

Analizy i badania nośności stalowych słupów rurowych linii elektroenergetycznych

Dr hab. inż. Paweł Lewiński, ITB Warszawa, mgr inż. Robert Czyż, mgr inż. Piotr Wojciechowski, Elbud-Projekt Warszawa, mgr inż. Marek Otręba, Kromiss-Bis Sp. z o.o.

1. Uwarunkowania technologiczne słupów rurowych

Elektroenergetyczne powłokowe słupy stalowe o przekroju wielokątnym stanowią nowatorską branżę w dziedzinie budownictwa elektroenergetycznego na całym świecie. Coraz więcej tego typu konstrukcji wykorzystuje się do budowy linii elektroenergetycznych w Polsce, głównie na liniach wielotorowych 110 kV. Ze względu na swoje niewielkie gabaryty, u podstawy słupa i mniej znaczącą ingerencję w krajobraz są one łatwiej akceptowane przez społeczeństwo. Jednak podstawową zaletą słupów rurowych jest ich krótkotrwały proces produkcyjny i szybki montaż.

Proces produkcyjny słupa polega na formowaniu na zimno za pomocą prasy krawędziowej arkuszy blachy o kształcie trapezu w rurę o przekroju wielokąta foremnego. Rurę zamyka się spoiną wzdłużną wykonywaną w narożach przekroju wielokątnego. Segmenty słupów rurowych, ze względu na ograniczenia technologiczne, można wykonywać o długości maksymalnej 13,5 m. Aby uzyskać słup o wysokości przekraczającej tę wysokość, słupy wykonuje się z wielu segmentów z zachowaniem dużej dokładności, tak aby możliwe było nasunięcie jednego na drugi z odpowiednią siłą i odpowiednim zakładem. Połączenie segmentów pracuje na zasadzie

tarcia bezpośrednio oddziałujących na siebie płaszczyzn stykowych. Przy wymiarowaniu elementów konstrukcji trzonu rurowego słupa należy uwzględnić ograniczenia, jakie wynikają z procesu technologicznego wytwarzania konstrukcji, z których najistotniejsze wynikają z: technologii cynkowania zanurzeniowego, technologii gięcia, cięcia oraz spawania blach konstrukcyjnych, ograniczonego asortymentu blach konstrukcyjnych, transportu.

Proces wymiarowania słupa rurowego jest znacznie prostszy niż wymiarowanie tradycyjnego słupa kratowego. Decydującym czynnikiem przy wymiarowaniu słupa są momenty zginające wywołane siłami poziomymi, a w układach o niesymetrycznej budowie głowicy – również siłami pionowymi. Udział sił ściskających w naprężeniach stanowi co najwyżej 2% całkowitych naprężeń w trzonie. Ze względu na ten charakter pracy słupa oraz na małą sztywność konstrukcji rurowej, ważnym aspektem staje się stan graniczny użytkowania dotyczący przemieszczeń słupa. Nowe wymagania projektowe narzucają duże ograniczenia co do przemieszczeń konstrukcji słupów elektroenergetycznych i obecnie wynoszą one 2% wysokości słupa niezależnie od charakteru jego pracy. W większości przypadków jest to podstawowe kryterium determinujące parametry słupa.

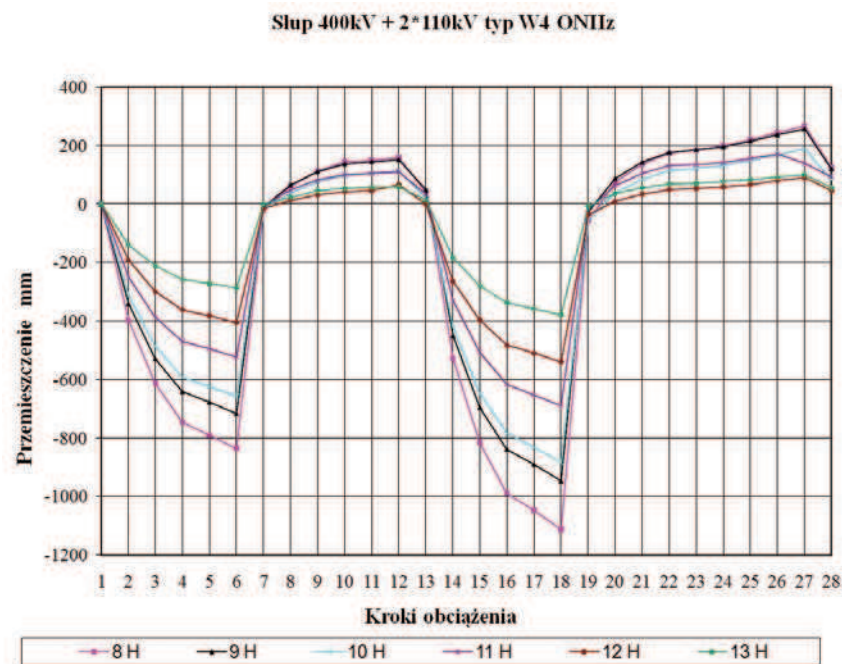
2. Badania doświadczalne słupów

Badania doświadczalne 4 typów słupów przeprowadzono na poligonie badawczym w Żylinie (Słowacja) w okresie sierpień – październik 2009 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 2 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 układ kombinacji obciążeń zrealizowany był poprzez odpowiedni układ oliwienia. Poszczególne kombinacje były realizowane w kolejnych krokach obciążeń obejmujących przykładowo 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 2.

W trakcie badania słupa typu ONIIz zniszczenie słupa polegające na utracie stateczności lokalnej dolnej części słupa w strefie podporowej nastąpiło dla wartości 140% obciążeń kombinacji niszczącej. Na fotografiach 1a i 1b przedstawiono widok dolnej strefy zniszczonego trzonu słupa. Badania słupów W4P1 i W411P1 do poziomu 160% obciążeń kombinacji SGN nie wykazały osiągnięcia ani przekroczenia stanów granicznych nośności przez wymienione słupy. Słup W411ONII, ze względu na możliwości badawcze poligonu, badano jedynie do 100% wartości kombinacji obliczeniowych.

Z trzech słupów, dla których przeprowadzono próby niszczące (W4 P1, W4 ONIIz, W411 P1), tylko dla słupa W4 ONIIz udało się tak dobrać parametry przekroju, że przekroczenie wartości sił obliczeniowych o 40% spowodowało osiągnięcie i przekroczenie stanu granicznego nośności. Utrata nośności słupa polegała na lokalnej utracie stateczności płaskiej ścianki słupa u dołu tuż nad żebrami usztywniającymi. Wyraźnie zaobserwowana w końcowej fazie badania niewielka deformacja najbardziej wyętej płaskiej ścianki (przy osiągnięciu wartości 140% obciążeń obliczeniowych) świadczy o tym, że ścianka ta tuż przed zniszczeniem znajdowała się w stanie nadkrytycznym (fot.



Rys. 1. Słup 400 kV+2*110 kV typ W4 ONIIz. Graficzne przedstawienie przemieszczeń poziomych konstrukcji. Symbole 8 H ÷ 13 H – oznaczenia tarcz pomiarowych

1a). Osiągnięcie stanu nadkrytycznego poprzedził spadek wartości sił o około 1%. Po osiągnięciu sił przeciążających konstrukcję słupa o 40% i utrzymaniu ich na tym poziomie przez 1 min. płaszcz słupa nadal znajdował się w stanie nadkrytycznym. Po rozpoczęciu kolejnej fazy badania, przy stanie około 141–143% obciążeń obliczeniowych, najbardziej wyęta ścianka płaska uległa wyboczeniu, co spowodowało gwałtowny spadek sił w linach obciążających oraz wyboczenie całej strefy ściskanej płaszczu w strefie powyżej żeber usztywniających (fot. 1a i 1b).

3. Analiza zachowania się słupów powłokowych

W przypadku ścianek o małej smukłości model zniszczenia wygląda podobnie jak w przypadku ścianek o dużej smukłości, jednak odciążenie nie przebiega tak gwałtownie. Gdy ścianki nie są smukłe, przekrój ulega uplastycznieniu i wraz ze wzrostem naprężeń wzrasta również deformacja. Model ten jest trudny do uzyskania przy tej wielkości słupów i to z dwóch względów: zazwyczaj ścianki płaskie w konstrukcjach o takich gabarytach podatne są na lokalną utratę

Tabela 1. Parametry geometryczne i maksymalne momenty utwierdzenia słupów

Typ słupa	Ilość kątów wielokąta	Średnica dolna*	Średnica górna*	Ilość segmentów	Grubość segmentów**	Wysokość całkowita	M _{max} utwierdzenia
	[-]	[mm]	[mm]	[szt.]	[mm]	[m]	[kNm]
W4 P1	24	1900	900	4	10–10–8–6	42,5	5898
W4 ONIIz	24	2210	807	5	12–12–10–8–8	40,1	11906
W411 P1	24	1890	720	5	16–14–12–10–8	46,5	9560
W411 ONII	24	2500	1200	5	16–14–12–10–8	45,1	18444

* – średnica okręgu wpisanego w wielokąt

** – kolejność segmentów w kolejności od dołu do góry



Fot. 1. Model zniszczenia słupa rurowego: a) praca w stanie nadkrytycznym, b) utrata stateczności lokalnej w strefie ściskanej płaszczka słupa

stateczności, a w przekrojach przypodporowych występuje bardzo wysoki poziom naprężeń.

Dotychczas w procesie wymiarowania słupów powłokowych o przekroju wielokątnym posługiwano się dwoma normami [2] oraz [1]. Pierwsza z nich nie do końca jest miarodajna ze względów na to, że odnosi się do powłok kominów stalowych, które z reguły są o przekroju okrągłym. Ze wzoru na smukłość względną powłoki (1) wynika, że uzależniono ją od proporcji średnicy do grubości powłoki.

$$\bar{\lambda}_p = \frac{r/t}{1,59} \left(\frac{f_{dT}}{E_T} \right)^{2/3} \quad (1)$$

gdzie: r – promień zewnętrzny powłoki; t – grubość powłoki; f_{dT} , E_T – parametry materiałowe.

Metodologia ta jest jednak mało precyzyjna ze względu na to, że załamania między ścinakami stanowią usztywnienie elementu, a norma [2] nie uwzględnia tego zjawiska. Dlatego też nie można sterować parametrem stateczności lokalnej przez zwiększenie ilości kątów. Norma [1] rozpatruje zagadnienie stateczności poszczególnych ścianki płaskiej, co pozwala precyzyjniej określać jej faktyczny wpływ na nośność przekroju. We wzorze (2) wyznacznik stateczności lokalnej określa się na podstawie smukłości pasma płytowego;

wzór na smukłość względną ma postać:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b}{t} \cdot \frac{K}{56} \sqrt{\frac{f_d}{215}} \quad (2)$$

gdzie: b – szerokość pojedynczej ścianki płaskiej składowej powłoki, w miejscu największej średnicy trzonu rurowego; t – grubość powłoki; f_d – wytrzymałość obliczeniowa stali [w MPa]; K – współczynnik podparcia i obciążenia pasma płytowego równy 1,0.

Ze względu na to, że trzony rurowe słupów elektroenergetycznych obciążane są na całej długości momentem zginającym, malejącym wraz ze wzrostem wysokości, łatwo można wytypować miejsce występowania największego wyężenia trzonu; będzie ono występować na poziomie najniższej położonego przekroju. Mimo iż trzony są zbieżne, nie ma możliwości takiego sterowania zmianą średnicy, aby wyężenie było równomierne dla całego trzonu. Dlatego też w przypadku trzonów słupów wielosegmentowych optymalizuje się zużycie materiału poprzez zmianę grubości powłoki. Na podstawie procedur zawartych w normie [1] można precyzyjniej określić stateczność lokalną rury wielokątnej. Potwierdzają to wyniki badania słupa typu W4 ONIIz przeprowadzonego na poligonie w Żylinie. Z wyliczeń analitycznych

wg normy [1] oszacowano poziom obciążeń przy zniszczeniu słupa na około 117% obciążeń obliczeniowych, wg normy [2] – na 109%, zaś słup uległ zniszczeniu przy około 140%. Po przeprowadzeniu prób wytrzymałościowych pobrano próbki stali, z których wykonano trzon słupa i określono parametry mechaniczne materiału. Średnia granica plastyczności z 3 przebadanych próbek wynosiła 381 MPa, przy przyjęciu do obliczeń wielkości 355 MPa. Wyniki te wskazują, że możliwe jest wymiarowanie tego typu konstrukcji z dokładnością do 10% przy użyciu normy [1]. W procesie projektowania słupów rurowych można się również posłużyć wytycznymi amerykańskimi [3]. Konfrontując je z procedurami wspomnianymi powyżej można stwierdzić, że opracowanie to kumuluje założenia normy [1] oraz normy [2]. W opracowaniu tym rozdzielono grupy przekrojów na okrągłe i wielokątne, przy czym kryterium podziału na grupy opiera się na wielkości kąta ostrego (α) zawartego między płaszczyznami profilu wielokątnego. Wartości graniczne tego kąta dla przekrojów traktowanych jako wielokątne to 45° oraz 22,5°, co daje graniczną ilość kątów przekroju od 8 do 16. Dodatkowo opracowanie [3] ogranicza zakres stosowania procedur dla przekroju wielokątnego do przekrojów, dla których smukłość ścianki płaskiej nie przekracza

1,25. Przekroje, w których kąt α jest większy niż $22,5^\circ$, traktowane są jako przekroje okrągłe. Założenie to jest słuszne tylko w pewnym zakresie, gdyż zgodnie z [7], kąt α nie może być mniejszy niż 15° . Doświadczenia przy projektowaniu tego typu konstrukcji wskazują na to, że procedury określone w opracowaniu [3] są bardziej rygorystyczne dla słupów wielokątnych o liczbie kątów większej od 16, natomiast mniej rygorystyczne dla przekrojów wielokątnych o liczbie kątów mniejszej niż 16.

Wytyczne zawarte w normie [5] w załączniku K określają uproszczone procedury wymiarowania słupów rurowych. Procedury te opierają się ściśle na wytycznych norm PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-3 [6]. W załączniku tym opracowano gotowe nomogramy służące do płynnego i szybkiego odczytywania wartości parametrów efektywnych przekrojów, tak jak dla przekrojów cienkościennych. Nomogramy te jednak ograniczają się do przekrojów o maksymalnej ilości boków równej 18, dlatego też załącznika K normy [5] nie można było zastosować przy projektowaniu słupów o przekrojach 24-kątnych. Bardziej szczegółowe procedury i wytyczne do wymiarowania tego typu słupów określa norma PN-EN 1993-1-3 [6]. Analizując deformacje słupów rurowych uwzględniono nieliniowość geometryczną konstrukcji i wpływ jej deformacji na wyężenie

Tabela 2. Różnice wartości ugięć uzyskanych z obliczeń i z badań

Typ słupa	Deformacja wierzchołka wyznaczona analitycznie	Deformacja wierzchołka wyznaczona empirycznie	Różnica ugięć
	[cm]	[cm]	[%]
W4 P1	84,7	74,0	13
W4 ONIIz	71,4	71,7	0
W411 P1	111,5	94,7	15
W411 ONII	81,0	84,0	-4

wskutek powstawania momentów zginających od działających na konstrukcję sił równoległych do osi głównej słupa, czyli analizę II rzędu. Otrzymane wyniki analityczne przemieszczeń konstrukcji okazały się porównywalne z wynikami pomiarów przemieszczeń, co pokazano w tabeli 2.

4. Wnioski

Przeprowadzone w Żylinie tzw. badania typu w skali rzeczywistej dowiodły, że:

- Słupy rurowe o tak dużych gabarytach, zarówno przelotowe, jak i mocne są wymiarowane poprzez osiągnięcie SGU, a nie SGN.
- Słupy przelotowe należy wymiarować z uwzględnieniem ugięcia H/40, a nie H/50 – pozwoli to na bardziej ekonomiczne projektowanie słupów. Żaden z badanych słupów przelotowych wymiarowanych na warunek ugięcia H/50 (zgodnie z warunkami wcześniej obowiązującej wersji normy [4]) nie osiągnął SGN przy obciążeniach wynoszących 160% wartości obciążeń obliczeniowych. Potwierdza to najnow-

szą wersją normy [4] zalecająca wymiarowanie słupów przelotowych na warunek ugięcia H/40.

c) Doświadczalnie stwierdzono, że możliwe jest wymiarowanie tego typu konstrukcji przy użyciu normy [1] z zachowaniem dokładności do 10%.

NORMY

- PN-B-03200:1990 „Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie”
- PN-B-03201:1993 „Konstrukcje stalowe. Kominy. Obliczenia i projektowanie”
- ASCE/SEI 48-05 “Design of Steel Transmission Pole Structures”
- PN-EN 50341-1 „Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne” oraz Część 3 (NNA)
- PN-EN-60652 Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych
- Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno

BIBLIOGRAFIA

- Ernest Kubica, „Nośność graniczna i sztywność podłużna cienkościennych elementów stalowych” – Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2005 r.

Prenumerata
elektroniczna
tylko

www.przeглядbudowlany.pl

50
zł