



## Weryfikacja stateczności konstrukcji stalowych kratowych słupów elektroenergetycznych linii 110 kV

Jarosław Paluszyński<sup>1</sup>, Sławomir Labocha<sup>2</sup>

### STRESZCZENIE:

W pracy dokonano analizy wpływu smukłości względnej efektywnej na nośność prętów ściskanych w stalowych wieżach kratowych. Smukłość efektywna obliczana jest z uwzględnieniem sposobu zamocowania końców elementów ściskanych. Omówiono implementację tych zasad obliczeń w odniesieniu do nowych słupów linii elektroenergetycznych 110 kV. Weryfikację założeń teoretycznych obliczeń nośności elementów słupów kratowych przeprowadzono podczas testów kompletnych konstrukcji na poligonie badawczym. Badania prowadzono w ramach realizacji projektu współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego Województwa Mazowieckiego Nr RPMA.01.02.00–14–5672/16. Wyniki testów potwierdziły z dużą dokładnością zgodność oszacowania teoretycznej nośności prętów ściskanych z realnie wyznaczoną nośnością graniczną ustrojów kratowych, ulegających zniszczeniu w wyniku utraty stateczności. Potwierdzono praktyczną skuteczność procedur normowych zawartych w PN-EN 1993–3–1 w zakresie modyfikacji wymiarowania prętów ściskanych o stałych przekroju. Celem artykułu było wskazanie efektywności innowacyjnych zasad obliczeń ustrojów kratowych zapewniających stosowną nośność elementów przy uwzględnieniu ekonomicznych aspektów rozwiązań.

### SŁOWA KLUCZOWE:

stalowe wieże kratowe; energetyczne linie napowietrzne; badania słupów kratowych; stateczność wież

## 1. Wprowadzenie

Projektowanie konstrukcji budowlanych w Polsce zaleca się obecnie prowadzić zgodnie z normami europejskimi, w szczególności tzw. Eurokodów. Zasady projektowania konstrukcji stalowych ujęte zostały w Eurokodzie 3, tj. normach grupy PN-EN 1993. W przypadku kratowych konstrukcji wieżowych i masztowych zalecaną normą jest PN-EN 1993–3–1 [3], która uzupełnia i rozszerza ogólne wymagania projektowania tego typu konstrukcji w stosunku do norm podstawowych PN-EN 1993–1–1 [1] i PN-EN 1993–1–8 [2]. Niektóre typy specjalnych konstrukcji posiadają dedykowane im normy specjalistyczne precyzujące zasady ich projektowania. W przypadku słupów elektroenergetycznych normami takimi są PN-EN 50341–1 [4] oraz PN-EN 50341–2–22 [5], które definiują zarówno wielkości oddziaływań przypadających na te konstrukcje, ich kombinacje, jak i zasady obliczeń i kształtowania konstrukcji słupów. Nowością w stosunku do dotychczas stosowanych na terenie Polski zasad oceny nośności z uwagi na stateczność elementów kratownic są pewne wytyczne ujęte w normie PN-EN 1993–3–1 [3]. Dotyczą one między innymi stosowania w obliczeniach nośności prętów zredukowanej smukłości, wynikającej z niepomijalnej sztywności węzłów modyfikującej postacie utraty stateczności. W stosunku do założeń z teoretycznym przegubowym modelem połączeń prętów i określaniem ich smukłości na podstawie nominalnych rozpiętości między węzłami możliwe jest podniesienie

<sup>1</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42–218 Częstochowa, e-mail: palski@bud.pcz.czest.pl, orcid id: 0000-0002-2434-3812

<sup>2</sup> Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, ul. Rolna 43, 40–555 Katowice; ENPROM Sp. z o.o., ul. Taneczna 18C, 02-829 Warszawa, e-mail: biuro@stahlbau.com.pl, orcid id: 0000-0003-0331-4585

teoretycznej nośności prętów. Rzeczywistą nośność graniczną złożonej kratowej przestrzennej struktury niełatwo precyzyjnie oszacować tylko na podstawie nośności wydzielonych prętów. W przypadku konstrukcji powtarzalnych, występujących w znacznej liczbie, jak np. słupy elektroenergetyczne, konieczny jest nie tylko bezpieczny dobór elementów pod względem nośności, ale również uwzględnienie ekonomicznych aspektów zagadnienia.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest odniesienie wybranych zagadnień oceny stateczności prętów wg normy PN-EN 1993-3-1 [3] do wyników uzyskiwanych podczas testów nośności granicznej kompletnych konstrukcji słupów kratowych w skali 1:1.

## 2. Wybrane aspekty oceny stateczności wg normy PN-EN 1993-3-1

Ogólne zasady oceny stateczności prętów ściskanych w normie PN-EN 1993-3-1 [3] są analogiczne do zasad określonych w normie PN-EN 1993-1-1 [1]. Obliczeniową nośność wyboecznio-  
w pręta ściskanego kratowej wieży lub masztu wyznacza się według wzorów:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{w przypadku przekrojów klas 1, 2 i 3} \quad (1)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{w przypadku przekrojów klasy 4} \quad (2)$$

Odmiennością w stosunku do dotychczas stosowanych w Polsce zaleceń jest to, iż w przypadku osiowo ściskanych prętów o stałym przekroju parametry związane ze statecznością (tj. współczynnik wyboeczenia  $\chi$  oraz parametr  $\phi$ ) wyznacza się przy skorygowanej smukłości, tzw. efektywnej  $\bar{\lambda}_{eff}$ , zamiast smukłości względnej standardowej  $\bar{\lambda}$ . Zasadniczo w przypadku wież i masztów występują kształtowniki o przekroju poprzecznym kątownika walcowanego i do nich ograniczono rozważania w artykule.

Smukłość efektywną  $\bar{\lambda}_{eff}$  oblicza się zgodnie z normą [3] według wzoru:

$$\bar{\lambda}_{eff} = k \bar{\lambda} \quad (3)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik smukłości efektywnej wg odpowiednich tablic normy PN-EN 1993-3-1 [3], w przypadku prętów głównych, tj. krawężników, wg tablicy G1, w przypadku prętów wykratowania i drugorzędnych wg tablicy G2,  $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1}$  – smukłość względna,  $\lambda_1$  – jak zdefiniowano w PN-EN 1993-1-1 *Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne i reguły dla budynków* [1],  $\lambda$  – smukłość przy odpowiedniej postaci wyboeczenia.

Jednocześnie dla prętów z pojedynczych kątowników niepołączonych sztywno na obu końcach (np. co najmniej dwiema śrubami) obliczeniową nośność na wyboeczenie zmniejsza się współczynnikiem redukcyjnym  $\eta$ :

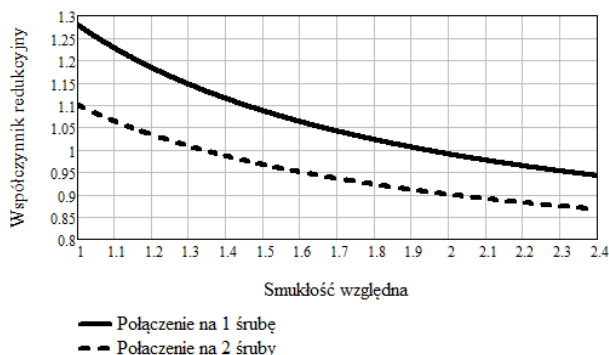
$\eta = 0,8$  – dla prętów z pojedynczych kątowników połączonych jedną śrubą na każdym końcu  
 $\eta = 0,9$  – dla prętów z pojedynczych kątowników połączonych jedną śrubą na jednym końcu i ciągłych lub połączonych sztywno na drugim końcu.

Analizując zależności opisujące współczynnik smukłości efektywnej  $k$ , można zauważyć, iż formuły te w pewnych zakresach redukują smukłość, niemniej istnieją zakresy, w których powodują one jej wzrost. Przykładowo na rysunku 1 zilustrowano przebieg zmienności współczynników efektywnej smukłości dla osi geometrycznej y-y kątowników przy połączeniu nieciągłym na obu końcach oraz ciągłym na jednym końcu w zakresie smukłości względnych od 1,0 do 2,4, opisanych wzorami z tablicy G2 normy PN-EN 1993-3-1 [3]:

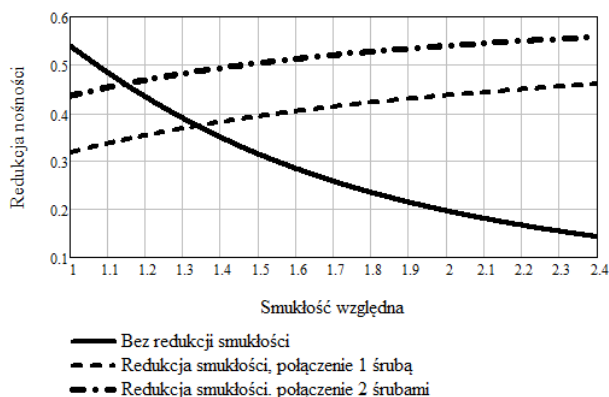
$$0,7 + \frac{0,58}{\lambda_y} \quad \text{w przypadku połączenia na 1 śrubę} \quad (4)$$

$$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_y} \quad \text{w przypadku połączenia na 2 śruby} \quad (5)$$

W przypadku połączenia ciągłego na jednym końcu (połączenie na dwie śruby) współczynnik smukłości efektywnej  $k$  staje się współczynnikiem redukującym smukłość dopiero w przypadku smukłości względnych powyżej wartości około 1,3. Natomiast w przypadku połączeń nieciągłych na obu końcach (połączenie na jedną śrubę) redukcja smukłości względnej następuje dopiero w pobliżu wartości smukłości względnej około 1,9. Jeśli dodatkowo uwzględnia się wymóg normowy redukcji nośności przy ściskaniu prętów z pojedynczych kątowników obliczanych z uwzględnieniem efektywnej smukłości, może okazać się, iż tak określona nośność pręta będzie dla pewnych smukłości finalnie niższa niż obliczana wg standardowych formuł. Na rysunku 2 przedstawiono porównanie nośności prętów na ściskanie obliczanych z redukcją smukłości i bez redukcji smukłości. Formalnie wykresy te przedstawiają redukcję samej nośności w funkcji smukłości względnej. W przypadku pominięcia redukcji smukłości względnej zamieszczony na rysunku wykres przedstawia właściwie przebieg zmienności redukcyjnego współczynnika wybożenia. W przypadku uwzględnienia smukłości efektywnej zamieszczone na rysunku 1 wykresy przedstawiają całkowitą redukcję nośności, zarówno ze względu na wybożenie, jak i dodatkową redukcję współczynnikiem  $\eta$ .



Rys. 1. Wykres współczynnika efektywnej smukłości  $k$  dla osi geometrycznej  $y$ - $y$  przy połączeniu nieciągłym na obu końcach oraz ciągłym na jednym końcu



Rys. 2. Porównanie nośności prętów na ściskanie obliczanych z redukcją i bez redukcji smukłości (opis w tekście)

Z zamieszczonych na rysunku 2 wykresów wynika jednoznacznie, iż finalna ocena nośności prętów ściskanych z wykorzystaniem redukcji smukłości względnej prowadzi do podwyższenia wartości badanej nośności (stateczności względem osi geometrycznej  $y$ - $y$ ) powyżej smukłości

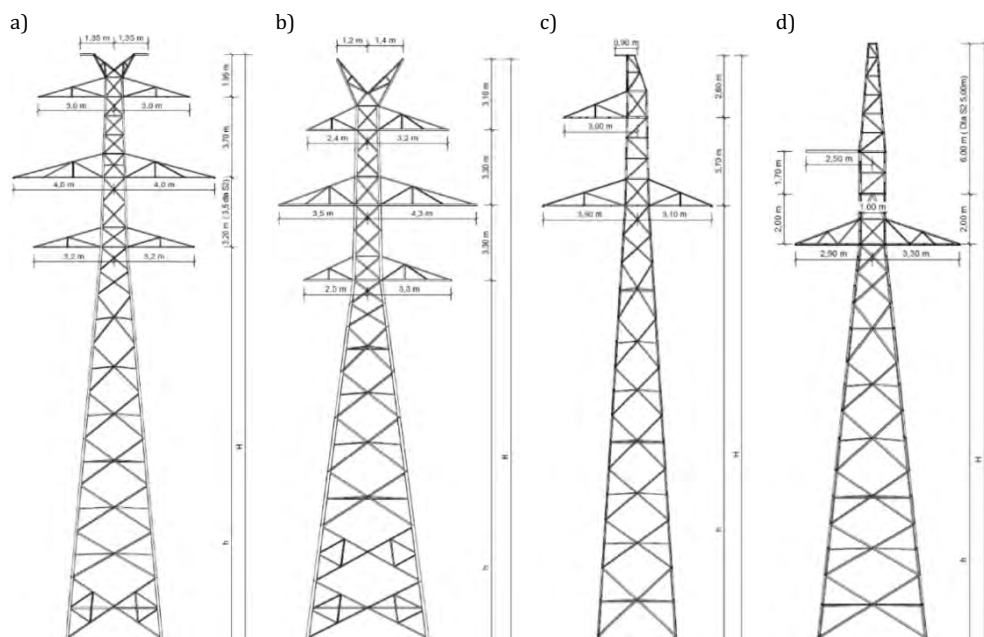
względnej około 1,15 przy połączeniu ciągłym na jednym końcu oraz przy około 1,35 przy połączeniu nieciągłym na obu końcach. Największy zysk w postaci wzrostu oszacowania nośności uzyskuje się w przypadku znacznych wartości smukłości względnych, przy czym przyrost ten może przekraczać nawet 100%. Znajomość omówionych powyżej zależności i konsekwencji z nich wynikających dla projektowania elementów składowych masztów i wież pozwala optymalnie projektować tego typu konstrukcje. Jest to szczególnie istotne w przypadku stalowych kratowych słupów elektroenergetycznych, które z uwagi na znaczną powtarzalność muszą być kształtowane w sposób maksymalnie ekonomiczny przy jednoczesnym zapewnieniu stosownej nośności elementów. Z uwagi na wagę tego problemu w praktyce obligatoryjne są w przypadku nowych linii najwyższych napięć testy wytrzymałościowe słupów. Badania te prowadzi się na specjalnych poligonach na konstrukcjach wykonanych w skali 1:1. Testy te stanowią z jednej strony formalne potwierdzenie prawidłowości projektu i przyjętych procedur obliczeniowych, a z drugiej strony stanowią dodatkowe nieocenione źródło wiedzy w zakresie rzeczywistego zachowania się konstrukcji. Dzięki prowadzeniu prób testowych aż do zniszczenia konstrukcji możliwe jest zidentyfikowanie rzeczywistej nośności granicznej badanej struktury.

### 3. Nowe słupy dla linii 110 kV serii EN111 i EN122

Firma Enprom Sp. z o.o. zaprojektowała i przebadła nowe serie słupów dla jedno- (seria EN111) i dwutorowych (seria EN122) napowietrznych linii elektroenergetycznych o napięciu 110 kV. Prace rozwojowe i badawcze, w których uczestniczyli autorzy niniejszego artykułu, prowadzone były w ramach realizacji zadań do projektu Nr RPMA.01.02.00-14-5672/16 pt. „Innowacyjne słupy linii elektroenergetycznych 110kV” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014-2020. Słupy zaprojektowano w zgodności z wymogami najnowszych norm PN-EN 50341-1:2013 „Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1. Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne” [4] oraz 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” [5]. Badania słupów reprezentatywnych dla całej serii przeprowadzono w czerwcu 2018 roku w Sewilli w Hiszpanii na certyfikowanym poligonie firmy Eucomsa. Na rysunku 3 pokazano kratowe konstrukcje oporowe oraz ogólny wygląd poligonu badawczego. Do testów wybrano zarówno jedno-, jak i dwutorowe podstawowe słupy przelotowe P oraz słupy mocne typu M3. Wszystkie badania i procedury testowe uwzględniały wymagania normy PN-EN 60652:2006 „Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych” [6]. Schematy konstrukcyjne badanych słupów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Konstrukcje oporowe (z lewej) oraz widok ogólny poligonu badawczego (z prawej)



**Rys. 4.** Schematy badanych słupów: a) EN122:P ( $h = 18$  m,  $H = 26,85$  m); b) EN122:M3 ( $h = 16$  m,  $H = 25,7$  m); c) EN111:P ( $h = 18$  m,  $H = 23,6$  m), d) EN111:M3 ( $h = 16$  m,  $H = 24$  m)

Wszystkie konstrukcje słupów przetestowano z uwzględnieniem trzech kluczowych kombinacji obciążeń wg [5], przy czym dwie pierwsze próby prowadzono do wartości 100% obliczeniowych obciążeń projektowych, natomiast próby końcowe obejmowały badania niszczące, prowadzone do momentu destrukcji słupów. Zgodnie z wymogami normowymi [6], konstrukcje słupów powinny w próbie zniszczeniowej wytrzymać obciążenie na poziomie co najmniej 105% deklarowanego obciążenia obliczeniowego. Wszystkie obciążenia, zarówno pochodzące od oddziaływań liniowych (tj. przewodów), jak i oddziaływań wiatru na konstrukcję słupów odwzorowano za pomocą układów linowych sterowanych automatycznie za pośrednictwem systemów hydraulicznych. Poza ciągłym i monotonicznym rejestrowaniem obciążeń kontrolowano również wielkość przemieszczeń i towarzyszących w wybranych charakterystycznych punktach. Obciążenia wiatrem konstrukcji słupów zasymulowano wypadkowymi siłami skupionymi, przyłożonymi do trzonów za pośrednictwem specjalnych trawers.

Zniszczenie konstrukcji wszystkich słupów nastąpiło na poziomie powyżej 129% obliczeniowego obciążenia projektowego. Elementy konstrukcyjne i ich połączenia zaprojektowano przy założonym poziomie wykorzystania poniżej 100% nośności teoretycznej, a w obliczeniach uwzględniono obligatoryjny współczynnik częściowy bezpieczeństwa po stronie materiałowej na poziomie 1,1 (dla stali S235) oraz 1,15 (dla stali S355). Wykonane po próbach badania materiałowe wytrzymałości na rozciąganie wykazały wyższe od nominalnych o około 10% wartości granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie stali w zastosowanych kształtownikach. Po uwzględnieniu powyższych czynników okazało się, iż obliczone zgodnie z normą [3] nośności wybranych do badań elementów słupów oszacowano na poziomie odchyłki 3–5% od wartości uzyskanych faktycznie.

Schematy zniszczeń konstrukcji poszczególnych słupów przedstawiono na rysunkach 5 i 6. W przypadku słupów mocnych zarówno EN122:M3, jak i EN111:M3 krytyczna okazała się nośność wyboczeniowa krawężników trzonu słupów. W przypadku słupów przelotowych EN122:P i EN111:P krytyczna okazała się nośność krawężników kolumny słupów.



Rys. 5. Schematy zniszczenia słupów jednotorowych EN111 [7]



Rys. 6. Schematy zniszczenia słupów dwutorowych EN122 [7]

#### 4. Wnioski

Norma PN-EN 1993-3-1:2008 [3] wprowadza do oceny nośności prętów ściskanych kratowych wież i masztów dodatkowe wytyczne pozwalające na bardziej optymalny dobór elementów konstrukcyjnych. Zalecenia te również zaaplikowano do projektowania konstrukcji słupów elektroenergetycznych za pośrednictwem normy PN-EN 50341-2-22:2016 [5]. Przeprowadzone badania słupów elektroenergetycznych linii 110 kV wykonane na konstrukcjach w skali 1:1 potwierdziły prawidłowości procedur obliczeniowych. Jednocześnie dowiodły bardzo dobrej zgodności wytycznych zawartych w normie [3] co do proponowanej oceny nośności smukłych elementów ściskanych, uwzględniającej sposób zamocowania w węzłach elementów [8]. Uwzględniając normowe materiałowe współczynniki bezpieczeństwa, zapasy wynikające z wyższych niż nominalne wartości granicy plastyczności i wytrzymałości na zerwanie stali przebadanych prętów, po uwzględnieniu obliczeniowego wyężenia, okazało się, iż obliczone zgodnie z normą [3] nośności wybranych elementów oszacowano z dokładnością na poziomie odchyłki 3-5% od wartości granicznych uzyskanych podczas badań. Wykorzystanie zaawansowanych metod projektowania pozwala na bardziej ekonomiczny dobór elementów i połączeń stalowych słupów kratowych.

## Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] PN-EN 1993-1-8:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8. Projektowanie węzłów.
- [3] PN-EN 1993-3-1:2008 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1. Wieże, maszty i kominy – Wieże i maszty.
- [4] PN-EN 50341-1:2013. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1. Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- [5] 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.
- [6] PN-EN 60652:2006 Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych.
- [7] Labocha S., Badania nowych konstrukcji stalowych kratowych słupów elektroenergetycznych linii 110 kV, Konstrukcje Stalowe 2018, 5/154, 28-31.
- [8] Kowolik B., Zamorowski J., Nośność stalowych elementów ściskanych i zginanych, pojedynczych i złożonych, z uwzględnieniem imperfekcji według norm PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1090-2, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2017, seria Budownictwo 23, 157-171.

## Verification of the stability of the construction of steel lattice towers of OHL power line 110 kV

### ABSTRACT:

In the work one made sensitivity studies the relative effective slenderness on the compression capacity of the elements used in steel lattice-towers. The effective slenderness is counted with the regard of the type of of the end connections of the elements. One discussed the implementation of these rules of calculations in reference to new tower of overhanging power lines 110kV. The verification of foundations of theoretical calculations of the capacity of elements of latticed towers one carried out during tests of complete constructions on the field tests. Tests were driven within the framework of the realization of the project partially financed from measures of the of the European Fund of the Development of the Regional Province of Mazovia No. RPMA.01.02.00-14-5672/16. Results of tests confirmed with the large accuracy the conformity of the estimation of the theoretical capacity of elements with the really designated limit capacity of systems lattice-tower, consumable as result of the loss of the stability. One confirmed the practical effectiveness of standard procedures contained in standard PN-EN 1993-3-1 within the range the modification of the dimensioning of compressed elements with constant cross section. For purposes of the article was the indication of the efficiency of innovative rules of calculations of lattice-towers systems providing the appropriate compression capacity of elements at the regard of economic aspects of solutions.

### KEYWORDS:

latticed steel towers; overhead electrical lines; testing of towers; stability of towers