

## Ryszard INGIELEWICZ, Adam ZAGUBIEŃ

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII ŁĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I GEODEZJI,  
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin

# Tłumienie gruntu w analizach akustycznych farm wiatrowych

Dr inż. Ryszard INGIELEWICZ

Wykładowca na Wydziale Inżynierii Łądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej. Biegły Wojewody Zachodniopomorskiego w zakresie sporządzania ocen oddziaływania na środowisko: hałas, wibracje. Autor lub współautor wielu publikacji i opracowań technicznych z dziedziny wibroakustyki, w tym ponad 50 ocen i raportów oddziaływania na środowisko farm wiatrowych. Wykonawca kilkunastu porealizacyjnych pomiarów hałasu wokół farm wiatrowych.



e-mail: wibrotest@wp.pl

Dr inż. Adam ZAGUBIEŃ

Wykładowca na Wydziale Inżynierii Łądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej. Biegły Wojewody Zachodniopomorskiego w zakresie sporządzania ocen oddziaływania na środowisko: hałas, wibracje. Konsultant akredytowanych laboratoriów pomiarowych. Wykonawca kilkunastu porealizacyjnych pomiarów hałasu wokół farm wiatrowych. Autor lub współautor ponad 50 ocen i raportów oddziaływania na środowisko farm wiatrowych.



e-mail: adam.zagubien@tu.koszalin.pl

### Streszczenie

W artykule omówiono problemy określania poziomów emisji i zasięgu hałasu na etapie projektowania lokalizacji farm wiatrowych. Szczególną uwagę poświęcono współczynnikowi tłumienia gruntu. Podjęto próbę analizy tego zagadnienia, zaproponowano sposób określania wartości wskaźnika gruntu  $G$  i uzasadniono przedstawioną metodykę własnymi badaniami oraz badaniami specjalistów z dziedziny akustyki farm wiatrowych z innych krajów. Następnie przeprowadzono analizę dla konkretnego projektu farmy wiatrowej, w wyniku której określono wartość wskaźnika gruntu  $G$ , zgodnie z zaproponowaną i uzasadnioną w artykule metodyką. Numeryczne prognozowanie poziomów emisji hałasu przy założeniu wskaźnika gruntu  $G = 0,7$  oraz maksymalnych poziomów mocy akustycznej wszystkich turbin, zapewni uzyskanie wyników z marginesem bezpieczeństwa dla najbliższych terenów chronionych akustycznie.

**Słowa kluczowe:** obliczenia hałasu, turbiny wiatrowe, wskaźnik gruntu  $G$ .

## Ground attenuation in acoustic analyses of wind farms

### Abstract

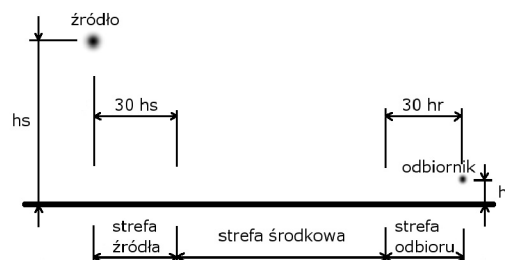
In this paper there are discussed the problems of determining immission and noise range levels at the stage of designing wind farm locations. The special attention is paid to the ground attenuation defined according to the standard ISO 9613-2:1996. There is made an attempt to analyse this issue. The way of estimating the value of the ground factor  $G$  is suggested. The presented method has been verified by the authors' own research and by the research of other specialists in acoustics of wind farms from other countries. The value of factor  $G$  should be estimated individually for each localization, after a thorough study of topography and area features of the farm location. The suggested way of estimating the  $G$  factor is illustrated by the example of analysis for a planned wind farm. As a result of the analysis the factor was estimated as  $G = 0.9$ . To keep the safety margin, we suggested assuming  $G = 0.7$ . The projected noise immission levels together with  $G = 0.7$  and maximum acoustic power levels of all wind turbines will ensure results with an absolutely sufficient safety margin. We suggest calculating the ground factor  $G$  according to the methodology presented in Section 3. One should take into account that use of the above method will result in estimating the  $G$  factor within the range  $0.7 \leq G \leq 0.9$ .

**Keywords:** noise calculating, wind turbines, ground factor  $G$ .

## 1. Wstęp

Określenie poziomów emisji i zasięgu hałasu farmy wiatrowej to ważny etap projektowania jej lokalizacji. Prowadzone na tym etapie analizy akustyczne, stanowią podstawę oceny zagrożenia dla środowiska ze względu na emisję hałasu i wykonywane są przy wykorzystaniu specjalistycznych programów obliczeniowych. Poprawna realizacja tego etapu odgrywa istotną rolę dla przedsięwzięcia, ponieważ wpływa na wielkość produkcji energii elektrycznej całej farmy. To wtedy określa się liczbę elektrowni wiatrowych możliwą do zainstalowania na danym terenie, ich typy, nastawy na niższe poziomy mocy akustycznej, a więc wpływa się praktycznie na efekt ekonomiczny całego przedsięwzięcia.

W ostatnim okresie daje się zauważyć tendencję narzucania wymogów prowadzących do przyjmowania skrajnie niekorzystnych założeń, przykładowo pomijania zjawiska tłumienia gruntu lub zakładanie wskaźnika gruntu  $G = 0$ . Wieloletnia praktyka obliczeniowa autorów, potwierdzona szeregiem pomiarów terenowych hałasu na eksploatowanych farmach wiatrowych, nie potwierdza słuszności takiego założenia. Prezentujemy jednak pogląd, że wartość przyjmowanego wskaźnika  $G$  powinna być doбирана indywidualnie dla każdej lokalizacji, po dokładnym rozpoznaniu topografii i właściwości terenu lokalizacji farmy. Osoba prowadząca obliczenia powinna mieć na uwadze zarówno zabezpieczenie terenów chronionych akustycznie zgodnie z wymogami określonymi w Polsce oraz dążyć do optymalnej wydajności farmy. Cel taki można osiągnąć na drodze kompromisu między podejściem zbyt konserwatywnym i zbyt optymistycznym, uzasadniając słuszność przyjętych założeń obliczeniowych. W Polsce stosowanych jest kilka programów obliczeniowych, jednak wszystkie powinny uwzględniać obowiązującą metodę obliczeniową, zgodną z Polską Normą PN-ISO 9613-2 [1]. Norma ta jest tłumaczeniem angielskojęzycznej normy międzynarodowej ISO 9613-2:1996 i jest zalecana do stosowania Rozporządzeniem [2]. Podkreślić należy, że w analizach akustycznych farm wiatrowych norma ta jest stosowana w wielu krajach na całym świecie, w tym również w Unii Europejskiej. Zgodnie z cytowaną normą, jednym z czynników wpływających na wyniki obliczeń, a w następstwie na lokalizację i odległości turbin wiatrowych od najbliższych terenów chronionych akustycznie, jest sposób uwzględniania w obliczeniach tłumienia przez grunt. Aktualnie daje się zaobserwować dyskusję na temat określania wartości wskaźnika gruntu  $G$  przyjmowanego w obliczeniach akustycznych dotyczących farm wiatrowych. Często w symulacjach komputerowych przyjmowany jest jako wartość skrajna z przedziału  $0 \leq G \leq 1$ . Prowadzona w dalszej części artykułu analiza literatury uzasadniająca zaproponowaną metodykę określania wartości wskaźnika gruntu  $G$  w obliczeniach akustycznych farm wiatrowych wymaga omówienia podstawowych założeń normy [1]. Tłumienie przez grunt  $A_{gr}$  jest wynikiem zjawiska interferencji fali akustycznej odbitej przez grunt i fali biegnącej bezpośrednio od źródła do punktu odbioru.



Rys. 1. Strefy do określania współczynnika tłumienia  
Fig. 1. Zones for determination of ground attenuation

Zgodnie z normą [1] tłumienie gruntu można uwzględnić w obliczeniach dwiema metodami:

1. Ogólna metoda obliczania, dla której określone są trzy strefy gruntu zgodnie z Rys. 1. Właściwości akustyczne każdej strefy są określone przez współczynniki tłumienia gruntu –  $A_s$  (strefa źródła),  $A_r$  (strefa odbioru) i  $A_m$  (strefa środkowa). W celu uwzględnienia w obliczeniach tłumienia poszczególnych stref, poziomy mocy akustycznej turbin deklaruje się do obliczeń w pasmach oktawowych i dla każdego pasma oktawowego oblicza się składowe tłumienia dla każdej strefy. Całkowite tłumienie stanowi sumę obliczonych tłumień dla poszczególnych stref. Każdą strefę charakteryzuje jedna z trzech kategorii gruntów, dla których przyjmuje się inną wartości wskaźnika gruntu  $G$ , i tak:

- grunt twardy – tu kwalifikujemy np. bruk, wodę, lód, beton oraz inne podłoża o małej porowatości i przyjmuje się  $G = 0$ ,
- grunt porowaty – tu kwalifikujemy np. powierzchnie trawiaste, powierzchnie zadrzewione i pokryte roślinnością zieloną, tereny upraw polowych, pastwiska, łąki itp. i przyjmuje się  $G = 1$ ,
- grunt mieszany – przypadek, gdy tereny są złożone zarówno z gruntu porowatego jak i twardego. Wtedy wskaźnik gruntu  $G$  przyjmuje się w zakresie przedziału  $0 \leq G \leq 1$ , a wartość stanowi ułamek odpowiadający udziałowi gruntu porowatego.

Całkowite tłumienie gruntu opisane jest wzorem:

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m, \quad (1)$$

gdzie:  $A_s$  – składowa tłumienia dla strefy źródła, opisywana wskaźnikiem gruntu  $G_s$ ,  $A_r$  – składowa tłumienia dla strefy punktu odbioru, opisywana wskaźnikiem gruntu  $G_r$ ,  $A_m$  – składowa tłumienia dla strefy środkowej, opisywana wskaźnikiem gruntu  $G_m$ .

2. Alternatywna metoda polega na obliczaniu poziomu dźwięku  $A$  w punkcie odbioru, jeżeli dźwięk rozprzestrzenia się nad gruntem porowatym lub mieszanym z przewagą porowatego i dźwięk nie jest tonem. W metodzie tej tłumienie przez grunt może być obliczane ze wzoru opisującego jedynie geometrię uwzględniając średnią wysokość drogi propagacji nad gruntem oraz odległość od źródła do punktu odbioru. W programach obliczeniowych najczęściej deklarowany jest wtedy poziom mocy akustycznej dla zastępczego źródła punktowego wszechkierunkowego w postaci maksymalnej wartości oraz zaznaczenie istnienia tłumienia lub braku tłumienia gruntu.

Podkreślić należy, że metoda obliczeń zgodna z normą [1] prognozuje poziomy ekwiwalentne w środowisku w korzystnych dla propagacji warunkach meteorologicznych, zakładając propagację z wiatrem na punkt odbioru.

## 2. Przegląd metod określania wskaźnika gruntu $G$

Obszerny materiał odnośnie metodyki prowadzenia analiz akustycznych dla farm wiatrowych, zawierający zarówno opis metod wykonania ocen oddziaływania na środowisko, zakresu raportów, sposobu prowadzenia obliczeń i propozycję wartości wskaźnika gruntu  $G$  zgodnie z zaleconą normą ISO 9613-2 przedstawiono w opracowaniu [3] sygnowanym przez Kanadyjskie Ministerstwo Środowiska. Dokument ten dotyczy lądowych elektrowni wiatrowych nowej generacji emitujących hałas i stanowi materiał zalecany do stosowania.

W opracowaniu [3] określono trzy klasy obszarów zurbanizowanych, dla których określone są dopuszczalne poziomy hałasu:

- Klasa 1 – obszary o dużej populacji, gdzie poziom tła kształtowany jest przez „gwar” miejski (ruch kołowy, działalność handlowa, itp.),
- Klasa 2 – obszar pośredni dla klasy 1 i 3, gdzie niski poziom tła otoczenia występuje w godzinach nocnych ( $23^{00} - 7^{00}$ ). Inne cechy reprezentatywne dla klasy 2 to:

- brak miejskiego „gwaru” już w godzinach  $19^{00} - 23^{00}$ ,
- poziom tła w godzinach wieczornych kształtowany jest przez środowisko naturalne i rzadką działalność człowieka,
- niewyraźnie słyszalne dźwięki od źródeł stacjonarnych innych niż te, które bierzemy pod uwagę,

• Klasa 3 – obszar wiejski zdominowany przez naturalne dźwięki o małym lub żadnym ruchu drogowym. Inne cechy reprezentatywne dla klasy 3 to:

- zaludnienie do 1000 mieszkańców,
- występowanie użytków rolnych,
- wiejskie dzielnice rekreacyjne, domki lub dzielnice uzdrowskowe,
- obszary pustyni.

W opracowaniu [3] zaleca się stosowanie ogólnej metody obliczeniowej (przygotowanie danych wejściowych w oktawach), a dla klasy obszarów 2 i 3 zalecane są następujące wskaźniki gruntu:

- $G_s = 1,0$  – wskaźnik gruntu strefy źródła,
- $G_m = 0,8$  – wskaźnik gruntu strefy środkowej,
- $G_r = 0,5$  – wskaźnik gruntu strefy odbioru.

Zgodnie z wytycznymi zawartymi w opracowaniu [3], alternatywnie możliwe jest stosowanie globalnego wskaźnika gruntu  $G$  o wartości nieprzekraczającej 0,7.

W prowadzonej w ostatnim okresie dyskusji na temat wskaźnika gruntu  $G$ , często porusza się problem okresu zimowego, wskazując na możliwość odwilży i ponownego zamarzania śniegu lub zamarzania zastoin wodnych zgromadzonych w zagłębieniach terenu. Istotne informacje na temat absorpcji dźwięku przez warstwy śniegu, w tym warstwy skompresowanego śniegu (czytaj: twardego, ubitego) przedstawia praca zbiorowa [4]. W publikacji opisano, że w okresach zimowych w latach 1998 i 1999 przeprowadzono pomiary terenowe dotyczące określenia podstawowych właściwości akustycznych warstwy śniegu. Pomiary dotyczyły zjawisk impedancji akustycznej (opór pozorny), współczynnika pochłaniania i stałej propagacji w śniegu. Stwierdzono, że warstwa śniegu posiada bardzo wysoką absorpcję dźwięku. Współczynnik absorpcji wynosił ponad 0,9 nawet przy bardzo niskiej częstotliwości dźwięku i zachowywał swoje wartości w zakresie od 50 Hz do 5 kHz. Stała propagacji posiadała silną zależność od częstotliwości, ponieważ tłumienie wzrastało wraz ze wzrostem częstotliwości, podobnie jak prędkość dźwięku, która również wzrosła od 100 m/s do prędkości bliskiej w powietrzu. Na tej podstawie stwierdzono, że śnieg jest typowym nośnikiem porowatym. Dla przypadku śniegu skompresowanego (czytaj: twardego, ubitego, powierzchniowo zmrożonego) współczynnik absorpcji utrzymywał się na poziomie ponad 0,6 lub 0,7. Ostatecznie stwierdzono, że śnieg ma podobne właściwości absorpcji do takiego materiału porowatego, jak wełna szklana o gęstości  $24 \text{ kg/m}^3$ . Zauważono również, że śnieg posiada wysoką absorpcję dźwięku przy niskich częstotliwościach, nawet dla grubości pokrywy śniegu równej 50 cm.

Problem prognozowania oddziaływania akustycznego na środowisko na etapie obliczeniowym przy projektowaniu farm wiatrowych szeroko omówiono w publikacji [5]. Analizie poddano problem zbieżności wyników obliczeń i pomiarów, zwracając uwagę na często stosowane w obliczeniach zbyt zachowawcze podejście do prognozowania emisji hałasu od elektrowni wiatrowych, w celu zmniejszenia ryzyka dla środowiska. Prowadzi to do zawyżania wyników obliczeń, a w konsekwencji do zmniejszania potencjalnych możliwości produkcyjnych projektowanych farm wiatrowych. Kluczowym elementem przeprowadzonych badań było porównanie przewidywanych poziomów hałasu na drodze obliczeniowej zgodnie z normą ISO 9613 - 2, z faktycznym poziomem emisji uzyskanym z pomiarów. Obliczenia wykonano dla dwóch wskaźników gruntu  $G = 0$  i  $G = 0,5$  (równych dla strefy źródła, strefy środkowej i strefy odbioru). Stwierdzono, że w przypadku zastosowania w obliczeniach wskaźnika gruntu  $G = 0$  uzyskano wyniki wyższe o ponad 3 dB od wyników pomiarów terenowych. W przypadku obliczeniowym drugim, gdy przyjęto wskaźnik gruntu  $G = 0,5$  uzyskano wyniki zbliżone do wyników pomiarów. Należy podkreślić, że przedstawione wyniki

pomiarów nie były korygowane ze względu na tło akustyczne i stanowią sumę hałasu turbin oraz tła akustycznego. Natomiast w obliczeniach tła akustyczne miało wartość zero. Zatem w przypadku korekcji wyników pomiarów ze względu na występujące tło akustyczne, wyniki te uległy by obniżeniu, co wskazuje, że przy wskaźniku  $G = 0,5$  wyniki obliczeń będą wyższe od wyników pomiarów.

### 3. Wskaźnik gruntu G propozycja autorska

Wskaźnik gruntu G należy określić zgodnie z obowiązującą normą [1], której założenia opisano we wstępie. W praktyce wielu autorów analiz akustycznych wykonywanych w Polsce uznaje tereny lokalizacji farm wiatrowych jako porowate, zakładając znikomy odsetek udziału w całej powierzchni terenów twardej i przyjmuje  $G = 1$ , w niektórych przypadkach jest to założenie bliskie prawdy. Przyjmijmy jednak wariant bardziej ostrożny i założmy, że tereny lokalizacji farmy wiatrowej i jej oddziaływania akustycznego, zaliczamy zgodnie z normą [1], do trzeciej grupy gruntów, a więc gruntu mieszanego. Zatem zakładamy, że tereny są złożone zarówno z gruntu porowatego, jak i twardego. Wtedy, zgodnie z normą, wskaźnik gruntu G przyjmuje się w zakresie przedziału  $0 \leq G \leq 1$ , a wartość stanowi ułamek odpowiadający udziałowi gruntu porowatego.

Przed określeniem współczynnika tłumienia gruntu dla przykładowej farmy wiatrowej przedyskutujmy, coraz częściej pojawiającą się sugestię, przyjmowania wskaźnika gruntu dla całości terenów na poziomie  $G = 0$ . Uzasadnia się to w ten sposób, że w porze zimowej, przy zaleganiu śniegu, po odwilżach i ponownym zamrażaniu zaistnieje sytuacja, w której powierzchnią odbijającą będzie lód. Przyjmowanie wskaźnika  $G = 0$  byłoby w tym przypadku słuszne, pod warunkiem, że lód powstałby na całym terenie lokalizacji i oddziaływania akustycznego farmy wiatrowej. W rzeczywistości sytuacja taka nigdy nie zachodzi. Zarówno proces topnienia zalegającej warstwy śniegu, jak i zamrażania w porze zimowej jest procesem wolnozmennym i rozłożonym w czasie (łagodne spadki lub wzrosty temperatury). Powstająca woda w większości jest absorbowana przez glebę, a częściowo może zbierać się i zalegać czasowo w istniejących zagłębieniach terenu i rowach, w których zaleganie wody nie występuje na stałe. Zatem w wyniku ponownego zamrożenia tafli lodu wystąpi jedynie na ograniczonej powierzchni stanowiącej jedynie jakiś procent całości terenu. Wielkość tej powierzchni zależy od ukształtowania terenu. Powierzchnie pokryte lodem, wystąpić mogą również w przypadku istnienia naturalnych zbiorników wodnych takich jak oczka wodne, jeziora, stawy, rzeki i inne ciekły wodne. Najczęściej jednak liczba naturalnych zbiorników wodnych występujących na terenach lokalizacji farm wiatrowych nie jest duża, ponieważ wprowadzają one znaczne ograniczenia ze względu na oddziaływanie przyrodnicze. Należy pamiętać, że powierzchnie, gdzie występuje zaleganie śniegu, w tym śniegu skompensowanego (czytaj zbitego, twardego, np. powierzchniowo zmrożonego) posiadają wysoki poziom absorpcji, co omówiono w punkcie 2.

Zatem ustalenie wartości współczynnika tłumienia gruntu wymaga dokładnego rozpoznania rzeźby terenu, istniejącej infrastruktury, występowania stałych zbiorników wodnych itp., a przyjmowanie go a priori na poziomie  $G = 0$  jest błędne i prowadzi do znacznego przeszacowania prognozowanych wyników emisji hałasu [5], ponadto nie jest zgodne z normą [1].

Proponuje się następującą metodykę postępowania przy szacowaniu wskaźnika gruntu G.

Dla przykładowej farmy wiatrowej analizie poddano mapy sytuacyjno - wysokościowe, mapy satelitarne, uzyskane informacje z wizji lokalnych oraz szczegółowy [6] Miejscowy Plan Zagospodarowania Przestrzennego. W wyniku analiz przyjęto, że tereny lokalizacji farmy wiatrowej ma z akustycznego punktu widzenia charakter płaski, z niewielkimi lokalnymi spadkami i zagłębieniami – rys. 2. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie

informacji, istotnych z punktu widzenia określenia wartości wskaźnika gruntu G.

Tab. 1. Zestawienie powierzchni oraz odpowiadających im wskaźników gruntu  
Tab. 1. Specification of areas and G-factors corresponding to them

Zestawienie ilościowe i procentowe udziałów powierzchni				Wskaźnik gruntu G
Lp.	Charakterystyka powierzchni	[ha]	Udział [%]	
1	Rowy melioracyjne	6,6	0,56	$G=0$
2	Oczka wodne i jeziora	0	0	brak
3	Tereny wód powierzchniowych (woda stojąca w rowach melioracyjnych)	0,5	0,04	$G=0$
4	Strumienie	0	0	brak
5	Doly i mniejsze istotne obniżenia terenu	1,2	0,10	$G=0$
6	Lasy i zakrzewienia	128,2	10,82	$G=1$
7	Obszary przeznaczone pod zalesienia (obecnie tereny rolne i nieużytki)	79,6	6,72	$G=1$
8	Pola i użytki rolne	935,6	78,98	$G=1$
9	Łąki i pastwiska	6,8	0,57	$G=1$
10	Drogi utwardzone - asfalt	3,0	0,25	$G=0$
11	Drogi utwardzone - tłuczeń	12,4	0,10	$G=0$
12	Fundamenty projektowane	1,0	0,09	$G=0$
13	Place manewrowe utwardzone - tłuczeń	2,0	0,17	$G=0$
14	Drogi gruntowe	7,8	0,66	$G=0$
	Całkowita powierzchnia	[ha]	Udział [%]	
	Obrys terenu	1184,7	100	



Rys. 2. Widok terenów farmy wiatrowej  
Fig. 2. View of a wind farm

W wyniku podsumowania powierzchni o wskaźniku  $G = 0$  i  $G = 1$  oraz po obliczeniu udziałów procentowych tych powierzchni w całej powierzchni oddziaływania farmy wiatrowej otrzymano:

- tereny o wskaźniku  $G = 0$ , sumaryczna powierzchnia 34,6 ha, procentowy udział w całej powierzchni 2,9 %,
- tereny o wskaźniku  $G = 1$ , sumaryczna powierzchnia 1150,1 ha, procentowy udział w całej powierzchni 97,1 %.

Dla analizowanego terenu farmy wiatrowej, zakładając możliwość wystąpienia oblodzenia w okresie zimowym, wskaźnik gruntu wynikający z przeprowadzonej analizy, określa się zgodnie z zasadami normy [1] na wartość  $G = 0,9$ .

Zaproponowana metodyka stosowana przez zespół autorski w analizach akustycznych dla farm wiatrowych, potwierdzona została szeregiem pomiarów terenowych. Przyjęcie wskaźnika gruntu  $G = 0,7$ , zgodnie z rekomendacją kanadyjską i wnioskami wynikającymi z analizowanej literatury, będzie wskazywało w rozpatrywanym przypadku na asekuracyjne podejście do problemu.

#### 4. Wnioski

W większości przypadków w obliczeniach akustycznych zasięgu hałasu turbin wiatrowych, zarówno w Polsce, jak i w innych krajach, przyjmuje się wskaźnik globalny. Wynika to z faktu, że udział procentowy gruntu porowatego w powierzchni terenu oddziaływania turbin wiatrowych jest najczęściej znacznie większy od 90% oraz z faktu, że tłumienie gruntu nie wzrasta wraz z długością strefy środkowej, lecz zależy przede wszystkim od właściwości strefy źródła i strefy odbioru [1]. Należy również zauważyć, że w przypadku farm wiatrowych, strefa środkowa przedstawiona na Rys. 1. praktycznie nie istnieje ze względu na wysokości wieży nośnej turbin (wysokość położenia źródła), a strefę źródła stanowią tereny zielone o wskaźniku gruntu  $G_s \approx 1,0$ . W przypadku pojedynczej turbiny wiatrowej o wysokości 100 m strefa źródła będzie miała promień 3km, a strefa odbioru będzie w niej zawarta.

Przedstawione wnioski w publikacji [4] stanowią istotną informację przy określaniu wartości wskaźnika gruntu  $G$  podczas obliczeń poziomów i zasięgu hałasu dla lokalizacji farm wiatrowych, przy założeniu istnienia warstwy śniegu w tym śniegu zbitego, co może wystąpić w porach zimowych. Zatem w warunkach zimowych, dla terenów o zalegającym śniegu, bezpieczny wskaźnik gruntu można przyjąć na poziomie ponad 0,6 lub 0,7.

Odległość 450 m od skrajnej turbiny, wynikająca z obliczeniowych analiz akustycznych, jest w wielu przypadkach zbliżona do minimalnej odległości od zabudowy projektowanych w Polsce farm wiatrowych, np. przy założeniu poziomu dopuszczalnego hałasu w środowisku 45,0 dB – zabudowa zagrodowa w porze nocnej. Jak zauważyli autorzy publikacji [5], przy większych odległościach od turbin wiatrowych rośnie wpływ tła na mierzone poziomy hałasu. Prowadzone badania własne [7, 8] potwierdzają ten pogląd, ponadto podobne zjawisko daje się zauważyć wraz ze wzrostem prędkości wiatru [9]. Wyniki przeprowadzonych badań [10] wykazują, że gradient prostej ilustrujący zmiany sumaryczne poziomu hałasu turbiny i tła akustycznego mierzonego w terenie jest mniejszy niż gradient prostej ilustrującej zmiany poziomu hałasu samego tła. Dlatego wraz ze wzrostem prędkości wiatru udział tła akustycznego w mierzonym sumarycznym poziomie hałasu będzie miał tendencję wzrostową. Przy większych odległościach (400 - 500 m oraz większych) i prędkościach wiatrów bliskich uzyskania maksymalnej wydajności turbin, poziom tła w punkcie pomiarowym będzie porównywalny, a często wyższy, do poziomu hałasu mierzonego od pracy elektrowni wiatrowych (hałas nierozróżnialny z tłem). Prowadzone kontrolne pomiary własne na pracujących farmach wiatrowych niejednokrotnie potwierdziły to zjawisko. Zatem cytowane w publikacji [5] wyniki obliczeń wykonane zgodnie z ISO 9613 – 2, przy założeniu wskaźnika gruntu na poziomie  $G = 0,5$  należy traktować jako wyniki z zachowaniem znacznego marginesu bezpieczeństwa.

Należy również mieć na uwadze fakt, że w analizach numerycznych zakłada się pracę wszystkich turbin wiatrowych z maksymalną wydajnością i maksymalną mocą akustyczną jednakową dla każdej turbiny. Założenie to wprowadza dodatkowy margines bezpieczeństwa dla określanych poziomów emisji w punktach kontrolnych i zasięgu hałasu. Przypadek taki może zaistnieć tylko teoretycznie. Szereg prowadzonych przez autorów niniejszej publikacji pomiarów terenowych (kilkanaście badań) wykazało istniejące zawsze zróżnicowanie prędkości wiatru na wysokości osi wirnika poszczególnych turbin. Część turbin pracuje przy niższej prędkości wiatru, a więc posiada niższy poziom mocy akustycznej i niższą emisję hałasu od zakładanej w obliczeniach. Przykładowo w tabeli 2 przedstawiono wycinek zmierzonych na wysokości osi wirnika wartości prędkości wiatru, dla 8 elektrowni wiatrowych o mocy 2,5 MW, jednej z badanych farm wiatrowych.

Z porównania prędkości wiatru na turbinach Ew2 i Ew3 wynika, że w czasie kiedy turbina Ew2 posiadała poziom mocy akustycznej bliski maksymalnemu (dla badanych turbin to 106,0 dB od prędkości wiatru 12 m/s), to turbina Ew3 w tym samym czasie ( $16^{00}$  i  $16^{10}$ ), zgodnie z jej charakterystyką akustyczną, posiadała poziom mocy akustycznej około 101,0 dB (prędkość wiatru 6

m/s). Pozostałe turbiny również nie osiągają poziomów maksymalnej mocy akustycznej przyjętej w obliczeniach. Podobne sytuacje wystąpiły na wszystkich badanych przez autorów farmach wiatrowych, co wynika z tzw. „zabierania wiatru” i zaburzeń przepływu wiatru przez sąsiadujące turbiny.

Tab. 2. Przykładowe prędkości wiatru podczas pomiarów hałasu  
Tab. 2. Sample speeds of wind during noise measurements

Czas pomiaru	Ew1	Ew2	Ew3	Ew4	Ew5	Ew6	Ew7	Ew8
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
18.10.12 16:00	9,5	11,4	7,6	10,8	10,4	10,0	10,4	10,1
18.10.12 16:10	11,1	11,2	6,0	10,3	10,4	9,8	9,9	10,1
18.10.12 16:20	10,6	11,1	5,5	7,5	10,3	9,9	10,2	10,0
18.10.12 16:30	10,1	10,6	5,6	7,4	10,0	9,8	9,9	9,8
18.10.12 16:40	8,9	9,8	5,8	5,9	9,4	9,0	9,0	8,8
18.10.12 16:50	8,3	9,0	6,2	4,2	8,9	8,5	8,3	8,3
18.10.12 17:00	8,6	9,7	6,8	4,5	9,3	8,9	8,9	8,7

Prognozowane poziomy emisji hałasu przy założeniu wskaźnika gruntu  $G = 0,7$  oraz maksymalnych poziomów mocy akustycznej wszystkich elektrowni, zapewnią dla analizowanej przykładowej farmy wiatrowej uzyskanie wyników z marginesem bezpieczeństwa. Autorzy niniejszego artykułu proponują wyliczenie wskaźnika  $G$  indywidualnie dla każdej lokalizacji farmy wiatrowej zgodnie z metodyką przedstawioną w punkcie 3 i normą [1]. Należy zauważyć, że stosowanie powyższej metodyki będzie skutkowało przyjmowaniem wskaźnika gruntu  $G$  w przedziale  $0,7 \leq G \leq 0,9$  dla większości typowych terenów lokalizacji farm wiatrowych w Polsce.

#### 5. Literatura

- [1] PN-ISO 9613-2:2002 Akustyka - Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej, Ogólna metoda obliczania.
- [2] Rozporządzenie Ministra Środowiska, z dnia 4 listopada 2008 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody, Dz. U. Nr 206 poz. 1291.
- [3] Ministry of the Environment.: Noise Guidelines for Wind Farms. Interpretation for Applying MOE NPC Publications to Wind Power Generation Facilities, Ontario, October 2008.
- [4] Iwase T., Sakuma T., Yoshihisa K.: Measurements and simulations on sound propagation above snow field, The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, The Hague, The Netherlands, 2001.
- [5] Bullmore A., Adcock J., Jiggins M., Cand M.: Wind Farm Noise Predictions and Comparison with Measurements, Third International Meeting on Wind Turbine Noise, Aalborg, Denmark, June 2009.
- [6] Szczepański P., Pyszny K., Zydrón A.: Analiza zróżnicowania stopnia szczególności ustaleń polityk przestrzennych wybranych gmin aglomeracji poznańskiej. Rocznik Ochrona Środowiska. Vol. 15, s. 2767-2779, 2013.
- [7] Ingielewicz R., Zagubień A.: Pomiar hałasu infradźwiękowego wokół farmy wiatrowej. PAK. Vol. 59, nr 7, s. 725-727, 2013.
- [8] Ingielewicz R., Zagubień A. „Hałas elektrowni wiatrowych a ochrona środowiska”, Konferencja Ochrony Środowiska, Zarządzanie środowiskiem akustycznym, s. 168-176, Wrocław, kwiecień 2004.
- [9] Malec T., Boczar T., Wotzka D.: Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe różnych mocy. PAK Vol. 58, nr 9, s. 5-10, 2012.
- [10] Massachusetts Department of Environmental Protection, Massachusetts Department of Public Health, Wind Turbine Health Impact Study: Report of Independent Expert Panel, Massachusetts, January 2012.