

# PROJEKT PYLON – KATALOG SŁUPÓW KRATOWYCH DLA LINII 110 kV

Anna Scheibe – Kierownik projektu Pylon, Energa Invest

Paweł Szwarczewski – Kierownik Działu Linii Elektroenergetycznych, Energa Invest

## 1. Wstęp

Nieustający wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, a także zwiększanie niezawodności pracy sieci i utrzymanie coraz wyższego poziomu bezpieczeństwa dostaw energii generują potrzebę rozbudowy i modernizacji sieci dystrybucyjnej. Skala wymaganych zmian jest bardzo duża również ze względu na wiek znacznej części sieci 110 kV. Inwestycje tego typu obejmują budowy nowych linii, jak również zwiększanie obciążalności, czy modernizacje już istniejących linii elektroenergetycznych 110 kV.

W odpowiedzi na zapotrzebowanie inżynierowie z Energi Invest w ramach projektu Pylon opracowali katalog słupów kratowych dla linii elektroenergetycznych 110 kV. Konstrukcje zaprojektowano w oparciu o najnowszą normę PN-EN 50341-1:2013-03: *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1kV* oraz załącznik krajowy dla Polski PN-EN 50341-2-22:2016-04. Założeniem projektu było stworzenie rozwiązań pozwalających m.in. na redukcję liczby stanowisk słupowych poprzez dopuszczenie stosowania długich przęseł do 380 m. Zaprojektowane słupy umożliwiają pełne wykorzystanie charakterystyki mechanicznej trzech różnych typów przewodów fazowych oraz dwóch najczęściej wykorzystywanych typów przewodów odgromowych. Pozwoli to na ograniczenie wysokości konstrukcji i jednocześnie stanowić będzie o szerokim obszarze możliwości ich stosowania.

## 2. Oddziaływania klimatyczne i dobór gabarytów słupa

Zasady projektowania linii elektroenergetycznych w Polsce, do roku 2010, definiowały normy:

- PN-E-05100-1:1998 - *Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Projektowanie i budowa. Linie prądu przemiennego z przewodami roboczymi gołymi.*
- PN-B-03205:1996 - *Konstrukcje stalowe. Podpory linii elektroenergetycznych. Projektowanie i wykonanie.*

Od roku 2010 aktualną wytyczną do projektowania linii elektroenergetycznych jest system norm europejskich PN-EN 50341, który opiera się o normę podstawową – wspólną dla krajów europejskich oraz załącznik krajowy, który uwzględnia m.in. lokalne warunki klimatyczne. Ze względu na interdyscyplinarną specyfikę definiowanych zagadnień norma PN-EN 50341 często odwołuje się do Eurokodów, mimo iż została wyłączona z ich składu. W roku 2013 opublikowano polskie tłumaczenie zaktualizowanej części wspólnej normy, jako: PN-EN 50341-1:2013-03 – *Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.* Załącznik krajowy ukazał się w roku 2016 jako: PN-EN 50431-2-22:2016.

Aktualizacja względem wersji poprzedniej wprowadziła m.in. następujące zmiany:

- Zwiększono zasięg strefy S2;
- Zwiększono obciążenie oblodzeniem w strefie S1;
- Zmieniono sposób określania oddziaływań wiatru;
- Zmodyfikowano przypadki układów obciążeń dla przewodów oraz słupów;
- Zmieniono stosowanie współczynników częściowych;
- Zmieniono sposób wymiarowania elementów ściskanych;

- Zniesiono wymóg badania słupów seryjnych.

Norma PN-EN 50341-1:2013-03 określa rodzaj obciążeń oraz sposób, w jaki należy je uwzględniać. Podstawowe obciążenia to:

- Oddziaływanie wiatru na dowolny podzespół linii określony wzorem:

$$Q_{wx} = q_p(h)G_x C_x A_x$$

gdzie:

$q_p(h)$  – szczytowe ciśnienie prędkości wiatru;  
 $h$  – wysokość odniesienia nad terenem (stosowana dla konkretnego podzespołu linii);  
 $G_x$  – współczynnik konstrukcyjny (dla konkretnego podzespołu linii);  
 $C_x$  – współczynnik oporu aerodynamicznego;  
 $A_x$  – pole rzutu danego podzespołu na płaszczyznę prostopadłą do kierunku wiatru.

- Obciążenie oblodzeniem uwzględnione na przewodach, elementach mocowanych na przewodach oraz na izolatorach. Stopień obciążenia przewodów oblodzeniem norma uzależnia od średnicy przewodu oraz regionu kraju (strefa obciążenia oblodzeniem).

Strefa obciążenia oblodzeniem	Charakterystyczne obciążenie oblodzeniem (na jednostkę długości przewodu o średnicy $d$ [mm]) $I_K$ [N/m]
S1	5,5+0,55 $d$
S2	8,2+0,82 $d$
S3	16,4+0,82 $d$
S <sub>spec</sub>	wg specyfikacji projektowej lub danych meteorologicznych

Tabela 1. Charakterystyczne obciążenie oblodzeniem.

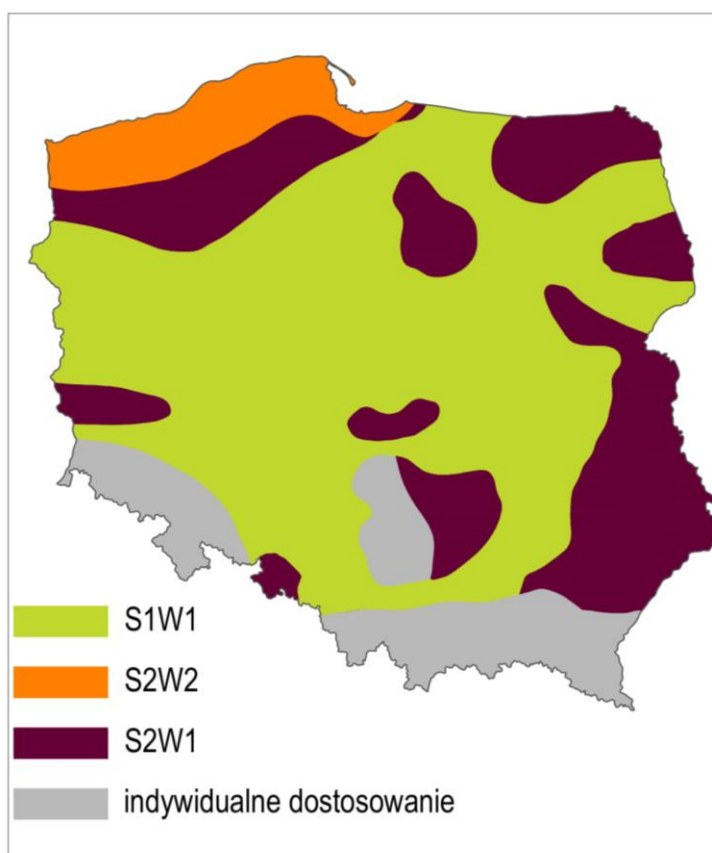
Norma określa przypadki układów obciążeń przewodów wiatrem i oblodzeniem, wskazując jednocześnie dla każdego przypadku dopuszczalny naciąg określony jako % obliczeniowej siły zrywającej (RTS) przewodu (Tabela 2). Przypadki układu obciążeń słupów są bardziej rozbudowane i zawierają dodatkowe kombinacje wpływające na wymiarowanie konstrukcji.

Układ obciążeń	Opis układu	Temperatura przewodu [°C]	Współczynniki do kombinacji			Współczynniki częściowe dla oddziaływań						Dopuszczalny % RTS przewodu (wartości dla przewodów typowych stalowo – aluminiowych, dla 1,2 poziomów obostrzenia)	
						Poziom niezawodności							Ciężar
						1		2		3			
						$B_l^2$	$\psi_w$	$\psi_i$	$\gamma_w$	$\gamma_i$	$\gamma_w$		
1	Oddziaływanie wiatru ekstremalnego	10				1		1,2		1,4	1,5	1	80
2a	Oddziaływanie ekstremalnego	-5					1		1,25		1,5	1	55

	oblodzenia równomiernego we wszystkich przęsłach												
3a	Ekstremalne obciążenie oblodzeniem z bardzo prawdopodobnym obciążeniem wiatrem	-5		0,33			1		1,25		1,5	1	80
3b	Obciążenie nominalnym oblodzeniem z mało prawdopodobnym obciążeniem wiatrem	-5	0,56		0,37	1		1,2		1,4		1	80
4	Minimalna temperatura bez wiatru i bez oblodzenia	-25										1	40

Tabela 2. Przypadki układu obciążeń przewodów.

Poniżej przedstawiono mapę Polski z rozgraniczeniem na strefy obciążenia wiatrem i oblodzeniem wg wytycznych z załącznika krajowego PN-EN 50341-2-22:2016-04, według której projektant dobiera konstrukcje słupów dla odpowiedniej kombinacji stref.



Rys. 1. Obszar zastosowania słupów PLN.

Poza definicją rodzaju obciążeń oraz ich układów, norma określa także wymagania jakie powinny być spełnione dla poszczególnych przypadków. Powyższe dotyczy:

- zewnętrznych odstępów izolacyjnych - minimalnych wymaganych odległości do terenu i obiektów krzyżowanych;
- wewnętrznych odległości izolacyjnych – minimalnych odległości pomiędzy poszczególnymi przewodami jak również pomiędzy przewodami a konstrukcjami wsporczymi linii.

Projekt linii elektroenergetycznej musi być wykonany w sposób gwarantujący bezpieczną eksploatację zarówno samego obiektu, jak również terenów w bezpośrednim sąsiedztwie. Podstawowym zadaniem projektanta sieci wysokich napięć jest zapewnienie spełnienia wymagań normy w zakresie zewnętrznych i wewnętrznych odstępów izolacyjnych. W tym celu projektant może skorzystać z poniższych sposobów:

- dobór rzędnej posadowienia słupa (lokalizowanie z uwzględnieniem ukształtowania terenu);
- dostosowanie długości poszczególnych przęseł;
- dostosowanie wysokości słupów;
- wybór rodzaju zastosowanych słupów (z uwzględnieniem ich dopuszczalnych warunków pracy).

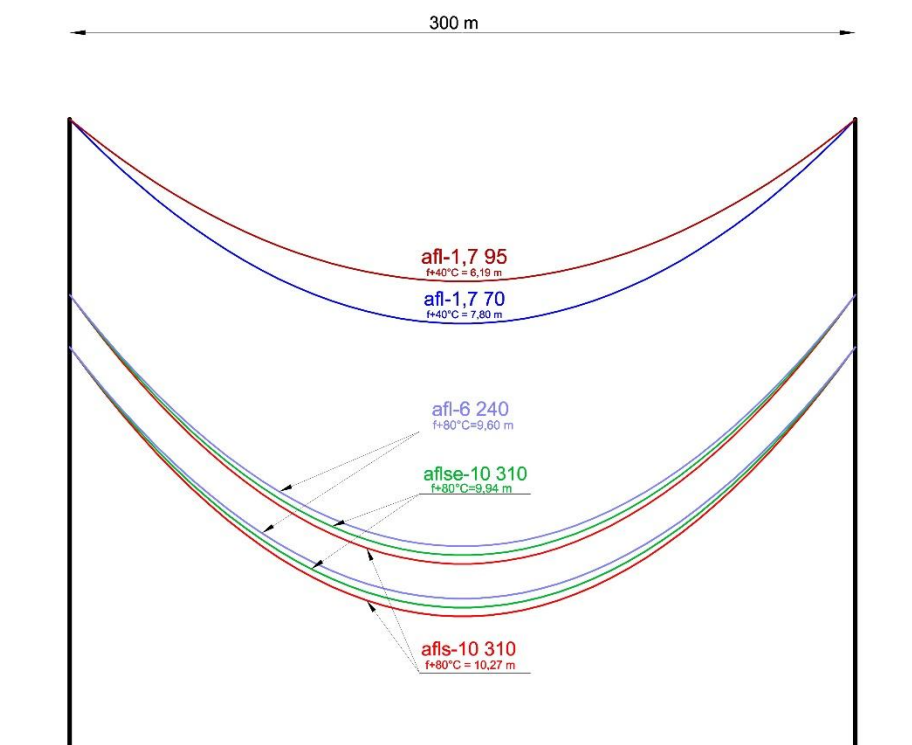
Niejednokrotnie sprostanie wymaganiom ukształtowania i zagospodarowania terenu, związane z wypełnieniem wymagań normowych, przysparza wielu problemów podczas projektowania linii napowietrznych. Często problemy te wynikają z ograniczonych właściwości użytkowych dostępnych konstrukcji wsporczych. Każdorazowe, indywidualne modyfikacje w zakresie wysokości czy gabarytów słupów są czasochłonne i kosztowne. Idealnym rozwiązaniem, wydawać by się mogło stworzenie konstrukcji maksymalnie uniwersalnych, zapewniających znaczne rezerwy względem wartości wymaganych w normie. Jednak takie podejście podniosłoby koszty realizacji inwestycji typowych, gdzie uwarunkowania terenowe nie są aż tak wymagające. Niewątpliwie rozwiązaniem pożądanym byłyby słupy udoskonalone tzn. słupy o szerokich możliwościach zastosowania jednak zaprojektowane tak, aby ich powszechne stosowanie było uzasadnione ekonomicznie. W związku z powyższym, idealnym momentem na wprowadzenie udoskonaleń w konstrukcjach wsporczych jest zmiana wymagań normowych, kiedy to tworząc nowe projekty słupów można uwzględnić aktualne potrzeby.

Udoskonalenia słupów zrealizowane w ramach realizacji projektu Pylon:

- dopuszczenie przęsła wiatrowego o długości do 380m – jako rozwiązanie na trudne warunki terenowe (problemy gruntowe lub własnościowe) jak również ekonomicznie uzasadnione (redukcja sumarycznej ilości użytych materiałów względem innych dostępnych rozwiązań);
- zakresy kątów pracy słupów ( $180^{\circ}$ - $165^{\circ}$ - $145^{\circ}$ - $135^{\circ}$ - $125^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) – zapewniające maksymalne wykorzystanie ich gabarytów (ustalone na podstawie kątów załomów istniejących linii);
- uwzględnienie charakterystyki mechanicznej trzech najczęściej stosowanych typów przewodów fazowych: AFL-6 240 mm<sup>2</sup>, AFLs-10 310 mm<sup>2</sup>, AFLse-10 310 mm<sup>2</sup> – brak konieczności przeliczania słupów w przypadku projektów uwzględniających jeden z ww. przewodów;
- uwzględnienie charakterystyki mechanicznej dwóch najczęściej stosowanych typów przewodów odgromowych: AFL-1,7 95 mm<sup>2</sup>, AFL-1,7 70 mm<sup>2</sup> –

ograniczenie ilości przypadków kiedy gabaryt słupów stanowiłby o konieczności skrócenia przęsła lub modyfikacji sylwetki słupów.

Na poniższym profilu przedstawiono korelację różnych typów przewodów zwizowanych wg PN-EN 50341-2-22:2016-04 z naciągiem zmniejszonym. Odmiennie charakterystyki mechaniczne przewodów wpływają na ich wzajemną korelację, a docelowo na gabaryt końcowy słupów.

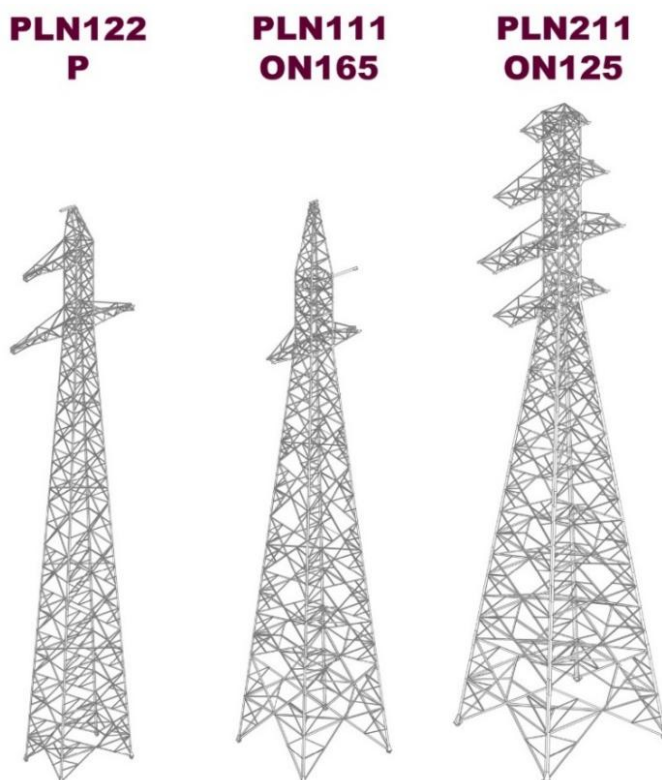


Rys. 2. Profil porównawczy krzywych zwisania różnych typów przewodów (warunki wizowania wg PN-EN 50341-2-22:2016-04, naciąg zmniejszony)

W efekcie zaprojektowano gabaryty konstrukcji wsporczych dla linii WN, cechujące się dopuszczalną długością przęsła, wyważoną do możliwości technicznych oraz ekonomicznego ich stosowania. Dodatkowo ograniczono ilość przypadków kiedy rzeczywiste kąty pracy słupa istotnie odbiegają od dopuszczalnych dla danego typu słupa, dzięki zawężeniu ich zakresów. Ponadto słupy umożliwiają wykorzystanie

najczęściej stosowanych typów przewodów fazowych i odgromowych przy zapewnieniu ich wzajemnej współpracy.

Katalog zawiera łącznie 36 różnych typów konstrukcji wsporczych, czyli 6 serii słupów kratowych dla linii 110 kV, po 3 serie słupów odpowiednio jednotorowych i dwutorowych z podziałem na trzy różne kombinacje stref klimatycznych: S1W1, S2W2, S2W1. Każda seria składa się ze słupów przelotowych, odporowo-narożnych i krańcowych.



Rys. 3. Przykładowe sylwetki słupów PLN jedno i dwutorowych.

### 3. Wymiarowanie i optymalizacja

Do obliczeń statycznych zastosowano przestrzenny model konstrukcji kratowej. Konieczność wymiarowania słupów energetycznych z zastosowaniem normy PN-EN 50341-1:2013 oraz Załącznika G i H normy PN-EN 1993-3-1:2008 zamiast ogólnych zasad zdefiniowanych w normie PN-EN 1993-1-1, wymusiła potrzebę stworzenia procedury obliczeniowej ściśle dedykowanego do projektowania kratowych konstrukcji wsporczych. Na podstawie wartości sił wewnętrznych uzyskanych z modelu obliczeniowego, przeprowadzono wymiarowanie prętów ściskanych i rozciąganych przy pomocy autorskiej procedury łączącej wymagania najnowszych norm oraz zwiększającej wydajność i poprawność prowadzonych obliczeń.

Punktem wyjścia przy projektowaniu konstrukcji wsporczych dla linii elektroenergetycznych jest analiza doboru optymalnej zbieżności trzonu słupa z uwzględnieniem najkorzystniejszych reakcji na fundament. W kolejnych krokach dobierane jest takie zakratowanie, aby przy spełnieniu normowych wartości granicznych smukłości, maksymalnie wykorzystać przekrój danego profilu. Smukłości graniczne elementów (wg PN-EN 50341-2-22:2016-04) powinny wynosić nie więcej niż:

- 120 dla krawężników trzonu i kolumny oraz pasów ściskanych poprzeczników i wieżyczek;
- 200 dla prętów skratowania głównego;
- 250 dla prętów skratowania drugorzędowego.

Warto podkreślić, że mimo wymiarowania elementów ściskanych opartego na normie PN-EN 1993-3-1:2008, dopuszczono w załączniku krajowym PN-EN 50341-2-22:2016-04 większe smukłości prętów skratowania głównego (200 zamiast 180 dla wież i masztów). Dobór większości profili skratowań determinowany jest przez ograniczenie smukłości prętów. W przypadku prętów krzyżulców nie ma uzasadnienia stosowanie stali o podwyższonych właściwościach. Dobór układów skratowań wynika zwykle z ekonomicznie uzasadnionej konieczności zapewniania nośności i stateczności prętów przy optymalnym wykorzystaniu przekroju profilu. Po spełnieniu powyższych zaleceń następuje wymiarowanie prętów w stanie granicznym nośności oraz wymiarowanie połączeń śrubowych.

Wszystkie słupy zostały zaprojektowane wg tej samej procedury. W bazie firmy Energa Invest znajduje się komplet danych, dzięki którym projektanci są w stanie bardzo szybko adaptować, rozwijać oraz aktualizować i dostosowywać katalogowe rozwiązania do bieżących warunków normowych i prawnych, a także specyficznych warunków techniczno-terenowych z zachowaniem pełnej funkcjonalności i spójności rozwiązań. Jest to bardzo korzystna sytuacja w przypadku późniejszej eksploatacji, gdyż w przypadku ewentualnych awarii, naprawach i modernizacjach nie ma problemu z dokumentacją archiwalną.

#### **4. Badania słupów w skali rzeczywistej**

Do roku 2016 normy dotyczące projektowania linii elektroenergetycznych nakładały obowiązek badania jednego słupa przelotowego i jednego mocnego z nowoprojektowanej serii. Aktualnie załącznik krajowy PN-EN 50341-2-22:2016 zaleca jedynie wykonanie montażu kontrolnego, natomiast potrzebę przeprowadzania badań wytrzymałościowych pozostawia do określenia przez Zamawiającego w Specyfikacji Projektowej. W dbałości o jakość projektu oraz na wniosek Energi Operatora, zostały przeprowadzone badania doświadczalne czterech wytypowanych słupów. Badania odbyły się na stacji badawczej Celpi, w Bukareszcie i zostały wykonane w oparciu o normę PN-EN 60652:2006 „Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych”.

Do badań wytrzymałościowych słupów PLN wytypowano pięć najistotniejszych dla wymiarowania konstrukcji przypadków obciążeń. W trakcie badania każdego słupa przeprowadzono pięć nieniszczących prób (do 100% obciążeń obliczeniowych) oraz jedną niszczącą próbę nośności, która była kontynuacją ostatniego przypadku. Do słupa zamontowane zostały na trzech kierunkach liny, przez które przyłożono wypadkowe obciążenia dla każdej kombinacji. Siły przykładano stopniowo do 50%, 75%, 90%, 95%, 100% wartości określonych obciążeń. Przypadek obciążenia nr 5 stopniowo przykładano powyżej 100% wartości sił, co 5% aż do zniszczenia konstrukcji.

Wyniki badań uznaje się za pozytywne, jeżeli podczas wszystkich testów konstrukcja wytrzyma obciążenia na każdym poziomie co najmniej przez 1 minutę, bez zniszczenia jej elementów. Natomiast dla 100% wartości obciążeń obliczeniowych przez 5 minut. Po zakończeniu badań wytrzymałościowych zostały pobrane próbki stali w celu przeprowadzenia badań podstawowych właściwości mechanicznych materiału. Elementy te zostały wskazane po badaniach, w zależności od przebiegu zniszczenia konstrukcji.

Zniszczenie wszystkich czterech słupów nastąpiło w dolnej części trzonu w postaci wybożenia ściskanych krawężników.



Rys. 4. Zniszczenie słupa PLN122 P (po lewej) oraz słupa PLN122 ON165 (po prawej).

Konstrukcje wsporcze kratowe wymiarowane były z uwagi na stan graniczny nośności. Stan graniczny użyteczności nie determinował doboru profili. Wartości ugięć obliczone w programie komputerowym i pomierzone w trakcie badań (zarówno przy obciążeniu 100% jak i tuż przed zniszczeniem) nie przekroczyły wartości dopuszczalnych normowych, a nawet wykazują znaczny zapas (ok. 70 % dla słupów przelotowych i ok. 50% dla słupów mocnych). Badanie wytrzymałości słupów wykonano z przyjęciem obciążeń obliczeniowych (a nie charakterystycznych, które przyjmuje się dla stanu granicznego użyteczności), zatem porównanie wartości pomierzonych z normowymi ma jedynie charakter orientacyjny. Miarodajne jest porównanie przemieszczenia wyznaczonego

w programie na modelu dla obciążenia obliczeniowego i przemieszczenia pomierzonego w badaniu po przyłożeniu 100% wartości tego obciążenia. Różnice są niewielkie (w granicy 10%), co dowodzi poprawności przyjętego modelu oraz procedury obliczeniowej.

Typ słupa	Przemieszczenie nie wyznaczone obliczeniowo	Przemieszczenie pomierzone przy 100% obciążenia normowego	Różnica przemieszczeń pomierzonych w stosunku do wart. obliczonych	Przemieszczenie zbadane dla obciążenia, po którym nastąpiło zniszczenie	Dopuszczalne normowe ugięcia dla obciążeń charakter.
	cm	cm	%	cm	
PLN122 P+10	35	32	9	42	130
PLN122 ON165+10	27	26	2	29	63
PLN211 P+0	33	31	6	38	114
PLN211 ON165+0	26	28	9	36	53

Tabela 3. Zestawienie porównawcze pomiędzy przemieszczeniami wyznaczonymi obliczeniowo a przemieszczeniami zbadanymi.



Po badaniach przeprowadzone zostały obliczenia na modelu z przyjęciem rzeczywistych wartości wytrzymałości stali zbadanej dla każdego testowanego słupa. Wyznaczono wartości obciążeń, przy których nastąpiłoby przekroczenie nośności przy uwzględnieniu wyników badania stali. Wykazano, że dodatkowo występuje zapas około 8% w obciążeniach modelowych w stosunku do wartości obciążeń, po których nastąpiłoby zniszczenie. Biorąc pod uwagę zapas wytrzymałości między parametrami normowymi dla stali a rzeczywistymi, zbadanymi w laboratorium, wyężenie konstrukcji obliczone teoretycznie jest bardzo zbliżone do uzyskanego podczas badań. Wielkości wyznaczone na modelu obliczeniowym odpowiadają wielkościom uzyskanym doświadczalnie.

## 5. Wnioski

Zmiana wymagań normowych oraz konieczność przebudowy systemu dystrybucyjnego kraju jest idealną okazją do wprowadzenia udoskonaleń w konstrukcjach wsporczych, uwzględniających aktualne potrzeby rynkowe i techniczne. Największą zaletą opracowywanego katalogu słupów jest uniwersalność oraz kompleksowość rozwiązań, która pozwoli na zastosowanie konstrukcji na większości obszaru Polski. Podkreślenia wymaga fakt, że przy założeniu udoskonalenia słupów polegającego na zwiększeniu ich wartości użytkowych, Energa Invest stworzyła słupy, które na przykładzie typowej sekcji odciągowej o długości 2,5 km pozwalają na mniejsze zużycie materiałów do budowy, ograniczają ingerencję w grunt prywatny oraz środowisko naturalne. Szerokie możliwości zastosowania pozwalają na zunifikowanie konstrukcji wsporczych w kraju przez co umożliwią m.in. szybsze usuwanie awarii, a posiadanie pełnych modeli obliczeniowych sprawną ocenę możliwości adaptacji do nietypowych warunków pracy.

Zasadniczą zmianą w projektowaniu konstrukcji wsporczych linii elektroenergetycznych jest wprowadzona w normie PN-EN 50341-2-22:2016-04 konieczność oceny nośności prętów ściskanych z uwzględnieniem Załącznika G i H normy PN-EN 1993-3-1:2008. Wprowadzony współczynnik smukłości efektywnej, uwzględniający sposób zamocowania prętów w węzłach, wpływa na wzrost teoretycznej nośności prętów, czego konsekwencją są korzyści ekonomiczne szczególnie istotne w przypadku konstrukcji powtarzalnych występujących w obiektach liniowych. Poprawność przyjętego podejścia obliczeniowego, wcześniej niestosowanego, została potwierdzona badaniami wytrzymałościowymi słupów w skali rzeczywistej.

Widząc zalety projektu Pylon, dzięki któremu powstał katalog bezpiecznych, ekonomicznych i ustandaryzowanych konstrukcji wsporczych, zespół Energi Invest postanowił wdrożyć swoje rozwiązania nie tylko na terenie Grupy Energa, ale również na niemal całym obszarze Polski. Dzięki katalogowi możliwa jest unifikacja linii wysokich napięć na bazie jednego rozwiązania, a idea standaryzacji może być przenoszona na innych operatorów sieci dystrybucyjnej. Prezentowany katalog swoim zakresem obejmuje podstawowe typy słupów stosowane na linii. Aktualnie projekt jest rozwijany, trwają prace nad rozszerzeniem katalogu o nowe rozwiązania.

## 6. Literatura:

- PN-EN 50341-1:2013-03: Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- PN-EN 50341-2-22:2016-04: Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2: Zbiór normatywnych warunków krajowych (NNA).
- PN-EN 1993-3-1:2008: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 3-1: Wieże, maszty i kominy. Wieże i maszty.

- PN-EN-60652:2006: Badania obciążeniowe konstrukcji wsporczych elektroenergetycznych linii napowietrznych.