

---

**CIEPLNE MASZyny PRZEPLYWOWE**

---

No. 143

TURBOMACHINERY

2013

Patryk GAJ, Jarosław R. BLASZCZAK  
Politechnika Łódzka  
Instytut Maszyn Przepływowych  
Jaroslaw.Blaszczak@p.lodz.pl

**POMIARY DRGAŃ PRZY UŻYCIU NIESTACJONARNEGO  
SYSTEMU MONITORINGU TURBIN WIATROWYCH**

*Streszczenie:* W artykule przedstawiono pomiary drgań uzyskane z mobilnego systemu monitoringu turbin wiatrowych. Przedstawiono problem drgań oraz ich wpływ na okolicznych mieszkańców. Przedstawiono niektóre wyniki pomiarów przeprowadzonych w Polsce w roku 2012.

*Słowa kluczowe:* wiatr, turbiny, drgania, pomiary.

**VIBRATION MEASUREMENTS OF WIND TURBINES USING  
MOBILE MONITORING SYSTEM**

*Abstract:* Vibrations measurements of wind turbines using mobile monitoring system are presented. In this paper the problem of vibrations and their influence on local residents is described. Some results of the field research which took place near wind farm in Poland in 2012 are presented.

*Keywords:* wind, turbines, vibration, measurements.

**1. WPROWADZENIE**

Współcześnie w Europie oraz świecie następuje szybki wzrost wykorzystania energii odnawialnych. Wykorzystanie wiatru jest jednym z podstawowych sposobów pozyskiwania energii znanym od dawna. W ostatnich latach nastąpił gwałtowny wzrost ilości turbin wiatrowych, przy czym często grupowane są one w postaci farm wiatrowych. Nadaje to nowy, większy wymiar wynikających z tego problemów. Wiele krajów europejskich intensywnie inwestuje w ten rodzaj uzyskiwania energii [1], aby zrealizować wiążące je umowy wynikające z konieczności obniżenia emisji dwutlenku węgla. Uzyskiwane moce z energii wiatru są coraz większe i współcześnie dochodzą do kilkuset MW (np. system London Array o mocy 630 MW [2]). W Polsce skala wykorzystania energii wiatru jest aktualnie mniejsza, ale jest to dziedzina

szybko rozwijająca się. Wynika to również z faktu, że rządy wielu krajów wspomagają finansowo (lub tworzą ułatwienia) dla podmiotów działających w tej branży. W wielu przypadkach można uzyskać refundację na poziomie od 40 do 80% kosztów instalacji, np. dla przypadku turbin wiatrowych o małej mocy [3]. Farmy wiatrowe powstają zarówno na morzu jak i na lądzie, przy czym obserwuje się również zjawiska negatywne budzące sprzeciw społeczeństwa. Drgania towarzyszące pracy turbin wiatrowych są jednymi z takich negatywnych skutków wykorzystania energii wiatru, obok emitowanego hałasu, efektów optycznych cienia i odbłyśków światła oraz promieniowania elektromagnetycznego.

Celem określenia poziomów drgań stosowane są systemy monitoringu i kontroli, zarówno stacjonarne jak i mobilne. W niniejszym artykule opisano wyniki pomiarów uzyskanych przy użyciu jednego z takich systemów oraz przedstawiono część z nich. Ponieważ zjawiska kontrolno-pomiarowe oraz monitoringu samych urządzeń, zamontowane w konstrukcji maszyn, są doskonale rozpoznane w literaturze i były wielokrotnie opisywane, w niniejszym artykule opisane są badania przeprowadzone u podstaw oraz w pewnych odległościach od turbin wiatrowych w gospodarstwach okolicznych mieszkańców.

## **2. DRGANIA TOWARZYSZĄCE PRACY TURBIN WIATROWYCH**

Drgania maszyn i urządzeń są zjawiskiem niekorzystnym i powodują niepożądane straty energii oraz uszkodzenia. Głównie są spowodowane niewyważeniem elementów wirujących i w przypadku turbin wiatrowych może to dotyczyć zarówno generatorów, wirników, wałów napędowych oraz innych zastosowanych systemów. W wielu przypadkach bardzo duży wpływ na poziom drgań mają również zjawiska aerodynamiczne przy opływie łopat turbiny wiatrowej, nie tylko w postaci sphywających wirów, ale również w profilowych warstwach przyściennych [4]. Systemy monitoringu najczęściej analizują drgania zagrażające bezpośrednio konstrukcji turbiny wiatrowej oraz jej poszczególnym elementom i praktycznie większość technicznych pozycji literaturowych jest poświęcona tylko temu zagadnieniu. Tym nie mniej coraz więcej ukazuje się pozycji literaturowych, również w Polsce, opisujących zjawiska negatywne [5], [6], [7].

W niniejszym artykule główny nacisk jest położony na drgania odbierane w pewnej odległości od turbin wiatrowych i mogące mieć wpływ na ludzi. Ponieważ najbardziej szkodliwe dla zdrowia ludzkiego są drgania o bardzo niskich częstotliwościach (od kilku do kilkudziesięciu Hz [8]) poświęca się im najwięcej uwagi. Zgodnie z przyjętymi ustaleniami wyróżnia się trzy progi wrażliwości na ekspozycję drganiową: I – próg odczucia, II – próg dokuczliwości oraz III – próg wytrzymałości. Normy opisujące te zagadnienia bazują głównie na ustaleniach Międzynarodowej Organizacji Standardów – ISO-2631 [9].

### **3. SYSTEM POMIAROWY I WYBÓR PUNKTÓW TESTOWYCH**

Pomiary zostały przeprowadzone na terenie Polski przez grupę badawczą, w której uczestniczył jeden z autorów [10]. Oddzielnie przebadano poziomy drgań dla poszczególnych turbin wiatrowych, w następnej kolejności wykonano serie testów badawczych w wyznaczonych domostwach, znajdujących się w pobliżu omawianych urządzeń.

W przypadku pomiarów wibracyjnych istotnym czynnikiem jest odpowiednie umiejscowienie stacji monitorującej względem punktu poddawanego pomiarom. Podczas przeprowadzonych testów najistotniejszym faktem było zarejestrowanie wibracji całej konstrukcji elektrowni wiatrowej, jak również gruntu w jej najbliższym otoczeniu. Miejsca pomiarów były identyczne dla każdego testu aby nie zaniżyć jakości uzyskiwanych wyników, a także celem uproszczenia procesu przetwarzania danych. Stacje monitorujące zostały umieszczone w specjalnych obudowach na betonowym fundamencie, tuż przy turbinie wiatrowej. Urządzenia te były wyposażone w poziomnice celem odpowiedniego ustawienia względem gruntu. Posiadały również regulowane podstawki antypoślizgowe, aby, w czasie przeprowadzania testów badawczych, zapobiec przesunięciu sprzętu pomiarowego pod wpływem wiatru. Urządzenia nie były przytwierdzane klejem, ani żadnym dodatkowym spoiwem do podstaw turbin wiatrowych, jak również nie były mocowane.

Podczas monitorowania poziomu drgań w domostwach wykorzystano ten sam typ urządzeń monitorujących. Zdecydowano też, że pomieszczenie poddane badaniu powinno spełniać kilka warunków, które miały zapewnić jak najbardziej dokładne wyniki. Pierwszym warunkiem był fakt, że badane pomieszczenie powinno znajdować się na parterze, na wysokości zbliżonej do tej, na której przeprowadzono badania turbin wiatrowych. Dodatkowo wybrane pomieszczenia miały podłogę wykonaną z płytek ceramicznych (równa powierzchnia) lub posiadały betonową wylewkę (bardzo podobne podłoże jak podczas wykonywania pomiarów przy turbinach wiatrowych). Ostatnim, najważniejszym warunkiem był fakt, że pomieszczenie to nie było używane podczas godzin wieczornych i nocnych, ani nie pracowały tam żadne urządzenia wytwarzające dodatkowe drgania, które mogłyby wpłynąć na wyniki przeprowadzonych testów badawczych.

Pomiary przeprowadzono przy użyciu akcelerometrów PCB 356B18 (PCB Piezotronics) o masie 35 g. Podczas badań turbin wiatrowych przeprowadzone pomiary obejmowały zakres od 0.63 Hz do 2 kHz.

### **4. WYNIKI POMIARÓW**

Przykładowe wyniki dla jednej z badanych turbin wiatrowych o mocy 2 MW przedstawiono na Rys. 1. Dla pozostałych maszyn wyniki miały podobne przebiegi.

W przedstawianym przypadku składowa  $x$  odpowiada kierunkowi na wprost napływającego wiatru, składowa  $y$  odpowiada kierunkowi prostopadłemu do kierunku wiatru, natomiast składowa  $z$  odpowiada kierunkowi pionowemu.

Dla przypadku pomiarów bezpośrednio u podnóża turbiny, z wykresów dla trzech składowych drgań, jest widoczne, że największe amplitudy występują w kierunkach  $x$  oraz  $y$  i są one poza zakresem bardzo niskich częstotliwości. Jedynie dla składowej pionowej  $z$  występują drgania o niskich częstotliwościach (w tym przypadku 20 Hz), ale są one o kilkakrotnie mniejszej amplitudzie niż dla pozostałych składowych. Podczas pomiarów średnia prędkość obrotowa wirnika turbiny wynosiła 10.6 obr/min.

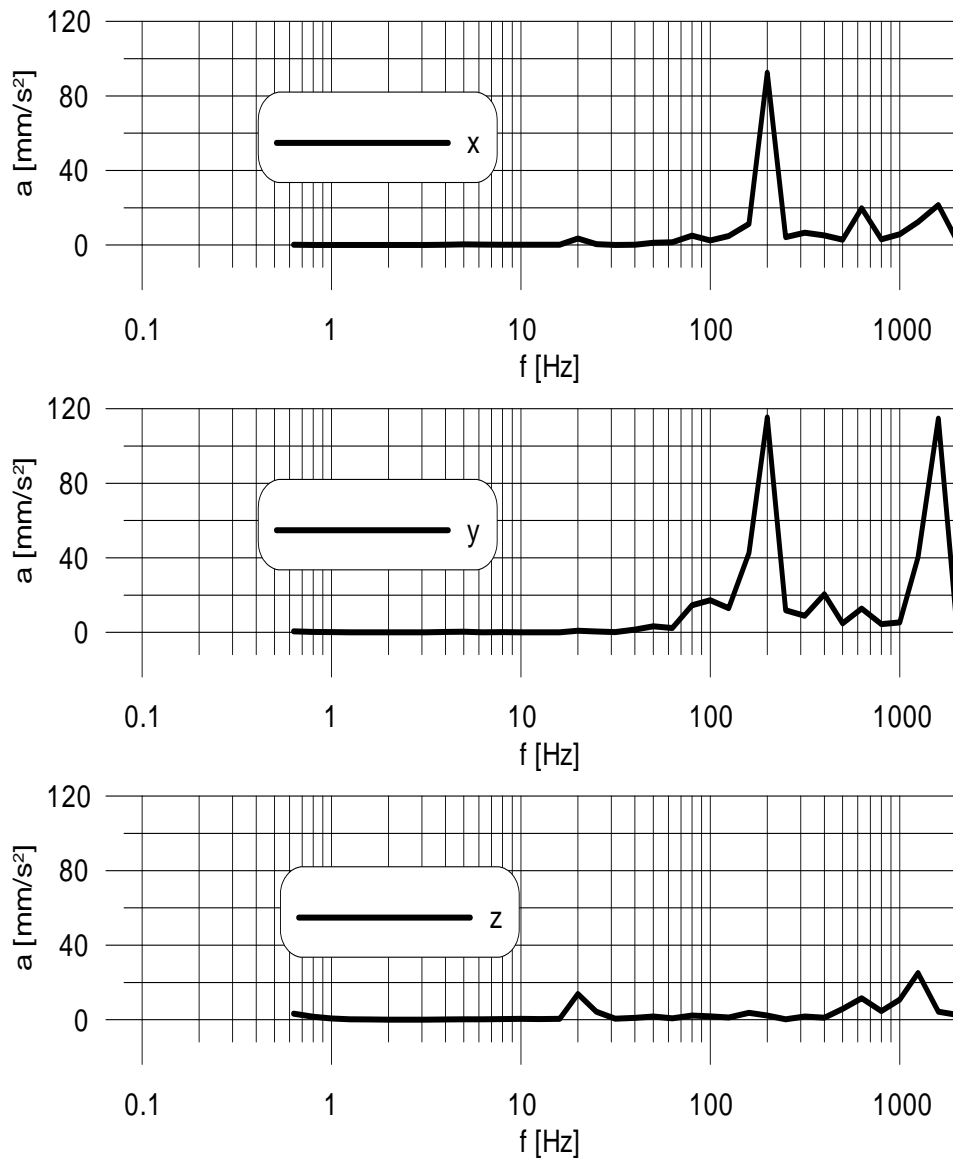
Porównanie wypadkowych poziomów drgań dla wybranych 13 turbin wiatrowych przedstawiono na Rys. 2. Podczas pomiarów prędkości wiatru były w granicach 13-26 km/h [10]. Łączny czas trwania pomiarów wynosił 21 godzin. Jak można zaobserwować mierzone wartości dla poszczególnych turbin wiatrowych mogą się różnić kilkakrotnie i każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie.

Wstępne pomiary przeprowadzono w 26 wyznaczonych domostwach. Do badań poziomu drgań w indywidualnych domostwach ostatecznie wyznaczono 8 punktów pomiarowych. Mieściły się one wewnątrz budynków, w pomieszczeniach mieszkalnych. Pomiary, w zależności od możliwości, monitorowano w czasie od 4 do 20 godzin dla każdego domu.

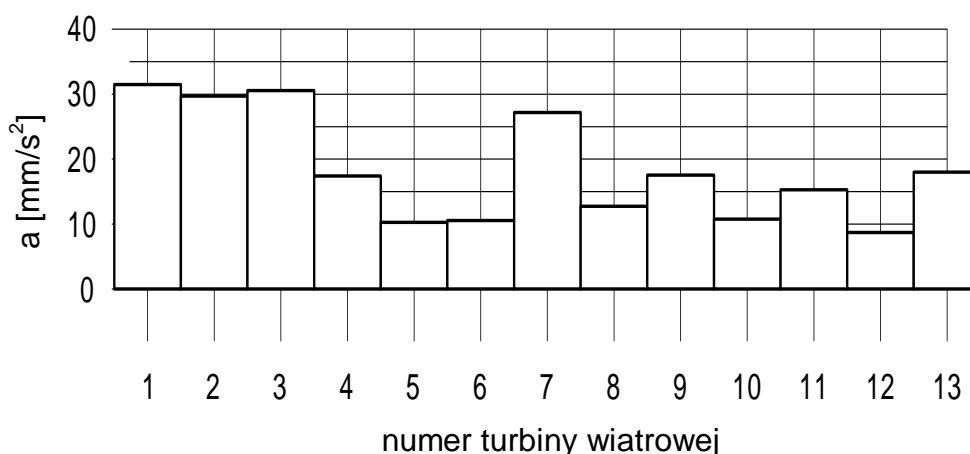
Podczas badań poziomu drgań w domostwach przeprowadzone pomiary obejmowały zakres od 0.63 Hz do 800 Hz. Niezależnie od przeprowadzanych testów druga grupa przeprowadzała test i badania medyczne mieszkańców (nie będące tematyką tego artykułu).

Przykładowe wyniki dla jednego z domostw przedstawiono na Rys. 3. Ten przypadek jest szczególny gdyż domostwo znajduje się w odległości najmniejszej z badanych przypadków, zaledwie 300 m od turbiny wiatrowej. Pozostałe testowane domostwa znajdowały się w większych odległościach, w większości do 1.2 km. W danym przypadku, jeżeli występują jakiegokolwiek uciążliwości wywoływane drganiami maszyn, powinno to być najbardziej widoczne. Pomiary przeprowadzono w godzinach wieczornych i nocnych, celem wyeliminowania wpływu innych czynników na wyniki pomiaru, np. pracy maszyn rolniczych w pobliżu. Składowa  $x$  odpowiada kierunkowi zachodniemu,  $y$  południowemu, natomiast składowa  $z$  jest pionowa.

Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że w zakresie bardzo niskich częstotliwości (a więc szczególnie szkodliwych dla człowieka) zmierzone wartości są małe. Jednakże amplituda jednej ze składowych drgań (w kierunku  $x$ ) dla częstotliwości 100 Hz, jest kilkakrotnie większa od drugiej, co jest zastanawiające z uwagi na fakt, że takiej składowej nie zaobserwowano podczas badań bezpośrednio u podstawy turbiny wiatrowej. Drgania w kierunku pionowym, zgodnie z oczekiwaniami były znacznie mniejsze od pozostałych.



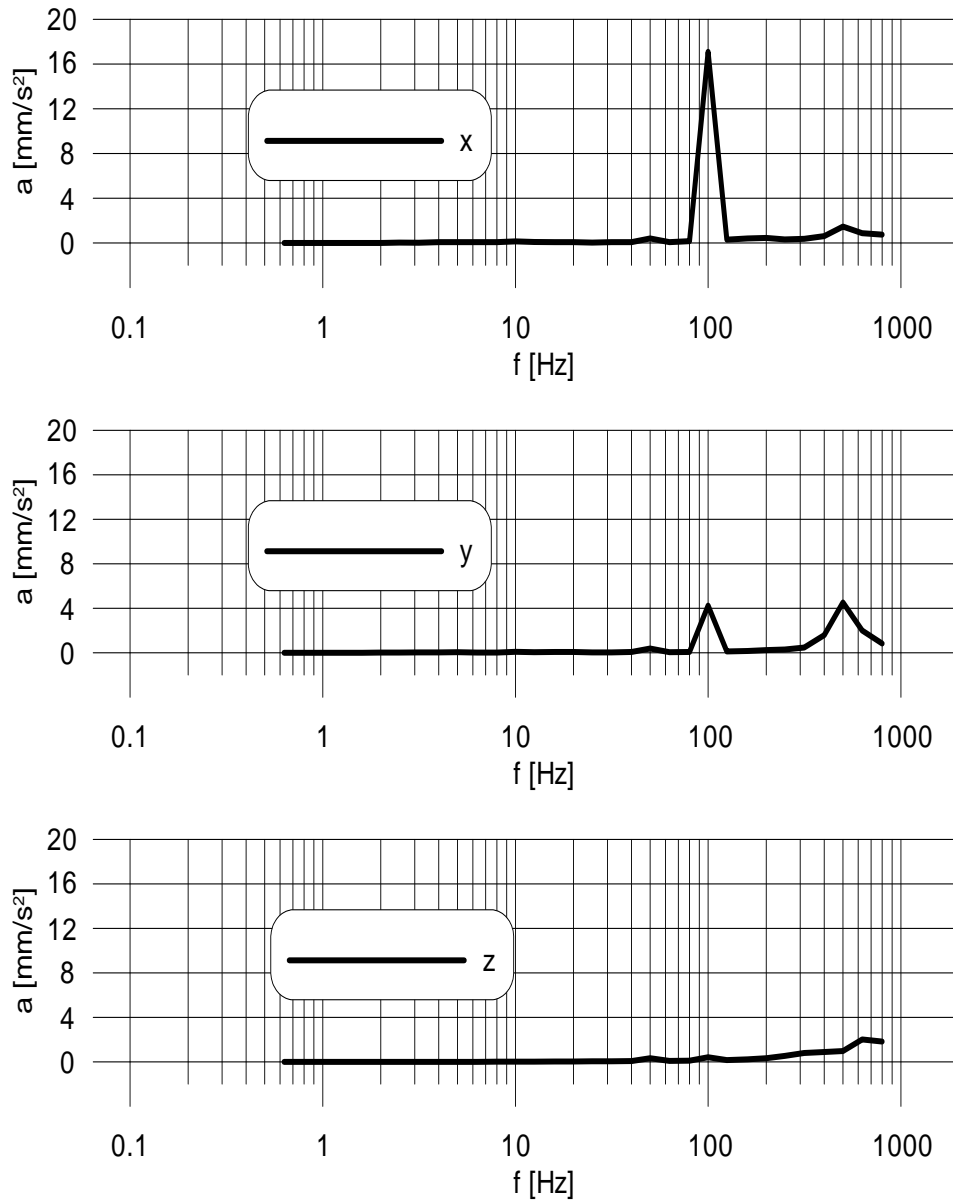
Rys. 1. Poziomy składowych drgań wzdłuż głównych osi turbiny  
Fig. 1. Levels of vibrations components along main axes of a turbine



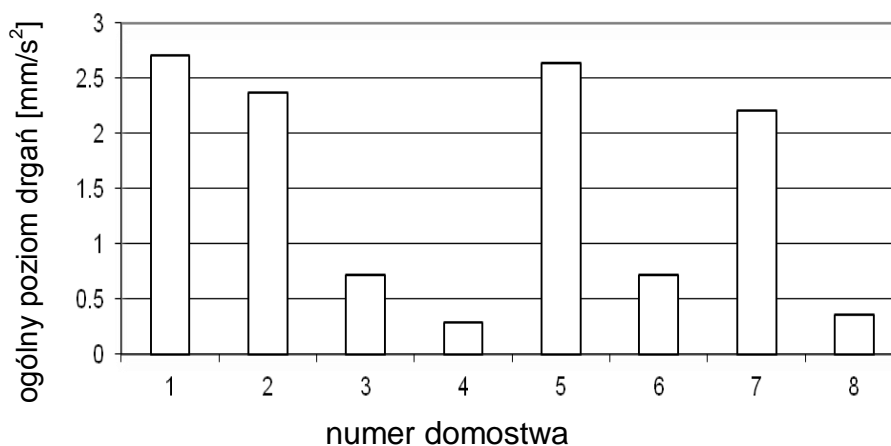
Rys. 2. Porównanie poziomów drgań dla wybranych 13 turbin wiatrowych

Fig. 2. Comparison of the vibration levels for chosen 13 wind turbines

Na Rys. 4, celem porównania, przedstawiono ogólne poziomy drgań pomierzone w innych domostwach. Poszczególne domostwa (oznaczone na rysunku numerami od 1 do 8) były w różnych odległościach od najbliższej turbiny wiatrowej, przy czym na podstawie uzyskanych danych nie można wyprowadzić zależności o spadku poziomu drgań w zależności od odległości od turbiny. Omawiane domostwo, znajdujące się w odległości 300 m od turbiny wiatrowej, ma numer 1, a np. 5 domostwo było w odległości 900 m od turbiny. Z kolei domostwo nr 3 było najbardziej oddalone gdyż o 3 km, a pomiary nie wykazały najniższego poziomu drgań. Domostwa nr 4 oraz 8, w których zarejestrowano najniższe poziomy drgań, były w odległościach zaledwie 700 m od najbliższych turbin. Biorąc pod uwagę, że turbiny były tej samej mocy, przedstawione wyniki wskazują na dużą niejednoznaczność omawianego zagadnienia i złożoność problemu, na jaki napotyka się badacz. Najprawdopodobniej jedynym rozwiązaniem byłoby stworzenie regularnej siatki punktów pomiarowych terenie, odpowiednio zagęszczonych. Dodatkowo przy analizie należałoby uwzględnić wiele dodatkowych elementów jak np. skład podłoża, ukształtowanie terenu, wzajemne wpływy turbin wiatrowych na siebie, efekty dodatkowych drgań wywoływanych opływem łopat [11] itp. Niestety zwiększa to nie tylko czasochłonność i koszty finansowe badań, ale również bardzo znacząco komplikuje późniejszą analizę uzyskanych wyników. Tym nie mniej tylko takie kompleksowe badania są w stanie dać satysfakcjonującą odpowiedź odnośnie wpływu drgań turbin wiatrowych na najbliższą okolicę.



Rys. 3. Poziomy składowych drgań zmierzonych w najbliższym domostwie  
Fig. 3. Levels of vibrations components measured in a nearby household



Rys. 4. Porównanie poziomów drgań dla wybranych domostw

Fig. 4. Comparison of the vibration levels for chosen households

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Energii pozyskiwanej z odnawialnych źródeł energii poświęca się w obecnych czasach dużo uwagi. Turbiny wiatrowe stały się bardzo atrakcyjną metodą, m.in. z powodu zachęt rządów państw. Jednakże daje się zaobserwować nienadążanie rozwiązań prawnych oraz odpowiednich norm dających ochronę ludziom zamieszkującym okolice farm wiatrowych, w tym również w zakresie bezpieczeństwa i ochrony ludzi i zwierząt zamieszkujących w pobliżu. Zgodnie z różnymi wytycznymi, oraz na podstawie bezpośrednich badań, zaleca się aby odległość domostw od turbin wiatrowych była nie mniejsza niż 1600-3200 m, w zależności o mocy i wysokości zainstalowanej turbiny. Niestety, często spotyka się przypadki, w których odległości są mniejsze niż zalecane. Przypadki tego typu są nagłaśniane w mediach i tworzą niekorzystny odbiór społeczny. Problem będzie narastał gdyż zaczynają być wdrażane programy umieszczania turbin wiatrowych (na razie małych mocy) w środowiskach miejskich. W tym przypadku problem będzie narastał gdyż drgania wywołane takimi turbinami wiatrowymi będą bezpośrednio oddziaływać na konstrukcje budynków.

W omawianym przypadku badania przeprowadzono w środowisku wiejskim. Jak można zaobserwować na podstawie uzyskanych wyników, zmierzone wartości drgań dla poszczególnych turbin wiatrowych (u ich podstaw) mogą się różnić kilkakrotnie i każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie. Trudno na podstawie przeprowadzonych badań doszukać się negatywnego wpływu turbin wiatrowych na zdrowie ludzi i zwierząt. Należy również uczciwie przyznać, że z różnych powodów, część wyników może być obarczona trudną do określenia niepewnością, niezależną od strategii i metodyki badań. Nie zawsze



można oszacować wszystkie potencjalne przyczyny bazując tylko na metodach statystycznych (niepewności typu A) oraz niepewnościach innego rodzaju, np. użytej aparatury pomiarowej (niepewności typu B). Dodatkowo należy uwzględnić fakt, że pomiary powinny być przeprowadzone głównie przy optymalnej pracy turbin co nie zawsze było możliwe do spełnienia. Problemem, na który natknięto się również w badaniach była też niestabilność pracy mierzonych obiektów. Tym nie mniej wykazano, że powinny powstać dodatkowe wytyczne i dokładniejsze normy odnoszące się do badanych zjawisk, tym bardziej, że w omawianym przypadku zaobserwowano drgania, które wg okolicznych mieszkańców, źle wpływały na ich stan zdrowia, podczas gdy bezpośrednio systemy monitoringu wykazywały dobry stan techniczny urządzeń. Dodatkowe testy psycho-fizyczne, którym poddano mieszkańców, potwierdziły te obserwacje. W niektórych przypadkach dopatrzono się wczesnych stadiów syndromu turbin wiatrowych, co potwierdzałyby badania przedstawione przez innych badaczy [12]. Zdaniem autorów, dodatkowe badania przeprowadzone przez innych badaczy oraz w innych porach roku są wskazane.

W przyszłości, celem przeprowadzenia dokładnej analizy omawianego zagadnienia, zaleca się badania dla przypadków dłuższych czasów ekspozycji i monitoringu omawianych zjawisk, mierzonych dniami lub nawet tygodniami. Ogólnie wynika też potrzeba znalezienia metod do optymalnego rozmieszczenia poszczególnych turbin wiatrowych, odpowiedniego ich rozproszenia w terenie w zależności od ukształtowania danego terenu. Może to również spowodować wzajemne niwelowanie się ujemnych skutków pojedynczych turbin wiatrowych, np. wzajemne wytłumianie drgań. Podstawowym kryterium jednak zawsze będzie odległość do najbliższych gospodarstw domowych.

Tak, jak już wcześniej wspomniano, występuje tutaj duża złożoność problemu. Zgodnie z wcześniejszymi sugestiami jedynym rozwiązaniem byłoby stworzenie siatki, odpowiednio zagęszczonych terenowych punktów pomiarowych. Uwzględnienie dodatkowych czynników zwiększa czasochłonność i koszty badań, ale jest jedynym rozwiązaniem omawianego zagadnienia.

Podsumowując należy stwierdzić, że nie należy pochylić się na rezygnację z wykorzystania energii wiatru. Ciągłe trwają prace badawcze nad udoskonalaniem konstrukcji turbin wiatrowych oraz polityka wielu państw sprzyja wykorzystywaniu tej formy energii. Zagadnienie to jest szczególnie aktualnie w Polsce, szczególnie w perspektywie rozwoju energetyki i zamierzeń odnośnie roku 2020.

**LITERATURA**

- [1] *Wind in Power 2011 European statistics*, [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/statistics/Stats\\_2011.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/statistics/Stats_2011.pdf), p. 4-7, (dostęp 2013/08/07).
- [2] <http://www.forbes.pl/druga-najwieksza-elektrownia-wiatrowa-na-swiecie-otwarta,artykuly,159715,1,1.html> (dostęp 2013/08/07).
- [3] Nolbrzak I., Błaszczak J., 2010: *Wind Turbine as a Potential Energy Source for Households – Lodz region case*. CMP – Turbomachinery, T. 137, s. 79-90.
- [4] Smolny A., Błaszczak J.R., 1996: *Boundary Layer and Loss studies on Highly Loaded Turbine Cascade*, AGARD CP571.
- [5] Damijan Z., 2009: *Wibroakustyczna ocena raportu oddziaływania na środowisko – „Raport o oddziaływaniu na środowisko dla przedsięwzięcia polegającego na budowie parku elektrowni wiatrowych „Pawłowo” wraz z infrastrukturą towarzyszącą o łącznej mocy 90 MW” (lipiec 2009)*, Kraków, [http://stopwiatrakom.eu/wts/pliki/Odp\\_AGH.pdf](http://stopwiatrakom.eu/wts/pliki/Odp_AGH.pdf) (dostęp 2013/08/07).
- [6] Gray L., 2011: *Can wind farms really make you ill? The evidence: A list of the health concerns about wind farms and conclusions of major studies*, <http://www.telegraph.co.uk/earth/earthnews/8386397/Can-wind-farms-really-make-you-ill-The-evidence.html> (dostęp 2013/01/06).
- [7] Various Authors, 2012: *Wind Turbine Health Impact Study: Report of Independent Expert Panel January 2012*, [http://www.mass.gov/dep/energy/wind/turbine\\_impact\\_study.pdf](http://www.mass.gov/dep/energy/wind/turbine_impact_study.pdf), p. 45-52, (dostęp 2013/01/06)
- [8] *Oddziaływanie drgań na człowieka*; <http://neur.am.put.poznan.pl/wa/3.3.pdf> (dostęp 2013/08/07).
- [9] ISO-2631, 1997: *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration*
- [10] Gaj P., 2013: *Mobile monitoring and impact of wind turbines on human health*. Praca dyplomowa. Promotor J. Błaszczak, Politechnika Łódzka.
- [11] Błaszczak J., 2006: *Noise Reduction and Efficiency Improvement Through Vane Indexing of a Two-Stage Turbine*. AIAA 2006-2578.
- [12] Pierpont N., 2009: *Wind Turbine Syndrome A Report on a Natural Experiment*, NM: K-Selected Books, Santa Fe.