

KOMPATYBILNOŚĆ ELEKTROMAGNETYCZNA ELEKTROWNI WIATROWYCH

Streszczenie: W referacie omówiono problemy związane z zakłóceniami radioelektrycznymi wytwarzanymi przez farmy wiatrowe. Przeanalizowano wpływ takich farm na systemy radiokomunikacyjne (m.in. TV analogową i cyfrową, łącza mikrofalowe oraz systemy radiolokacyjne). Przedstawiono metodologię sprawdzania wpływu farm wiatrowych na działanie tych systemów.

1. WSTĘP

Turbiny wiatrowe stają się coraz bardziej powszechnym elementem naszego krajobrazu. Budzą one na ogół niechęć okolicznych mieszkańców. W grę wchodzi nie tylko względy estetyczne, ale również potencjalnie niekorzystny wpływ na środowisko naturalne i człowieka (np. hałas). Stosunkowo niewiele mówi się o wpływie takich inwestycji na pracę urządzeń i systemów elektronicznych. Okazuje się, że wpływ ten może być w niektórych przypadkach bardzo duży. Niniejszy referat analizuje zakłócenia wytwarzane przez farmy wiatrowe, pokazuje ich wpływ na systemy radiokomunikacyjne i przedstawia metodologię oszacowania tego wpływu na istniejące lub planowane systemy radiokomunikacyjne. Ostatni aspekt jest ważny zarówno dla projektantów i użytkowników systemów radiowych, jak i dla Urzędu Komunikacji Elektronicznej. Brakuje bowiem jasnych kryteriów (podobnych do sformułowanych np. w Kanadzie [17]), pozwalających szacować obszar potencjalnych zakłóceń.

2. WPLYW TURBIN WIATROWYCH NA SYSTEMY RADIOKOMUNIKACYJNE

2.1. Budowa turbin

Turbiny wiatrowe, wykorzystywane do wytwarzania energii elektrycznej, składają się z metalowego masztu lub wieży, śmigła z łopatom (średnica śmigieł wiatraków sięga 90-100 m) oraz gondoli z generatorem. Maszt kratownicowy lub rurowa wieża jest wykonana z metalu. Wnętrze gondoli zawiera również wiele elementów metalowych. Łopaty śmigieł są najczęściej wykonane z tworzywa sztucznego GRP (Glass Reinforced Plastic) lub z włókien węglowych. Elementy metalowe odbijają fale radiowe oraz przesłaniają ich drogę powodując tłumienie sygnału. Tworzywa sztuczne w zdecydowanie mniejszym stopniu tłumią i odbijają fale radiowe (włókna węglowe odbijają bardziej niż GRP), dzięki czemu ich potencjalnie szkodliwy wpływ na sygnały radiowe jest znacznie mniejszy. Nie należy zapominać o pokrywaniu się powierzchni łopat warstwą wody w czasie opadów deszczu. Może to nieznacznie podnieść poziom tłumienia oraz fal odbitych dla łopat z tworzyw sztucznych.

2.2. Rodzaje wprowadzanych zakłóceń

Turbiny mogą wprowadzać dwa typy zakłóceń:

- zakłócenia aktywne – urządzenia kontrolno-sterujące i falowniki zainstalowane w gondoli mogą same wytwarzać fale elektromagnetyczne zakłócające działanie innych urządzeń lub systemów; wyładowania elektrostatyczne na skutek elektryzowania się łopat wykonanych z tworzyw (tarcie) również mogą generować zakłócenia
- zakłócenia bierne – tłumienie, odbijanie i rozpraszanie fal elektromagnetycznych.

Dostępna literatura na temat wpływu zakłóceń aktywnych wytwarzanych przez turbiny (np. [13], [16]) stwierdza, że występują one w zakresie niskich częstotliwości (praktycznie do ok. 200 MHz) i nie są istotne dla pracy innych systemów i urządzeń znajdujących się w odległości powyżej 1 km od turbin.

Zakłócenia bierne mogą być sklasyfikowane następująco:

- zaburzenia w polu bliskim anteny
- odbicie i rozpraszanie
- przesłanianie i dyfrakcja.

Z pierwszym rodzajem zakłóceń mamy do czynienia w przypadku, gdy przedmioty przewodzące znajdują się w strefie bliskiej anteny. Rozmiar tej strefy zależy od rozmiarów liniowych anteny oraz długości fali [21]. Obiekty przewodzące zmieniają rozkład pól w strefie bliskiej, co wpływa na zmianę parametrów anten (charakterystyka promieniowania, zysk energetyczny czy impedancja wejściowa). Obliczenie takich zmian jest trudne i wymaga dokładnej znajomości otoczenia wokół anteny oraz specjalistycznego oprogramowania do symulacji pól elektromagnetycznych. Podstawową metodą uniknięcia tego typu zakłóceń jest zapewnienie wolnej strefy bliskiej wokół anten.

Metalowy maszt lub wieża, metalowe elementy w gondoli oraz łopaty śmigła z tworzywa (w zdecydowanie mniejszym stopniu odbijające sygnał, nawet jeśli wzdłuż łopat są prowadzone metalowe przewody odgromowe) są w stanie odbijać i rozpraszać fale radiowe w różnych kierunkach. Mamy wtedy do czynienia ze zjawiskiem wielodrogowości.

Zjawisko rozpraszania i odbicia zależy od materiału, z jakiego wykonane są przedmioty odbijające, pola powierzchni i kształtu tych przedmiotów, wzajemnego usytuowania względem siebie anteny nadawczej, odbiorczej i przedmiotu odbijającego, charakterystyk promieniowania anteny nadawczej i odbiorczej, częstotliwości i prędkości obrotowej śmigła. Zjawisko wielodrogowości sprawia, że

do anteny odbiorczej docierają dwa promienie: bezpośredni z anteny nadawczej i odbity od turbiny. Sygnał odbity jest w tym przypadku traktowany jako zakłócenie.

Przesłanianie i dyfrakcja fal występuje, gdy przeszkoda wchodzi bezpośrednio w wiązkę fali rozchodzącej się między anteną nadawczą a odbiorczą. Przeciwdziałanie polega w tym wypadku na zapewnieniu czystości 1. strefy Fresnela [5, 11, 21, 22, 23].

2.3. Wpływ turbin na linie radiowe

Jak wspomniano, zakłócenia aktywne są wytwarzane do ok. 200 MHz, zatem nie stanowią one bezpośredniego zagrożenia dla łączy mikrofalowych. Istnieje natomiast potencjalne ryzyko zakłóceń pola w strefie bliskiej anteny. Przykładowo dla częstotliwości 23 GHz i przy typowych antenach wykorzystywanych w tym zakresie (średnica 0,6 – 1,2 m) strefa ta rozciąga się do ok. 50 – 220 m. Jeśli chodzi o odbicia i rozpraszanie, to falę odbitą traktujemy jako sygnał zakłócający. Antena nadawcza może wysłać w stronę turbiny sygnał. Ze względu na bardzo dużą kierunkowość anten mikrofalowych sygnał ten jest tłumiony względem kierunku maksymalnego promieniowania. Tłumienie jest tym większe, im większy kąt tworzą linia bezpośredniej widoczności anten oraz linia łącząca antenę nadawczą z turbiną (przeszkodą odbijającą). Podobny mechanizm tłumienia występuje w przypadku anteny odbiorczej, do której odbity sygnał dociera pod pewnym kątem względem kierunku maksymalnego promieniowania. Istnieje ryzyko, że sygnał odbity będzie miał na tyle duży poziom, iż uniemożliwi prawidłową pracę łącza. Przeciwdziałanie zakłóceniom tego typu polega na zmianie anten na typy o większym zysku energetycznym oraz zmianie lokalizacji turbiny lub prześła trasy (nowe łącza). Zakłócenia dyfrakcyjne są powodowane przesłanianiem wiązki fal radiowych przez przeszkodę oraz uginaniem się fali na krawędzi przeszkody. Jeśli turbina (maszt lub obracające się łopaty) znajdzie się w obszarze 1. strefy Fresnela, może to spowodować ciągłe lub okresowe zaniki sygnału. Środki zaradcze mają na celu utrzymanie 1. strefy Fresnela wolnej od przeszkód (zmiana wysokości zawieszenia anten, dodatkowa stacja przekątnikowa, zmiana lokalizacji turbiny).

2.4. Wpływ na odbiór TV analogowej

Turbiny wiatrowe mogą powodować kłopoty z odbiorem analogowego sygnału TV. Zakłócenia aktywne mogą być wytwarzane w bezpośredniej bliskości turbin (do 1 km) i zakłócać pracę niższych kanałów TV (pasmo III — do kanału 9., podobnie jak systemy radiodfuzyjne AM czy sygnały czasu i częstotliwości na falach długich).

Na wartość zakłóceń biernych wpływa odległość turbin do anteny nadawczej i odbiorczej, częstotliwość i polaryzacja sygnału, typ i parametry anteny odbiorczej oraz materiał, z którego wykonano wieżę i łopaty śmigła. Bezpośrednia obecność turbiny w pobliżu anteny nadawczej oznacza powstanie silnego, wtórnego źródła promieniowania. Pole pochodzące z tego źródła sumuje się z polem z anteny nadawczej, powodując zaburzenia charakterystyki promieniowania i osłabienie sygnału w niektórych kierunkach. Obracające się łopaty śmigła mogą powodować okresowe zaburzenia pola o częstotliwości wyznaczonej prędkością obrotową wiatraków (typowo od 8 do 20 ob-

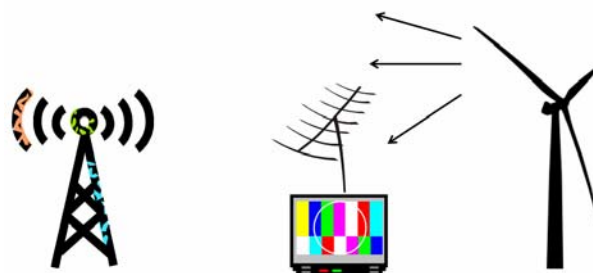
r/min). Zaburzenia te mogą objawiać się jako wahania jasności obrazu (identyczne z zakłóceniami wywoływany- mi przez nisko lecący samolot). W literaturze [7, 24] można znaleźć wskazówkę, że ten rodzaj zakłóceń jest nieistotny, jeśli turbiny znajdują się w odległości co najmniej 1 km od anten nadawczych stacji retransmisyjnych TV (z reguły niżej zawieszonych) lub 6 km od anten dużych centrów nadawczych.

Metalowa konstrukcja wieży może blokować (silnie tłumić) fale radiowe, jeśli znajduje się bezpośrednio na linii antena nadawcza – antena odbiorcza. Tłumienie jest bardzo duże w bezpośredniej bliskości turbiny (do ok. 100 m od anteny odbiorczej) i dla wież litych. Maszty ażurowe tłumią sygnał w nieznacznym stopniu. W odległości ponad 100 m za masztem lub wieżą pole elektromagnetyczne ulega regeneracji. Tłumienie jest najbardziej dokuczliwe na granicy zasięgu nadajnika (natężenie pola w pobliżu wartości chronionej).

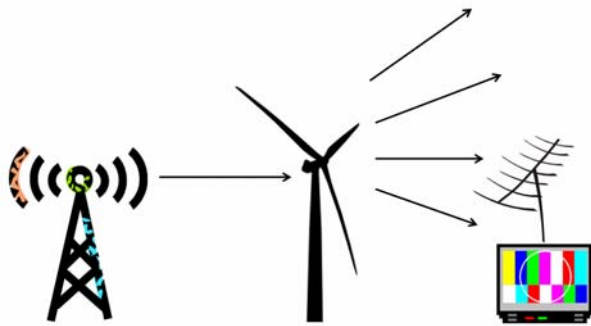
Sposobem przeciwdziałania skutkom tłumienia sygnału może być nakierowanie anteny na inny nadajnik (jeśli to możliwe), zastosowanie anten o większym zysku energetycznym, zastosowanie wzmacniacza antenowego, podwyższenie wysokości anteny odbiorczej, zastosowanie przemienników małej mocy, a w skrajnych przypadkach przejście na bezpośredni odbiór satelitarny lub instalacja sieci TV kablowej.

Odbicie od nieruchomych elementów przewodzących sprawia, że do anteny odbiorczej fala dociera co najmniej dwiema drogami. Sygnał opóźniony jest również wyświetlany na ekranie, wywołując tzw. odbicia („zjawy”), których może być nawet kilka (tyle, ile jest dróg sygnału odbitego). Odbicia są tym bardziej dokuczliwe, im większe jest opóźnienie wynikające z różnicy dróg między sygnałem bezpośrednim a sygnałem odbitym. Jeśli założymy, że różnica ta wynosi 300 m, oznacza to opóźnienie sygnału o 1 μ s. Przy ekranie o przekątnej 24" szerokość ekranu wynosi ok. 48 cm. Jedna linia obrazu przebiega tę drogę w 56 μ s, co oznacza, że odbicie będzie przesunięte na ekranie o ok. 8-9 mm. Tego typu zakłócenia mogą być zredukowane poprzez zastosowanie anten odbiorczych o zwiększonej kierunkowości i stosunku F/B (obniżenie poziomu wiązek bocznych i wstecznych).

Ostatni rodzaj zakłóceń jest spowodowany odbiciem i rozpraszaniem sygnału od łopat śmigła. Wyróżnia się jego dwa podrodzaje [20]: rozpraszanie wsteczne, gdy turbina znajduje się na linii łączącej nadajnik i odbiornik, ale za odbiornikiem (rys. 1) i rozpraszanie do przodu, gdy turbina znajduje się między nadajnikiem i odbiornikiem (rys. 2).



Rys. 1. Rozpraszanie wsteczne



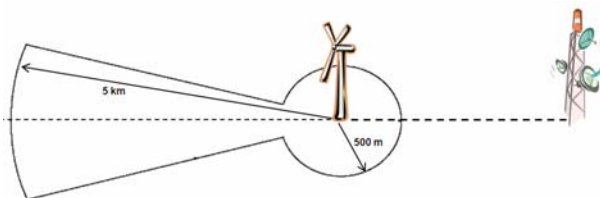
Rys. 2. Rozpraszanie do przodu

Przy rozpraszaniu wstecznym sygnał z nadajnika TV jest odbijany od łopat śmigła i dociera do odbiornika z inną amplitudą i fazą (opóźnienie) niż sygnał bezpośredni. Zakłócenie objawia się jako okresowo zmieniające się odbicie. Zastosowanie wzmacniacza odbieranego sygnału nie pomaga w tej sytuacji.

Zakłócenia tego typu występują w odległości do 500 m wokół turbiny [9, 20], a więc w bezpośredniej jej bliskości. Można wtedy zmniejszyć zakłócenia poprzez zmianę anteny na model o wyższym stosunku F/B.

Rozpraszanie do przodu pojawia się przy rozpraszaniu sygnału w stronę anteny odbiorczej i objawia się jako okresowe tłumienie sygnału („zjawy” na ekranie są w tym przypadku znacznie słabsze). Tłumienie powodowane przez turbiny może dochodzić do 8 dB [16]; w przypadku łopat wykonanych z włókien węglowych wartość ta jest mniejsza. Łopaty wykonane z GRP w najmniejszym stopniu powodują tłumienie sygnału. Jest to dobry dielektryk niewprowadzający tłumienia w zakresie fal TV, jednak różnica względnej przenikalności elektrycznej powietrza i tego materiału sprawia, że odbicie fal występuje i osłabia sygnał docierający do anteny odbiorczej.

Tłumienie wprowadzone przez obracające się śmigła może powodować wahania jasności obrazu (zakłócenia dźwięku nie występują). Do pewnego stopnia wahania poziomu odbieranego sygnału są kompensowane w obwodzie automatycznej regulacji wzmacnienia (ARW) odbiornika TV. Dokładna analiza zjawiska przeprowadzona w [20] wskazuje, że sygnał TV doznaje dodatkowej modulacji impulsowej amplitudy, która nie może być w pełni skompensowana przez obwody ARW. Obszar zakłóceń rozciąga się do 5 km za turbiną [9, 20] (rys. 3). Rozpraszanie do przodu może być tylko częściowo zredukowane podobnymi metodami jak przy tłumieniu sygnału przez wieżę.



Rys. 3. Obszar potencjalnych zakłóceń odbioru TV analogowej (kąt rozwarcia stożka 30...40 stopni)

2.5. Wpływ na odbiór TV cyfrowej

Zjawiska fizyczne występujące przy odbiorze TV cyfrowej są identyczne jak dla TV analogowej, jednak ich

wpływ na odbiór jest diametralnie inny. Ustawienie turbin w polu bliskim anten będzie powodować podobne zaburzenia pola elektrycznego jak dla TV analogowej. Nie będą one zauważalne tak długo, jak długo natężenie pola elektrycznego w punkcie odbioru będzie przez cały czas (uwzględniając obroty śmigła) powyżej wartości chronionej. Należy w tym miejscu zauważyć, że osłabienie sygnału analogowego prowadzi na początku do obniżenia jakości odbioru, który jeszcze długo jest możliwy. W przypadku sygnałów cyfrowych osłabienie sygnału o 0,5–1 dB poniżej wartości chronionej prowadzi do przerwy w odbiorze (zamrożenie obrazu). Jeśli zatem natężenie pola z nadajnika będzie bliskie wartości chronionej, powstałe zakłócenia będą bardziej zauważalne i dokuczliwe dla osób odbierających sygnał TV. Tłumienie sygnału przez wieżę nie będzie zauważalne, chyba że słumiony sygnał będzie poniżej wartości chronionej. Może w tym przypadku pomóc zastosowanie anten o wyższym zysku energetycznym lub wzmacniaczy sygnału.

Dzięki zastosowaniu modulacji COFDM wpływ odbić na jakość sygnału cyfrowego jest pozytywny w przeciwieństwie do odbioru TV analogowej. Odbicia (w tym powstające dzięki rozpraszaniu wstecznemu i do przodu) mogą poprawić jakość odbioru. Dzieje się tak do momentu, gdy opóźnienie sygnałów odbitych nie przekroczy tzw. odstępu ochronnego. Dla wartości tego odstępu przyjętej w Polsce oznacza to, że różnica dróg między sygnałem bezpośrednim i odbitym musi wtedy przekraczać 33,5 km.

Polska znajduje się w chwili obecnej na początku procesu cyfryzacji telewizji. Można bardzo ostrożnie założyć, że za co najmniej kilka lat emisja analogowa przestanie być wykorzystywana w radiodifuzji. W związku z tym ewentualne zakłócenia typowe dla TV analogowej nie będą w ogóle występować. Oznacza to, że wpływ turbin wiatrowych na TV cyfrową jest znacznie mniejszy.

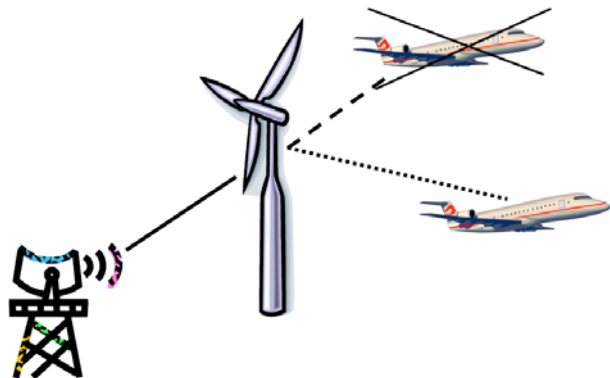
2.6. Telefonia komórkowa

Sygnały wykorzystywane w telefonii komórkowej są dość odporne na zakłócenia wywołane zjawiskiem wielodrogowości, dlatego odbicia od wież, gondoli i łopat śmigła nie powoduje kłopotów z łącznością. Kłopoty takie mogą wystąpić w bezpośredniej bliskości turbiny (do 100 m) na skutek przesłaniania fal ze stacji bazowej. Potencjalne problemy z łącznością mogą powstać również wtedy, jeśli turbina znajdzie się w strefie bliskiej anteny stacji bazowej, zmieniając jej parametry.

2.7. Systemy radiolokacyjne i radary pogodowe

Farmy wiatrowe stanowią poważny problem dla systemów radiolokacyjnych. Mogą one przesłaniać wiązkę wysłaną przez antenę i w efekcie powodować martwe strefy, w których częściowo lub całkowicie niemożliwe jest wykrycie lub śledzenie obiektu powietrznego (rys. 4). Odbicia od turbin mogą powodować występowanie echa od obiektów, które nie znajdują się na kierunku maksymalnego promieniowania anteny (zafalszowanie informacji o azymucie – rys. 4). Dyfrakcja fali na kilku turbinach również prowadzi do osłabienia fali padającej i odbitej oraz błędów w ustaleniu rzeczywistej pozycji obiektów. Efekt dyfrakcji jest tym silniejszy, im bliżej siebie stoją turbiny. Echa od wirujących łopat są szczególnie niepożądane przy

śledzeniu nisko poruszających się obiektów. Odbicie wiązki radaru od wirujących łopat może wywołać pojawienie się wielu fałszywych celów na ekranie radaru, które z kolei mogą przeciążyć procesor obsługujący wszystkie cele. W przypadku pogodowych radarów dopplerowskich energia odbijająca się od wirujących łopat może być zinterpretowana jako obszar burzowy lub z opadami deszczu.



Rys. 4. Wpływ turbiny na system radarowy

2.8. GPS

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że odbiór sygnałów GPS na farmie wiatrowej jest możliwy, natomiast należy się liczyć ze zmniejszeniem dokładności wyznaczania pozycji, jeżeli niektóre satelity zostaną przesłonięte przez turbiny. Przy korzystaniu z systemów różnicowych DGPS, w których sygnał z korektą pozycji jest nadawany przez nadajniki naziemne, w bezpośredniej bliskości turbin odbiór tych sygnałów może być niemożliwy.

3. OSZACOWANIE WPŁYWU TURBIN NA SYSTEMY RADIOKOMUNIKACYJNE

3.1. Uwagi ogólne

Ponieważ liczba farm wiatrowych gwałtownie rośnie, należy się liczyć z ich niekorzystnym wpływem na istniejące lub nowo budowane systemy radiokomunikacyjne. Z tego względu bardzo ważne staje się opracowanie metod pozwalających na ocenę tego wpływu i oszacowanie obszarów, na których może się on ujawnić. Każdy przypadek należy traktować indywidualnie. Możliwe wydaje się opracowanie zbioru prostych zasad i kryteriów (podobnie jak uczyniono to w Kanadzie [17]), mogących ułatwić pracę zarówno projektantom farm i systemów radiowych, jak i instytucjom takim jak Urząd Komunikacji Elektronicznej. Poniżej przedstawiono metody wykorzystywane do tego celu i opisane do tej pory w literaturze. Nieco dokładniej potraktowano linie radiowe i TV analogową.

3.1. Linie radiowe

Pierwszy krok oszacowania wpływu farmy polega na określeniu strefy bliskiej anten danego przęsła (wzór można znaleźć np. w [21]) i sprawdzeniu, czy turbiny nie znajdują się wewnątrz tej strefy. W drugim kroku należy sprawdzić, czy wiatraki nie przesłaniają 1. strefy Fresnela (sprawdzenie kryteriów przesłuwu [23]). W raporcie [1] znajduje się sugestia, by sprawdzać przesłonięcie 2. strefy Fresnela (bez wyjaśnienia, dlaczego tak należy postąpić, choć pewne przesłanki ku temu istnieją [22, 23]). Ochrona 2. strefy Fresnela jest nadmiarowa, zbyt zachowawcza i podnosi niepotrzebnie koszt przęsła. Ochronę wyłącznie 1.

strefy zalecają zarówno podręczniki radiokomunikacji, np. [5], [21], [22], monografie poświęcone projektowaniu linii radiowych [14, 19], międzynarodowe zalecenia ITU-R dotyczące projektowania linii radiowych [10] oraz raporty i zalecenia publikowane przez firmy zajmujące się projektowaniem systemów radiokomunikacyjnych, np. [16], [24] (w tym dokumencie dopuszcza się częściowe przesłanianie 1. strefy przez turbinę) czy [13].

W kolejnym kroku należy sprawdzić poziom zakłóceń docierający do anteny odbiorczej. Falę odbitą traktujemy jako sygnał zakłócający. Ocena wpływu turbin polega tu na oszacowaniu poziomu sygnału odbitego; jest to w ogólności trudne zadanie. Antena nadawcza wysyła w stronę turbiny sygnał, który się od niej odbija. Ze względu na bardzo dużą kierunkowość anten mikrofalowych sygnał ten jest stłumiony względem kierunku maksymalnego promieniowania. Z tego powodu można od razu pominąć analizę wpływu turbin, dla których kąt wypromieniowania i nadejścia fali (odpowiednio dla anteny nadawczej i odbiorczej) jest dostatecznie duży, by wywołać zakładane minimalne tłumienie sygnału odbitego.

W pierwszym przybliżeniu można by przyjąć, że fala odbija się w sposób idealny od turbiny (turbina stanowi wtedy idealną powierzchnię odbijającą). Przybliżenie to prowadzi jednak do bardzo dużego zawyżenia poziomu fali odbitej i nie odpowiada zjawiskom fizycznym zachodzącym na drodze tej fali. Metalowe powierzchnie odbijające (wieża, gondola, łopaty) nie są idealnie płaskimi płaszczyznami. Łopaty śmigła nie są zawsze wykonane z metalu, co znacznie redukuje współczynnik odbicia fal elektromagnetycznych. Ponadto płaszczyzna łopat jest skrzywiona i z tego względu łopaty raczej fale radiowe rozpraszają niż odbijają w kierunku anten. Dodatkowo powierzchnia odbicia łopat zmienia się w czasie obrotu śmigła, a sama gondola zmienia swoje położenie w zależności od kierunku wiatru. Metoda dokładna powinna zatem uwzględniać nieidealność powierzchni odbijających, a także dyfrakcję na przeszkodach (jeśli występuje, wnosi dodatkowe tłumienie) na trasie fali bezpośredniej i odbitej. Turbina stanowi tu wtórne źródło promieniowania, w którym zaindukowały się prądy wytworzone przez falę wysłaną przez antenę nadawczą. Podstawowym równaniem wykorzystywanym w tym przypadku jest tzw. równanie radarowe [22] dla radaru bistatycznego. Zawiera ono parametr zwany skuteczną powierzchnią odbicia (SPO) obiektu, będący powierzchnią w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku fali oświetlającej, która w przypadku idealnego, izotropowego odbicia całej energii na nią padającej wytworzyłaby taką samą zastępczą moc promieniowaną izotropowo jak moc wytwarzana przez obiekt rzeczywisty. SPO zależy od kąta oświetlenia przedmiotu od strony anteny nadawczej oraz kąta odbicia w stronę anteny odbiorczej, długości fali i jej polaryzacji, materiału, z jakiego wykonano przedmiot i od pola jego powierzchni. Obliczenie SPO jest bardzo trudne. Oprócz odpowiedniego oprogramowania konieczne są dokładne informacje o geometrii przedmiotu i materiale (materiałach), z jakiego został wykonany. Powyższa metoda obliczeń jest wykorzystywana w raportach [12, 15, 24].

W literaturze można znaleźć nieliczne informacje z wynikami obliczeń i pomiarów SPO turbin. Raport [1] podaje typową wartość SPO równą 15 m^2 , przy czym turbiny

produkowane 20 lat temu miały łopaty wykonane z metalu. Późniejszy raport [18] zawiera wyniki pomiarów, jednak są one wykonane dla częstotliwości ok. 1,5 GHz i obciążone dość dużą niepewnością (co przyznają sami autorzy tego raportu). Otrzymane tam wartości są prawdopodobnie znacznie zawyżone i nie zostały nigdzie potwierdzone w innych źródłach. Oprócz tego nic nie wiadomo o materiale, z jakiego wykonane zostały łopaty śmigieł mierzonych wówczas turbin.

Bardziej wiarygodny jest artykuł [11]. Dla dużych częstotliwości można założyć, że SPO jest równa polu przekroju elementów metalowych turbiny (maszt) — jest to najgorszy przypadek. W praktyce wiązka mikrofal nie musi obejmować całego wiatraka i odbija się tylko od jego części, co dodatkowo zmniejsza moc fali odbitej. Obliczona w powyższy sposób SPO jest porównywalna z wartościami uzyskanymi w [11]. Wartości SPO uzyskane na podstawie pomiarów podaje też raport [15].

W referacie [6] kwestionuje się przydatność zastosowania SPO i równania radarowego do oszacowania wpływu farm wiatrowych. Powodem jest niespełnienie warunku znajdowania się anteny w strefie dalekiej wiatraka traktowanego jako wtórne źródło promieniowania (minimalne odległości wahają się od 40 km do nawet kilku tysięcy km). Mimo tych zastrzeżeń SPO jest powszechnie zalecanym parametrem do tego typu obliczeń, np. w raportach [4, 12, 15].

Minimalna wartość stosunku mocy fali nośnej do mocy zakłóceń C/I wynika z zastosowanego schematu modulacji i przepływności binarnej łącza. Można ją określić na podstawie danych technicznych urządzeń nadawczo-odbiorczych. Można również skorzystać z normy europejskiej EN 302 217-2-2 [3].

W przypadku, gdy łącze może być przesłaniane, należy rozważyć podwyższenie zawieszenia anten, budowę stacji przekątnikowej lub wybór innej lokalizacji stacji dla nowo budowanych przeseł. W przypadku zakłóceń wywołanych odbiciami w pewnym stopniu może pomóc wymiana anteny na typ o większym zysku energetycznym. Radykalnym środkiem jest zmiana położenia wiatraka.

3.3. TV analogowa

Sprawdzenie dla systemu TV analogowej rozpoczynamy od weryfikacji położenia anten nadawczych względem farmy wiatrowej (strefa bliska). Uwzględnianie zakłóceń odbioru TV analogowej wywołanej odbiciami omawia Zalecenie ITU-R [9] oraz artykuł [20]. Opisane tam metody są dość czasochłonne i wymagają dodatkowego oprogramowania. Dostępna literatura wskazuje, że określenie potencjalnie zakłócanych obszarów z wykorzystaniem obliczeń wg wspomnianych metod nie zawsze daje dokładne i wiarygodne wyniki. Można jednak opracować prostą i skuteczną metodologię określania takich obszarów korzystając ze wskazówek zawartych w [9] oraz [20]. Wystarczy mianowicie wyznaczyć maksymalne obszary zakłócanie z rys. 3 dla każdej z turbin (okrąg o promieniu 500 m wokół turbiny uzupełniony o wycinek koła o promieniu 5 km). Obszary te należy umieścić na linii łączącej nadajnik dominujący dla danego terenu z każdą turbiną. Wyznaczone w ten sposób obszary należy skorelować z mapami wskazującymi obszary zabudowane. Część wspólna powstała po nałożeniu obu map wskaże potencjalne

obszary zakłóceń analogowego odbioru TV. Należy też wykonać mapę zasięgu użytecznego z nadajnika w celu stwierdzenia, czy na obszarach zamieszkałych w bezpośrednim sąsiedztwie turbin natężenie pola elektrycznego przekracza wartość chronioną pola. We wcześniejszej wersji raportu [17] można znaleźć wzór na promień obszaru zakłóconego, który zależy od długości łopat śmigła i liczby wiatraków na farmie:

$$R = 0,051 \times B \times \sqrt{T}$$

gdzie R [km] jest promieniem strefy zakłóceń licząc od środka farmy, B [m] długością jednego śmigła, a T liczbą wiatraków na farmie.

Środki zaradcze przeciw zakłóceniom odbioru opisano w punkcie 2.4. Radykalnym sposobem ograniczenia zakłóceń jest zmiana lokalizacji turbin.

Ze względu na bardzo duży opór społeczny przeciw budowie wiatraków zdecydowanie zaleca się wykonanie pomiarów propagacyjnych odbioru TV (natężenie pola elektrycznego zgodnie z Zaleceniem ITU-R SM.378 na wysokości 10 m i subiektywna jakość odbioru) w kilku lokalizacjach (głównie obszary zamieszkałe) przed postawieniem wiatraków, a następnie po ich budowie. Pomiarów stanowić będą obiektywny dowód braku zakłóceń w odbiorze TV lub ich wystąpienia oraz mogą pomóc w odrzuceniu ewentualnych roszczeń ludności dotyczących zadośćuczynienia za rzekomo pogorszony odbiór. Procedura pomiarów propagacyjnych przed i po budowie farm wiatrowych jest standardowo wykonywana np. w USA.

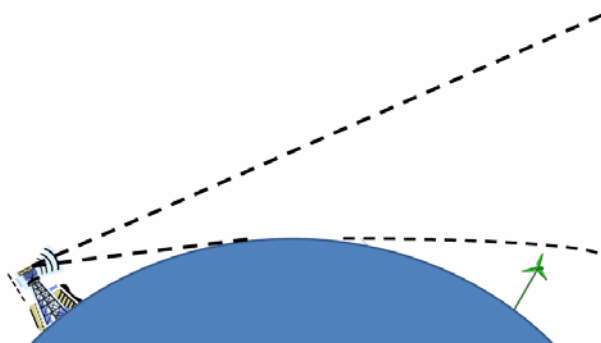
3.4. TV cyfrowa

Ponieważ dominującym mechanizmem powodującym zakłócenia jest bezpośrednie tłumienie sygnału (cień radiowy) przez konstrukcję wieży, można dla uproszczenia założyć do analizy, że obszar potencjalnych zakłóceń ma postać koła o promieniu 200 m oraz środkiem umieszczonym w punkcie posadowienia wieży. Jeśli wewnątrz tak powstałych okręgów znajdują się obszary zabudowane, w których potencjalnie mogą znajdować się anteny do odbioru TV (głównie po stronie wiatraka przeciwnej do posadowienia nadajnika), obszary te należy uznać za potencjalnie zagrożone. Dodatkowo należy nałożyć mapkę zasięgów nadajnika TV. Warto rozważyć też pomiary propagacyjne przed i po budowie farmy.

3.5. Systemy radiolokacyjne

Podstawową metodą jest zapewnienie bezpośredniej widoczności obiektu przez antenę radaru. Oznacza to przede wszystkim jak najdalsze odsunięcie farm od lokalizacji radarów (co najmniej kilkadziesiąt km), co jest szczególnie ważne w pobliżu lotnisk. Czasem możliwe jest częściowe przesłonięcie turbin przez naturalne przeszkody terenowe (rys. 5, zmniejsza to jednak przestrzeń skanowania wiązki). Każdy przypadek budowy farmy musi być indywidualnie badany w konkretnej lokalizacji. Sporo wysiłku kieruje się na wykonanie turbin w taki sposób, aby zmniejszyć ich SPO (technologia „stealth”). Rozważane jest też utrzymanie stałej łączności telemetrycznej między farmą a stacją radarową (powiadamanie o zmianie konfiguracji przestrzennej). Chodzi tu przede wszystkim o uwzględnienie odbić od wirujących łopat śmigła (echa stałe są dobrze wytłumione w typowym radarze). Modyfikuje się również

same radary (cyfrowe przetwarzanie sygnałów – sygnatury turbin, lepsze układy i algorytmy tłumienia echa stałych, algorytmy śledzenia, zwiększenie częstotliwości powtarzania impulsów, krótsze impulsy), rozmieszcza tzw. gap fillery, które redukują martwe strefy lub oświetla ten sam obszar z kilku stron, redukując martwe strefy.



Rys. 5. Przesłonięcie wiązki radarowej przez Ziemię

3.6. Telefonía komórkowa

W przypadku systemów telefonii komórkowej podstawowym krokiem jest sprawdzenie, czy wiatrak nie będzie znajdował się w strefie do 1 km od anteny

4. WNIOSKI

Elektrownie wiatrowe mogą mieć niekorzystny wpływ na systemy radiokomunikacyjne. Aby uniknąć konfliktów między operatorami i użytkownikami tych systemów a właścicielami elektrowni, istnieje potrzeba opracowania metod i kryteriów oszacowania wpływu farm w Polsce. Byłyby one pomocne projektantom farm i nowych systemów radiowych oraz operatorom już istniejących systemów, a także UKE.

SPIS LITERATURY

- [1] Bacon D.F., *A proposed method for establishing an exclusion zone around a terrestrial fixed radio link outside of which a wind turbine will cause negligible degradation of the radio link performance*, October 2002.
- [2] Brenner M. i inni, *Wind Farms and Radar*, JASON, The MITRE Corporation, 2008.
- [3] ETSI EN 302 217-2-2 v.1.4.1, *Fixed Radio Systems; Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas; Part 2-2: Digital systems operating in frequency bands where frequency coordination is required*, ETSI 2010.
- [4] EUROCONTROL, *Guidelines on How to Assess the Potential Impact of Wind Turbines on Surveillance Sensors European Organisation for the Safety of Air Navigation*, 2009.
- [5] Freeman R. L., *Radio System Design for Telecommunications (1 – 100 GHz)*, wyd. 2., New York, John Wiley & Sons 1997.
- [6] Greving G., Biermann W., *Application of the Radar Cross Section RCS for Objects on the Ground - Example of Wind Turbines*, Int. Radar Symposium, Wrocław 2008.
- [7] Hall S.H., *The Assessment and Avoidance of Electromagnetic Interference due to Windfarms*, Wind Engineering, Vol. 16 No. 6, 1992, str. 326-338.
- [8] Howard M., Brown C., *Results of the electromagnetic investigations and assessments of marine radar, communications and positioning systems undertaken at the North Hoyle wind farm by QinetiQ and the Maritime and Coastguard Agency*, QINETIQ/03/00297/1.1, 2004.
- [9] ITU-R Recommendation BT.805 *Assessment of impairment caused to television reception by a wind turbine*, Genewa, ITU 1992.
- [10] ITU-R Recommendation P.530-13, *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*, Genewa, ITU 2009.
- [11] Kent M.B, Kueichien C.H i inni, *Dynamic Radar Cross Section and Radar Doppler Measurements of Commercial General Electric Windmill Power Turbines Part 1: Predicted and Measured Radar Signatures*, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 50, No. 2, April 2008, str. 211-219.
- [12] Lemmon J., Carol J. i inni, *Assessment of the Effects of Wind Turbines on Air Traffic Control Radars*, National Telecommunications and Information Administration Technical Report TR-08-454, U.S. Department of Commerce, 2008.
- [13] Leonard J. Koehnen and Associates, Inc. Consulting Engineers, *Wind Farms and Their Effect on Public Safety Radio Systems*, White Paper, Saint Paul 2005.
- [14] Manning T., *Microwave Radio Transmission Design Guide*, London, Artech House 1999.
- [15] Office of the Director of Defence Research and Engineering, *The Effect of Windmill Farms on Military Readiness*, The Report to the Congressional Defence Committees, U.S. Department of Defence, 2006.
- [16] Polisky E.L., *Identifying and Avoiding Radio Frequency Interference for Wind Turbine Facilities*, White Paper, COMSEARCH, An Andrew Company, Bulletin TP-100321-EN (03/05), Andrew Corporation 2005.
- [17] Radio Advisory Board of Canada, *Technical Information and Coordination Process Between Wind Turbines and Radiocommunication and Radar Systems*, 2010. (www.rabc-cccr.ca/publications.cfm?p=publications)
- [18] Randhawa B.S., Rudd R., *RF Measurement Assessment of Potential Wind Farm Interference to Fixed Links and Scanning Telemetry Devices*, Final Report for Ofcom, Era Technology Ltd., March 2009.
- [19] Rasiukiewicz M., Leśnicki A., *Podstawy systemów horyzontowych linii radiowych*, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1983.
- [20] Sengupta D.L., Thomas B.A., *Electromagnetic Interference to Television Reception Caused by Horizontal Axis Windmills*, Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No 8, August 1979, str. 1333-1142.
- [21] Szóstka J., *Fale i anteny*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [22] Szóstka J., *Mikrofałe. Układy i systemy*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- [23] Szóstka J., *Projektowanie horyzontowych linii radiowych*, Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.
- [24] Sustainable Energy Australia Pty Ltd., *The Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Field Implications for Wind Farming in Australia*, May 2004.