



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



NCBR
Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Odnawialne źródła energii

Ćwiczenia projektowe IV

Energia elektryczna

Microelektrownie wiatrowe

Materiały dydaktyczne dla studentów kierunku ELEKTROTECHNIKA

Opracował:

dr inż. Michał Łanczont

Lublin 2025 r.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.
Utwór dostępny jest na licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Międzynarodowe.

Projekt pn. „*POLLUB zieloną transformację*” realizowany jest w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus zgodnie z umową nr FERS.01.05-IP.08-0049/23-00.

Mikroelektrownie wiatrowe to niewielkie instalacje, które mogą zasilać gospodarstwa domowe lub małe zakłady w energię elektryczną, częściowo uniezależniając je od sieci. Wykorzystują one energię wiatru do napędzania wirnika, którego ruch obrotowy jest przekształcany w energię elektryczną przez generator. Dobór odpowiedniej turbiny wymaga uwzględnienia lokalnych warunków wiatrowych, parametrów technicznych urządzenia oraz zapotrzebowania na energię. Właściwa analiza zasobów wiatru i optymalny wybór turbiny pozwalają zwiększyć efektywność pracy instalacji i skrócić czas zwrotu inwestycji.

Turbina wiatrowa

Zasada działania turbiny wiatrowej opiera się na:

- Wiatr przepływa przez łopaty turbiny, powodując ich obrót dzięki sile nośnej (w turbinach profilowanych) lub sile oporu (w turbinach typu Savonius).
- Energia kinetyczna wiatru jest zamieniana na moment obrotowy wirnika.
- Wał wirnika napędza generator, który produkuje energię elektryczną.
- Energia jest przesyłana do odbiorników bezpośrednio lub magazynowana w akumulatorach, a w przypadku mikroinstalacji on-grid – oddawana do sieci.
- System sterowania optymalizuje pracę turbiny w zależności od prędkości wiatru, a przy zbyt silnym wietrze zatrzymuje wirnik, aby uniknąć uszkodzeń.

W mikroelektrowniach wiatrowych stosuje się przede wszystkim dwa główne typy turbin:

1. Turbiny o poziomej osi obrotu (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine)
 - Wirnik ustawiony prostopadle do kierunku wiatru.
 - Wymagają mechanizmu ustawiania w kierunku wiatru (ogon, system yaw).
 - Zwykle osiągają wyższą sprawność (C_p do ok. 0,5) niż turbiny pionowe.
 - Popularne w zastosowaniach przydomowych dzięki szerokiej dostępności modeli i dużemu wyborowi mocy (od kilkuset watów do kilkunastu kW).
2. Turbiny o pionowej osi obrotu (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine)

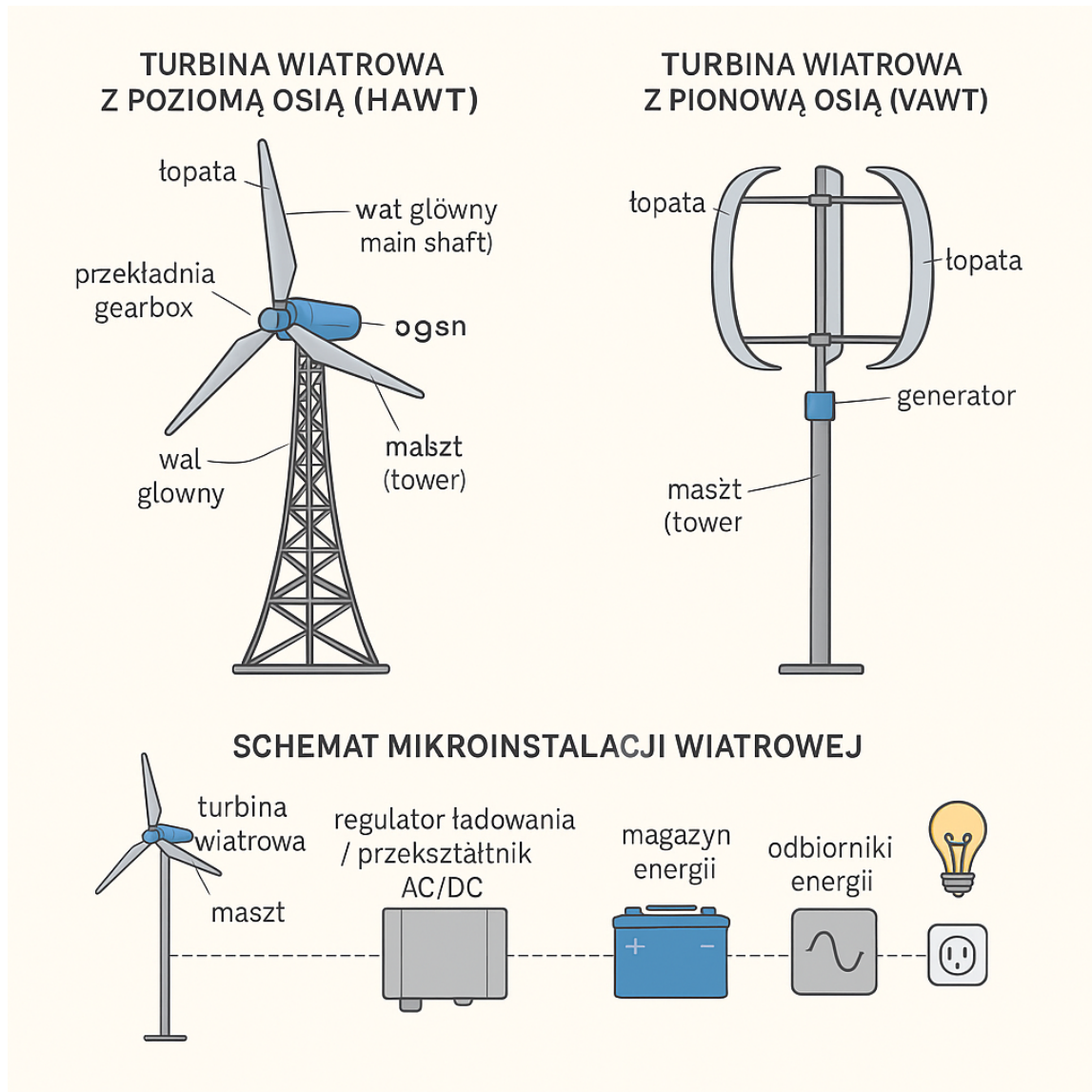


- Wirnik obraca się wokół pionowej osi; działa niezależnie od kierunku wiatru.
- Łatwiejsze w montażu i serwisie (generator i przekładnie często przy ziemi).
- Niższa sprawność (C_p zazwyczaj do ok. 0,35), ale dobra praca w turbulentnym wietrze i ograniczonych przestrzeniach.
- Warianty: Savonius (łopatki półcylindryczne, duża siła rozruchowa, niska prędkość obrotowa) i Darrieus (profilowane łopaty, wyższa sprawność).

Budowa typowej mikroelektrowni wiatrowej, pokazane na Rys.1

- Wirnik – zestaw łopat przetwarzających energię kinetyczną wiatru na ruch obrotowy.
- Piasta – element łączący łopaty z wałem głównym.
- Wał główny – przekazuje moment obrotowy do generatora.
- Generator – zamienia energię mechaniczną w energię elektryczną (najczęściej prądnica synchroniczna lub asynchroniczna).
- Przekładnia (opcjonalnie) – dostosowuje prędkość obrotową wirnika do wymagań generatora.
- Układ sterowania – kontroluje pracę turbiny, chroni przed przeciążeniem i nadmierną prędkością obrotową.
- Maszt – podnosi wirnik na wysokość, gdzie wiatr jest silniejszy i bardziej stabilny.
- Układ przyłączeniowy – inwerter, regulator ładowania, akumulatory lub przyłącze do sieci.





Rysunek 1: Elementy microelektrowni wiatrowych

Projektowanie instalacji z turbiną wiatrową

Projektowanie instalacji z turbiną wiatrową, analogicznie jak w poprzednio analizowanych przypadkach sprowadza się do dobrania turbiny spełniającej wymagania związane z wymaganiami związanymi z wymaganiami energetycznymi i warunkami lokalizacyjnymi. Procedura optymalnego doboru turbiny wiatrowej do inwestycji wymaga rozpatrzenia szeregu czynników:



Lokalizacja: Współrzędne, klasa terenu (otwarty/podmiejski/miejski), ukształtowanie i przeszkody w promieniu $\geq 10 \times$ wysokość masztu.

Warunki wiatrowe: Średnia prędkość wiatru (na 10 m), rozkład Weibulla (k, c), róża wiatrów. Przeliczenie na 8–12 m: logarytmiczny lub potęgowy profil wiatru ($\alpha \simeq 0.14-0.25$ w zależności od szorstkości).

Wymagania energetyczne: Roczne zapotrzebowanie [kWh/rok], profil dobowy, czy off-grid (magazyn) czy on-grid (falownik).

Ograniczenia formalne: MPZP/warunki zabudowy, hałas (dB(A) na granicy działki), odległości od granic/obiektów, zgłoszenie/pozwolenie.

Maszt: Wysokość 8–12 m, typ (rurowy odciągany/kratowy/wolnostojący), fundament, strefa wiatrowa, obciążenia dynamiczne, dostęp serwisowy.

Elektryka: Napięcie systemu (12/24/48 V DC) lub on-grid (230 V AC), sterownik ładowania (PWM/MPPT), zabezpieczenia (DC, odgrom).

Serwis i gwarancja: Dostępność części/serwisu w PL, gwarancja (lata / godziny pracy), interwały przeglądów.

Ekonomia: AEP szacowane (z rozkładu Weibulla + krzywa mocy), CAPEX (turbina+maszt+montaż), OPEX (serwis), LCOE.

Najważniejszymi zagadnieniami spośród wymienionych są warunki lokalizacyjne z którymi wiąże większość pozostałych. Analiza najniższego otoczenia miejsca inwestycji w stopniu największym, w porównaniu do innych źródeł OZE, wpływa na parametry działania turbiny. Ukształtowanie terenu, bliskość zabudowań itp w bardzo duży wpływ na rozkład przepływów powietrza (wiatru) w otoczeniu turbiny. Niekorzystne warunki terenowe mogą zdecydować o nieopłacalności inwestycji w danej lokalizacji pomimo potencjalnie dobrych parametrów wiatrów.

Przy sprzyjających warunkach lokalizacyjnych kolejnym elementem do rozpatrzenia są warunki wiatrowe. Można je przeanalizować na podstawie pomiarów lub skorzystać z



źródeł bazowych wiatru, np.: Global Wind Atlas (GWA)[3]. Można uzyskać informacje o uśrednionej prędkości wiatru na określonej wysokości. GWA pozwala na uzyskanie informacji o parametrach wiatru na wysokościach 10, 50, 100, 150 i 200m. Jeżeli pojawi się konieczność określenia prędkości wiatru na innej wysokości można wyznaczyć tą wartość dla innej wysokości można skorzystać np. z prawa potęgowego:

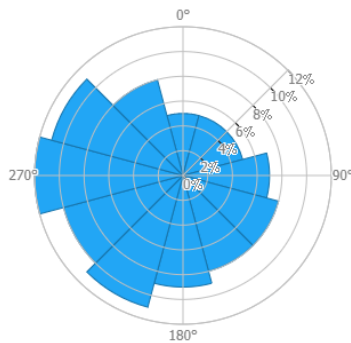
$$v(h) = v(h_{odn}) \cdot \left(\frac{h}{h_{odn}}\right)^\alpha$$

, gdzie α jest współczynniki zależnym od rodzaju terenu, jak pokazano w tabeli 1, na jego wartość ma też wpływ np. konwekcja - przy stabilnej atmosferze (noc, brak konwekcji) bywa większa niż w tabeli, a przy niestabilnej (dzień, konwekcja) — mniejsza.

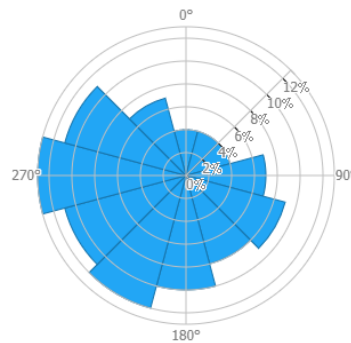
Tabela 1: Wartości α dla typowych terenów

Rodzaj terenu / ekspozycji	Opis powierzchni	Typowa α
Morze, tafla jeziora	Bardzo gładka, brak przeszkód	0,08 – 0,10
Równina otwarta / pustynia	Krótką trawą, brak drzew i budynków	0,10 – 0,14
Teren rolniczy z niską roślinnością	Pola, łąki, nieliczne przeszkody	0,14 – 0,18
Obszar wiejski z zabudową niską i drzewami	Rozproszone domy, kępy drzew	0,18 – 0,22
Małe miasteczka / przedmieścia	Większe zagęszczenie zabudowy, drzewa	0,22 – 0,26
Gęsta zabudowa miejska	Bloki, kamienice, dużo wysokich przeszkód	0,26 – 0,40

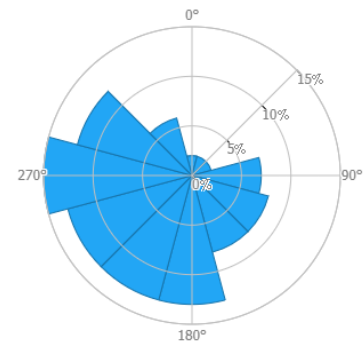
Podstawową informacją odczytywaną z GWA jest średnia prędkość wiatru na wybranej wysokości. Dla micro turbin wiatrowych będzie to wysokość 10 metrów. Ważne informacje można uzyskać z wykresów w postaci róży o kierunkach z jakich wieją wiatry, jak pokazano na rysunkach 2, 3 i 4. Pozwolą one ocenić czy przewidywana lokacja inwestycji zapewni optymalną pracę przy występujących w danym miejscu wiatrach.



Rysunek 2: Czężstotliwoć



Rysunek 3: Prędkość



Rysunek 4: Siła

Zauważyć można, że dla przewidywanej lokalizacji wszystkie trzy parametry osiągnęją najkorzystniejsze wartości dla kierunku zachodniego, południowo-zachodniego. Jeżeli warunki terenowe nie zakłócają wiatru z tych kierunków można przystąpić do dalszej analizy.

W analizowanej lokalizacji uśredniona wartość gęstości mocy wiatru osiągnęła wartość $P_d = 87 \frac{W}{m^2}$ przy prędkości wiatru $v = 4.28 \frac{m}{s}$ na wysokości 10 m.

Dobór „od gęstości mocy” - pola wirnika

Obliczenie średniej mocy dla m^2 powierzchni wirnika przy określonej sprawności całego układu (turbina + generator + sterowanie). Dla małych turbin sensowny zakres to $\eta \simeq 0.15 - 0.25$.

$$P_{m^2} = P_d \cdot \eta = 87 \cdot (0.15 - 0.25) = 13.05 - 21.75 \frac{W}{m^2}$$

$$P_{m^2} = P_d \cdot \eta = 87 \cdot 0.2 = 17.5 \frac{W}{m^2}$$

Co rocznie zapewnia energię na poziomie:

$$E_{rok} = P_{m^2} \cdot 365 \cdot 24 \simeq 114 - 190 \frac{kWh}{rok}$$

Przy zapotrzebowaniu na poziomie $5000 \frac{kWh}{rok}$ i założeniu pokrycia 100% zapotrzebowania na energię elektryczną w turbiny wiatrowej można określić średnicę wirnika:

$$A = \frac{5000}{114 - 190} = 26.3 - 43.9 m^2$$



Dobór mocy znamionowej turbiny

Opierając się na informacji o **capacity factor** (współczynnik wykorzystania mocy zainstalowanej, czasem współczynnik pracy turbiny). CF to miara tego, jak efektywnie źródło energii (np. turbina wiatrowa) pracuje w ciągu roku w stosunku do swojej mocy znamionowej.

$$CF = \frac{\text{Rzeczywista średnia moc w okresie}}{\text{Moc znamionowa urządzenia}}$$

lub równoważnie

$$CF = \frac{\text{Energia wyprodukowana w okresie}}{\text{Moc znamionowa} \times \text{czas pracy w tym okresie}}$$

Na tej podstawie można oszacować moc turbiny. Typowa wartość CF dla małych turbin wiatrowych waha się między 8-15%.

$$P_{turb} = \frac{E_{rok}}{CF \cdot \text{czas}} = \frac{5000}{(0.08-0.12) \cdot 24 \cdot 365} \simeq 4.7 - 7.1 \text{ kW}$$

W tabeli 3 zestawiono przykładowe turbiny wiatrowe dedykowane do słupa o wysokości około 10m.

Dla przyjętych założeń trudno będzie dobrać dostępną komercyjnie turbinę która spełniała by założone kryteria. W praktyce, dla polskich warunków, turbina wiatrowa jest w stanie zapewnić pewną część zapotrzebowania jak pokazano w tabeli 2.

Tabela 2: Typowy udział w pokryciu zapotrzebowania

Średnia prędkość wiatru na 10 m	Realny CF	Roczna produkcja małej turbiny (2–3 kW)	Pokrycie zapotrzebowania
3–4 m/s	5–8%	200–400 kWh	5–10%
4–5 m/s	8–15%	500–900 kWh	10–20%
5–6 m/s	15–25%	1300–2200 kWh	25–40%
6–7 m/s	25–35%	2500–3700 kWh	40–70%

Przy urealnieniu pokrycie zapotrzebowania na energię do 25% rocznego zapotrzebowania parametry turbiny przyjmują wartości:

$$A = \frac{0.25 \cdot 5000}{114-190} \simeq 6.7 - 11 \text{ m}^2$$

$$P_{turb} = \frac{E_{rok}}{CF \cdot \text{czas}} = \frac{0.25 \cdot 5000}{(0.08-0.12) \cdot 24 \cdot 365} \simeq 1.2 - 1.8 \text{ kW}$$



Tabela 3: Przykładowe mikrotrubiny na maszt 8–12 m (wartości orientacyjne)

Producent Model	Typ	Moc znam.	Ø wirnika	Cut-in (start)	Prędkość znam.	Odcięcie	Napięcie / System	Zalecany maszt	Szac. AEP przy 5 m/s*
Primus Windpower AIR 40	HAWT	160 W	1.17 m	3.1 m/s	12 m/s	22–25 m/s	12/24 V DC (off-grid)	6–12 m	200–400 kWh/rok
Leading Edge LE-600	HAWT	do 600 W (szczyt)	1.5 m	3 m/s	12 m/s	20+ m/s	12/24/48 V DC	6–12 m	400–900 kWh/rok
Superwind 350	HAWT	350 W	1.22 m	3.5 m/s	12 m/s	25 m/s	12/24 V DC	8–12 m	300–700 kWh/rok
Bornay 1500	HAWT	1.5 kW	2.5–3.0 m	3 m/s	11 m/s	20–25 m/s	24/48 V DC, on-/off-grid	9–12 m	1.5–2.8 MWh/rok
SD Energy SD3 (d. Kingspan KW3)	HAWT	3 kW	3.5 m	3 m/s	11 m/s	25 m/s	On-grid/off-grid (48 V + inwerter)	9–15 m	3–5 MWh/rok
LE-Vertical (np. LE-V150/300)	VAWT	150–300 W	-	3–4 m/s	10–12 m/s	20+ m/s	12/24 V DC	6–10 m	150–500 kWh/rok

* AEP (Annual Energy Production): orientacyjny zakres przy średniej prędkości 5 m/s na wysokości wirnika, bez zacięnięć i z prawidłowym doborem elektroniki. Do dokładnego doboru użyj krzywej mocy producenta



Można rozważyć zwiększenie wysokości masztu ze względu na to że wraz z wzrostem wysokości rośnie prędkość wiatru, a moc wiatru jest proporcjonalna do sześcianu prędkości wiatru.

Zadanie

Dla zadanej lokalizacji i podanych warunków technicznych zaprojektować instalację turbiną wiatrową. Przeprowadzić analizę możliwości zastosowania komercyjnych rozwiązań przy założeniu wysokości masztu między 10 a 15 m i pokryciu zapotrzebowania na energię między 20 a 100%. Dokument projektowy przygotować zgodnie z wytycznymi i wymogami prowadzącego zajęcia.

Literatura

[1] J. TENETA Wykłady "Czyste energie i ochrona środowiska" AGH 2016

[2] Materiały wykładowe OZE, AGH

<https://home.agh.edu.pl/~romus/OZE/>

dostęp 11.08.2025

[3] Global Wind Atlas (GWA)

<https://globalwindatlas.info/en/>

dostęp 11.08.2025

