

dr inż. Aleksy Łodo*
dr inż. Jarosław Michalek*

Wieże z betonu wirowanego pod małe turbozespoły wiatrowe

Spun concrete supporting towers for small wind turbines

Streszczenie. W pracy podano ogólne zasady obliczeń i doboru konstrukcji wsporczych małych turbin wiatrowych (SWT). Przedstawiono możliwości wykorzystania wirowanych żerdzi strunobetonowych jako konstrukcji wsporczych SWT.

Słowa kluczowe: małe turbiny wiatrowe, konstrukcje wsporcze, beton wirowany.

Abstract. In the paper the general rules of calculations and selection of supporting structures of small wind turbines were given. The possibilities of application of spun pre-tensioned prestressed concrete poles as supporting structures of small wind turbines were presented.

Keywords: small wind turbines, supporting structures, spun concrete.

Małe turbozespoły wiatrowe SWT (Small Wind Turbines) [1] wytwarzają energię elektryczną o mocy do kilkudziesięciu kilowatów. PN-EN 61400-2:2008 [1] podaje zasady projektowania SWT z poziomą osią obrotu turbiny o powierzchni omiatania wirnikiem do 200 m². SWT mogą wytwarzać napięcie do 1000 V prądu zmiennego lub do 1500 V prądu stałego. SWT nie wymagają wysokich wież i dlatego rodzą się pytania dotyczące możliwości wykorzystania wirowanych żerdzi elektroenergetycznych typu E z betonu wirowanego jako konstrukcji wsporczych [5, 6].

Projektowanie wież SWT

Konstrukcje wsporcze SWT (wieże i fundament) powinny być projektowane na trwałość 30- lub 50-letnią w naturalnych warunkach środowiskowych (klasa ekspozycji XC4 i XF1 [2]). W przypadku turbozespołów z powierzchnią omiataną wirnikiem od 2 do 200 m² do projektu budowlanego turbozespołu należy dołączyć projekt konstrukcji wsporczej. Z tego względu bardzo ważne jest właściwe określenie obciążeń wirnika parciem wiatru w czasie wytwarzania energii elektrycznej przez turbozespół i podczas zatrzymania go w warunkach zbyt dużej prędkości wiatru lub awarii.

W normie [1] wprowadzono cztery klasy standardowe SWT (tabela 1) zależne od średniej prędkości rocznej wiatru V_{ave} na wysokości piasty i jedną

Tabela 1. Projektowe prędkości wiatru [m/s] do obliczeń obciążeń SWT

Prędkość wiatru [m/s]	Klasy standardowe SWT			
	I	II	III	IV
V_{ave}	10,0	8,5	7,5	6,0
$V_{ref} = 5 \cdot V_{ave}$	50,0	42,5	37,5	30,0
$V_{design} = 1,4 \cdot V_{ave}$	14,0	11,9	10,5	8,4
$V_{out} = 2,5 \cdot V_{ave}$	25,0	21,3	18,8	15,0
$V_{e50} = 1,4 \cdot V_{ref}$	70,0	59,5	52,5	42,0
$V_{e1} = 0,75 \cdot V_{e50}$	52,5	44,6	39,4	31,5

specjalną, dla której warunki zewnętrzne definiowane są indywidualnie (np. na wodach przybrzeżnych). Klasy SWT wprowadzono w celu uwzględnienia w metodzie uproszczonej projektowych warunków wiatrowych charakterystycznych dla większości lokalizacji turbozespołów.

Do projektowania turbozespołu wiatrowego w warunkach wytwarzania energii elektrycznej niezbędna jest projektowa prędkość wiatru V_{design} i prędkość zatrzymania V_{out} (najwyższa średnia prędkość wiatru na wysokości piasty wirnika, przy której wytwarza się moc użyteczną prądnicy turbozespołu). Producent turbiny powinien określić prędkość uruchomienia turbozespołu V_{in} (najniższa średnia prędkość wiatru, przy której można wytwarzać moc użyteczną prądnicy). W warunkach przetrwania (parkowania) SWT wykorzystuje się maksymalne prędkości wiatru uśrednione w ciągu 3 s V_{e1} i V_{e50} z czasem nawrotu $N = 1$ r. i $N = 50$ lat lub prędkości referencyjną wiatru V_{ref} . Projektowe przypadki obciążeń SWT dla uproszczonej metody obliczania obciążeń podano w tabeli 2 normy [1].

Metodę uproszczoną wyznaczania obciążeń od parcia wiatru na elementy turbozespołu można stosować, jeśli wirnik śmigłowy o poziomej osi obrotu ma co najmniej dwie łopaty wolnonośne, jednostronnie utwierdzone w piastce, która z kolei jest sztywno połączona z wałem generatora [1]. Do wyznaczania wieży SWT z konkretnym generatorem o mocy P zainstalowanym na wysokości z_{hub} nad poziomem terenu niezbędne jest określenie maksymalnej siły $F_{x-shaft}$ od parcia wiatru na wirnik w trakcie wytwarzania energii elektrycznej i w trakcie postoju F_{k1} (przetwania) przy maksymalnym wietrze V_{e50} . Przykład takich obliczeń dla różnej prędkości wiatru V_{ave} przedstawiono w tabeli 2. Moc znamionową wirnika P_r określono ze wzoru: $P_r = (C_p \times \rho \times \pi \times R^2 \times V_{design}^3) / 2000 = 0,01026 \times V_{design}^3$, przyjmując współczynnik wykorzystania mocy energii wiatrowej $C_p = 2/3 \times C_T = 2/3 \times 0,5 = 1/3$ [1] i $\rho = 1,225$ kg/m³.

Z danych o prędkości wiatru w Polsce wynika [4], że na zdecydowanym obszarze kraju średnioroczna prędkość wiatru nie przekracza 4,5 m/s. Tabela 2 pokazuje, że do osiągnięcia przez turbinę mocy znamionowej $P = 10$ kW potrzebna jest prędkość wiatru $V_{ave} \approx 8,18$ m/s (prawie IV klasa SWT). Na terenie Polski warunek ten może być spełniony po wyniesieniu SWT na wysokość $z_{hub} \geq 13,5$ m n.p.t., na której można uwzględnić współczynnik ekspozycji $C_e(z) \geq 1,9$ w terenie kategorii III lub $C_e(z) \geq 2,5$ w terenie kategorii IV [3]. W tabeli 3 zestawiono obciążenie działające na wieżę z żerdzi wirowanej E15 i trzyłopatową

* Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

Tabela 2. Siły maksymalne od parcia wiatru na wirnik SWT o promieniu R = 4,0 m

Prędkość wiatru na poziomie piasty turbiny [m/s] $Z_{hub} = 13,5$ m n.p.t.					Siła od parcia wiatru na wirnik		Moc znamionowa wg [1] [kW]		Uwagi
V_{ave}	V_{ref}	V_{design}	V_{out}	V_{e50}	w ruchu $F_{x-shaft}$ [kN]	zatrzymany F_{k1} [kN]	wirnika P_r	prądnicy $P = \eta \cdot P_r$	
7,5	37,5	10,5	18,75	52,5	5,412	11,132	11,88	7,72	III klasa SWT [1]
8,0	40,0	11,2	20,0	56,0	6,158	12,666	14,41	9,37	V_{out} dla turbiny producenta
8,18	40,9	11,45	20,45	57,26	6,438	13,242	15,40	10,01	P dla turbiny producenta
$F_{x-shaft} = C_T \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_{out}^2 \cdot \pi \cdot R^2$ dla $C_T = 0,5$; $F_{k1} = C_T \cdot A_{proj} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot V_{e50}^2$ dla $C_T = 1,5$ i $A_{proj} = 4,396$ m ² $P_r = P_{r,design} = C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{design}^3$ dla $C_p = 1/3$; $P = P_{design} = \eta \cdot P_r$ dla $\eta = 0,65$									

Tabela 3. Obciążenia na wieżę SWT o mocy 10 kW wykonaną z żerdzi wirowanej E15

Rodzaj pracy turbozespołu na wieżę z = 13,0 m n.p.t. ($Z_{hub} = 13,5$ m n.p.t.)			Momenty [kNm] w podstawie wieży wg [3, 6]		Siła wierzchołkowa P_k [kN]	Uwagi (np. typ żerdzi)
			M_k	$M_{Ed} = 3,0 \cdot \Sigma M_k$		
Wytwarzanie energii elektrycznej	parcie wiatru na wirnik $V_{hub} = V_{out}$	$V_{out}^{in} = 18,75$ m/s $V_{out}^{out} = 20,0$ m/s $V_{out}^{max} = 20,45$ m/s	73,06 83,13 86,91	229,104 260,682 272,538	$P_k = 13,77$ kN $P_k^k = 15,67$ kN $P_k^k = 16,38$ kN	E15/17,5
	parcie wiatru na wieżę $V(z) = V_{hub} (z/z_{hub})^{0,2}$	$V_{out}^{in} = 18,75$ m/s $V_{out}^{out} = 20,0$ m/s $V_{out}^{max} = 20,45$ m/s	3,306 3,761 3,933			
Turbozespół nie wytwarza energii elektrycznej	parkowanie wg procedury normalnej $V_{e50} = 52,5$ m/s ($V_{e50} = 57,26$ m/s) $V_{b1} = V_{b3} = 31,24$ m/s ²	śmigła w bezruchu + obudowa generatora	150,28 (178,77) 159,64 ²	528,60 (628,80) (377,30) ¹ 187,17 ²	31,77 (37,79) (22,70) ¹ 11,25 ²	E15/32 (E15/38) (E15/25) ¹ E15/15 ²
		wieża	25,921 (30,83) 27,53			
	bieg jałowy wirnika $V_{e50} = 52,5$ m/s ($V_{e50} = 57,26$ m/s) $V_{b1} = V_{b3} = 31,24$ m/s ² $n_{max} = 200$ obr./min.	wirnik w ruchu	89,60 (90,83) 85,266 ²	346,56 (365,00) 283,33 ²	20,83 (21,94) 17,03 ²	E15/25 (E15/25) E15/17,5 ²
		wieża	25,921 (30,83) 9,178 ²			
	parkowanie w warunkach zakłócenia $V_{ref} = 37,5$ m/s $V_{b1} = V_{b3} = 31,24$ m/s ²	śmigła w bezruchu + obudowa generatora	76,68 53,22 ²	269,73 187,19 ²	16,21 12,25 ²	E15/17,5 E15/15 ²
		wieża	13,23 9,18 ²			

¹ parcie wiatru jako obciążenie wyjątkowe dla $\gamma_f = 1,0$ i $\beta = 1,8$, czyli: $M_{Ed} = 1,8 \cdot 209,6 = 377,3$ kNm < $M_{Rd} = 430,86$ kNm
² wyniki obliczeń dla $V_{b1} = V_{b3} = 31,24$ m/s jako maksymalnej prędkości wiatru w strefie 1 i 3 dla $A = 1000$ m n.p.m. [3]

turbinę wiatrową o mocy 10 kW, promieniu wirnika R = 4,0 m, prędkości rozruchowej wiatru $V_{in} = 2,2$ m/s, zatrzymania $V_{out} = 20$ m/s i projektowej $V_{design} = 10$ m/s. Turbinę można zakwalifikować do III klasy SWT [1] (tabela 1 ÷ 3). Z tabeli 3 wynika, że żerdź wirowana E15/17,5 spełnia warunek stanu granicznego nośności na zginanie ($M_{Ed} \leq M_{Rd}$ wg norm [1, 2]) z zastrzeżeniem, że prędkość wiatru przy parkowaniu zgodnie z procedurą normalną nie przekroczy $V_{e50} = 40$ m/s (144 km/h), co w 1 strefie wiatrowej Polski jest realne [3]. W przypadku prędkości wiatru $V_{e50} = 52,5$ m/s (189 km/h), jaką przewiduje norma [1]

dla III klasy SWT w warunkach przetrwania w ciągu 50 lat eksploatacji, żerdzie E15 mają za małą nośność na zginanie.

W przypadku wieży turbozespołu wiatrowego liczba cykli obciążeń zmęczeniowych podczas normalnej pracy (przypadek A wg [1]) znacznie przekroczy $n = 10^6$ uznana za graniczną [2]. Analiza wytrzymałości zmęczeniowej betonu i stali wykonana w opracowaniu [6] wykazała, że wieże z typowych żerdzi elektroenergetycznych E15/17,5 ÷ E15/25 nie spełniają warunku nośności na zmęczenie betonu w trakcie obciążeń zbliżonych do $V_{out} = 20$ m/s. Podczas wytwarzania

energii elektrycznej w zakresie prędkości wiatru $V_{hub} = V_{in} \div V_{out}$ w betonie wieży nie mogą wystąpić naprężenia rozciągające, czyli wieże powinny być w pełni sprężone, a nie częściowo jak żerdzie elektroenergetyczne typu E.

Podsumowanie

Wieże strunobetonowe z betonu wirowanego nie wymagają konserwacji podczas całego okresu eksploatacji i są stosunkowo tanie [5], a więc są konkurencyjne w stosunku do stalowych. Mankamentem ich jest natomiast stosunkowo duży ciężar. Brak charakterystyki aerodynamicznej turbiny, która powinna być podana przez jej producenta, powoduje konieczność korzystania w obliczeniach z uproszczonego modelu określania obciążeń. Prowadzi to do przewymiarowania konstrukcji wieży i fundamentu.

W normie [1] podano zbyt duże wartości prędkości wiatru $V_{e50} = 1,4 \times V_{ref}$ na poziomie piasty, w trakcie postoju turbozespołu w stosunku do możliwej w kraju, bazowej prędkości wiatru $V_{b,0}$ (tabela NA.1 [3]). Bezkrityczne stosowanie normy [1] do projektowania w Polsce wież pod turbozespoły wiatrowe SWT prowadzi do przewymiarowania konstrukcji wieży w warunkach parkowania (bieg jałowy lub zatrzymanie).

Wieże strunobetonowe dla SWT powinny być projektowane jako w pełni sprężone podczas obciążeń wiatrem w trakcie wytwarzania energii elektrycznej, co gwarantuje spełnienie warunku wytrzymałości zmęczeniowej dla betonu i stali wg [1, 2].

Literatura

[1] PN-EN 61400-2:2008 Turbozespoły wiatrowe. Część 2: Wymagania projektowe dotyczące małych turbozespołów wiatrowych.
 [2] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
 [3] PN-EN 1991-1-4:2008 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania wiatru.
 [4] Lorenc H.: Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 1996.
 [5] Michałek B., Michałek J.: Elekrownie wiatrowe w Polsce, Materiały Budowlane. 2005, nr 12, s. 59 – 60.
 [6] Kubiak J., Łodo A., Michałek J.: Wieża z betonu wirowanego pod turbinę wiatrową o poziomej lub pionowej osi obrotu zlokalizowana w I strefie wiatrowej. PDPEB Compendium, Wrocław 2010 r.