

PROJEKTOWANIE POSADOWIENIA ELEKTROWNI WIATROWYCH



Adam Zaremba
Projektant, Kierownik Działu
Projektowego, Menard Polska Sp. z o.o.



Projektując posadowienie tego typu obiektów budowlanych, należy zwrócić uwagę w szczególności na jakość oraz rodzaj rozpoznania podłoża gruntowego. Jego badania powinny stanowić materiał wyjściowy do wykonania projektu geotechnicznego.

Zgodnie z pakietem energetyczno-klimatycznym, nałożonym przez Komisję Europejską na państwa członkowskie, do 2020 roku Polska będzie zobowiązana do produkowania 15% energii w krajowym bilansie energetycznym ze źródeł odnawialnych (z czego od 30% do 50% będzie wytwarzana przez elektrownie wiatrowe). To oznacza, że Polska do 2020 r. musi czterokrotnie zwiększyć moc zainstalowanej energii wiatrowej.

Kolejnym założeniem pakietu energetyczno-klimatycznego jest znacząca redukcja emisji gazów cieplarnianych do 40% w 2030 r, czyli poniżej emisji z roku 1990. Aby nie płacić kar za przekroczoną emisję CO₂, Polska będzie musiała odchodzić od energii pozyskiwanej z paliw kopalnych. Jedyną alternatywą są odnawialne źródła energii, ponieważ z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że do tego czasu nie powstaną w Polsce elektrownie atomowe. Obecne prognozy szacują start pierwszego bloku energetycznego na 2027 r. Chciałbym podkreślić, że pierwsze plany zakładały uruchomienie elektrowni atomowej w Żarnowcu w 1990 r.

Postawienie na rozwój energetyki z odnawialnych źródeł energii jest zatem jedyną szansą spełnienia kryteriów zapisanych w pakiecie energetyczno-klimatycznym przedstawionym niedawno przez Komisję Europejską.

Zalety energetyki wiatrowej

Argumenty za rozwojem energetyki wiatrowej są następujące:

- krótki czas realizacji inwestycji, w porównaniu do energii pozyskiwanej z elektrowni wodnych,
 - wydajne instalacje, moc turbin dochodzi do 7,0 MW,
 - dobrze rozwinięta technologia, sprawności dochodzące do 40%,
 - stosunkowo niewielkie oddziaływanie na środowisko w porównaniu do budowl wodnych lub energetyki z biomasy lub biogazu.
- Do wad energetyki wiatrowej można zaliczyć:
- emisję uciążliwych oddziaływań akustycznych,
 - produkcję energii tylko przy określonej prędkości wiatru,
 - krótki czas eksploatacji turbiny (ok. 20 lat).

Charakterystyka konstrukcji

Elektrownia wiatrowa zbudowana jest z wieży i gondoli, która składa się z wirnika i układu pomiarowego (schemat turbiny przedstawia rysunek 4). Wirnik składa się z łopat połączonych piastą. Łopaty poruszane są przez wiatr i przekazują moc do piasty, która jest połączona z wałem napędowym, zwiększającym prędkość osi.

Wieże dla turbin dużych mocy wykonane są w postaci stalowej lub żelbetowej rury (rzadziej kratownicy). Rozwiązanie w postaci masztu, utrzymywanego w poziomie za pomocą lin, jest stosowane tylko w małych turbinach (służących na przykład do ładowania baterii akumulatorów). Wieże elektrowni wiatrowych o dużych mocach (1,0-3,6 MW) są wykonane w większości przypadków z rur stalowych, o średnicy 4,0-11,0 m, które są dostarczane w częściach na miejsce budowy. Wieże mają stożkowy kształt, ze średnicą rosnącą ku podstawie. Taki kształt zapewnia dużą wytrzymałość oraz oszczędność materiału.

Badania podłoża gruntowego

Zgodnie z rozporządzeniami [3] (§4 ust. 1 pkt 3b i 3c) oraz [4] turbiny wiatrowe można opisać, jako „nietypowe obiekty budowlane niezależnie od stopnia skomplikowania warunków gruntowych, których wykonanie lub użytkowanie może stwarzać poważne zagrożenie dla użytkowników” lub „których projekty budowlane zawierają nieznaną podstawę w przepisach nowe niesprawdzone w krajowej praktyce rozwiązania techniczne”. Obiekty tak scharakteryzowane zaliczane są do trzeciej kategorii geotechnicznej, co narzuca wykonanie szczegółowych badań geotechnicznych oraz projektu geotechnicznego zgodnego z [3]. Zważywszy na koszt pojedynczej turbiny szacowany na ok 2,5 mln euro, oszczędności od kilkuset do kilku tysięcy złotych na badaniach geotechnicznych są niewspółmierne do kosztów, jakie można ponieść w przypadku katastrofy budowlanej.

W wytycznych [5] został przedstawiony szczegółowy zakres badań, jakie należy wykonywać podczas projektowania posadowień turbin wia-

trowych. Badania polowe należy wykonywać do głębokości ok 1,5 średnicy fundamentu. Przykładowe badania do wykonania są następujące:

- 1-2 odwierty,
- 1-3 sondowania pozwalające określić parametry gruntu na miejscu np.:
 - sondowania CPTu,
 - sondowania DMT,
 - badania z wykorzystaniem presjometru np. Menard,
 - sondowania sondą dynamiczną (dla gruntów niespoistych,
 - sondowania sondą krzyżkową do określenia niedrenowanej wytrzymałości na ścinanie w warunkach in-situ.
- badania in-situ do określenia parametrów gruntów w zakresie małych odkształceń, badania geofizyczne prędkości rozchodzenia się fali akustycznej w gruncie np.:
 - sondowania SCPTu,
 - sondowania SDMT,
- pobór próbek NNS do badań laboratoryjnych.

Na podstawie badań polowych oraz laboratoryjnych powinny zostać wyznaczone następujące parametry, potrzebne do poprawnego zaprojektowania posadowienia konstrukcji:

- określenie rodzaju gruntu z podziałem na warstwy litologiczne
- maksymalny poziom zwierciadła wód gruntowych,
- parametry wiodące uzyskane z sondowań np. qc,
- efektywne parametry wytrzymałościowe gruntu,
- parametry wytrzymałościowe gruntu w warunkach bez drenażu,
- parametry odkształceniowe gruntów:
 - moduł odkształcenia gruntu E dla zakresu odkształceń ($10^{-2} > \epsilon > 10^{-3}$),
 - moduł ścinania gruntu G dla zakresu odkształceń ($10^{-2} > \epsilon > 10^{-3}$),
 - wartość współczynnika Poissona dla sytuacji krótkotrwałej i długotrwałej,
 - moduł odkształcenia gruntu E_{max} dla zakresu odkształceń ($10^{-5} > \epsilon > 10^{-6}$),
 - moduł ścinania gruntu G_{max} dla zakresu odkształceń ($10^{-5} > \epsilon > 10^{-6}$).

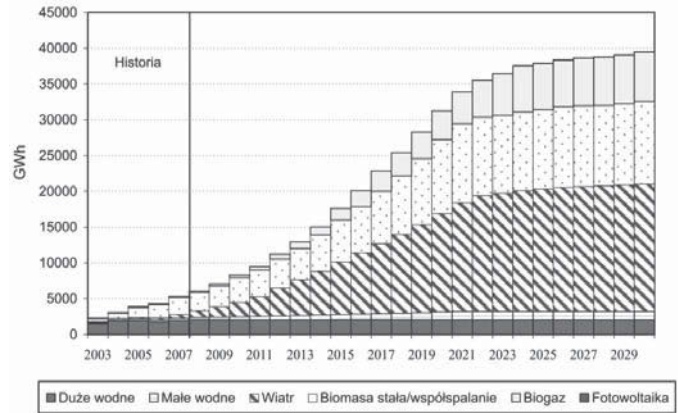
Projekt geotechniczny

Ze względu na charakter konstrukcji oraz trzecią kategorię geotechniczną wymagane jest przygotowanie projektu geotechnicznego zgodnie z [3] oraz wytycznymi producenta turbiny.

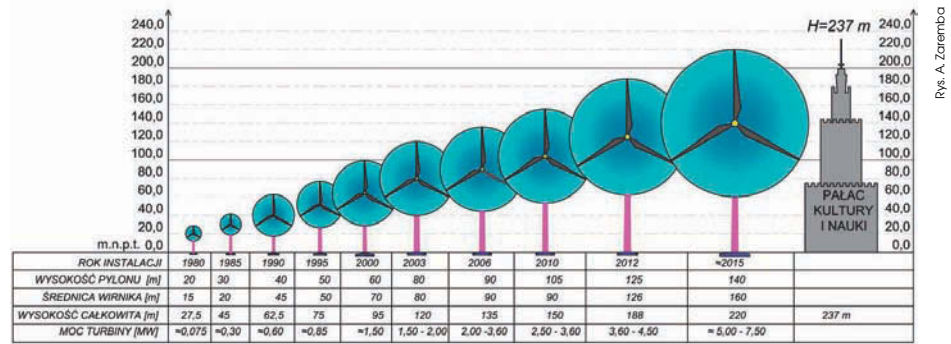
Kształt oraz wielkość fundamentu określa projektant konstrukcji na podstawie analizy statycznej. Wymiarującym kryterium wg [5] jest brak odrywania fundamentu dla obciążeń charakterystycznych dla przypadku DLC_{QP} (quasi-permanent loads combination), zarówno przy posadowieniu bezpośrednim, jak i na palach. Wytyczne [5] oraz norma [9] określają zakres dopuszczalnego odrywania dla pozostałych kombinacji, należy pamiętać o uwzględnieniu wszystkich destabilizujących oddziaływań, jak np. wypór wody, oraz współczynników obliczeniowych.

W projekcie geotechnicznym należy sprawdzić następujące warunki stanów granicznych nośności i użyteczności podłoża gruntowego [5, 6, 13, 16]:

- $\Delta S < \Delta S_{dop}$ – warunek dopuszczalnych osiadań różnicowych fundamentu,
 - Δs – wyznaczona przechyłka fundamentu,
 - ΔS_{dop} – przechyłka dopuszczalna określana przez producenta turbiny,
- $q_{min} > \sigma_{max}$ – warunek granicznej nośności podłoża,
 - q_{min} – nośność rodzimego podłoża gruntowego lub poddanego modyfikacji w celu spełnienia nierówności,
 - σ_{max} – maksymalne naprężenia krąwekcyjne,
- $s_{max} < s_{dop}$ – warunek osiadań maksymalnych,
 - s_{max} – maksymalne osiadania konstrukcji,
 - s_{dop} – osiadania dopuszczalne,



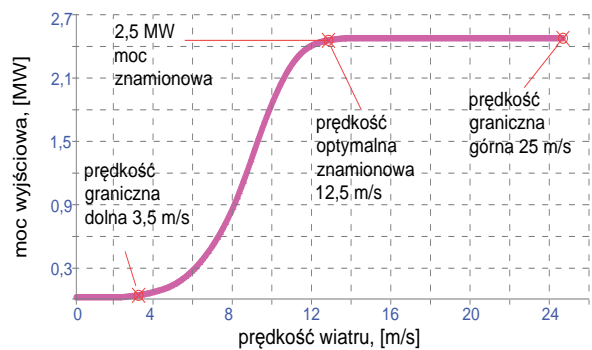
Rys. 1. Prognozowana struktura pozyskiwania energii elektrycznej z OZE w Polsce w roku 2030 [1]



Rys. 2. Zmiany parametrów turbin wiatrowych na przełomie ostatnich dwóch dekad [2]

KRZYWA MOCY TURBINY WIATROWEJ

(dla turbiny o mocy 2,5 MW na podstawie danych GE Energy)



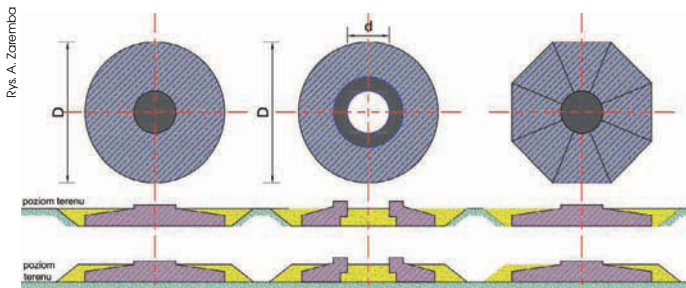
Rys. 3. Wykres mocy turbiny w zależności od prędkości wiatru [17]



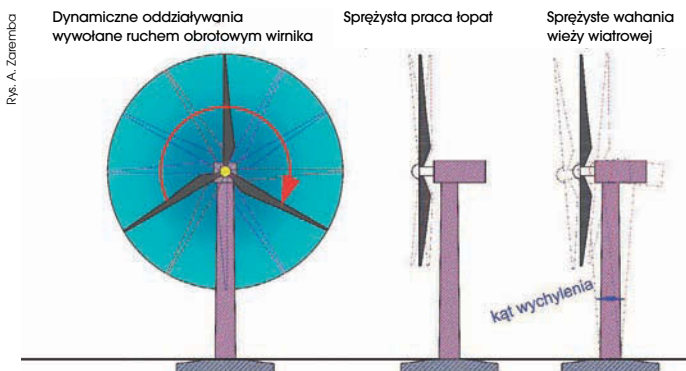
Rys. 4. Schemat budowy turbiny wiatrowej oraz zdjęcie elektrowni o mocy 2,5 MW [17]

Rys. A. Zoremba

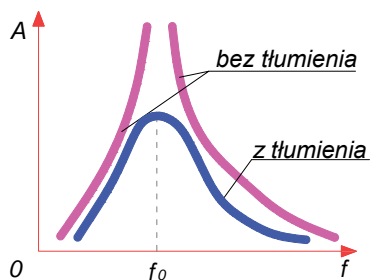
Rys. A. Zoremba



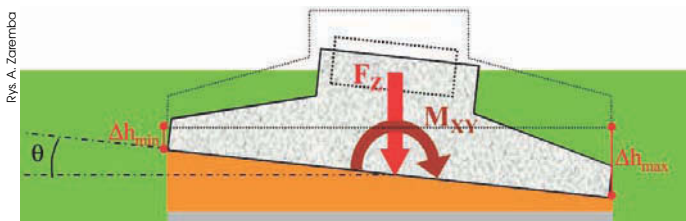
Rys. 5. Schematy fundamentów o kształtach okrągły, kwadratowy i oktagonalny



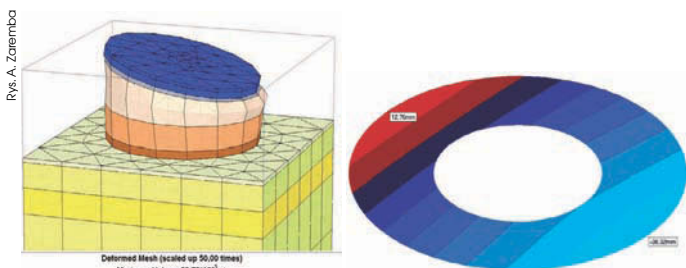
Rys. 6. Schemat oddziaływań dynamicznych przekazywanych na fundament EW



Rys. 7. Wykres amplitudy drgań w strefie rezonansu [17]



Rys. 8. Schemat przemieszczeń fundamentu turbin wiatrowej w wyniku przekazywanych obciążeń [10]



Rys. 9. Wyniki analizy osiadań fundamentu posadowionego na gruncie rodzimym wykonane w programie Plaxis 3D i ABC Obiekt 3D

• $k_{\phi,i} > k_{\phi dop,i}$ – sprawdzenie parametrów dynamicznych podłoża gruntowego ze względu na oddziaływania dynamiczne/cykliczne konstrukcji (dynamicznej i statycznej sztywności obrotowej fundamentu),

$k_{\phi,stat}$ – statyczna sztywność obrotowa podłoża gruntowego,

$k_{\phi dop,stat}$ – graniczna statyczna sztywność obrotowa podłoża gruntowego określona przez producenta turbiny,

$k_{\phi,dyn}$ – dynamiczna sztywność obrotowa podłoża gruntowego,

$k_{\phi dop,dyn}$ – graniczna dynamiczna sztywność obrotowa podłoża gruntowego określona przez producenta turbiny.

Pierwsze trzy stany graniczne są typowe dla większości fundamentów, natomiast sprawdzanie obrotowej sztywności dynamicznej fundamentu nie jest powszechnie wykonywane, a w przypadku turbin wiatrowych ma kluczowe znaczenie. Producent turbiny określa minimalną wartość sztywności dynamicznej fundamentu, dla której różnica częstotliwości jest bezpieczna.

Analiza dynamiczna fundamentu ma na celu zapobiegnięcie nakładaniu się na siebie drgań, a co za tym idzie, uniknięcie zjawiska rezonansu. Przykładem katastrofy budowlanej wywołanej nakładaniem się drgań oraz rezonansem jest katastrofa mostu Tacoma Narrows Bridge, do której doszło w 1940 r. [8] na skutek obciążeń poziomych wiatrem wiejącym z prędkością ok. 42 mph. Most był projektowany na wiatr o prędkości maksymalnej 120 mph [7].

Katastrofę skomentował profesor Jan Biliszczuk słowami „Z tego zdarzenia wyciągnięto jednak wnioski, bo od tego czasu nie było na świecie katastrofy typu «flutter», czyli spowodowanej nakładaniem się tych drgań. Inżynierowie badający katastrofę odkryli, że ich częstotliwości powinny być od siebie maksymalnie oddalone. Normy wymagają, żeby ta różnica wynosiła, co najmniej 1,5. W moście Takoma była bliska jedynki, czyli drgania się na siebie prawie nakładały [8]”.

Sprawdzanie obrotowej sztywności dynamicznej fundamentu nie jest powszechnie wykonywane, a w przypadku turbin wiatrowych ma kluczowe znaczenie.

Z rysunku 7 wynika, że w przypadku braku tłumienia amplitudy drgań mogą teoretycznie wzrastać do nieskończoności, co prowadzi do zniszczenia konstrukcji. W praktyce przyjmuje się, że strefa rezonansu obejmuje przedział wartości częstotliwości z zakresu $0,85 f_0$ do $1,15 f_0$, gdzie f_0 jest to częstotliwość idealnego rezonansu [15].

Dlatego tak ważne jest by sprawdzenie warunku sztywności obrotowej wykonywane było z należytą starannością, przy wykorzystaniu parametrów gruntów pomierzonych w warunkach in-situ.

Projekt geotechniczny zgodnie z [3, 5, 11] powinien zawierać:

- prognozę zmian właściwości podłoża gruntowego w czasie;
- określenie obliczeniowych parametrów geotechnicznych;
- określenie częściowych współczynników bezpieczeństwa do obliczeń geotechnicznych;
- określenie oddziaływań od gruntu;
- przyjęcie modelu obliczeniowego podłoża gruntowego, a w prostych przypadkach projektowego przekroju geotechnicznego;
- obliczenie nośności i osiadania podłoża gruntowego oraz ogólnej stateczności;
- ustalenie danych niezbędnych do zaprojektowania fundamentów;
- specyfikację badań niezbędnych do zapewnienia wymaganej jakości robót ziemnych i specjalistycznych robót geotechnicznych;
- określenie szkodliwości oddziaływań wód gruntowych na obiekt budowlany i sposobów przeciwdziałania tym zagrożeniom;
- określenie zakresu niezbędnego monitorowania wybudowanego obiektu budowlanego, obiektów sąsiadujących i otaczającego gruntu, niezbędnego do rozpoznania zagrożeń mogących wystąpić w trakcie robót budowlanych lub w ich wyniku oraz w czasie użytkowania obiektu budowlanego.

Naturalnie zrównoważony rozwój

Nowoczesne i innowacyjne rozwiązania
posadowienia elektrowni wiatrowych
na słabym podłożu.



Gwarantujemy efektywną technologię i materiały, których użycie w możliwie minimalny sposób wpływa na środowisko

Warunek granicznej nośności podłoża

Sprawdzenie nośności podłoża należy wykonać zgodnie z obowiązującymi normami lub własną metodyką, uwzględniając redukcję nośności ze względu na obciążenia cykliczne. Wartość współczynnika redukcyjnego można przyjąć na podstawie normy PN – 80/B-03040 [18] lub wg literatury fachowej.

Posiłkując się Eurokodem 7 [6], ze względu na zmienny charakter obciążeń dla gruntów spoiowych nośność graniczną oblicza się dla warunków bez odpływu z zależności:

$$\frac{R_k}{A'} = (\pi + 2) \cdot c_u \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q \quad (1)$$

gdzie:

A' – efektywne obliczeniowe pole powierzchni fundamentu,

c_u – wytrzymałość gruntu na ścinanie bez odpływu,

q – naprężenie od nadkładu lub obciążenia w poziomie podstawy fundamentu.

$$\begin{aligned} b_c &= 1 - \frac{2\alpha}{\pi + 2} \\ s_c &= 1 + 0,2 \frac{B'}{L'} \\ i_c &= 0,5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{A' - c_u}} \right) \\ H &\leq A' \cdot c_u \end{aligned} \quad (2)$$

Dla gruntów niespoistych przeprowadzamy analizę z rozproszeniem nadwyżki ciśnienia wody w porach (warunek z odpływem) [6]:

$$\frac{R_k}{A'} = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,5 \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma \quad (3)$$

gdzie:

A' – efektywne obliczeniowe pole powierzchni fundamentu,

c' – spójność efektywna gruntu,

q – naprężenie od nadkładu lub obciążenia w poziomie podstawy fundamentu,

γ' – obliczeniowy efektywny ciężar objętościowy gruntu (do głębokości B) [6].

Warunek dopuszczalnych osiadań różnicowych fundamentu

W większości przypadków kryteria przechyłki, jakie musi spełnić fundament, określane są przez producenta turbiny, natomiast zakres odrywania powinno się przyjmować wg obowiązujących wytycznych krajowych i praktyk inżynierskich.

Producenci turbin w większości przypadków podają dopuszczalne osiadania różnicowe równe $\Delta S < 3,0$ mm/m.

Ze względu na nierównomierny rozkład obciążeń wymiarowanie osiadań różnicowych metoda analityczną może być niedokładne. Do tego celu można się posłużyć poniższą zależnością [16]:

$$\text{tg } \theta = \omega_\lambda \cdot \frac{1 - \nu_0^2}{E_0} \cdot \frac{Q \cdot e_0}{r^3} \quad (4)$$

gdzie:

θ – kąt przechyłki fundamentu,

ω_λ – współczynnik zależny od zagłębienia stopy/fundamenty w podłożu,

e_0 – mimośród obciążeń,

Q – wypadkowa sił pionowych,

ν_0 – współczynnik Poissona gruntu,

r – promień fundamentu,

E – moduł odkształcenia gruntu rodzimego.

Analiza numeryczna umożliwiła szczegółowe modelowanie współpracy fundament – grunt. W tym celu wykorzystuje się oprogramowanie komercyjne zorientowane geotechnicznie, np. ABC Obiekt 3D lub Plaxis 3D. Wyniki uzyskane tą metodą bardzo dobrze odwzorowują zachowanie się konstrukcji w rzeczywistości.

Warunek osiadań maksymalnych

Krytycznym warunkiem przemieszczeń konstrukcji są różnice osiadania. Warunek osiadań maksymalnych jest elementem, który nie jest wymiarujący przy projektowaniu tego typu konstrukcji. Kryterium maksymalnych osiadań konstrukcji należy przyjmować z normy Eurokod 7 [6].

Sprawdzenie parametrów dynamicznych podłoża gruntowego ze względu na oddziaływania dynamiczne/cykliczne konstrukcji

Minimalna sztywność dynamiczna podawana jest przez producenta turbiny i można ją opisać równaniem:

$$C_{\phi, dyn} = \frac{M_{obl}}{\phi} \left[\frac{kNm}{rad} \right] \quad (5)$$

gdzie:

$C_{\phi, dyn}$ – wymagana sztywność dynamiczna fundamentu

ϕ – kąt obrotu fundamentu

M_{obl} – moment przekazywany na fundament z konstrukcji

Sztywność dynamiczną dla fundamentu okrągłego można wyznaczyć z poniższej zależności [18] dla podłoża jednorodnego:

$$k_{\phi, dyn} = \frac{8 \cdot G_o \cdot r^3}{3 \cdot (1 - \nu)} \quad (6)$$

gdzie:

r – promień fundamentu,

ν – pomierzony współczynnik Poissona gruntu,

G_o – minimalny dynamiczny moduł ścinania gruntu na podstawie badań.

Podsumowanie

W związku z nowym rozporządzeniem z dnia 27 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalenia geotechnicznych warunków posadowienia obiektów budowlanych, elektrownie wiatrowe należy zakwalifikować do III kategorii geotechnicznej jako „obiekty energetyki”. To powoduje, że projektując posadowienie tego typu obiektów budowlanych należy zwrócić uwagę na otrzymane dane, a w szczególności na jakość oraz rodzaj rozpoznania podłoża gruntowego. Ze względu na złożoność zagadnień statycznych i dynamicznych ww. konstrukcji rolę projektantów oraz środowiska geotechnicznego jest zwracanie uwagi inwestorów na problematykę związaną z badaniami podłoża gruntowego, które stanowią materiał wejściowy do wykonania projektu geotechnicznego posadowienia fundamentów turbiny wiatrowej. ■

Literatura

- [1] Prognoza bilansu energetycznego Polski do 2030 r. Dr inż. M. Duda. Mgr H Mikołajku, Mgr inż., S Okrasa
- [2] Flaga. A.: Inżynieria wiatrowa Podstawy i zastosowania. Warszawa 2008.
- [3] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25 kwietnia 2012 r. w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowiania obiektów budowlanych.
- [4] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko.
- [5] Working group on "Wind Turbine Foundations" Recommendations for the design, calculation, installation and inspection of wind-turbine foundations, July 5, 2011.
- [6] PN-EN 1997 – 1 EUROKOD 7 „Projektowanie geotechniczne. Część 1: zasady ogólne”
- [7] http://wyborcza.pl/1,76842,7594248,Slyne_katastrofy_mostow.html
- [8] <http://www.history.com/this-day-in-history/tacoma-bridge-collapses>
- [9] International Standard IEC 61400-1
- [10] A. Zaremba, „Modyfikacja podłoża gruntowego w świetle posadowienia turbin wiatrowych”
- [11] PN-EN 1997 2: Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- [12] A. Zaremba, „Modyfikacja podłoża gruntowego na potrzeby posadowienia turbin wiatrowych - projektowanie” Seminarium IBDiM i PZWFS - Warszawa, 6 marca 2014 – WZMACNIANIE PODŁOŻA I FUNDAMENTÓW 2014
- [13] Polską Normę PN – 83/B – 03020 „Posadowienie bezpośrednie budowli”
- [14] „Zarys geotechniki” Z. Wilun. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2005.
- [15] Cz. Kłós, J. Lipiński. „Fundamenty pod maszyny” Arkady 1959.
- [16] Guideline for the Certification of Wind Turbines. 2nd Edition. Det Norske Veritas, Copenhagen (Wind.Turbine.Certification@dnv.com) and Wind Energy Department, Risø National Laboratory (Certification@risoe.dk) 2002.
- [17] Materiały wewnętrzne firmy MENARD Polska.
- [18] PN-B-03040:1980 Fundamenty i konstrukcje wsporcze pod maszyny – Obliczenia i projektowanie.