

Damian GŁUCHY\*  
Dariusz KURZ\*  
Grzegorz TRZMIEL\*

## WPLYW WIATRU I ŚNIEGU NA INSTALACJE FOTOWOLTAICZNE W POLSCE

W pracy przedstawiono sposób i zasady wyznaczania obciążenia wiatrem i śniegiem instalacji fotowoltaicznych tradycyjnych (naziemnych i nadachowych) oraz zintegrowanych z budynkiem. Zwrócono również uwagę na problem zalegającego śniegu i jego usuwania. Przytoczono odpowiednie normy, zgodnie z którymi Polska została podzielona na kilka stref w zależności od dopuszczalnego obciążenia wiatrem i śniegiem.

### 1. WPROWADZENIE

Produkcja energii elektrycznej z energii słonecznej zmienia się okresowo, w zależności od pory roku czy pory dnia, pogody i wielu innych czynników. W Polsce roczna suma energii słonecznej wynosi 950 – 1250 kWh/m<sup>2</sup> powierzchni poziomej. Na wartość promieniowania ma wpływ głównie położenie geograficzne, gdyż zmniejsza się ono wraz z oddalaniem się od równika, gdzie wynosi ok. 4000 kWh/m<sup>2</sup>. Zainstalowanie ogniw fotowoltaicznych na wyższej wysokości nad poziomem morza pozwala na zwiększenie żywotności urządzeń oraz obniżenie kosztów ich zakupu, ponieważ na niższych wysokościach ogniwa nie wykorzystują optymalnie promieni słonecznych z uwagi na mniejsze nasłonecznienie, częstsze występowanie mgieł oraz mniejszą siłę promieni słonecznych w różnych porach roku. W miesiącach letnich wysoki jest poziom promieniowania oraz czas nasłonecznienia, które mają bezpośrednie przełożenie na ilość generowanej energii. Aż 75 % użytecznego promieniowania ze Słońca przypada na miesiące od kwietnia do września, natomiast w miesiącach zimowych, od listopada do lutego, już tylko 25 %. Nie oznacza to jednak, że czas zimowy jest mało istotny podczas projektowania instalacji fotowoltaicznych [5].

### 2. OBCIĄŻENIE WIATREM

Obciążenie wiatrem jest istotnym problemem i należy je wziąć pod uwagę podczas projektowania instalacji solarnych wolnostojących lub na dachach

---

\* Politechnika Poznańska.

budynków. Siła wiatru, która wzrasta wraz z kwadratem jego prędkości, jest zależna od rodzaju, wielkości i układu pobliskich obiektów oraz od kierunku jego przepływu. W zależności od formy i kąta nachylenia instalacji, a tym samym i dachu, nawietrzna strona instalacji narażona jest na parcie wiatru, podczas gdy zawietrzna strona jest narażona w równym stopniu na ssanie wiatru [1].

Korzystając z prawa Bernoulliego, można określić ciśnienie dynamiczne  $q_c$  (ciśnienie prędkości wiatru) dla określonej prędkości wiatru według wzoru [1]:

$$q_c = \frac{1}{2} \cdot d_L \cdot v^2 \quad (1)$$

gdzie:  $q_c$  – ciśnienie dynamiczne [ $N/m^2$ ],  $d_L$  – gęstość powietrza [ $kg/m^3$ ] (w warunkach normalnych, czyli w temperaturze  $0\text{ }^\circ\text{C}$  i ciśnieniu  $1013,25\text{ hPa}$ , suche powietrze ma gęstość  $d_L = 1,293\text{ kg/m}^3$ ),  $v$  – prędkość wiatru [ $m/s$ ].

W Polsce średnia roczna prędkość wiatrów waha się w przedziale  $2,8 \div 3,5\text{ m/s}$  [4]. Niższe wartości występują w porze letniej, natomiast wyższe w porze zimowej. Według normy PN-77/B-02011, w zależności od prędkości wiatru, obszar Polski został podzielony na 5 stref obciążenia wiatrem, które przedstawiono na rysunku 1 [2, 5].



Rys. 1. Podział Polski na strefy obciążenia wiatrem [5]

Strefa 1 obejmuje przeważającą część kraju. Do strefy 2 należy pas lądu od wzniesień Pojezierza Pomorskiego do brzegu morza oraz wąski pas lądu wokół Zatoki Gdańskiej. Zalicza się do niej także pasmo Łysogór, leżące w obszarze strefy 1. W strefie tej wydzielono także dwie podstrefy na zachód od Władysławowa. Przybrzeżny pas lądu o szerokości około 2 km to strefa 2a,

natomiast przybrzeżny pas morza i pasmo wydm o szerokości 200 m to strefa 2b. Do strefy 3 przydzielony został obszar od Podgórze Sudeckiego i Podgórze Karpackiego do szczytów włącznie. Na granicach dwóch stref, czyli w pasie o szerokości 5 km, należy przyjmować wartości z jednej bądź drugiej strefy, w zależności od konfiguracji terenu i ekspozycji budowli. W tabeli 1 zostały przedstawione wartości charakterystyczne ciśnienia dla poszczególnych stref w Polsce według normy PN-77/B-02011, w zależności od prędkości wiatru [2, 5].

Tabela 1. Wartości charakterystycznych prędkości  $v$  oraz ciśnienia wiatru  $q_c$  dla poszczególnych stref obciążenia wiatrem [2, 5]

Strefa	1	2	2 a	2 b	3
$v$ [m/s] ( $v$ [km/h])	20 (72)	24 (86,4)	27 (97,2)	30 (108)	24 – 47 (86,4 – 169,2)
$q_c$ [N/m <sup>2</sup> ]	250	350	450	550	$250 + 0,5 H$ $\geq 350$

Prędkość wiatru w strefie 3 zawiera się w zakresie od 24 m/s na granicy strefy pierwszej i trzeciej do 47 m/s w szczytowych partiach gór. Współczynnik  $H$  dla strefy 3 oznacza wysokość n.p.m. wyrażoną w metrach.

Dla określonego ciśnienia dynamicznego  $q_c$ , powierzchni instalacji fotowoltaicznej  $A_G$  i kierunku współczynnika przepływu  $c_w$  można określić siłę wiatru  $F_w$  zgodnie ze wzorem [1]:

$$F_w = q_c \cdot c_w \cdot A_G \quad (2)$$

gdzie:  $F_w$  – siła wiatru [N],  $q_c$  – ciśnienie dynamiczne [N/m<sup>2</sup>],  $A_G$  – powierzchnia instalacji fotowoltaicznej [m<sup>2</sup>],  $c_w$  – kierunek współczynnika przepływu [-].

W zależności od kierunku przepływu i formy okolicznych struktur, współczynnik  $c_w$  przyjmuje wartości w zakresie od 0,4 do 1,6. Najniższe wartości stosuje się w przypadku ssania wiatru przy instalacji słonecznej zintegrowanej z dachem lub dla strony zawietrznej w części środkowej dachu dwuspadowego albo całkowicie w cieniu aerodynamicznym innych budynków lub elementów instalacji. Natomiast najwyższe wartości przyjmuje się dla systemów naziemnych oraz w przypadku sił wiatru działających prostopadle do powierzchni ogniw fotowoltaicznych. Szczególnie niebezpieczne są siły wiatru podnoszące panele (działające od spodu instalacji) a przeciwdziałanie im zwykle pociąga wyższe wydatki niż w przypadku sił nacisku.

Przedstawione równania umożliwiają oszacowanie przybliżonych wartości sił wiatru, na które będzie narażona pracująca instalacja fotowoltaiczna. Stąd też dobór umiejscowienia i sposób mocowania generatora słonecznego jest szczególnie istotny z punktu widzenia jego prawidłowej i bezpiecznej pracy.

### 3. OBCIĄŻENIE ŚNIEGIEM

Drugim istotnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę podczas projektowania instalacji fotowoltaicznej, jest ciężar nie tylko samych ogniw PV (mających masę ok.  $10 \div 20 \text{ kg/m}^2$  a tym samym siłę nacisku rzędu  $100 \div 200 \text{ N/m}^2$ ) i elementów konstrukcyjnych, ale również występujące okresowo opady śniegu, na które będzie narażona instalacja [1]. Dla systemów wolnostojących system wsporczy będzie musiał wytrzymać mechanicznie nacisk całego ciężaru jego elementów składowych i śniegu. Dla instalacji zintegrowanych z budynkiem ciężar ten przejmuje konstrukcja dachowa, która musi być odpowiednio dobrana już na etapie projektowania samej budowli. Ponieważ wielkość opadów śniegu jest różna dla różnych obszarów świata (w niektórych nie występuje nigdy, w innych jest możliwy przez cały rok), poszczególne kraje opracowują normy, określające dopuszczalne wartości obciążenia śniegiem dla budowli.

Podstawową wielkością odniesienia, stosowaną do wyznaczenia obciążenia śniegiem dachów, był rozwój pomiarów i obserwacji meteorologicznych dotyczących obciążenia śniegiem gruntów. Na podstawie wieloletnich pomiarów, prowadzonych według jednakowych metod i technik pomiarowych, obszar Polski został podzielony na 5 stref obciążenia śniegiem, które zostały przedstawione na rysunku 2, zgodnie z normą PN-EN 1991-1-3:2005. Każda strefa charakteryzuje się innym obciążeniem śniegu, co zależy od ilości i częstotliwości występowania tam opadów śniegowych. Liczba dni śnieżnych w Polsce waha się pomiędzy 20 a 80, w zależności od strefy. Wartości charakterystycznego obciążenia śniegiem gruntu w Polsce zostały zestawione w tabeli 2 [3, 5].

Na pograniczu dwóch stref, około 5 km, można przyjmować wartości z jednej lub drugiej strefy. Wartość  $H$  to wysokość nad poziomem morza wyrażona w metrach. Przedstawione wzory mają zastosowanie dla budowli znajdujących się na wysokości do 1000 m n.p.m. (gdzie  $q_s$  przyjmuje wartość  $3,552 \text{ kN/m}^2$ ), natomiast dla terenów położonych wyżej obciążenia  $q_s$  ustalane są indywidualnie, gdyż wartość obciążenia śniegiem wzrasta drastycznie wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza.

Przykładowo teren Polski rozciąga się od bardzo małych wysokości nad morzem do prawie 1000 m n.p.m. pod pasmem górskim, aż do 2499 m, jakim jest najwyższy szczyt Polski – Rysy.



Rys. 2. Podział Polski na strefy obciążenia śniegiem gruntu [5]

Tabela 2. Wartości charakterystycznych obciążenia śniegiem gruntu  $q_s$  w Polsce dla poszczególnych stref [3, 5]

Strefa	1	2	3	4	5
$q_s$ [ $N/m^2$ ]	$7H - 1,4$ $q_s \geq 700$	900	$6H - 0,6$ $q_s \geq 1200$	1,6	$930 \exp(0,00134H)$ $q_s \geq 2000$

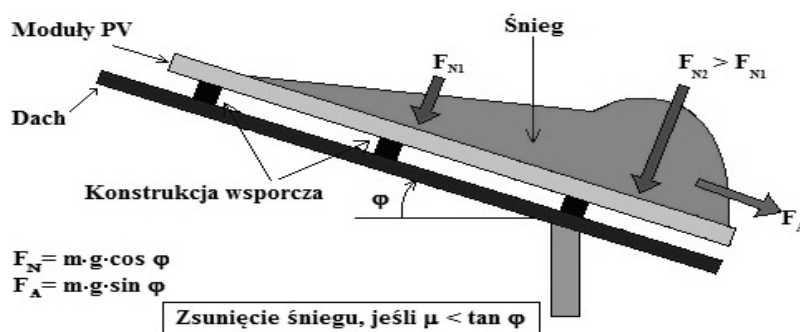
Przedstawione obciążenia dotyczyły pionowego nacisku na powierzchnię poziomą, czyli siła nacisku była skierowana prostopadle do powierzchni. Panele fotowoltaiczne zazwyczaj jednak są montowane pod pewnym kątem  $\varphi$  do powierzchni ziemi. W takim przypadku ciśnienie obciążeniem śniegu ma niższą wartość w stosunku do działającego na powierzchnię poziomą. Stąd też wartość ciśnienia obciążenia śniegu, działającego na pochyłą powierzchnię generatora PV, można obliczyć z zależności [1]:

$$q_{sk} = q_s \cdot \cos \varphi \quad (3)$$

gdzie:  $q_{sk}$  – ciśnienie obciążenia śniegiem działające na powierzchnię pochyłą [ $N/m^2$ ],  $q_s$  – ciśnienie obciążenia śniegiem działające na powierzchnię poziomą [ $N/m^2$ ],  $\varphi$  – kąt nachylenia powierzchni do poziomu [ $^\circ$ ].

W przypadku instalacji solarnej o kącie nachylenia  $\varphi$  do płaszczyzny poziomej śnieg szybko topnieje i ześlizguje się z niej. Przy dużych opadach śniegu, dla instalacji naziemnych zainstalowanych na stosunkowo niskich konstrukcjach wsporczych, może zdarzyć się sytuacja, że śnieg nie będzie miał

już miejsca, gdzie może się zsunąć, wypełni całą wolną przestrzeń pomiędzy ziemią a stelażem. Zsuwający się śnieg i zalegający na dolnych częściach paneli powoduje nierównomierne naciski na powierzchnię ogniów i konstrukcję wsporczą, jak to zostało przedstawione na rysunku 3.



Rys. 3. Obciążenie śniegiem panelu fotowoltaicznego nachylonego pod kątem  $\varphi$  do płaszczyzny poziomej [1]

Masa śniegu reprezentowana przez siłę  $F = mg$  [N] wywierana na moduł składa się z dwóch sił: siły normalnej  $F_N$  skierowanej pod kątem prostym do powierzchni modułu oraz siły zstępującej  $F_A$  równoległej do jego powierzchni. Na rysunku 3 można zaobserwować różnice sił normalnych w zależności od ilości zalegającego na panelu śniegu. Siłą przeciwstawną do wymienionych sił jest siła tarcia ślizgowego  $T \leq \mu F_N$  [N]. Różnica wartości współczynnika tarcia  $\mu$  [-] dla śniegu i szkła (zwłaszcza mokrego) jest stosunkowo tak mała, że śnieg może zsunąć się z panelu podczas odwilży, jeśli kąt nachylenia panelu nie jest zbyt ostry. Dla tarcia ślizgowego, z którym mamy tutaj do czynienia, często zastępuje się współczynnik tarcia kątem tarcia ślizgowego, równym tangensowi kąta nachylenia panelu, z którego zsuwa się śnieg, zgodnie ze wzorem [1]:

$$\mu = \operatorname{tg} \varphi \quad (4)$$

gdzie:  $\mu$  – współczynnik tarcia ślizgowego [-],  $\varphi$  – kąt nachylenia powierzchni do poziomu [°].

Jeśli wartość współczynnika tarcia  $\mu$  jest mniejsza od tangensa kąta nachylenia instalacji, może zachodzić samoistne zsuniecie się z niej śniegu. Dla paneli zainstalowanych na dachach budynków, zwłaszcza dla laminatów, współczynnik tarcia powinien być niższy (dla śniegu na dachach o tych samych kątach nachylenia) niż dla dachów spadzistych pokrytych dachówką. Zsuwający się śnieg z dużych wysokości może być zagrożeniem dla życia lub zdrowia ludzi albo spowodować uszkodzenie mienia. Optymalne nachylenie paneli, ze względu na uzysk energii, wynoszące w Polsce około  $40^\circ$ , obniży o kilka procent wartość siły nacisku śniegu na powierzchnię panelu. Dla kątów ponad  $60^\circ$  można

bezpiecznie założyć, że śnieg zsunie się samoistnie, a obciążenie śniegiem może zostać pominięte podczas doboru elementów składowych instalacji solarnych. Jednak przy instalacjach naziemnych należy zapewnić odpowiednią ilość miejsca pod konstrukcją dla zsuwającego się śniegu [1].

## 5. WNIOSKI

Działanie wiatru w przypadku instalacji wolnostojących lub montowanych na dachach budynków ma istotne znaczenie na odpowiedni dobór stelaży pod kątem ich wytrzymałości mechanicznej. Dla instalacji zintegrowanych z budynkiem problem ten staje się mniej istotny, jednak nie należy go zupełnie pomijać w fazie projektowej. Dla większości obszarów Polski obciążenie wiatrem wynosi  $q_c = 250 \text{ N/m}^2$ , czyli na każdy metr kwadratowy powierzchni instalacji działa siła  $F_w = 250 \text{ N}$ , a tym samym ciężar o masie równej 25,5 kg. Jednak dla rejonów górskich, znajdujących się w trzeciej strefie obciążenia wiatrem, dla wysokości  $H = 2000 \text{ m n.p.m.}$  ciśnienie dynamiczne, wyznaczone za pomocą równania (1), wynosi już  $1250 \text{ N/m}^2$ , co oznacza nacisk na powierzchnię metra kwadratowego instalacji ciężaru o masie równej 127,6 kg.

Pokrywający panele śnieg może także posiadać bardzo dużą masę. I tak 1 metr sześcienny puchu śniegowego waży niecałe 200 kg, mokrego śniegu już ok. 800 kg, natomiast topniejący śnieg może ważyć nawet 900 kg. Łatwo więc policzyć, że na 1 metrze kwadratowym powierzchni nawet cienka 10-cio centymetrowa warstwa śniegu może ważyć aż 100 kilogramów [6]. Tradycyjne panele fotowoltaiczne posiadają metalowe ramki, które mogą stanowić pewnego rodzaju mały próg dla zsuwającego się śniegu. W przypadku dachówek solarnych, pokrywających całą powierzchnię dachu to zagrożenie jest większe, gdyż nie posiadają zewnętrznych ramek. Należy więc odpowiednio zabezpieczyć dolny brzeg instalacji bądź dachu przed schodzącymi lawinami śnieżnymi poprzez montaż odpowiednich barier. Moduły fotowoltaiczne przeznaczone do krajów, w których występują opady śniegu powinny być właściwie zaprojektowane i dostosowane do występujących obciążeń śnieżnych poprzez odpowiednio dobraną szybę oraz ramkę, które mogłyby ulec uszkodzeniu.

Zaśnieżenie instalacji wpływa również na zmniejszenie uzysku energii elektrycznej ze względu na ograniczone przenikanie promieni słonecznych do ogniw PV. Jednak gdy część panelu jest nieośnieżona i pracuje, a część jest zasłonięta, to powoduje to wzrost temperatury ogniwa, co przyspiesza proces topnienia i zsuwania się śniegu.

Odpowiednio zaprojektowana instalacja fotowoltaiczna powinna więc uwzględniać możliwe dopuszczalne wartości obciążenia wiatrem i śniegiem, uzależnione od jej lokalizacji geograficznej, aby mogła bezpiecznie i nieprzerwanie pracować przez cały jej czas eksploatacji.



## LITERATURA

- [1] Haberlin H., Photovoltaics. System Designed and Practice, John Wiley & Sons Ltd., 2012.
- [2] Norma PN-77/B-02011 pt. "Obciążenia w obliczeniach statycznych – obciążenia wiatrem".
- [3] Norma PN-EN 1991-1-3:2005 pt. "Oddziaływanie na konstrukcje. Oddziaływanie ogólne – obciążenie śniegiem".
- [4] Sadło R., Elektrownie wiatrowe w Polsce, 2010.
- [5] [http://image.schrack.com/produktkataloge/w\\_p-phovol10\\_pl.pdf](http://image.schrack.com/produktkataloge/w_p-phovol10_pl.pdf), dn. 25.01.13 r.
- [6] <http://iletowazy.pl/meteorologia/ile-wazy-snieg/>, 30.01.13 r.

### **THE IMPACT OF WIND AND SNOW ON PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS IN POLAND**

The paper presents a method and rules for determining wind and loads of traditional photovoltaic installations (ground and above roofing) and integrated with the building. It also drew attention to the problem of lying snow and its removal. Quoted the relevant standards, according to which Poland was divided into several zones, depending on the allowable wind loads and snow.