

# Badania stalowych elementów i konstrukcji podpór linii elektroenergetycznych



dr inż.  
**WIOLETA BARCEWICZ,  
PROF. PW**  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
**ORCID: 0000-0002-3551-5309**



dr inż.  
**SŁAWOMIR LABOCHA**  
ENPROM Sp. z o.o., WST Katowice  
Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk  
Stosowanych  
**ORCID: 0000-0003-0331-4585**



dr inż.  
**STANISŁAW WIERZBICKI**  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
**ORCID: 0000-0002-7076-0641**



prof. dr hab. inż.  
**MARIAN GIŻEJOWSKI**  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Lądowej  
**ORCID: 0000-0003-0317-1764**

W artykule przedstawiono zarys badań doświadczalnych całych konstrukcji stalowych kratowych podpór linii elektroenergetycznych, a także wydzielonych sekcji oraz izolowanych elementów z węzłami śrubowymi.

Wprowadzenie do praktyki nowych norm projektowania linii elektroenergetycznych [1] oraz [2] wiąże się z podniesieniem wymaganego poziomu niezawodności linii, a więc i bezpieczeństwa ich eksploatacji. Zmiany są na tyle istotne, że większość dotychczas projektowanych konstrukcji wsporczych nie spełnia nowych kryteriów. W sytuacji przebudowy lub remontu napowietrznych linii elektroenergetycznych wymagane jest wprowadzenie istotnych zmian konstrukcyjnych podpór lub ich wymiana na nowe, opracowane zgodnie z aktualnymi normami. Koszty przebudowy podpór są przy tym często znaczne, a efektywność ich wzmocnień niska, głównie ze względu na problemy związane z zespoleniem nowych elementów z istniejącą konstrukcją.

## Poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych

Problemy techniczne występujące powszechnie przy wzmacnianiu istniejących konstrukcji wsporczych, a mające bezpośrednio odniesienie do efektywności ekonomicznej, skutkują tendencją do wymiany zbyt słabych słupów na nowe, mocniejsze konstrukcje. Wiąże się to z kolei z potrzebą wprowadzenia na rynek nowych rozwiązań konstrukcyjnych słupów elektroenergetycznych, nie tylko spełniających stosowne warunki nośności i sztywności wynikające z aktualnych norm, ale uwzględniających również aspekty ekonomiczne. Skuteczna realizacja tych zadań nie jest możliwa bez wdrażania wyników najnowszych prac badawczych, prowadzonych w laboratoriach i na

specjalistycznych poligonach. Szeroki zakres prac badawczych prowadzi w Polsce między innymi firma ENPROM we współpracy z Wydziałem Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Prace były realizowane w ramach projektu NCBiR 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”. Zakres badań stalowych konstrukcji wsporczych stosowanych w energetyce obejmuje testy polowe w skali 1:1, zarówno całych słupów, jak i wybranych sekcji konstrukcji oraz izolowanych elementów i węzłów w laboratorium. Dzięki kompleksowemu ujęciu badań możliwa staje się identyfikacja problemów, które mogą pojawić się



Fot. 1. Postać zniszczenia dla kombinacji obciążeń ze skreśnieniem trzonu słupa EN422:10



Fot. 2. Utrata nośności połączeń rozciąganych dolnej sekcji słupa EN422:10

w praktyce, oraz zaproponowanie rozwiązań konstrukcyjnych pozwalających na spełnienie warunków bezpieczeństwa, jak również obniżenia kosztów wykonania.

### Badania poligonowe

W Europie badania poligonowe całych podpór w skali 1:1 są obecnie realizowane na poligonach firmy Eucomsa w Sewilli oraz firmy Electromontaj w Bukareszcie. Zalecenia dotyczące badań można znaleźć w broszurze CIGRE [3]. Opis badań zrealizowanych w kraju zamieszczono w pracach [4, 5]. Podczas badań poligonowych słupów prowadzi się zazwyczaj od 2 do 4–5 prób weryfikujących założenia projektowe, z obciążeniem odpowiadającym obliczeniowemu, zgodnie z aktualnymi normami. Celem badań jest potwierdzenie założeń projektowych dotyczących wytrzymałości i sztywności badanej konstrukcji. Ostatnia próba jest zazwyczaj próbą niszczącą, której celem jest określenie nośności granicznej konstrukcji oraz postaci jej zniszczenia. Badania są prowadzone zgodnie z normą [6] dla kombinacji oddziaływań określonych zgodnie z normą [2] (w przypadku słupów przeznaczonych do zabudowy na terenie Polski). Warto podkreślić, że opisane w pracach [4, 5] badania słupów obejmowały standardowe wymogi normowe. W ramach realizowanych prac badawczych firma ENPROM opracowała nietypowe testy niszczące całej konstrukcji, z uwzględnieniem kombinacji obciążeń skręcających nieujętych w normach, ale możliwych do wystąpienia jako skutek awarii podpory podpierającej linie energetyczne. Taka forma obciążenia słupów kratowych jest w istocie najbardziej niebezpieczna. Badania tego typu przeprowadzono na poligonie w Sewilli, a na fot. 1. i 2. przedstawiono postacie zniszczenia słupa 400 kV typu EN422:10 M3. Zniszczenie obejmowało głównie dolną sekcję słupa, a jej forma była związana zarówno z utratą stateczności krążników oraz ukośników, jak i zniszczeniem połączeń rozciąganych ukośników oraz prętów drugorzędnych.

### Badania laboratoryjne

Badania poligonowe całych słupów w skali 1:1 są bardzo kosztowne. W przypadku konstrukcji modułowych dopuszcza się więc ograniczenie badań do testów laboratoryjnych w skali 1:1, obejmujących tylko wybrane sekcje słupów. Na fot. 3. i 4. przedstawiono przykładowe testy zginanych sekcji słupów EN412:16, odpowiednio połączenia liniowego segmentów oraz połączenia kąтового segmentów ze specjalnym elementem węzłowym.

Nieodzownym elementem badań konstrukcji wsporczych w energetyce są jednak testy laboratoryjne wyizolowanych elementów konstrukcyjnych i ich połączeń, gdyż właściwości zintegrowanych elementów pręt – węzeł wpływają w sposób istotny na zachowanie się całych



Fot. 3. Badanie laboratoryjne sekcji liniowej konstrukcji słupów EN412:16



Fot. 4. Badanie laboratoryjne sekcji kątowej konstrukcji słupów EN412:16

konstrukcji. Zalecenia podane w normach przedmiotowych [7–9], w odniesieniu do tych elementów, różnią się od przepisów zawartych w [10] oraz norm dedykowanych [1, 2], jednocześnie odbiegając od wytycznych stosowanych w Polsce w projektowaniu zgodnie z [11]. Problem nośności rozciąganych zakładkowych połączeń śrubowych stalowych kątowników walcowanych na gorąco, mocowanych jednym ramieniem, zidentyfikowano jako wymagający uściślenia w celu efektywnego projektowania słupów wsporczych napowietrznych linii 400 kV. Badania doświadczalne wykonano w Laboratorium Instytutu Inżynierii Budowlanej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej [12, 13]. Program badawczy składał się z 18 serii kątowników ze stali S355J2 o zróżnicowanych przekrojach oraz różnej liczbie, średnicy i klasie wytrzymałości śrub w połączeniach zakładkowych (fot. 5).

Forma zniszczenia rozciąganych kątowników łączonych jednym ramieniem zależała głównie od liczby oraz klasy łączników w połączeniu – obserwowano zarówno ścinanie śrub (przy dwóch łącznikach), jak i rozerwanie kątowników w przekroju osłabionym otworami (w seriach z trzema śrubami) oraz uplastycznienie w strefie docisku trzpieni śrub do ścianek otworów (połączenia z jedną śrubą). Wyniki badań doświadczalnych posłużyły do oceny nośności obliczeniowych połączeń według norm [1], [2] i [9]. Stwierdzono, że korzystanie z normy [1] w projektowaniu rozciąganych połączeń śrubowych kątowników łączonych jednym ramieniem nie jest zalecane ze względu na wartości nośności przekraczające w niektórych wypadkach wartości pomierzone w badaniach. Obliczenia nośności na podstawie [9] były bezpieczne, aczkolwiek





Fot. 5. Badanie połączenia śrubowego rozciąganego kątownika łączonego jednym ramieniem



Fot. 6. Badanie ściskane go ceownika z odgiętymi pasami profilowanego na zimno

w przeważającej większości prowadziły do mniej efektywnego wykorzystania materiału. Największą zbieżność wyników badań niszczących i wyznaczonych nośności charakterystycznych uzyskano na podstawie normy [2]. Jednak w przypadku obliczania nośności na rozerwanie przekroju netto kątownika jest sugerowane zmniejszenie współczynnika redukcyjnego w celu zapewnienia większej niezawodności.

Zbadano również zachowanie się ścisanych elementów stalowych wykonanych z kształtowników profilowanych na zimno o przekroju kątownika L i V oraz ceownika z odgiętymi pasami (fot. 6.) i zróznicowanych smukłościach oraz sposobach mocowania.

Na podstawie tych badań określono formy zniszczenia elementów i ich nośności graniczne. Wyniki nośności z badań doświadczalnych porównano z obliczeniami na podstawie norm [8] oraz [1] i [2], obserwowano przy tym prawidłową zależność większej nośności uzyskiwanej w badaniach w porównaniu z nośnościami normowymi.

### Podsumowanie

Funkcjonujące od wielu lat sieci elektroenergetyczne wymagają coraz większych inwestycji w ich rozbudowę i modernizację. Wraz z zaostrzającymi się wymaganiami w zakresie bezpieczeństwa rośnie zakres prac modernizacyjnych dotyczących konstrukcji wsporczych linii napowietrznych, które stanowią przeważającą część całej sieci. To z kolei oznacza, że ze względów ekonomicznych czę-

sto bardziej opłacalna jest wymiana słupów niż ich wzmacnianie i naprawa. Bardzo duża liczba takich sytuacji powoduje, że zasadne jest poszukiwanie rozwiązań, które pozwolą ograniczyć koszty nowych konstrukcji wsporczych przy zapewnieniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa ich eksploatacji. Temu celowi służą opisane w artykule badania poligonowe oraz laboratoryjne podpór.

Celem niniejszego artykułu było przedstawienie zakresu zrealizowanych badań doświadczalnych w skali 1:1 stalowych podpór linii elektroenergetycznych i ich elementów, ze szczególnym uwzględnieniem badań całych konstrukcji oraz połączeń prętów skratowania z krawężnikami. Wyniki badań posłużą do walidacji skończone elementowych modeli numerycznych. Zwalidowane modele numeryczne zostaną następnie wykorzystane do analiz parametrycznych w celu opracowania nowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych stalowych podpór linii elektroenergetycznych.

### Bibliografia

- [1] PN-EN 50341-1:2013 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1. Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- [2] PN-EN 50341-2:2016 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22. Krajowe Warunki Normatywne NNA dla Polski.
- [3] Technical Brochure No 399: Improvement on the tower testing methodology. CIGRE WG B2.08 2009.
- [4] Labocha S., 2018, Badania nowych konstrukcji stalowych kratowych słupów elektroenergetycznych linii 110 kV, „Konstrukcje stalowe” nr 5/154, s. 28–31.
- [5] Labocha S., Paluszynski J., 2018, 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] PN-EN 60652:2006 Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych.
- [7] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [8] PN-EN 1993-1-3:2008/AC:2009 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [9] PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [10] PN-EN 1993-3-1:2008/AC:2009 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1. Wieże, maszty i kominy – Wieże i maszty.
- [11] PN-E-05100-1:1998 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi.
- [12] Barcewicz W., Wierzbicki S., Giżejowski M., Labocha S., Czyż R., Experimental investigation of angle length effect – angles in tension connected by one leg, W: Modern Trends in Research on Steel, Aluminium and Composite Structures/Giżejowski M. [i in.] (red.), Routledge (Open Access), Taylor & Francis Group, 2021, s. 85–91.
- [13] Labocha S., Barcewicz W., Wierzbicki S., Giżejowski M., 2021, Wyzwania badawcze związane z realizacją stalowych konstrukcji podpór linii elektroenergetycznych, „Inżynieria i Budownictwo”, t. 77, nr 4, s. 155–163.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8259

### PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Barcewicz Wioleta, Labocha Sławomir, Wierzbicki Stanisław, Giżejowski Marian, 2022, Badania stalowych elementów i konstrukcji podpór linii elektroenergetycznych, „Builder” 5 (298). DOI: 10.5604/01.3001.0015.8259

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono zarys badań doświadczalnych całych konstrukcji stalowych kratowych podpór linii elektroenergetycznych, a także wydzielonych sekcji oraz izolowanych elementów z węzłami śrubowymi. Badania elementów i ich połączeń dotyczyły rozciąganych kątowników łączonych jednym ramieniem oraz kształtowników profilowanych na zimno poddanych ścisaniu. Badania były realizowane przez firmę ENPROM i Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Warszawskiej w ramach projektu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju.

**Słowa kluczowe:** badania doświadczalne, stalowe kratowe słupy przesyłowe, podpory napowietrznych linii elektroenergetycznych

**Abstract:** EXPERIMENTAL TESTS OF THE STEEL MEMBERS AND STRUCTURES OF THE OVERHEAD ELECTRICAL LINES SUPPORTS. This article presents an outline of experimental investigations of entire structures of steel lattice supports of the overhead electrical lines, as well as separate substructures and isolated elements tested together with their bolted end joints. Tension angles connected by one leg and cold-formed sections subjected to compression were considered. The experimental work was carried out by the ENPROM company and the Faculty of Civil Engineering of the Warsaw University of Technology as part of the project of the National Centre for Research and Development.

**Keywords:** experimental tests, steel lattice transmission towers, overhead electrical lines supports