary z teodolitu ustawionego w kierunku ściany P



Rys. 2. Słup 220 kV ON150w. Graficzne przedstawienie przemieszczeń poziomych konstrukcji. Symbole 9 H ÷ 12 H – oznaczenia tarcz pomiarowych. Pomiary z teodolitu ustawionego w kierunku ściany R

wia widok dolnej strefy zniszczonego krawężnika słupa. Słup PL uległ zniszczeniu na poziomie obciążeń wynoszących 150% kombinacji niszczącej (kombinacja 3 l. normy [3] – duże obciążenie oblodzeniem i umiarkowane obciążenie

wiatrem). Zniszczeniu uległy krawężniki nóg ściskanych na połączeniu kolumny i trzonu słupa – rys. 4. W trakcie badań słupa P przy obciążeniach zbliżonych do poziomu 150% kombinacji niszczącej, zerwaniu uległa jedna z lin naciągowych

**Tabela 2.** Wyniki badania próbek stalowych dla stali S355

Typ słupa	Średnia wartość $R_{eL}$ wyznaczona doświadczalnie	Wartość $f_d$ przyjmowana w obliczeniach	$R_{emin}$	Stosunek $R_{eL} : R_{emin}$	Stosunek $R_{eL} : f_d$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	–	–
ON150	436	305	355	1,23	1,43
P i PL	434	305	355	1,22	1,42

**Tabela 3.** Wyniki badania próbek stalowych dla stali S235

Typ słupa	Średnia wartość $R_{eL}$ wyznaczona doświadczalnie	Wartość $f_d$ przyjmowana w obliczeniach	$R_{emin}$	Stosunek $R_{eL} : R_{emin}$	Stosunek $R_{eL} : f_d$
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	–	–
ON150	319	215	235	1,36	1,48
P i PL	352	215	235	1,50	1,63

odpowiedzialna za obciążenia poprzeczniaka odgromowego. Dalszych prób nie kontynuowano.

Porównanie ugięć wyznaczonych obliczeniowo (MES) i pomierzonych wykazuje, że są one zbliżone co do wartości.

Przemieszczenia poziome słupów kratowych nie są stanem granicznym determinującym ich wymiarowanie. Zarówno ugięcia obliczone MES, jak i pomierzone w trakcie badań wykazują znaczny zapas (30–50%) w stosunku do ugięć dopuszczonych normowo.

Wyniki badań rozciągania próbek stalowych pobranych z elementów konstrukcji słupów przedstawiono w tabeli 2 (S355) i tabeli 3 (S235). Zapas nośności wynikający ze stosunku  $R_{eL} : f_d$  (słupy projektowane

były wg PN-B-03200 [8]) wynosił: a) w przypadku słupa typu ON150w (M3w):

– 1,48 (stal S235 – z której wykonane były krzyżulce; profile od L 40×40×4 do L 80×80×8);

– 1,43 (stal S355 – z której wykonane były krawężniki i pasy dolne poprzeczników; profile od L90×90×7 wzwyż);

b) w przypadku słupów typu P i PL:

– 1,63 (stal S235 – z której wykonane były krzyżulce; profile od L 40×40×4 do L 80×80×8);

– 1,42 (stal S355 – z której wykonane były krawężniki i pasy dolne poprzeczników; profile od L90×90×7 wzwyż).

A zatem zniszczenie słupa ON150w (M3w) przy obciążeniu obliczeniowym na poziomie pomiędzy 140

i 150% oraz słupa PL przy obciążeniu obliczeniowym na poziomie 150% było logiczną konsekwencją powyższych różnic w wartościach granic plastyczności  $R_{emin}$  i  $R_{eL}$ .

Analiza powyższych tabel dowodzi poprawności przeprowadzonego procesu projektowania. Ugięcia oraz wytrzymałość konstrukcji wyznaczone teoretycznie odpowiadają wielkościom uzyskanymi doświadczalnie.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone obliczenia porównawcze MES oraz tzw. badania typu w skali rzeczywistej (1:1) na poligonie badawczym w Żylinie dowiodły, że:

a) Słupy kratowe wymiarowane są z uwagi na stan graniczny nośności, a nie stan graniczny użyteczności. Zarówno ugięcia obliczone MES, jak i pomierzone w trakcie badań wykazują znaczny zapas (30–50%) w stosunku do ugięć dopuszczonych normowo.

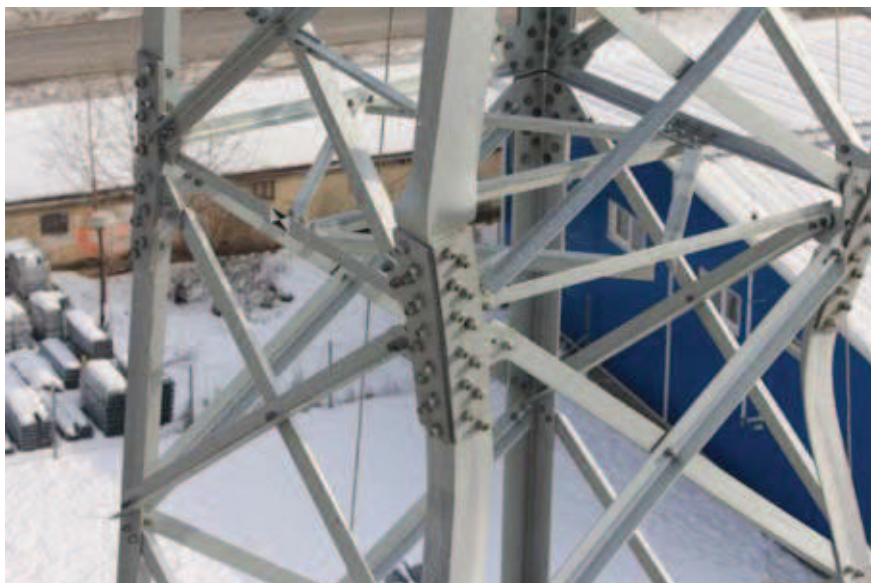
b) Zniszczenie słupów ON150 (M3w) i PL na poziomie obciążeń obliczeniowych zawartych pomiędzy 140 i 150%, biorąc pod uwagę stosunek  $R_{eL} : f_d$  (patrz tabele 2 i 3), dowodzi prawidłowości wykonanych obliczeń statycznych i wymiarowania słupa.

c) Słupy 220 kV były, zgodnie z wymaganiami SIWZ, wymiarowane wg [2],[3],[8] i [9]; następne projektowane słupy tego typu będą wymiarowane zgodnie z [1],[2],[3],[5],[6]. Równocześnie proces weryfikacji zaprojektowanej konstrukcji w postaci badań wytrzymałościowych w skali 1:1 prowadzonych do zniszczenia pozwoli zgodnie z zapisami załącznika J, p. J.5 normy [2] oraz [1] zastosować „łagodniejsze formuły obliczeniowe” i zmniejszyć aktualnie uzyskiwany w trakcie badań zapas bezpieczeństwa konstrukcji, a w związku z tym zmniejszyć jej ciężar i koszty.

d) Biorąc pod uwagę charakter pracy konstrukcji wsporczej narażonej bezpośrednio na działanie czynników zewnętrznych, takich jak: zagrożenie



**Rys. 3.** Postać zniszczenia słupa M3w: zniszczenie krawężnika nogi ściskanej w strefie podporowej



**Rys. 4.** Postać zniszczenia słupa kratowego PL: zniszczenie krawężników nóg ściskanych na połączeniu trzonu i kolumny

korozyjne, wandalizm (odkręcanie elementów, obciążanie konstrukcji maszynami rolniczymi itp.), obciążenia klimatyczne o charakterze wielokrotnie zmiennym – nadmierne zmniejszanie jej zapasu bezpieczeństwa jest nieracjonalne i niewskazane. Ze względu na konieczność ograniczenia nominalnego zakresu zmienności naprężeń od obciążeń częstych

(por. [7], p. 8(1)) oraz uwzględnienia wymagań p. 7.3.5.1.1 normy [2], a także pozostawienie w normie [3] dotychczasowych wielkości współczynników częściowych po stronie oddziaływań, sugeruje się celowość zachowania w dotychczasowej wysokości współczynników częściowych po stronie materiałów, tj.  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,15$ .

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Standardowe Specyfikacje Techniczne. Linia napowietrzna 400 kV. Załącznik 10. Projektowanie słupów i fundamentów linii na podstawie norm europejskich. Polskie Sieci Elektroenergetyczne Operator S.A., Konstancin-Jeziorna, Grudzień 2011 r.
- [2] PN-EN 50341-1:2005 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne
- [3] PN-EN 50341-3-22:2010 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV – Część 3: Zbiór normatywnych warunków krajowych
- [4] PN-EN-60652:2006 Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych
- [5] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [6] PN-EN 1993-3-1:2008 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [7] PN-EN 1993-1-9:2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie
- [8] PN-B-03200:1990 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [9] PN-B-03205:1996 Konstrukcje stalowe. Podpory linii elektroenergetycznych. Projektowanie i wykonanie
- [10] PN-EN 1991-1-4 Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru

## Zabezpieczenie strukturalne i powierzchniowe betonu w słupach elektroenergetycznych i oświetleniowych

Dr inż. Janusz Kubiak, dr inż. Aleksy Łodo, dr inż. Jarosław Michałek,  
Politechnika Wroclawska

### 1. Konstrukcje wsporcze dla napowietrznych linii elektroenergetycznych

Napowietrzne linie elektroenergetyczne średnich napięć SN buduje się obecnie w Polsce głównie na słupach strunobetonowych z żerdzi wi-

rowanych typu E [1, 5]. W przeszłości stosowano strunobetonowe żerdzie ażurowe typu BSW [3], a przy ich braku żerdzie żelbetowe ŻN [4]. W liniach niskich napięć nn używane są w dalszym ciągu żerdzie żelbetowe ŻN (zmodernizowane w 1995 r. [4]) i w coraz szerszym zakresie wi-

wane typu E. Słupy oświetleniowe można wykonywać z wirowanych żerdzi strunobetonowych EOP, EOC i EO [6] (jednak dominujące są słupy stalowe). Zamocowanie w gruncie żerdzi strunobetonowych E i żelbetowych ŻN realizuje się na podstawie rozwią-