

# Analiza wytrzymałościowa quasi-autonomicznego słupa oświetleniowego z wykorzystaniem systemów CAD/CAE

Strength analysis of a quasi-autonomous lamp post with the use of CAD/CAE systems

WALDEMAR DUDDA  
JERZY DOMAŃSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.84>

Prezentowane wyniki analizy wytrzymałościowej stalowego słupa oświetleniowego, na którym zamontowano zestaw mikro-turbiny wiatrowej z generatorem oraz zestaw paneli fotowoltaicznych. Prace wykonano w ramach projektu „Modele funkcjonalne i badania konstrukcji quasi-autonomicznego punktu oświetleniowego lub sygnalizacyjnego”.

**SŁOWA KLUCZOWE:** turbina wiatrowa, panel fotowoltaiczny, słup oświetleniowy, naprężenia

*Presented is the stress analysis of the steel lighting column, that the set of wind microturbine with generator and the set of photovoltaic panels was installed on. Works were done within the project entitled „Functional models and investigations of the construction of a quasi-autonomous lighting or signaling point”.*

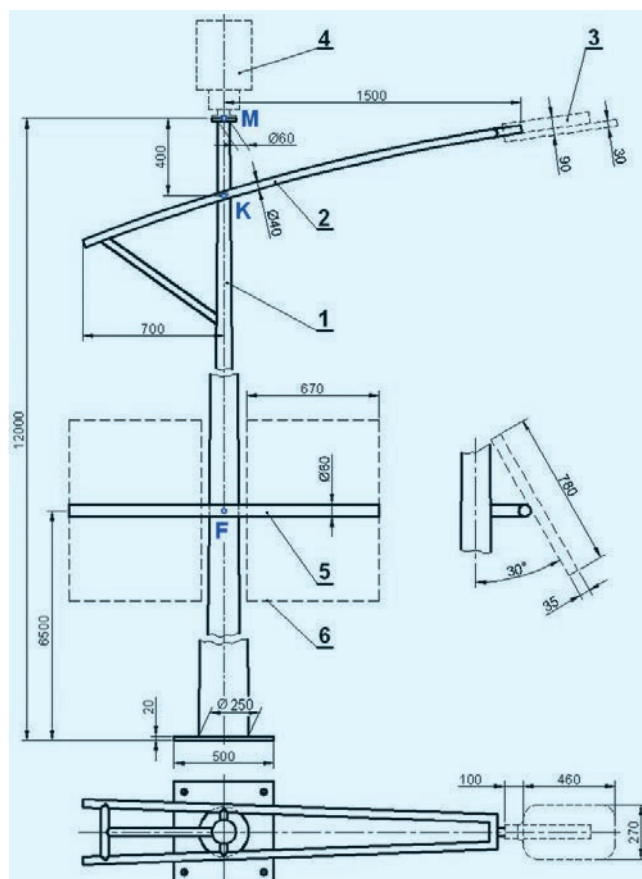
**KEYWORDS:** wind-turbine, photovoltaic panel, lamp-post, stress

Na typowych konstrukcjach słupów projektowanych pod lampy oświetleniowe rzadko kiedy można montować turbiny wiatrowe. Wzrost wartości naprężeń, zwłaszcza w podstawie słupa, zależy od konfiguracji oraz umiejscowienia turbiny i w niektórych przypadkach przekracza wartości dopuszczalne [1]. Zamontowanie dodatkowo paneli fotowoltaicznych spowoduje dalszy wzrost naprężeń ze względu na napór wiatru. Ponadto w lipcu 2009 r. wprowadzono zmianę Az1 do normy wiatrowej PN-77/B02011 (Obciążenia w obliczeniach statycznych. Obciążenia wiatrem). Obejmuje ona m.in.: nową mapę podziału Polski na strefy wiatrowe, nowe, większe wartości charakterystyczne prędkości wiatru, korektę współczynników ekspozycji i współczynnika obciążenia [2]. Zatem słupy sprzed lipca 2009 r. po zamontowaniu turbiny wiatrowej i/lub panelu fotowoltaicznego musiałyby spełniać jeszcze bardziej rygorystyczne wymagania.

Celem opisanych prac jest analiza wytrzymałościowa wybranej koncepcji stalowego słupa oświetleniowego przystosowanego do montażu zestawu paneli fotowoltaicznych oraz zestawu mikro-turbiny wiatrowej z generatorem. Analizę przeprowadzono z użyciem narzędzi CAD/CAE (SolidWorks Simulation) oraz według zaleceń normowych [3] dla najbardziej niekorzystnego przypadku oddziaływania obciążenia.

## Przedmiot badań

Wykorzystano koncepcję (rys. 1) słupa o przekroju okrągłym i wysokości 12 m, wykonanego z blachy stalowej w gatunku S275JR, o grubości ścianki 4 mm, o średnicach zewnętrznych podstaw: dolnej  $\varnothing 250$  mm i górnej  $\varnothing 60$  mm. Wysięgnik (2) sztywno związany ze słupem jest wykonany z rury o średnicy  $\varnothing 40$  mm i grubości ścianki 3 mm. Na końcu wysięgnika zamocowana jest latarnia LED (3). Do kołnierzego zakończenia słupa zamocowany jest zestaw turbiny wiatrowej i generatora (4). W środkowej części słupa znajduje się sztywno z nim związany wspornik (5) z panelami fotowoltaicznymi (6). Wspornik wykonany jest z rury o średnicy  $\varnothing 50$  mm i grubości ścianki 3 mm, z kątownika zimnogiętego  $20 \times 20 \times 2$  mm.



Rys. 1. Rysunek poglądowy słupa oświetleniowego (1) z wysięgnikiem (2), latarnią LED (3), turbiną (4) i wspornikiem (5) z panelami fotowoltaicznymi (6)

\* Dr inż. Waldemar Dudda (dudda@uwm.edu.pl), dr inż. Jerzy Domański (jdom@uwm.edu.pl) – Wydział Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego

## Obciążenie konstrukcji

Istotnym etapem analizy jest określenie wartości i miejsca przyłożenia wszystkich składników obciążenia oddziałującego na słup. Na obciążenie konstrukcji składają się ciężary własne wszystkich elementów konstrukcji słupa z zespołami turbiny i paneli fotowoltaicznych włącznie, jak również ciężar śniegu oraz napór wiatru na wymienione elementy.

Procedurę wyznaczania obciążenia wiatrem i ciężarem własnym przeprowadzono zgodnie z normą PN EN 40-3-1:2000. Zaleca ona przyjęcie, że słup jest sztywno zamocowany w podłożu, a wsporniki są sztywno połączone z trzonem słupa. W obliczeniach analitycznych momenty od ciśnienia wiatru i ciężarów własnych należy obliczać przez odpowiedni rozkład obciążeń działających na słup, wsporniki, latarnie itd. W tym celu dzieli się słup na odcinki wysokościowe, nie dłuższe niż 2 m. Następnie dla każdego  $i$ -tego odcinka oblicza się siłę ciężkości i siłę naporu wiatru indywidualnie, stosując właściwą objętość, pole, współczynniki kształtu, ciśnienie wiatru itd. Obciążenia wsporników i innych elementów redukuje się do środka przekroju poprzecznego słupa w miejscu ich mocowania.

## Charakterystyczne ciśnienie wiatru

Ciśnienie naporu wiatru zostało wyznaczone zgodnie z normą PN EN 40-3-1:2000 z zależności:

$$q(z) = \delta \cdot \beta \cdot f \cdot C_{e(z)} \cdot q_{(10)} \quad (1)$$

gdzie:  $\delta$  – współczynnik efektu skali (dla wysokości słupa  $H = 12$  m,  $\delta = 0,88$ ),  $\beta$  – współczynnik dynamiczny (z wykresu  $\beta = 1,5$ ),  $f$  – współczynnik topograficzny (dla spadku wysokości mniejszego niż 5 m  $f = 1$ ),  $C_{e(z)}$  – współczynnik ekspozycji (zależny od kategorii terenu i wysokości  $z_{si}$  środka  $i$ -tego odcinka nad poziomem gruntu – kat. II – tereny wiejskie z pojedynczymi zabudowaniami rolniczymi lub drzewami – tablica),  $q_{(10)}$  – referencyjne ciśnienie prędkości, którego wartości wyznaczono ze wzoru:

$$q_{(10)} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_s^2 \cdot V_{ref}^2 \quad [N/m^2] \quad (2)$$

gdzie:  $\rho$  – gęstość powietrza ( $\rho = 1,25$  kg/m<sup>3</sup>),  $C_s$  – współczynnik konwersji (dla słupów oświetleniowych  $C_s = 0,959$ ),  $V_{ref}$  – prędkość referencyjna (określana z map wiatrowych, według [3 – mapy wiatrowe PN] dla I strefy wiatrowej –  $V_{ref} = 22$  m/s). Do obliczeń analitycznych siły naporu wiatru na  $i$ -tym odcinku słupa/wspornika itd. wyznaczono z zależności:

$$P_i = A_i \cdot c_i \cdot q(z) \quad (3)$$

gdzie:  $A_i$  – pole rzutu odcinka trzonu słupa/wspornika itd. na płaszczyznę prostopadłą do kierunku wiatru,  $c_i$  – współczynnik kształtu dla rozważanego odcinka słupa/wspornika.

W analizie CAE obciążenie wiatrem realizowane jest poprzez obciążenie wystawionego na wiatr pola  $i$ -tego odcinka słupa/wspornika itd. wypadkowym ciśnieniem według wzoru:

$$q_w(z) = c_i \cdot q(z) \quad (4)$$

TABLICA. Charakterystyczne  $q(z)$  i wypadkowe  $q_w(z)$  ciśnienia prędkości

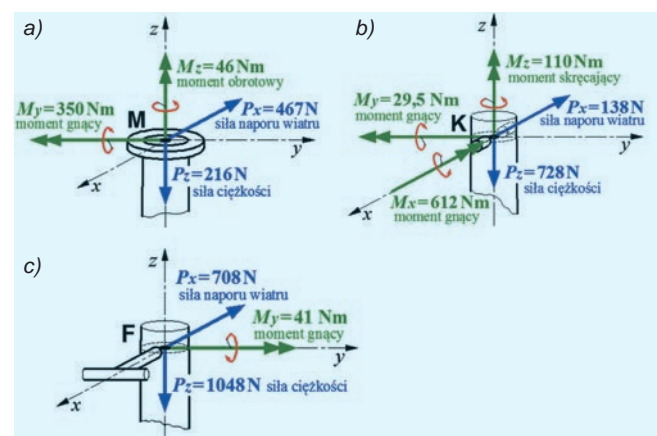
$z$ , m	$z_{si}$ , m	$C_{e(z)}$	$q(z)$ , N/m <sup>2</sup>	$c_i$	$A_i$	$P_i$ , N	$q_w(z)$ , N/m <sup>2</sup>
12,0	12,000	2,47	907,4	1,2	0,000	0,0	1088,8
11,6	11,796	2,458	903,0	1,2	0,0253	27,4	1083,6
10,5	11,028	2,41	885,3	1,2	0,082	87,6	1062,4
9,5	9,986	2,35	863,3	1,13	0,092	89,4	975,5
8,5	8,988	2,29	841,2	1,02	0,108	92,2	858,1
7,5	7,989	2,21	811,9	0,92	0,123	92,1	746,9
6,5	6,500	2,13	782,5	0,81	0,000	0,1	633,8
5,5	5,991	2,04	749,4	0,7	0,155	81,3	524,6
4,5	4,992	1,93	709,0	0,67	0,171	81,2	475,0
3,5	3,993	1,80	661,2	0,57	0,187	70,4	376,9
2,5	2,993	1,80	661,2	0,503	0,203	67,4	332,6
1,5	1,994	1,80	661,2	0,505	0,218	72,9	333,9
0,5	0,994	1,80	661,2	0,51	0,234	79,0	337,2
0,0	0,249	1,80	661,2	0,52	0,123	42,3	343,8

Słup podzielono na odcinki wysokościowe; obliczono współrzędne środków  $z_{si}$  rzutów powierzchni  $A_i$  odcinków słupa na płaszczyznę prostopadłą do kierunku wiatru. Następnie wyznaczono przypadające na te pola ciśnienia charakterystyczne i wypadkowe, współczynniki kształtu oraz siły naporu, których wartości zamieszczono w tablicy.

## Obciążenie słupa turbiną z generatorem

Obciążenie pochodzące od ciężaru własnego i naporu wiatru na zespół generator–turbina (wyznaczone przez zespół projektujący turbinę w ramach wspomnianego projektu) zostało zredukowane do punktu  $M$  górnego końca słupa (rys. 1) i przedstawione na rys. 2a.

Tak zdefiniowane obciążenie użyto zarówno w obliczeniach analitycznych, jak i numerycznych. Obciążenie pochodzące od ciężaru własnego, śniegu i naporu wiatru na wysięgnik i latarnię zostało zredukowane do punktu  $K$  środka przekroju słupa (rys. 1) i przedstawione na rys. 2b. Analogicznie obciążenie pochodzące od ciężaru własnego, śniegu i naporu wiatru na wspornik i panele fotowoltaiczne zostało zredukowane do punktu  $F$  środka przekroju słupa (rys. 1) i przedstawione na rys. 2c.



Rys. 2. Redukcja obciążenia do punktów: a) M, b) K, c) F kolumny słupa

Przy czym przyjęto obciążenie jednostkowe śniegiem  $q_s = 1,6 \text{ KN/m}^2$  zgodnie z normą PN-80/B-02010/ /Az1:2006 dla IV strefy według mapy śniegowej (obszar Warmii i Mazur). Ciężary śniegu na wysięgniku i latarni zostały obliczone z zależności:

$$P_s = A_s \cdot q_s \quad (5)$$

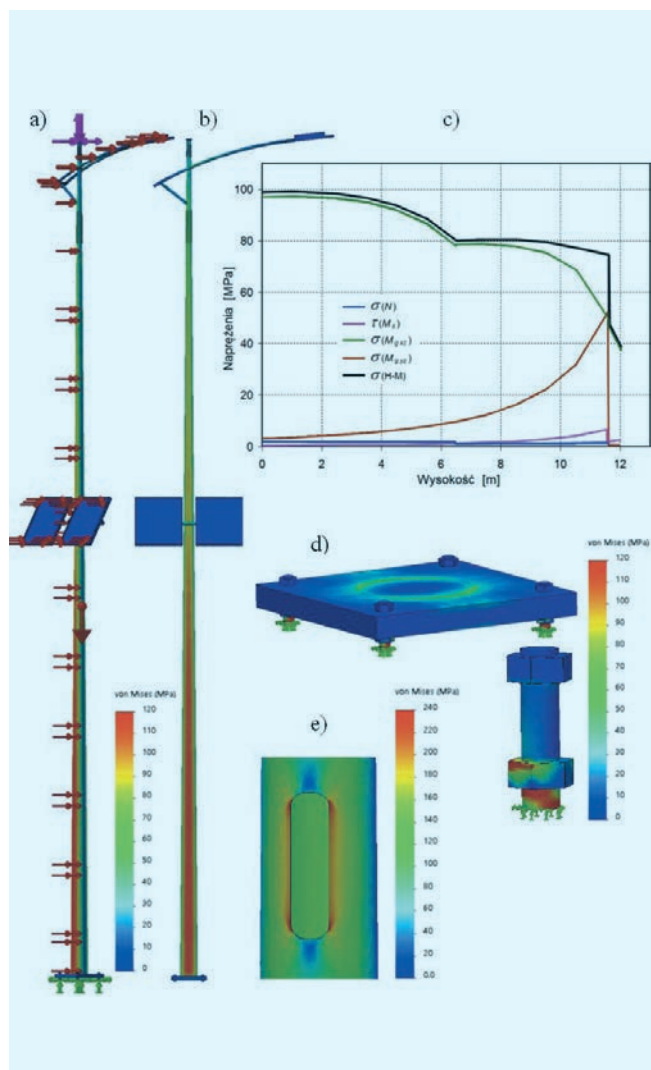
gdzie:  $A_s$  – pole powierzchni przekroju wzdłużnego wysięgnika i latarni.

Natomiast dla paneli fotowoltaicznych ciężary śniegu wyznaczono z zależności:

$$P_{spf} = A_{pf} \cdot q_s \cdot \cos \alpha_{pf} \quad (6)$$

gdzie:  $A_{pf}$  – pole powierzchni paneli,  $\alpha_{pf}$  – kąt nachylenia paneli do poziomu.

Obciążenie zdefiniowane na rys. 2 b, c zostało użyte jedynie w obliczeniach analitycznych. Natomiast w obliczeniach numerycznych uaktywniono opcję automatycznego uwzględniania grawitacji (dla elementów obciążonych śniegiem uwzględniono jego ciężar jednostkowy), a oddziaływanie wiatru zrealizowano poprzez ciśnienie wypadkowe prędkości wiatru określone dla współrzędnej środka rzutu powierzchni rozpatrywanego elementu na płaszczyznę prostopadłą do kierunku wiatru.



Rys. 3. Rozkład naprężeń w trzonie i podstawie słupa

## Wyniki analizy wytrzymałościowej

Analizę wytrzymałościową wykonano dwutorowo. W pierwszej kolejności wyznaczono naprężenia metodą analityczną, wyliczając siły wewnętrzne w przekrojach poprzecznych na początku i końcu każdego odcinka wysokościowego, na które podzielono kolumnę słupa (tablica). Na podstawie sił normalnych (wzdłuż osi z), momentów gnących (w płaszczyznach xz i yz) i skręcających (wokół osi z) wyznaczono odpowiadające im naprężenia:  $\sigma(N)$ ,  $\sigma(M_{g_{xz}})$ ,  $\sigma(M_{g_{yz}})$ ,  $\tau(M_s)$  oraz naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera–Misesa–Hencky’ego  $\sigma(H-M-H)$ , których wartości wzdłuż wysokości słupa przedstawiono na rys. 3c.

W drugiej kolejności wykonano analizę statyczną (MES) opracowanego modelu numerycznego konstrukcji słupa. Poszczególne odcinki wysokościowe słupa, wysięgnik z latarnią LED oraz wspornik z panelami fotowoltaicznymi obciążono ciężarem własnym oraz wypadkowym ciśnieniem prędkości wiatru, a do punktu M słupa przyłożono obciążenie zredukowane od oddziaływania wiatru i ciężaru zestawu generatora i turbiny. Kierunki przyłożonego obciążenia i mocowania słupa przedstawiono na rys. 3a.

Na rys. 3d przedstawiono rozkład naprężeń w płycie podstawy słupa i śrubach mocujących. Wykonano drugą symulację numeryczną dla słupa z otworem rewizyjnym na wysokości 600 mm w kształcie prostokąta o wysokości 300 mm i szerokości 80 mm, z zaokrąglonymi narożami o promieniu 30 mm, dla którego rozkład naprężeń przedstawiono na rys. 3e.

## Podsumowanie

Analiza wyników wskazuje, że największe naprężenia zredukowane (Hubera–Misesa–Hencky’ego) występują w podstawie słupa i według obliczeń analitycznych osiągają wartość 99 MPa (rys. 3c). Ta sama lokalizacja maksymalnych naprężeń wynikała z analizy numerycznej, według której wartość tych naprężeń wynosi 118 MPa (rys. 3 a, b). Poziom naprężeń jest już bardzo zbliżony do naprężeń dopuszczalnych na rozciąganie, które dla stali S275JR wynoszą 130 MPa, natomiast współczynnik bezpieczeństwa względem granicy plastyczności (275 MPa) osiąga najmniejszą wartość  $n_b = 2,33$ . Przy podanych wymiarach słupa niemożliwe jest wykonanie otworu rewizyjnego na umieszczenie akumulatorów i układu sterującego, gdyż naprężenia wzdłuż krawędzi otworu osiągają wartość rzędu 240 MPa (rys. 3e). W śrubach mocujących płytę podstawy słupa sięgają 90 MPa (rys. 3d); wyłączenie śrub można zmniejszyć, gdyż wytyczne normowe dopuszczają zastosowanie po trzy śruby wzdłuż każdej z krawędzi podstawy.

**Prace zostały wykonane w ramach projektu nr N N502 511940 pt. Modele funkcjonalne i badania konstrukcji quasi-autonomicznego punktu oświetleniowego lub sygnalizacyjnego.**

## LITERATURA

- Omilianowicz P., Miąskowski W., Nalepa K., Pietkiewicz P. „Analiza koncepcyjna umiejscowienia siłowni wiatrowej na istniejących słupach oświetleniowych”. *Mechanik*. 7 (2015): s. 613–620.
- Biuro Inżynierskie SPECBUD. „Porównanie obciążenia wiatrem według Pn-77/B-01011 i według jej zmiany Az1:lipiec2009”, <http://www.specbud.pl>. (2017).
- EN 40-3-1:2000. Słupy oświetleniowe – Część 1–3: Projektowanie i weryfikacja – Obciążenia charakterystyczne. ■