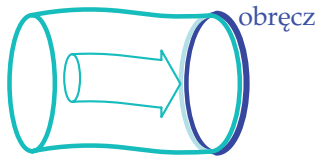


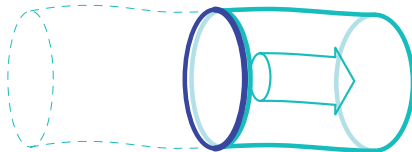
B Wiatr

Fizyka energii z wiatru

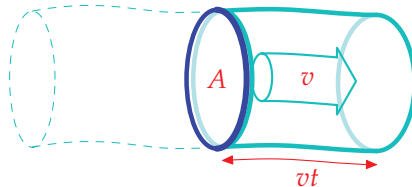
By oszacować potencjał energetyczny wiatru, wyobraźmy sobie, że obręcz o powierzchni A wystawiamy na wiatr o prędkości v . Rozważmy, jaka masa powietrza przemieści się przez obręcz w ciągu sekundy. Oto ilustracja masy powietrza na chwilę przed przepłynięciem przez obręcz:



A oto ilustracja tej samej masy powietrza sekundę później:



Masa tego wycinka powietrza jest iloczynem jego gęstości ρ , powierzchni A i długości, którą otrzymujemy, mnożąc v przez t , gdzie $t = 1$ sekunda.



Energia kinetyczna tego wycinka powietrza wynosi:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Avtv^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3 \quad (\text{B.1})$$

Stąd też moc wiatru przypadająca na powierzchnię A , czyli energia kinetyczna przepływająca przez tę przestrzeń na jednostkę czasu, wynosi:

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (\text{B.2})$$

To równanie wygląda dziwnie znajomo – taki sam wzór wyprowadziliśmy na str. 271, kiedy omawialiśmy wymogi energetyczne samochodu w ruchu.

Jaka jest typowa prędkość wiatru? W dni wietrzne rowerzysta rzeczywiście odczuwa kierunek wiatru – kiedy wieje w plecy, może przemieszczać się znacznie szybciej niż zazwyczaj. Prędkość takiego wiatru jest więc porównywalna z przeciętną prędkością rowerzysty, która wynosi mniej

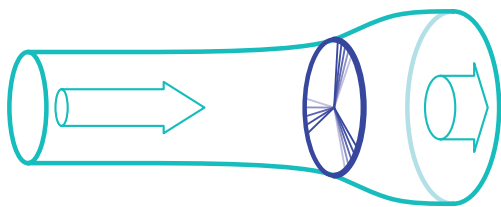


Znów posługuję się wzorem:

masa = gęstość \times objętość

mile/ godzina	km/h	m/s	skala Beauforta
2,2	3,6	1	siła 1
7	11	3	siła 2
11	18	5	siła 3
13	21	6	siła 4
16	25	7	
22	36	10	siła 5
29	47	13	siła 6
36	58	16	siła 7
42	68	19	siła 8
49	79	22	siła 9
60	97	27	siła 10
69	112	31	siła 11
78	126	35	siła 12

Tabela B.1. Prędkości



Rys. B.2. Przepływ powietrza przez wiatrak. Wiatrak spowalnia pęd powietrza i je rozprasza.

więcej 21 km na godzinę (6 metrów na sekundę). W Cambridge rzadko wieje tak mocno. Niemniej jednak przyjmijmy to jako wartość typową dla Wielkiej Brytanii (mając na uwadze, że może być konieczne zrewidowanie tych rachunków).

Gęstość powietrza wynosi około $1,3 \text{ kg/m}^3$ (zazwyczaj zaokrąglam to do 1 kg/m^3 , co łatwiej zapamiętać, ale tutaj tego nie robię). Stąd typowa moc wiatru na metr kwadratowy obręczy wynosi:

$$\frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} 1,3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.3})$$

Wiatrak nie może wychwycić całej tej energii. Wprawdzie niezgorzej spowalnia ruch powietrza, ale musi zostawić powietrzu nieco energii kinetycznej. W przeciwnym razie owo spowolnione powietrze stanęłoby i zahamowało pracę wiatraka. Rys. B.2 ilustruje faktyczny przepływ powietrza przez wirnik wiatraka. Maksymalny odsetek energii wchodzącej, który może pochwytać wirnik w kształcie dysku, został obliczony przez niemieckiego fizyka Alberta Betza w 1919 roku. Jeżeli prędkość wiatru wychodzącego wynosi $1/3$ prędkości wiatru wchodzącego, to wychwycona moc wynosi $16/27$ całkowitej mocy wiatru. $16/27$ to $0,59$. Załóżmy, że wiatraki mogą mieć sprawność 50% . W rzeczywistości wiatraki są projektowane do określonych prędkości wiatru – jeżeli prędkość wiatru znacznie przekracza prędkość idealną, turbinę trzeba wyłączyć.

Dla przykładu przyjmijmy średnicę wiatraka $d = 25 \text{ m}$ i wysokość piasty 32 m , co w zasadzie odpowiada rozmiarom samotnego wiatraka górującego nad Wellington w Nowej Zelandii (fot. B.3). Moc pojedynczego wiatraka wynosi:

współcz. efektywności \times moc na jedn. powierzchni \times powierzchnia

$$= 50\% \times \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{B.4})$$

$$= 50\% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4} (25 \text{ m})^2 \quad (\text{B.5})$$

$$= 34 \text{ kW} \quad (\text{B.6})$$

Kiedy oglądałem ten wiatrak pewnego bardzo wietrznego dnia, faktyczna produkcja wynosiła 60 kW .

By oszacować, na ile energii z wiatru możemy liczyć, musimy zdecydować, jak duże mają być nasze wiatraki i jak blisko siebie staną.

Jak gęsto da się rozmieścić wiatraki? Jeśli staną zbyt gęsto, to wiatraki na nawietrznej pozbawią wiatru wiatraki na zawietrznej. Eksperci twierdzą, że wiatraki powinny dzielić co najmniej pięciokrotność ich średnicy, inaczej znacznie stracą na mocy.



Fot. B.3. Wiatrak Brooklyn powyżej Wellington w Nowej Zelandii, z ludźmi u podnóża dla pokazania skali. W wietrzne dni wiatrak produkuje 60 kW (1400 kWh dziennie).

Fot. Philip Banks

Przy takim rozmieszczeniu, moc generowana przez wiatraki na jednostkę powierzchni wyniesie:

$$\frac{\text{moc na wiatrak (B.4)}}{\text{powierzchnia terenu na wiatrak}} = \frac{\frac{1}{2}\rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} \quad (\text{B.7})$$

$$= \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{B.8})$$

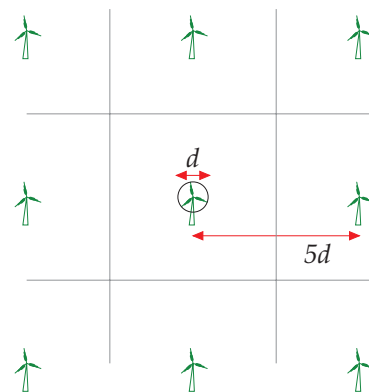
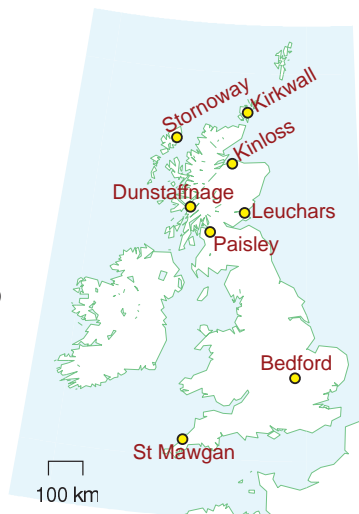
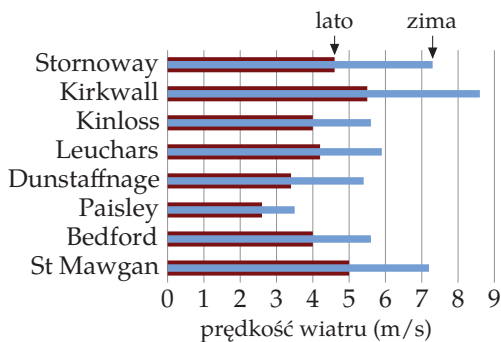
$$= 0,016 \times 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.9})$$

$$= 2,2 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.10})$$

Warto zapamiętać tę liczbę – farma wiatrowa przy prędkości wiatru 6 m/s wytwarza 2 W mocy na 1 m² powierzchni łądu. Zauważ, że nasz wynik nie zależy od średnicy wiatraka. Wartości d się zniósły, ponieważ większe wiatraki muszą być stawiane dalej od siebie. Większe wiatraki to może dobry pomysł, bo pochwyć większe prędkości wiatru (im wyższy wiatrak, z tym większą prędkością wiatru ma do czynienia) lub z uwagi na ekonomię skali. To jednak jedyne powody, by preferować duże wiatraki.

Nasze szacunki w istotnym stopniu zależą od założonych prędkości wiatru. Czy słusznie zakładamy 6 m/s jako długookresową typową prędkość wiatru w wietrznych rejonach Wielkiej Brytanii? Rysunki 4.1 i 4.2 ilustrowały prędkości wiatru w Cambridge i Cairngorm. Rys. B.6 pokazuje średnie prędkości wiatru zimą i latem w ośmiu innych miejscach w Wielkiej Brytanii. Obawiam się, że wartość 6 m/s jest przeszacowana dla większości kraju. Jeżeli zastąpimy 6 m/s przez 4 m/s notowane w Bedford, musimy obniżyć nasze szacunki, mnożąc je przez $(4/6)^3 \approx 0,3$ (pamiętajmy, że moc z wiatru rośnie proporcjonalnie do sześcianu prędkości wiatru).

Z drugiej strony, by oszacować typową moc, nie powinniśmy podnosić do sześcianu średniej prędkości, ale wyznaczyć średni sześcian prędkości wiatru. Średni sześcian jest większy niż sześcian ze średniej. Jeżeli jednak wdamy się w szczegóły, pojawią się komplikacje, bo prawdziwe turbiny wcale nie dostarczają mocy proporcjonalnej do sześcianu prędkości.



Rys. B.4. Rozplanowanie farmy wiatrowej

MOC NA JEDN. POWIERZCHNI

farma wiatrowa 2 W/m²
(prędkość 6 m/s)

Tabela B.5. Warto zapamiętać! Farmy wiatrowe w liczbach

Rys. B.6. Średnie prędkości wiatru latem (ciemny pasek) i zimą (jasny pasek) w ośmiu miejscach w Wielkiej Brytanii. Prędkości mierzone na standardowej dla pomiarów meteorologicznych wysokości 10 metrów. Średnie obejmują lata 1971–2000.

Zazwyczaj mają zakres prędkości wiatru, w ramach którego dostarczają optymalnej mocy. Przy prędkościach wyższych lub niższych zmniejsza się moc dostarczona.

Zmiany prędkości wiatru wraz z wysokością

Wyższe wiatraki są wystawione na działanie wiatru o większej prędkości. Sposób, w jaki prędkość wiatru rośnie wraz z wysokością, nie jest prosty i zależy od ukształtowania (szorstkości) terenu i pory dnia. By dać pewne wyobrażenie, założmy, że podwojenie wysokości zazwyczaj wiąże się ze wzrostem prędkości wiatru o 10% i wzrostem mocy z wiatru o 30%.

Standardowe wzory opisujące prędkość v jako funkcję wysokości z są następujące:

1. Zgodnie ze wzorem gradientu (ścianania) wiatru Narodowego Laboratorium Energii Odnawialnej NREL [ydt7uk], prędkość jest funkcją potęgi wysokości:

$$v(z) = v_{10} \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha$$

gdzie v_{10} oznacza prędkość na 10 m, a wartość typowa wykładnika potęgi α wynosi 0,143 lub $1/7$. Prawo jednej siódmej ($v(z)$ jest proporcjonalne do $z^{1/7}$) i jest stosowane np. przez Elliotta i innych (1991).

2. Wzór gradientu wiatru Duńskiego Stowarzyszenia Przemysłu Wiatrowego (Danish Wind Industry Association) wygląda następująco [yaooanz]:

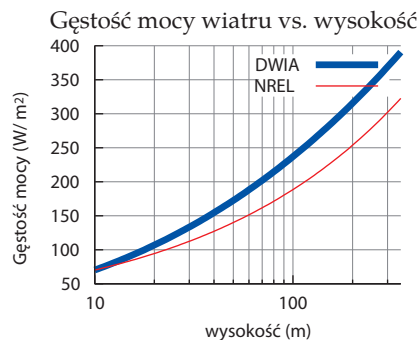
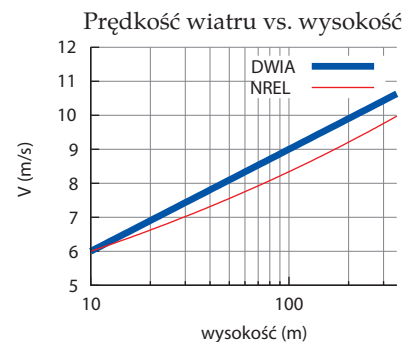
$$v(z) = v_{\text{ref}} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)}$$

gdzie z_0 to parametr zwany współczynnikiem szorstkości terenu, a v_{ref} to prędkość na wysokości referencyjnej z_{ref} , np. 10 m. Współczynnik szorstkości terenu dla typowego krajobrazu (obszar rolniczy z domostwami i zalesieniami śródpolnymi w półkilometrowych odstępach – klasa szorstkości 2) wynosi $z_0 = 0,1$ m.

W praktyce oba wzory gradientu wiatru dają zbliżony wynik. Nie oznacza to, że jest on zawsze prawidłowy. Van den Berg (2004) sugeruje, że nocą często mamy do czynienia z innymi profilami wiatru.

Standardowe właściwości wiatraków

W typowym współczesnym wiatraku wirnik o średnicy około 54 metrów jest osadzony na wysokości 80 metrów. Taka maszyna ma moc zainstalowaną 1 MW. Moc zainstalowana lub moc szczytowa to *maksymalna* produkcja energii w optymalnych warunkach. Zazwyczaj projektuje się wiatraki, które zaczynają się kręcić przy prędkościach wiatru między 3 a 5 m/s i stają w trakcie wichury (25 m/s). Rzeczywista generowana moc to moc zainstalowana pomnożona przez współczynnik opisujący ułamek czasu, kiedy warunki są zbliżone do optymalnych. Ten współczynnik, czasami nazy-



Rys. B.7. Góra: dwa modele obliczania prędkości i mocy wiatru jako funkcji wysokości. DWIA = Danish Wind Industry Association; NREL = National Renewable Energy Laboratory. W obu modelach na wysokości 10 m założono prędkość 6 m/s. W przypadku modelu duńskiego współczynnik szorstkości terenu ustalono na $z_0 = 0,1$ m. Dół: gęstość energetyczna (moc na jednostkę powierzchni pionowej) według poszczególnych modeli.



wany współczynnikiem obciążenia lub współczynnikiem wykorzystania mocy zainstalowanej, zależy od lokalizacji. Typowy współczynnik obciążenia dla dobrej lokalizacji w Wielkiej Brytanii wynosi 30%. W Holandii to 22%, a w Niemczech – 19%.

Fot. B.8. Turbina QR5 [quietrevolution.co.uk] nie wygląda jak typowy wiatrak.

Inne szacunki dotyczące mocy farm wiatrowych na jednostkę powierzchni

W analizie rządowej szacującej brytyjskie zasoby wiatru na lądzie [www.world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf] założono, że moc farm wiatrowych na jednostkę powierzchni wynosi góra 9 W/m^2 (moc zainstalowana, nie średnia produkcja). Jeżeli współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej wynosi 33%, wówczas średnia produkcja nie przekroczy 3 W/m^2 . Dla współczynnika 20% będzie to niecałe 2 W/m^2 .

London Array to farma wiatrowa na morzu planowana u ujścia Tamizy. Przy mocy zainstalowanej 1 GW ma to być największa farma *offshore* na świecie. Farma kosztująca 1,5 mld funtów składać się będzie z 271 turbin wiatrowych na obszarze 245 km^2 [6086ec] i będzie dostarczać średnio 3100 GWh energii rocznie (350 MW). Oznacza to moc na jednostkę powierzchni $350 \text{ MW}/245 \text{ km}^2 = 1,4 \text{ W/m}^2$. To mniej niż w przypadku innych farm na morzu – zapewne dlatego, że lokalizacja obejmuje wielki kanał (Knock Deep), który jest zbyt głęboki (około 20 m), by opłacało się stawiać tam turbiny.

Bardziej obawiam się tego, jak te plany [budowy London Array] zmienią nasz krajobraz i styl życia niż obawiałem się inwazji nazistów na nasze wybrzeża.

Bill Boggia, mieszkaniec Graveney,
gdzie będą wychodzić na ląd podwodne kable farmy wiatrowej.

Pytania i wątpliwości

A co z mikrogeneracją? Jeśli wrzucę sobie miniturbinę na dach, ile dostarczy energii?

Zakładając prędkość wiatru rzędu 6 m/s (a to, jak już wspominaliśmy, więcej niż średnia dla większości kraju) i średnicę 1 m , uzyskamy 50 W mocy. To $1,3 \text{ kWh}$ dziennie. Nie za dużo. W rzeczywistości na typowym terenie zurbanizowanym w Anglii mikroturbina dostarcza zaledwie $0,2 \text{ kWh}$ dziennie: patrz str. 76.

Bodaj najgorsze wiatraki na świecie stoją w japońskim Tsukuba – pożerają więcej energii niż produkują. Ich konstruktorzy zawstydzeni tym, że wiatraki nie pracują, napędzali je importowaną energią! [6bkvbn].

Przypisy i zalecana literatura

Numer strony:

- 280 **Maksymalny odsetek energii wchodzącej, który może pochwytać wirnik w kształcie dysku...** Ciekawy opis znajdziemy na stronie Danish Wind Industry Association. [yekdaa].
- 282 **Zazwyczaj projektuje się wiatraki, które zaczynają się kręcić przy prędkościach wiatru między 3 a 5 m/s.** [ymfbsn].
- 283 **typowy współczynnik obciążenia dla dobrej lokalizacji wynosi 30%.** W 2005 roku średni współczynnik obciążenia dla wszystkich dużych farm wiatrowych w Wielkiej Brytanii wyniósł 28% [ypvbvd]. Współczynnik obciążenia zmieniał się na przestrzeni roku i spadł do 17% w czerwcu i lipcu. W regionie o najlepszych warunkach wiatrowych – w Caithness, na Orkadach i Szetlandach – wyniósł 33%. Dla dwóch farm na morzu działających w 2005 roku wyniósł: 36% dla North Hoyle (wybrzeże Północnej Walii) i 29% dla Scroby Sands (okolice Great Yarmouth). Średni współczynnik obciążenia w 2006 roku dla dziesięciu regionów wynosił: Kornwalia 25%; Środkowa Walia 27%; Cambridgeshire i Norfolk 25%; Cumbria 25%; Durham 16%; Południowa Szkocja 28%; wyspy Orkady i Szetlandy 35%; pn.-wsch. Szkocja 26%; Irlandia Północna 31%; *offshore* 29%. [wbd8o].

Watson i in. (2002) twierdzi, że dla zapewnienia finansowej samowystarczalności energetyki wiatrowej wiatr musi mieć minimalną średnią prędkość roczną rzędu 7,0 m/s. Około 33% powierzchni Wielkiej Brytanii ma takie wiatry.



Fot. B.9. Mikroturbina Ampair o mocy zainstalowanej 600 W. Średnia energia generowana przez tą mikroturbinę w Leamington Spa wynosi 0,037 kWh dziennie (co odpowiada mocy 1,5 W).



Fot. B.10. Turbina Iskra o mocy 5 kW i rednicy 5,5 m [www.iskrawind.com] w trakcie dorocznego przeglądu. Ta turbina postawiona w Hertfordshire (a nie jest to najbardziej wietrzny zakątek Wielkiej Brytanii), o wysokości 12 m, ma średnią produkcję 11 kWh dziennie. Farma wiatrowa składająca się z wiatraków o takich osiąгах, rozstawionych na kwadratach 30 m na 30 m, miałyby moc na jednostkę powierzchni rzędu 0,5 W/m².