

# Badania poligonowe innowacyjnych słupów linii elektroenergetycznych 400 kV



dr inż.  
**SŁAWOMIR LABOCHA**  
Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach  
Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych  
**ORCID 0000-0003-0331-4585**

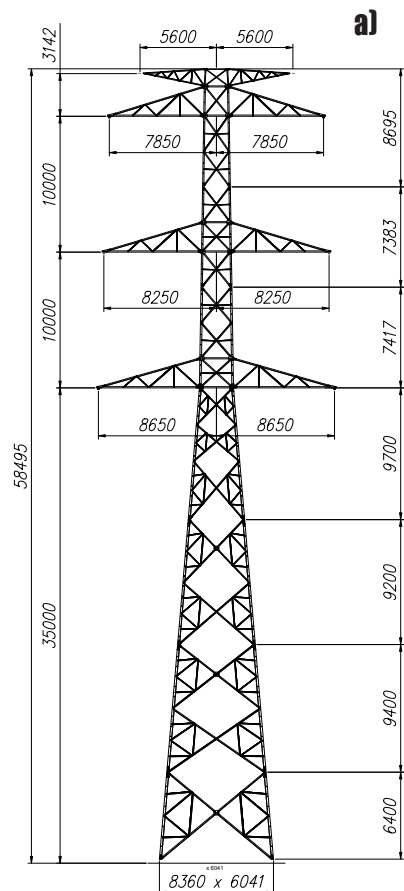
W artykule opisano rozwiązania konstrukcyjne oraz specjalistyczne badania innowacyjnych stalowych słupów kratowych przeznaczonych dla linii elektroenergetycznych 400 kV. Pełnowymiarowy prototyp nowych słupów poddano badaniom poligonowym obejmującym, poza weryfikacją nośności dla obciążeń normowych, określenie obciążenia niszczącego nową konstrukcję.

## Wprowadzenie

Szczegółowe wymagania dla stalowych kratowych słupów pełniących funkcję konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych podano w normach PN-EN 50341-1 [1] oraz PN-EN 50341-2-22

[2]. Obie normy wprowadziły znacząco wyższe standardy bezpieczeństwa dla budowy linii elektroenergetycznych wobec dotychczas stosowanych na terenie Polski. Nowe standardy wymusiły uruchomienie prac badawczych poświęconych opracowaniu zak-

tualizowanych rozwiązań konstrukcji wsporczych spełniających podwyższone wymagania bezpieczeństwa przy zachowaniu ekonomicznych aspektów. Kompleksowe prace badawcze były prowadzone w ramach realizacji zadań do projektu NCBIR PO-IR.01.01.01-00-0789/17 pt. *Opracowanie nowego typoszeregu słupów energetycznych 400 kV oraz odpowiednich dla nich fundamentów, w tym fundamentów do zastosowania na gruntach o szczególnie niekorzystnych parametrach geotechnicznych*. Projekt we współpracy z Zakładem Konstrukcji Metalowych i Zakładem Geotechniki, Mostów i Budowli Podziemnych Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej realizowała firma Enprom Sp. z o.o. W zakresie części projektu poświęconego konstrukcjom wsporczym opracowano nowe serie słupów kratowych dla linii 400 kV. Jedną z innowacyjnych serii słupów powstała z wykorzystaniem kątowników kształtowanych na zimno zastępujących kątowniki walcowane – powszechnie stosowane dotychczas w budowie energetycznych słupów kratowych. Celem innowacyjnych badań było zminimalizowanie masy całkowitej konstrukcji przy zachowaniu wymaganych normą nośności, w szczególności z uwagi na niższą odporność kształtowników zimnogiętych na gietnoskrętną postać niestałości. Analizy obliczeniowe były podstawą finalnego projektu, a następnie wykonania prototypu słupa w skali 1:1 i przeprowadzenia prób obciążeniowych.



## Badania innowacyjnych słupów linii 400 kV serii EN422:BR:16

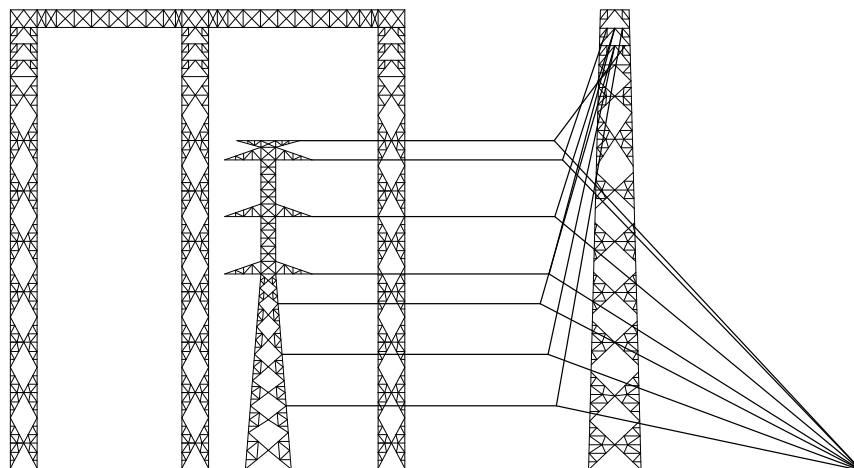
Słupy serii EN422:BR:16 przeznaczone dla dwutorowych linii 400 kV zaprojektowano zgodnie z wymogami norm PN-EN 50341-1:2010 [1] oraz PN-EN 50341-

Rys. 1. Geometria badanego słupa EN422:BR:16 P (H=58,495 m): a) schemat, b) widok

2-22:2016 [2]. Badania poligonowe wykonano na słupie tzw. przelotowym typu P w wersji wysokościowej +/-0 (wysokość całkowita konstrukcji 58,495 m) jako najbardziej reprezentatywnym dla całej serii EN 422:BR:16. Testy przeprowadzono w listopadzie 2020 roku w Bukareszcie w Rumunii na certyfikowanym poligonie firmy Electromontaj. Wszystkie badania przeprowadzono na podstawie specjalistycznej normy PN-EN 60652:2006 – Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych [3]. Schemat konstrukcyjny badanego słupa przedstawiono na rys. 1a, a widok konstrukcji przygotowanej do badań na rys. 1b. Słup zaprojektowano ze stali S355J2. Sylwetka słupa charakteryzowała się optymalną geometrią w świetle wymagań elektrycznych normy PN-EN 50341-2-22:2016 [2], natomiast innowacja rozwiązań konstrukcyjnych polegała na wykorzystaniu w konstrukcji kątowników zimnogiętych zastosowanych na pręty wykrętońców drugorzędnych. Do budowy słupów użyto kształtowników ZKL: 40 x 4, 45 x 4, 50 x 4, 60 x 4 oraz 70 x 40 x 4.

Słup zaprojektowano zgodnie z wymaganiami normy [2] dla obciążeń jednoznacznie wynikających z założeń bazowych: rozpiętość nominalna przęsła 450 m, strefa obciążenia wiatrem i oblodzeniem 1, przewody 3 x 468/24-A1F/UHST-261 (naciąg 23,5 kN) oraz AFL-1.7-95 (naciąg 12,5 kN). Konstrukcję słupa zbadano z uwzględnieniem czterech krytycznych kombinacji obciążeń wg normy [2], przy czym trzy pierwsze próby prowadzono do wartości 100% obliczeniowych obciążeń projektowych, natomiast próba końcowa obejmowała badania niszczące prowadzone do momentu zniszczenia słupa. Badania weryfikacyjne obejmowały symulację obciążenia poprzecznego wiatrem z oblodzeniem i bez oblodzenia (kolejno kombinacje wg nomenklatury normy [2]: 3a „x”, tj. ekstremalne oblodzenie z umiarkowanym wiatrem, 3b „x”, tj. nominalne oblodzenie z wiatrem i 1 „x”, tj. ekstremalny wiatr bez oblodzenia). Badania niszczące przeprowadzono dla kombinacji obciążeń wiatrem diagonalnym, tj. 1 „xy” wg normy [2]. Obciążenia przykładano kolejno w krokach: 50%, 75%, 90%, 95%, 100% i dalej w próbie niszczącej co 5%. Zgodnie z wymogami normowymi [3] konstrukcje słupów powinny w próbie niszczącej wytrzymać obciążenia na poziomie co najmniej 105% deklarowanych obciążeń obliczeniowych, niemniej w przypadku linii 400 kV na terenie Polski operator Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA wymaga standardowo poziomu bezpieczeństwa w wysokości 115%.

Wszystkie obciążenia, zarówno pochodzące od oddziaływań liniowych (tj. przewodów), jak i oddziaływań wiatru na konstrukcję słupów, odwzorowano za pomocą układów liniowych sterowanych automatycznie za pośred-



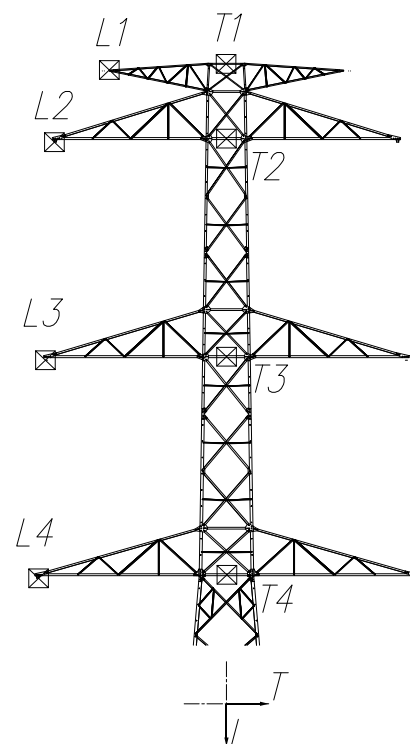
Rys. 2. Schemat olinowania przekazującego obciążenia na słup

nictwem systemów hydraulicznych. Schemat użytego olinowania przekazującego obciążenia testowe pokazano na rys. 2. Poza ciągłym i monotonicznym rejestrowaniem obciążeń kontrolowano również wielkości przemieszczeń im towarzyszących w wybranych charakterystycznych punktach. Na rys. 3. przedstawiono lokalizację punktów pomiaru przemieszczeń prostopadłych do linii (T1 do T4) oraz równoległych do linii (L1 do L4).

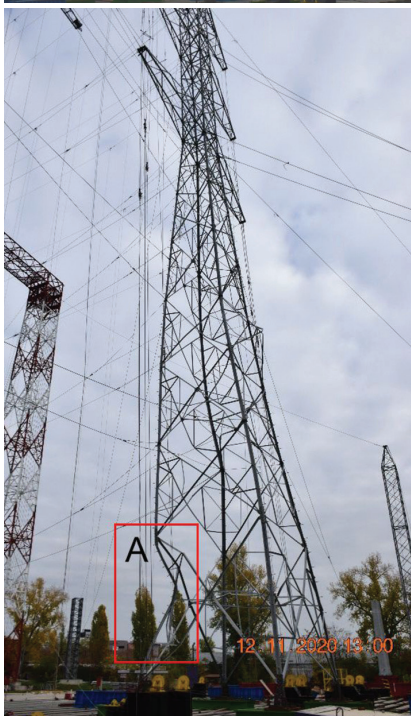
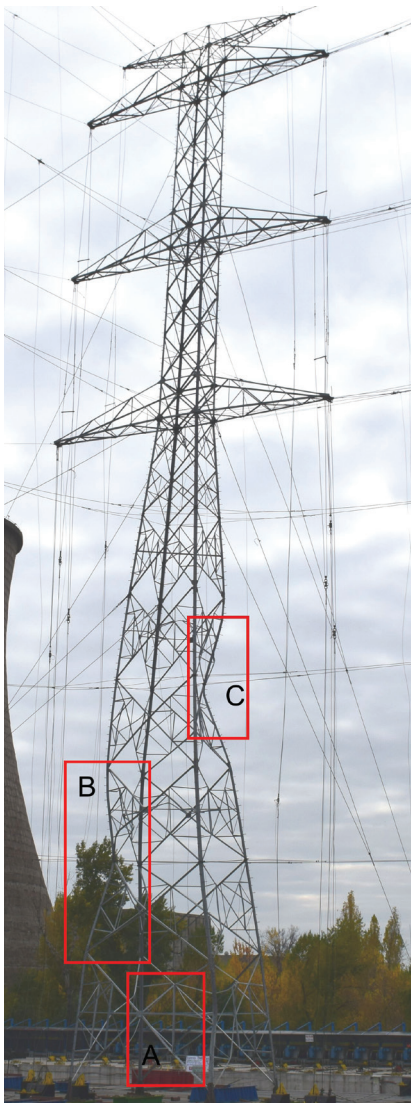
Słup dla wszystkich kombinacji obciążeń potwierdził wymaganą normową nośność. Zniszczenie konstrukcji słupa nastąpiło po przekroczeniu poziomu 125% obliczeniowych obciążeń projektowych przewidzianych dla badania niszczącego. Kluczowym elementem decydującym o nośności granicznej konstrukcji zgodnie z przewidywaniami analitycznymi okazały się dolne sekcje krawężników, które uległy wyboczeniu. Schemat zniszczenia słupa przedstawiono na rys. 4. Czerwonym prostokątem (A) zaznaczono na widoku z przodu sekcję, od której rozpoczęła się utrata stateczności konstrukcji. Niestateczność wyższych sekcji krawężnika (B, C) nastąpiła wtórnie, w wyniku pokrytycznych deformacji konstrukcji słupa. Warto podkreślić specyfikę badań właściwą dla konstrukcji elektroenergetycznych projektowanych i badanych na poligonach w Europie. Optymalne kształtowanie konstrukcji słupów oraz stosowanie lin asekuracyjnych pozwala jednoznacznie określić nośność graniczną ustroju przy jednoczesnym uniknięciu katastrofalnych form zniszczenia całych słupów (podobne badania opisano w pracach [4, 5, 6]) i innych efektów obserwowanych podczas badań prowadzonych poza obszarem UE. Po lawinowym zniszczeniu całego słupa utrudniona jest analiza mechanizmu i form zniszczenia elementów, a wiarygodność testów materiałowych może być dyskusyjna. Rejestracja wideo przebiegu badań nie rozwiązuje wszystkich problemów interpretacyjnych.

Elementy konstrukcyjne i połączenia przedmiotowego słupa EN422:BR:16 P za-

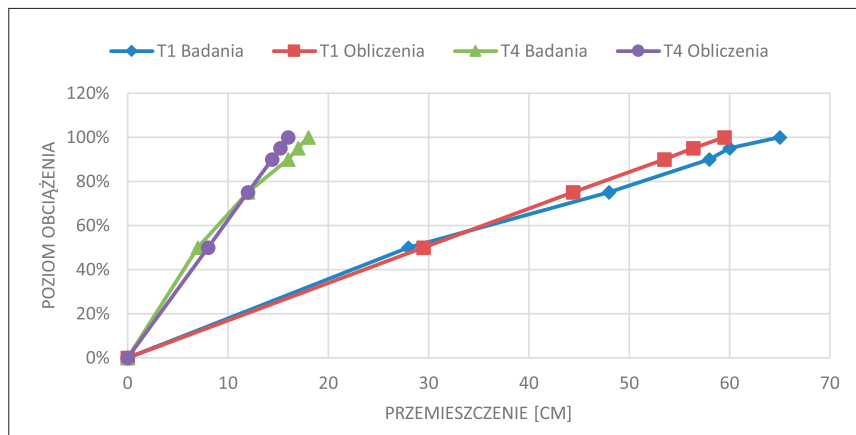
projektowano dla poziomu wykorzystania nieco poniżej 100% nośności teoretycznej, a w obliczeniach uwzględniono obligatoryjny współczynnik częściowy bezpieczeństwa po stronie materiałowej na poziomie 1,15 dla stali S355 wg [2]. Wykonane po próbach badania materiałowe wykazały w zastosowanych kształtownikach wyższe od nominalnych wartości granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie. W przypadku elementów krytycznych krawężników, które uległy zniszczeniu po utracie stateczności, średnie wartości parametrów wytrzymałościowych wynosiły:  $f_y=378$  MPa i  $f_u=524$  MPa. Po uwzględnieniu powyższych czynników okazało się, że oszacowana zgodnie z normą [8] nośność graniczna słupa (limitowana w rozpatrywanym przypadku nośnością kra-



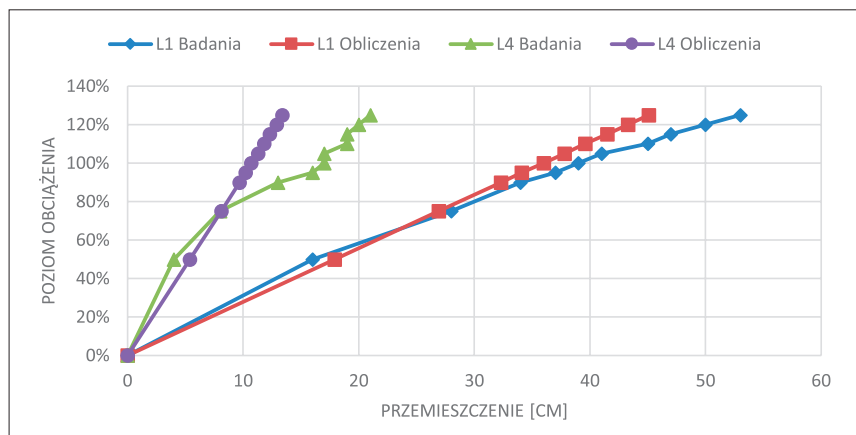
Rys. 3. Punkty pomiaru przemieszczeń konstrukcji



Rys. 4. Widok zniszczenia słupa EN 422:BR: 16 P (u góry widok od frontu, na dole widok z tyłu) kolejność zniszczeń sekcji: A, B, C



Rys. 5. Porównanie przemieszczeń poprzecznych punktów T1 i T4 (badanie 1)



Rys. 6. Porównanie przemieszczeń podłużnych punktów L1 i L4 (badanie 4)

węźników) zgadzała się z dokładnością około 2–3% względem wartości uzyskanej podczas badań (pozostając po stronie bezpiecznej).

### Wnioski

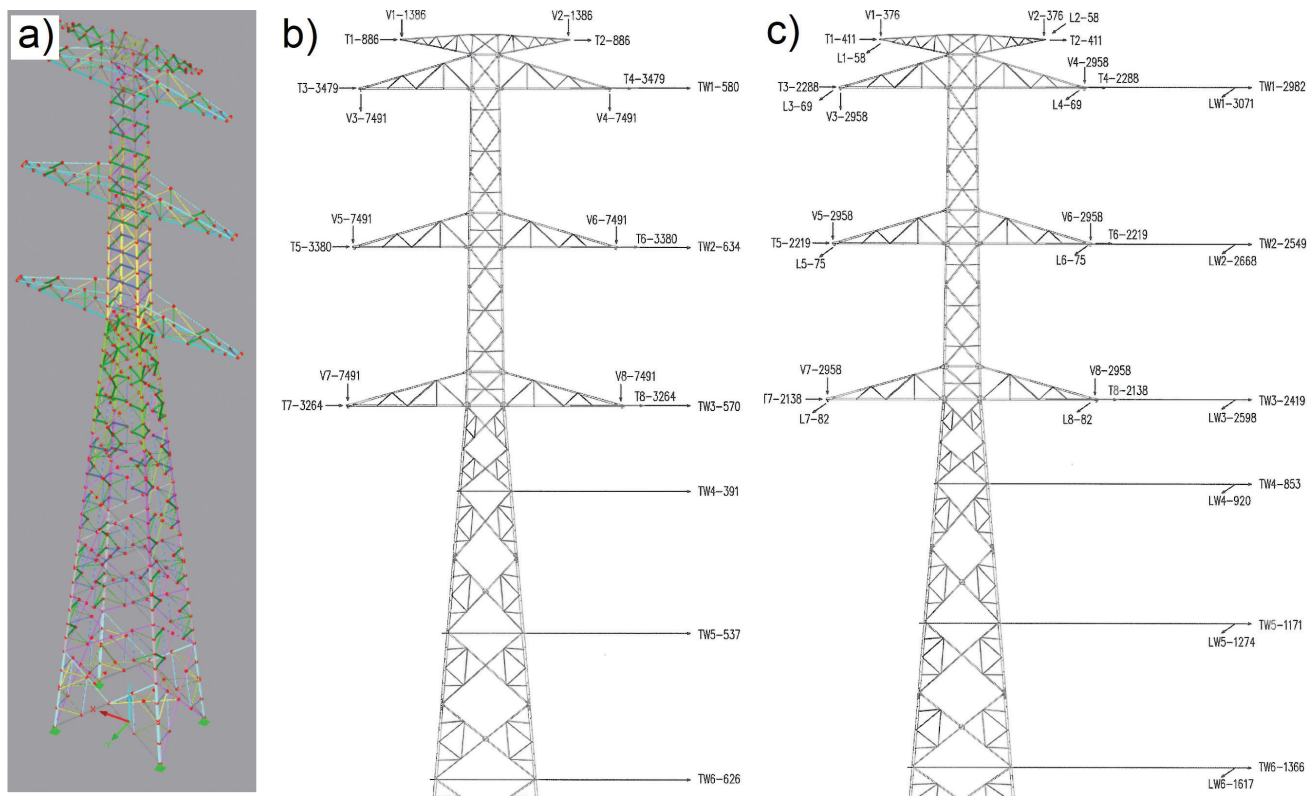
Utrata stateczności krytycznego elementu słupa nastąpiła w wyniku niestateczności przy ściskaniu w formie zasadniczo giętej, z wyraźnym wpływem lokalnego usztywnienia nakładkową blachą węzłową. Elementy drugorzędne uległy zniszczeniu albo w formie niestateczności przy ściskaniu, albo zerwania połączeń rozciąganych. Forma zniszczenia elementów zimnogiętych także wykazywała dominujący charakter wyboczenia giętego, uwidaczniając relatywnie niski wpływ niestateczności giętnoskrętnej. Deformacje skrętne obserwowane na tych elementach zasadniczo pochodziły już z fazy pokrytycznej.

W badaniach bardzo istotny wpływ na deformacje uwidacznia nieliniowa podatność węzłów z powodu poślizgów w połączeniach. Na rys. 5 i 6. przedstawiono porównanie wartości obliczonych w modelu MES typu perfect wg teorii II rzędu, odpowiednio dla kluczowych do oceny zachowania się słupa punktów pomiarowych T1 i T4 oraz L1 i L4 (patrz: rys. 3.) oraz wyników badań. Punkty pomiarowe 2 i 3 wykazywały trendy zmian analogiczne do punktu pomiarowego 4. Przestrzenne

modele MES słupów zbudowano w programie RFEM, odwzorowując konstrukcję podpartą w sposób przegubowo nieprzesuwny elementami sprężystymi typu 1D. Widok modelu oraz kombinacje obciążeń zastosowanych w badaniach 1 i 4 przedstawiono na rys. 7. (siły wyrażone w daN).

Można zauważyć wyraźną nieliniową zmienność pomierzonych podczas badań przemieszczeń, które poza początkową fazą (do poziomu około 70% normowych obciążeń obliczeniowych) przekraczają finalnie wartości obliczone w sprężystym modelu idealnym MES, odpowiednio: L1 – 17,5%, L4 – 56,7%, T1 – 9%, T4 – 12,5% (jak można wnioskować na podstawie krzywych przedstawionych na rys. 5 i 6.).

Podsumowując, należy zauważyć, iż ocena nośności elementów w wieżach kratowych wg wytycznych wskazanych w normach [8, 1, 2] jest w pełni wiarygodna i zdecydowanie lepiej odwzorowuje faktyczną nośność elementów kątownikowych (także zimnogiętych) w badanych urządzeniach niż ogólne wytyczne ujęte w normach [9, 7]. Natomiast ocena modelowych przemieszczeń (bez uwzględnienia poślizgów styków) w odniesieniu do wychyleń wierzchołka wieży była niedoszacowana na poziomie 17,5% w analizowanym przypadku.



Rys. 7. Model słupa: a) aksonometria, b) obciążenia, badanie 1, c) obciążenia, badanie 4

**Bibliografia:**

- [1] PN-EN 50341-1:2013. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1. Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- [2] PN-EN 50341-2-22:2016. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22. Zbiór normatywnych warunków krajowych. Normatywne warunki krajowe Polski.
- [3] PN-EN 60652:2006. Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych.
- [4] Labocha S., Badania nowych konstrukcji stalowych kratowych słupów elektroenergetycznych linii 110 kV, „Konstrukcje stalowe” 5/154, październik 2018, s. 28–31.
- [5] Labocha S., Paluszynski J., Weryfikacja rozwiązań projektowych stalowych kratowych słupów elektroenergetycznych linii 400 kV z wykorzystaniem badań w skali 1:1, „Materiały Budowlane” 12/2018 (nr 556), s. 74–75.
- [6] Paluszynski J., Labocha S., Weryfikacja stateczności konstrukcji stalowych kratowych słupów elektroenergetycznych linii 110 kV, „Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Wydział Budownictwa” 24/2018, s. 273–279.
- [7] PN-EN 1993-1-8:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8. Projektowanie węzłów.
- [8] PN-EN 1993-3-1:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1. Wieże, maszty i kominy – Wieże i maszty.
- [9] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.0238

**PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA**

Labocha Sławomir, 2021, Badania poligonowe innowacyjnych słupów linii elektroenergetycznych 400 kV, „Builder” 8 (289). DOI: 10.5604/01.3001.0015.0238

**Streszczenie:** W artykule opisano rozwiązania konstrukcyjne oraz specjalistyczne badania innowacyjnych stalowych słupów kratowych przeznaczonych dla linii elektroenergetycznych 400 kV. Nowe serie słupów opracowano w związku z wdrożeniem wyższych standardów bezpieczeństwa dla linii elektroenergetycznych, zawartych w normie PN-EN 50341-2-22:2016. Pełnowymiarowy prototyp nowych słupów poddano badaniom poligonowym obejmującym, poza weryfikacją nośności dla obciążeń normowych, określenie obciążenia niszczącego nową konstrukcję. W pracy przedstawiono podstawowe wyniki badań oraz dokonano analizy porównawczej z procedurami normowymi zawartymi w PN-EN 50341-2-22:2016 oraz PN-EN 1993-3-1:2008. Wykazano dobrą zgodność analiz teoretycznych oraz rezultatów z badań słupów w skali 1:1.

**Słowa kluczowe:** słupy energetyczne; stalowe wieże kratowe; napowietrzne linie elektroenergetyczne; badania poligonowe; stateczność wież

**Abstract:** FIELD TEST OF INNOVATIVE 400 KV POWER LINE TOWER. The article describes structural solutions and specialised testing of new, innovative, steel lattice tower intended for OHL (Overhead Line) 400 kV. The new series of towers was developed in connection with the implementation of higher standards of the safety for OHL determined by current PN-EN 50341-2-22:2016 standard. The full-size prototype of new tower was subjected to research range, including the verification of the load capacity for standard loads also the destructive test, to determine the ultimate capacity of the new structure. The paper presents basic research results and it performs a comparative analysis with the standard procedures contained in PN-EN 50341-2-22:2016 and PN-EN 1993-3-1:2008 standards. Good agreement between theoretical analyses and results from 1:1 scale test was demonstrated.

**Keywords:** OHL towers; steel latticed towers; overhead power lines; field tests; tower stability