

NOŚNOŚĆ NA WYCIĄGANIE FUNDAMENTÓW SŁUPÓW LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH 400 kV

Sławomir Labocha¹✉, Robert Czyż², Agnieszka Biernacka²

¹Wydział Architektury Budownictwa i Sztuk Stosowanych, Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach

²Enprom Sp. z o.o.

STRESZCZENIE

Przedmiotem opracowania są badania nośności na wyciąganie fundamentów stopowych słupów linii elektroenergetycznych. Zaprezentowano badania fundamentów w skali 1 : 1, przeprowadzone zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 61773:2000. Wyniki testów porównano z rezultatami uzyskanymi metodą MES oraz metodami normowymi według PN-EN 50341-1:2013 i PN-B-03322:1980.

Słowa kluczowe: fundamenty wyciągane, fundamenty wież kratowych, fundamenty słupów elektroenergetycznych, badania polowe

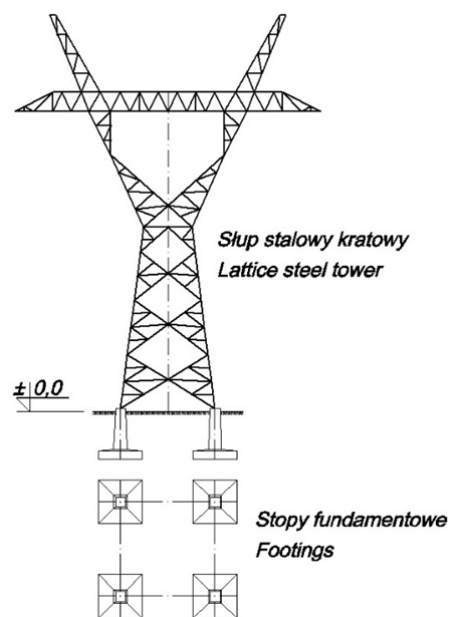
WSTĘP

Projektowanie elektroenergetycznych linii przesyłowych wymaga stosowania odrębnych zasad podyktowanych bezpieczeństwem oraz ekonomią. Szczegółowe wymagania ujęto w oddzielnych normach specjalnie przeznaczonych dla tych konstrukcji, w szczególności nośnych linii napowietrznych. Aktualne wymogi stawiane konstrukcjom wsporczych w energetyce są opisane w normach PN-EN 50341-1:2013 oraz PN-EN 50341-2-22:2016. Wytyczne projektowania konstrukcji wsporczych zawarte w wymienionych normach ujmują konieczne uzupełnienia lub nawet modyfikacje zasad projektowania wskazanych w Eurokodach. Specyfika wymagań dotyczy konstrukcji wsporczych bez względu na formę rozwiązań technicznych czy materiałowych, ale również ich posadowienia na gruncie. W szczególności dotyczy to fundamentów najpowszechniej stosowanych w energetyce typów konstrukcji wsporczych – stalowych słupów kratowych. Standardowo posadowienie ich rozwiązywane

jest w formie czterodzielnych stóp grzybkowych (rys. 1). Odmienne niż w typowych fundamentach budynków i konstrukcji szkieletowych posadowionych na stopach krytyczną wielkością warunkującą bezpieczeństwo posadowienia jest nośność stóp na wyciąganie. Zasad oceny nośności stóp wrywanych nie sprecyzowano jednak w normach PN-EN 1997-1:2008 i PN-EN 1997-2:2009. Jednocześnie normowe rozwiązania zapewniające nośność przy wrywaniu wyłącznie za pomocą przeciwwagi grawitacyjnej nie mogły być akceptowalne z uwagi na wysokie koszty takich rozwiązań dla ogromnej liczby stosowanych fundamentów. Racjonalne projektowanie stóp grzybkowych dla kratowych słupów elektroenergetycznych wymaga uwzględnienia przy nośności na wrywanie dodatkowego oporu generowanego w ośrodku gruntowym na powierzchni bocznej wyciąganej bryły fundament + grunt.

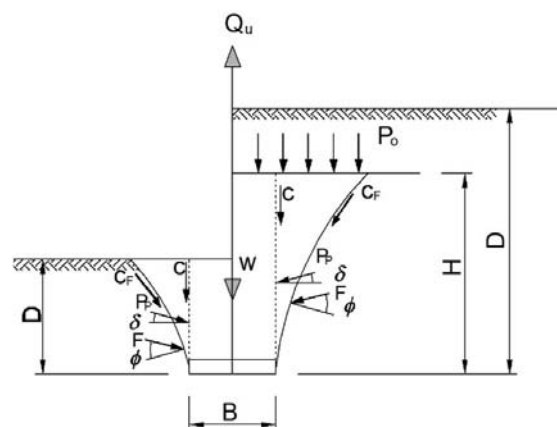
Zasadniczo asekuracyjną ocenę nośności stóp wrywanych zaproponowano w normie PN-EN 50341-1:2013. Jej zalecenia znacząco różniły się od zasad

oceny nośności takich fundamentów ujętych w normie PN-B-03322:1980, która przez wiele lat była stosowana z powodzeniem w energetyce. Wieloletnie pozytywne doświadczenia ze stosowania normy PN-B-03322:1980, prowadzące do bezpiecznego, ale zarazem ekonomicznego doboru fundamentów, poparte brakiem awarii i katastrof budowlanych związanych z posadowieniem konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych zdecydowało o wprowadzeniu do załącznika krajowego PN-EN 50341-2-22:2016 zalecenia dopuszczającego stosowanie dotychczasowych sprawdzonych modeli obliczeniowych. Tym samym wymagając spełnienia innych ogólnych zasad projektowania posadowień zgodnie z normą PN-EN 1997-1:2008, w ocenie nośności stóp fundamentowych na wrywanie dopuszcza się korzystanie z modelu wprowadzonego do normy PN-B-03322:1980, tj. stworzonego według propozycji Meyerhoffa i Adamsa (1968). Niewprowadzone do polskich norm modele alternatywne przedstawiono m.in. w pracy Dasa (2009). Schemat ideowy modelu mechanicznego Meyerhoffa i Adamsa (1968) przedstawiono na rysunku 2. Problemem formalnym są jednak różnice w systemach bezpieczeństwa, związane między innymi z odmiennymi wartościami częściowych współczynników występujących w normach PN-EN 1997-1:2008 oraz PN-B-03322:1980. Z uwagi na kluczowe znaczenie w energetyce oceny nośności fundamentów bezpośrednich poddanych obciążeniom wyciągającym podjęto projekt badawczy mający na celu zweryfikowanie rzeczywistej nośności takich fundamentów. Prace badawcze prowadzone były w ramach realizacji zadań do projektu NCBIR POIR.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”. Badaniom poligonowym poddano różne typy fundamentów stopowych. Unikalność przeprowadzonych badań polegała na testach prowadzonych na obiektach w skali naturalnej 1 : 1, w stosunku do fundamentów faktycznie stosowanych na liniach 400 kV. Projekt prowadzono we współpracy z Instytutem Dróg i Mostów, Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.



Rys. 1. Typowe fundamenty stalowych słupów kratowych w energetyce

Fig. 1. Typical foundation of the steel lattice transmission tower



Rys. 2. Mechanizm zniszczenia fundamentów wyciąganych według Meyerhoffa i Adamsa (1968)

Fig. 2. Failure of soil under uplift load according to Meyerhoff and Adams (1968)

BADANIA FUNDAMENTÓW KONSTRUKCJI WSPORCZYCH LINII 400 kV

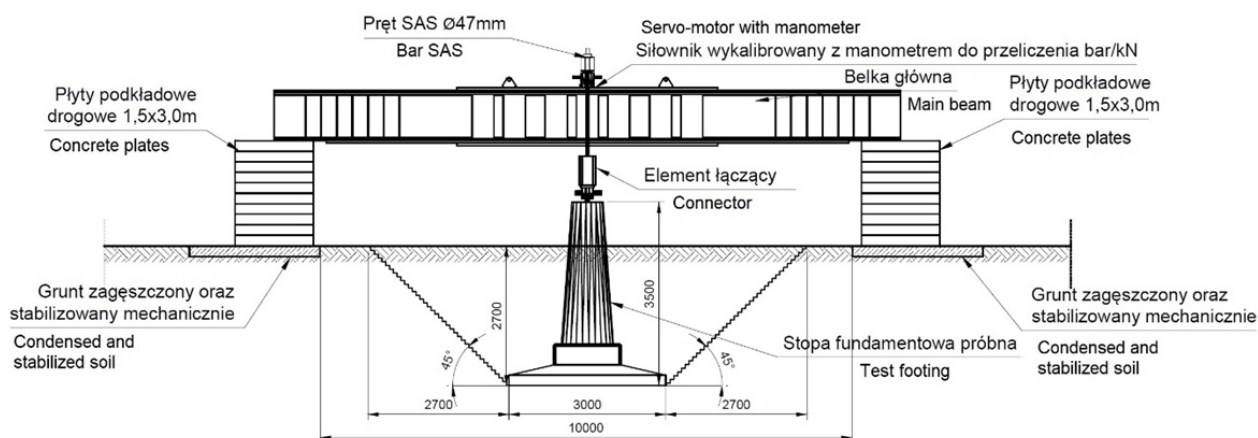
Badania poligonowe

Przedmiotem niniejszego opracowania jest opis badań fundamentów stopowych kratowych słupów

linii elektroenergetycznych 400 kV, związanych z oceną ich nośności w gruncie na wyciąganie. Badaniom terenowym na wyciąganie z podłoża poddano różne typy fundamentów wykonanych w skali 1 : 1. Przygotowano testy stóp grzybkowych w wersjach: typowych prefabrykowanych, zmodyfikowanych prefabrykowanych z nakładkami oraz innowacyjnych stóp monolityczno-prefabrykowanych. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3. W zależności od typu fundamentu oraz rodzaju gruntu zasypowego przewidziano zakres zmienności głębokości posadowienia stóp od 2,0 do

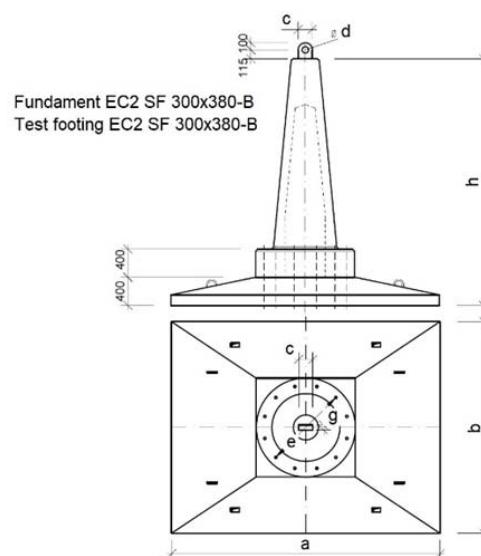
3,5 m. Niniejszy artykuł obejmuje opis badań oraz analizę szczegółową uzyskanych wyników dla podstawowej serii fundamentów EC2 SF 300×380-B przedstawionych na rysunku 4, będących dotychczas standardem w budowie linii elektroenergetycznych 400 kV.

Podstawowa seria badań obejmowała trzy testy fundamentów posadowionych na głębokości 2,5 m, w jednorodnych warunkach gruntowych. Do zasypu użyto gruntów niespoistych, układanych zagęszczanymi warstwami miąższości 30–40 cm. Badania polowe oraz laboratoryjne przedstawione w opracowaniu



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego (Piletest, 2018)

Fig. 3. Testing station schema (Piletest, 2018)



Rys. 4. Fundament EC2 SF 300×380-B przeznaczony do badań

Fig. 4. Test-foundation EC2 SF 300×380-B

EC2P300x380-1	EC2T310-65/88	380	300	350	120	20	8,5	65	11143
Płyta/Plate	Trzon/Core	a	b	h	e	c	d	g	Masa/ Mass [kg]
Elementy/Parts		Wymiary/Dimensions [cm]							

Raport WIL PW (2018) pozwoliły na zidentyfikowanie użytych gruntów jako piaski średnie.

Badania prowadzono zgodnie z wymogami normy PN-EN 61773:2000. Podczas badań, których głównym celem była ocena nośności granicznej fundamentów, prowadzono również stosowne pomiary przemieszczeń. Norma PN-EN 61773:2000 nie tylko precyzuje metodykę pomiarów nośności fundamentów, ale również proponuje kilka metod oceny nośności fundamentów na podstawie uzyskanych wykresów zależności siła–przemieszczenie. Odczyty przemieszczeń rejestrowano czterema czujnikami indukcyjnymi o dokładności 0,01 mm w pięciominutowych odstępach oraz natychmiast po zmianie obciążenia. Pomiar sił był wykonywany za pomocą elektronicznego dynamometru umieszczonego między tłokiem siłownika a belką główną. Wyniki z czujników przemieszczeń oraz dynamometru rejestrowane były z użyciem komputera przemysłowego DataLogger. Kontrola poprawności odczytów z czujników odbywała się dodatkowo za pomocą niwelatora. Widok stanowiska badawczego zamieszczono na rysunku 5. Po każdym teście dokonywano ponadto szczegółowej inwentaryzacji rys powstałych na powierzchni gruntu w obrysie wypartej bryły, dających przybliżone rozłożenie płaszczyzn poślizgu. Pomiary te miały charakter jakościowy. Podstawowym przedmiotem badań było oszacowanie nośności granicznej fundamentów bez kompleksowej analizy pól przemieszczeń.

Badania w każdym teście prowadzono aż do uzyskania granicznej siły w układzie pomiarowym, tj. gdy odczyty na manometrze siłownika wskazywały brak przyrostu siły przy rejestrowanych przyrostach przemieszczeń w określonych normą przedziałach czasowych. Tak określone siły graniczne w trzech próbach wyniosły kolejno: 1100 kN, 1000 kN i 1050 kN (średnio 1050 kN). Ciągły pomiar sił i przemieszczeń pozwolił na zbudowanie wykresów zależności siła–przemieszczenie.

Podczas kolejnych badań można było dokonać następujących spostrzeżeń:

- w trakcie badań, podczas wrywania fundamentu na powierzchni gruntu pojawiały się nieregularne pęknięcia, a grunt wokół fundamentu unosił się,
- po osiągnięciu siły granicznej następował ciągły przyrost przemieszczeń fundamentu w górę bez przyrostu odczytów sił,
- po odciążeniu grunt z fundamentem wracał praktycznie do stanu początkowego, nieregularne pęknięcia zamykały się, a uwidaczniały się regularne pęknięcia obwodowe wokół osi pionowej fundamentu w odległości około 1 m poza obrys jego płyty dolnej, przemieszczenia trwale odczytane na czujnikach wynosiły od 1,45 do 20,87 mm,
- ścięcie wrywanej bryły gruntu przebiegało pod kątem, jak sugeruje model z normy PN-B-03322:1980, a nie pionowo nad skrajem płyty, jak sugeruje asekuracyjnie norma PN-EN 50341-1:2013,



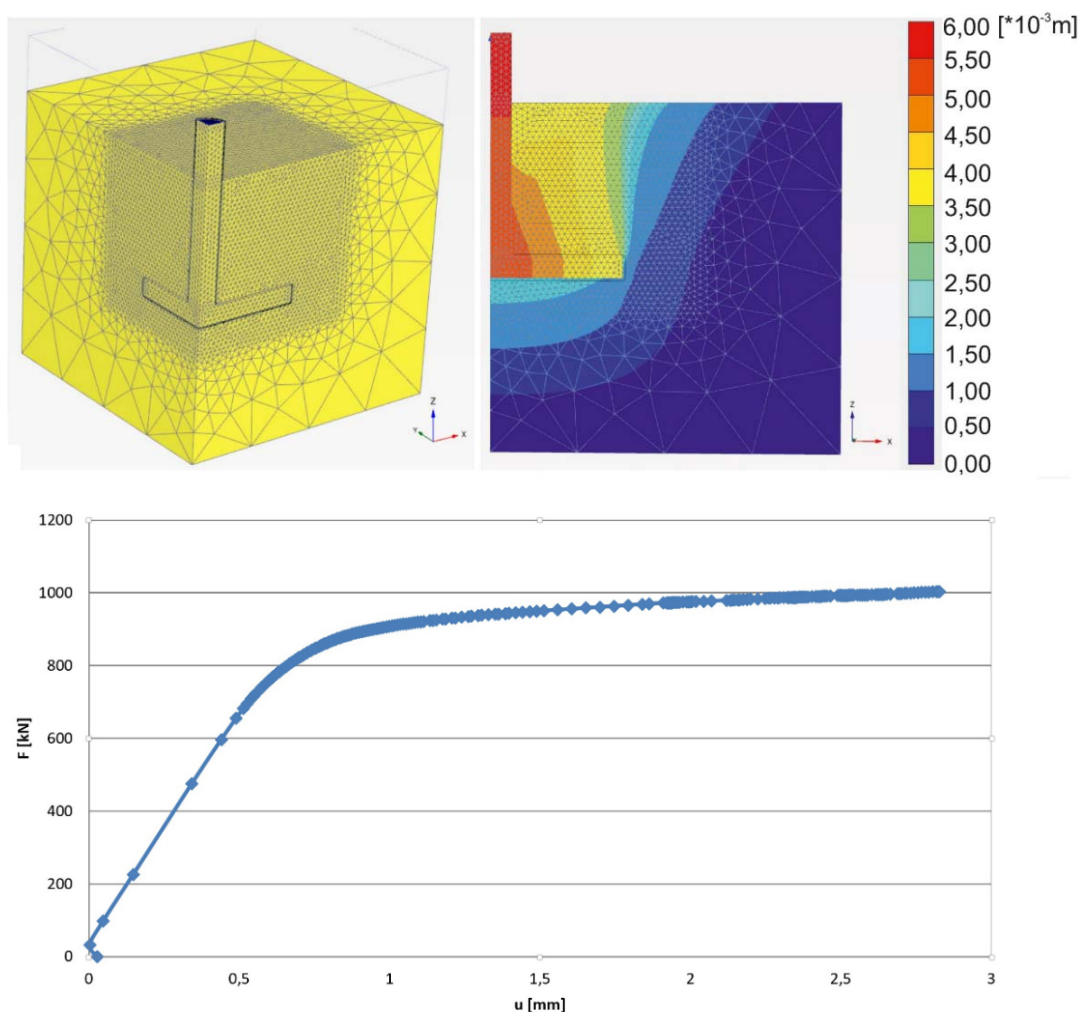
Rys. 5. Widok stanowiska badawczego
Fig. 5. View of the testing station

- żelbetowe fundamenty nie uległy żadnym uszkodzeniom, na wyciągniętych elementach testowych nie odnaleziono pęknięć ani zarysowań na powierzchniach, deformacji nie uległy również stalowe ucha, przez które poprzez sworzeń przekazywano obciążenia.

Modelowanie numeryczne MES

Otrzymane wyniki badań polowych porównano z rezultatami uzyskanymi na podstawie obliczeń metodą MES, posługując się programem Plaxis 3D. Zbudowano modele objętościowe reprezentujące 1/4 część badanego ustroju. Konstrukcję fundamentów zamodelowano elementami o własnościach liniowo-sprężystych odpowiadających betonowi C30/37. Ośrodek

gruntowy zamodelowano elementami o własnościach sprężysto-plastycznych, bazujących na hipotezie Coulomba-Mohra o parametrach geotechnicznych określonych makroskopowo i laboratoryjnie zgodnie z Raportem WIL PW (2018): gęstość objętościowa $18,95 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, kąt tarcia wewnętrznego $35,5^\circ$, moduł sprężystości 50 MPa, współczynnik Poissona 0,3, kąt dylatacji $5,5^\circ$ oraz spójność pozorna z przedziału od 1 do 3 kPa. Na powierzchni styku między elementami betonowymi i gruntem wykorzystano powierzchniowe elementy kontaktowe interferencyjne ze współczynnikiem redukcyjnym równym 0,7. Widok ogólny modelu MES wraz z siatkowaniem oraz typowy schemat deformacji wraz z krzywą siła–przemieszczenie przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Widok modelu MES oraz uzyskanej krzywej siła–przemieszczenie

Fig. 6. View of the FEM model and force–displacement curve

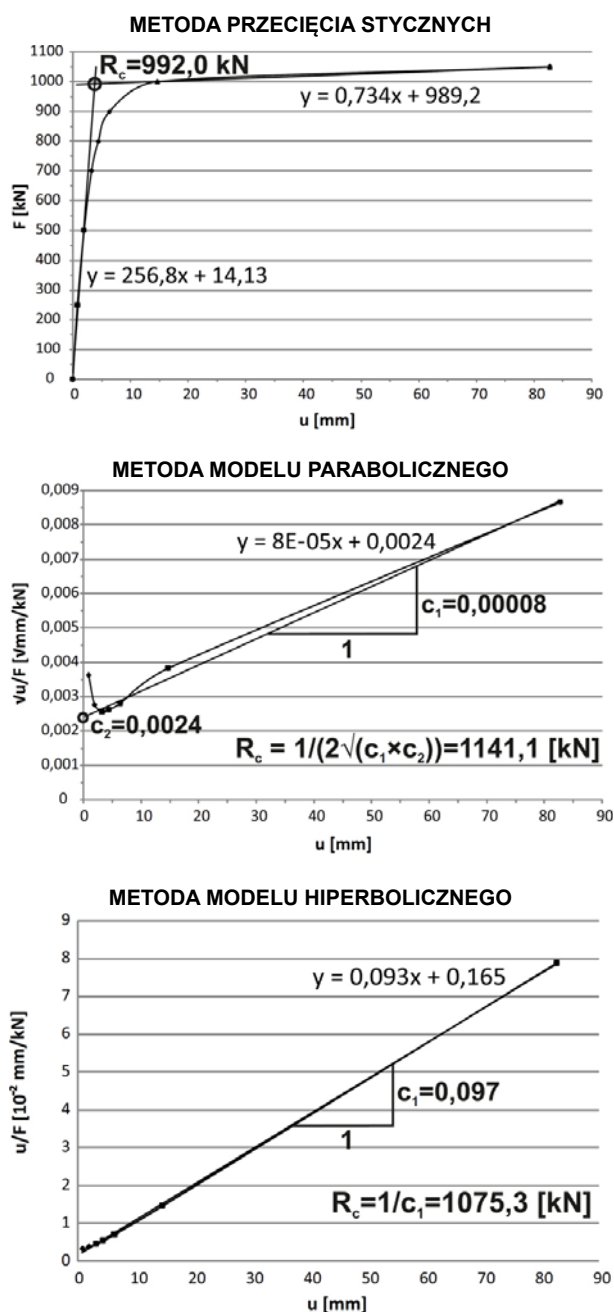
Analiza wyników

Wszystkie próby charakteryzowały się ciągłym przyrostem przemieszczeń, przy stałej lub lekko spadającej sile w stosunku do wartości maksymalnej granicznej. Otrzymane wykresy zależności siła–przemieszczenie z badań aproksymowano krzywymi gładkimi. Norma PN-EN 61773:2000 dopuszcza do określenia nośności następujące kryteria:

- metody stycznych przecinających się (nośność określa się jako obciążenie związane z przecięciem dwóch stycznych krzywej obciążenie–przemieszczenie: jednej reprezentującej zakresy sprężyste, drugiej plastyczne),
- metody logarytmicznej (nośność określa się przez punkt przecięcia prostych odcinków wykresów, w których współrzędne obciążenia–przemieszczenia są w skali logarytmicznej),
- metody modelu parabolicznego (nośność określa się wzorem $R_c = \frac{1}{2\sqrt{c_1 c_2}}$, gdzie wartości c_1 i c_2 oznaczają odpowiednio nachylenie linii wykresu i punkt przecięcia osi rzędnych na zmodyfikowany wykres ścieżki, gdzie na osi rzędnych odkładany jest iloraz pierwiastka kwadratowego przemieszczenia przez obciążenie),
- kryterium 90% (nośność określa obciążenie dające dwukrotnie większe przemieszczenie niż osiągnięte przy 90% obciążenia),
- metody modelu hiperbolicznego (nośność określa się wzorem $R_c = \frac{1}{c_1}$, w którym wartość c_1 oznacza nachylenie linii zmodyfikowanego wykresu obciążenie–przemieszczenie, gdzie na osi rzędnych odkładany jest iloraz przemieszczenia przez obciążenie),
- metody nachylenia stycznych (nośność określa przecięcie linii równoległej do wyjściowego odcinka krzywej obciążenie–przemieszczenie w odległości odpowiadającej przemieszczeniu 4 mm).

Ze wskazań normowych wynika, że metody (b) i (f) prowadzą do zaniżania wartości nośności, a metoda (d) wymaga postępowania iteracyjnego, dając rezultaty zbliżone do metod (a) i (c). W związku z tym ocenę nośności w przedmiotowym projekcie dokonano, modyfikując krzywe nośności z badań i analiz numerycznych zgodnie z metodami (a), (c) i (e). Odpowied-

nie wykresy i ich modyfikacje ilustrujące metodykę obliczeń dla krzywych z badań próby o maksymalnej sile 1050 kN zaprezentowano na rysunku 7. Metoda



Rys. 7. Nośność fundamentu na wyciąganie według PN-EN 61773:2000

Fig. 7. The ultimate uplift capacity of foundations according to PN-EN 61773:2000

przecięcia stycznych wykorzystuje wyjściową krzywą siła–przesunięcie. Dwie pozostałe metody stosują zmodyfikowane krzywe odniesione do przekształconych osi rzędnych. Nośności fundamentu z analiz numerycznych również określono według kryteriów normy PN-EN 61773:2000.

Zestawienie wyników szczegółowych obliczeń dla próby o sile granicznej równej średniej z badań (1050 kN) zamieszczono w tabeli. W przypadku obliczeń metodą MES podano zakres wartości uzyskanych dla przedziału zmienności spójności pozornej od 1 do 3 kPa. W tabeli umieszczono również wyniki obliczeń nośności nominalnych (dla charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych grun-

zachowanie aspektów ekonomicznych. Wyniki uzyskane metodą MES dla analizowanych modeli gruntu C-M szacują nośność badanego fundamentu od dołu.

Indywidualny wkład autorów

Opracowanie: S.L.; metodologia: S.L. i R.C.; oprogramowanie: A.B.; walidacja: S.L. i A.B.; analiza formalna: S.L.; badanie: S.L. i R.C.; kompilacja i opracowanie danych: A.B.; sporządzenie wstępnej wersji artykułu: S.L.; redakcja i korekta artykułu: R.C. i S.L.; zarządzanie projektem: R.C. i S.L.

Wszyscy autorzy zapoznali się z przeznaczoną do publikacji wersją manuskryptu.

Tabela. Wyniki obliczeń nośności fundamentu

Table. Results of the calculations of the foundation capacity

Metoda – Method	Badania <i>in situ</i> – <i>In situ</i> test [kN]	MES – FEM [kN]
Metoda stycznych – Tangents	992	866–934
Model paraboliczny – Parabolic model	1141	964–998
Model hiperboliczny – Hyperbolic model	1075	1042–1099
PN-EN 50341-1:2013		894
PN-B-03322:1980		1024

tów) zgodnie z metodyką norm PN-EN 50341-1:2013 i PN-B-03322:1980.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie danych z tabeli można zauważyć, że nośność wyznaczona zgodnie z normą PN-EN 50341-1:2013 jest mniejsza o około 10% od oceny metodą stycznych dającej dolne oszacowanie nośności z wybranych metod według normy PN-EN 61773:2000 i o około 13% mniejsza od obliczonej zgodnie z normą PN-B-03322:1980.

Przeprowadzone badania wykazały bardzo dobre dopasowanie metody oceny nośności na wyciąganie fundamentów stopowych zgodnie z normą PN-B-03322:1980, potwierdzając nie tylko poprawność modelu oceny nośności granicznej, ale również

PIŚMIENNICTWO

- Das, B. M. (2009). *Shallow foundations. Bearing capacity and settlement*. Boca Raton, London, New York: CRC Press.
- Meyerhof, G. G. i Adams, J. J. (1968). The ultimate uplift capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 5 (4), 225–244.
- Piletest (2018). *Projekt próbnych obciążeń statycznych na wyciąganie stóp fundamentowych*. Bielsko-Biała: Piletest.
- PN-B-03322:1980. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Fundamenty konstrukcji wsporczych. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.

PN-EN 50341-1:2013. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1: Wymagania ogólne.

PN-EN 50341-2-22:2016. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22: Krajowe warunki normatywne (NNA) dla Polski (oparte na EN50341-1:2012).

PN-EN 61773:2000. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Badanie fundamentów konstrukcji wsporczych.

Raport WIL PW (2018). *Raport końcowy z nadzoru naukowego nad badaniami poligonowymi grzybkowych fundamentów stopowych pod słupy energetyczne 400 kV*. Warszawa: Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Ładowej PW.

UPLIFT CAPACITY OF THE TOWER FOUNDATIONS FOR THE 400 KV TRANSMISSION LINES

ABSTRACT

The subject of the study is the assessment of the uplift capacity of pad foundations for transmission line towers. Full scale tests carried out in accordance with the requirements of the PN-EN 61773:2000 standard were presented. The test results were examined and compared with the results obtained using FEM models and methods defined in PN-EN 50341-1:2013 and PN-B-03322:1980 standards.

Key words: uplift foundations, lattice tower foundations, foundations of transmission line towers, *in situ* testing