



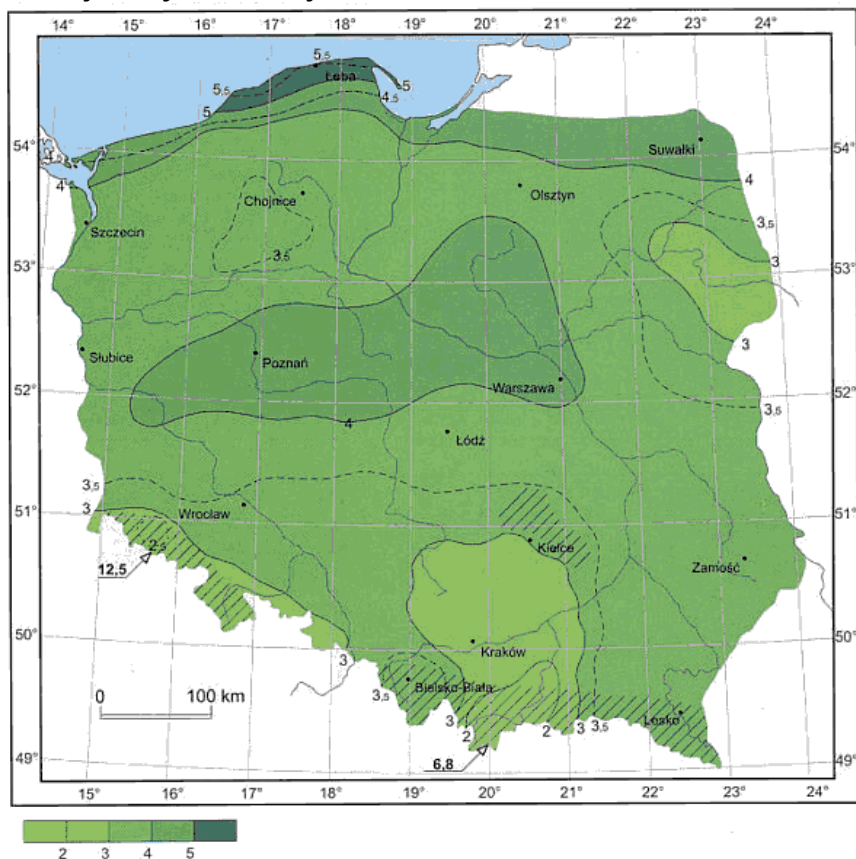
Ćwiczenie *Symulacyjne badanie elektrowni wiatrowych*

1. Wstęp teoretyczny

a) Wiatr jako źródło energii

Źródłem energii wiatru jest promieniowanie słoneczne. Ruch powietrza powstaje na skutek: nierównomiernego nagrzewania powierzchni Ziemi oraz siły Coriolisa związanej z ruchem obrotowym. Znaczenie użytkowe ma wiatr o prędkości $3 \div 25$ m/s. W Polsce możliwe jest wykorzystanie zasobów wiatru w następujących regionach (rys. 1):

- wybrzeże Morza Bałtyckiego;
- Suwalszczyzna;
- Środkowa Wielkopolska i Mazowsze;
- Beskid Śląski i Żywiecki;
- Bieszczady i Pojezierze Dynowskie.



Rys. 1. Średnie 10-minutowe prędkości wiatru (m/s) na wysokości 10 m [3].

Do modelowania prędkości wiatru używa się najczęściej rozkładu Weibulla, którego gęstość prawdopodobieństwa dana jest wzorem (rys. 2) [4]:

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{A} \right)^k \right), \quad (1)$$

gdzie: k , A – parametry rozkładu.

Parametr k jest związany z kształtem rozkładu. Dla $k=1$ otrzymujemy rozkład wykładniczy, dla $k=2$ rozkład Rayleigha. Jeżeli przyjmiemy rozkład Rayleigha, wówczas gęstość prawdopodobieństwa prędkości wiatru będzie dana wzorem [1]:

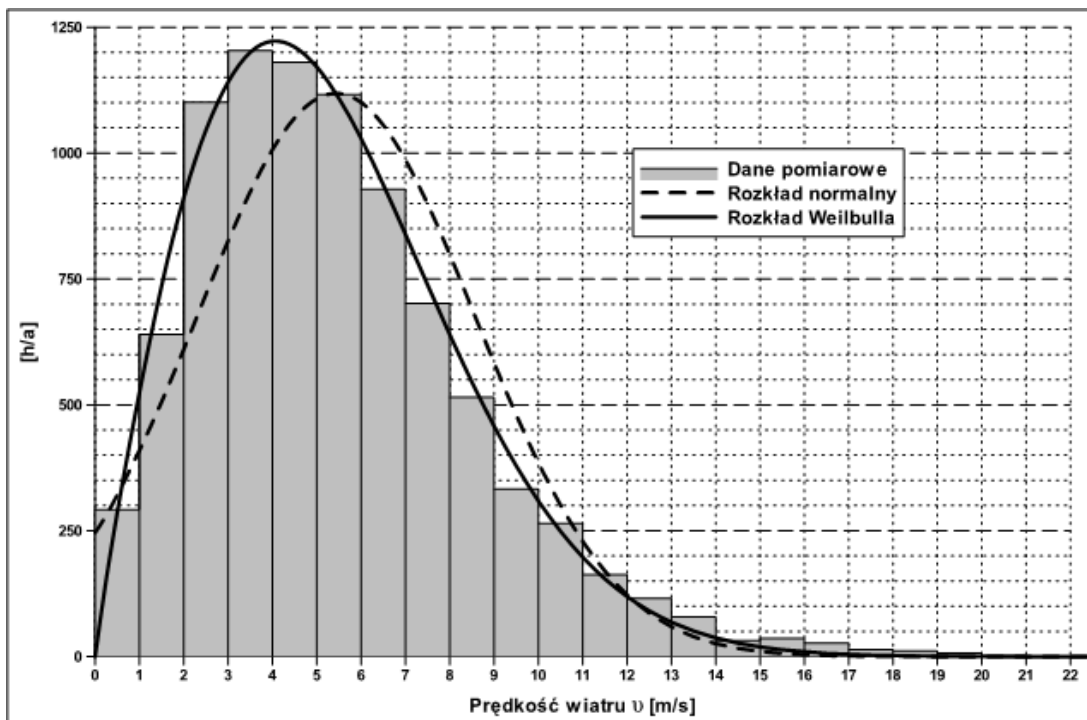
$$f(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} \exp \left(- \frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right), \quad (2)$$

gdzie: $\bar{v}$ – średnia prędkość wiatru [m/s].

Możliwe jest również opisanie prędkości wiatru za pomocą rozkładu normalnego [3]:

$$f(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}b} \exp \left\{ - \frac{(v-a)^2}{2b^2} \right\}, \quad (3)$$

gdzie: $\mu = a$ – średnia; $\sigma^2 = b^2$ – wariancja.



Rys. 2. Histogram prędkości wiatru dla Łeby i zastosowanie rozkładu normalnego oraz Weibulla.

Prędkość wiatru wzrasta wraz z wysokością. Jeśli pomiary prędkości wiatru zostały dokonane na wysokości innej niż wysokość zainstalowania gondoli turbos zespołu wiatrowego, wówczas należy zastosować wzór korekcyjny. Najczęściej jest wykorzystywana zależność [1, 4]:

$$v(h_2) = v(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha, \quad (4)$$

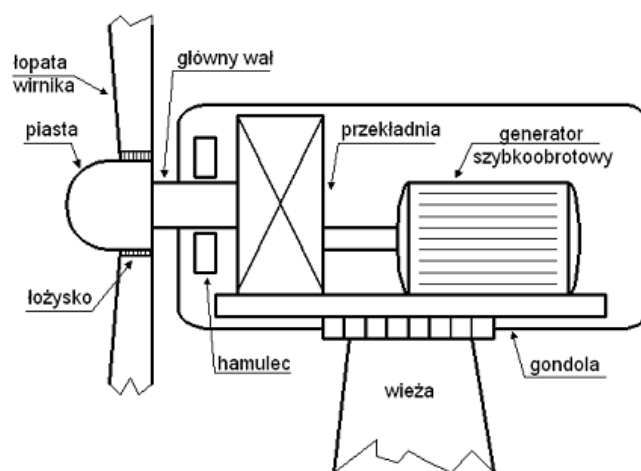
gdzie: h_1, h_2 – wysokość; $v(h_1), v(h_2)$ – prędkość wiatru na wysokości h_1, h_2 ; α – parametr zależny od szorstkości gruntu, najczęściej przyjmuje się wartość $1/7$.

b) Budowa i charakterystyka elektrowni wiatrowych

Zasadniczymi elementami elektrowni wiatrowych są:

- silnik wiatrowy;
- generator elektryczny;
- przekładnia mechaniczna (występują również rozwiązania bez przekładni);
- urządzenia do automatycznego sterowania i regulacji;
- urządzenia pomocnicze.

Podstawowe elementy elektrowni wiatrowej zostały przedstawione na rys. 3.



Rys. 3. Przekrój elektrowni wiatrowej.

Silnik wiatrowy jest charakteryzowany przez wartość **wyróżnika szybkobieżności**, wyrażającego się zależnością:

$$Z = \frac{u_z}{v} = \frac{\pi r_z \omega}{30v}, \quad (5)$$

gdzie: u_z - prędkość obwodowa końca łopat [m/s], v - prędkość wiatru [m/s], r_z - odległość końca łopaty od osi obrotu wirnika [m], ω - prędkość obrotowa wirnika [min^{-1}].

Moc strugi powietrznej napływającej przed wirnik silnika wiatrowego jest określona następującą zależnością [1, 4]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3, \quad (6)$$

gdzie: P_w – moc strugi powietrznej [W]; ρ – średnia gęstość suchego powietrza [kg/m^3]; A – powierzchnia zakreślana przez wirnik [m^2]; v – prędkość wiatru na wysokości osi wirnika [m/s].

Gęstość powietrza jest zależna od ciśnienia i temperatury. W warunkach normalnych (temperatura 15°C , ciśnienie 0,1 MPa) wynosi $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Maksymalna teoretyczna moc silnika wiatrowego jest ograniczona przez tzw. **prawo Betza**. Silnik ten jest w stanie wykorzystać co najwyżej $16/27$ mocy strugi przepływającej przez wirnik. Zatem maksymalna teoretyczna moc silnika wiatrowego wynosi:

$$P_{w\max} = \frac{2\pi d^2 \rho v^3}{27}, \quad (7)$$

gdzie: $P_{w\max}$ – maksymalna teoretyczna moc możliwa do uzyskania przez silnik wiatrowy [W]; ρ – średnia gęstość suchego powietrza [kg/m^3]; d – średnica okręgu zakreślanego przez łopaty wirnika [m]; v – prędkość wiatru na wysokości osi wirnika [m/s].

Sprawność turbozespołu wiatrowego może być wyznaczona z zależności:

$$\eta_{tbz} = \frac{P_{el}}{P_w}, \quad (8)$$

gdzie: P_w – moc strugi powietrznej [MW], P_{el} – moc elektryczna generowana [MW].

Sprawność zespołu silnik-generator może być wyznaczona z zależności:

$$\eta_{tsG} = \frac{P_{el}}{P_{w\max}}, \quad (9)$$

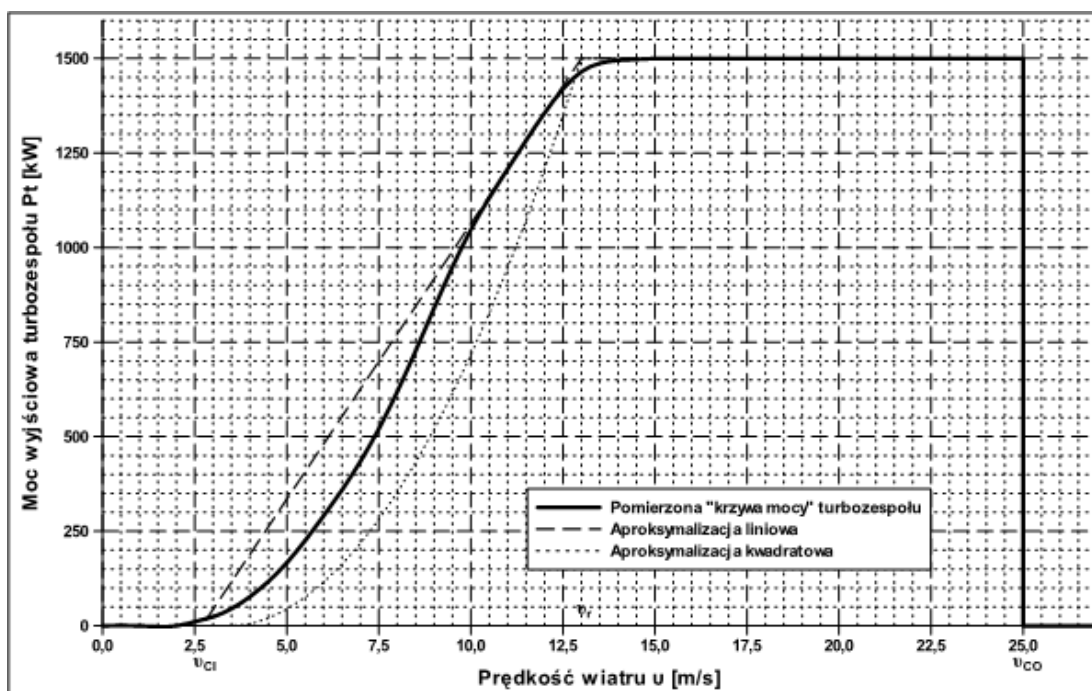
gdzie: $P_{w\max}$ – maksymalna teoretyczna moc możliwa do uzyskania przez silnik wiatrowy [MW], P_{el} – moc elektryczna generowana [MW].

Moc wytwarzana przez turbozespół wiatrowy zależy głównie od parametrów oraz prędkości wiatru w danej lokalizacji. Większość turbozespołów rozpoczyna swoją pracę od pewnej minimalnej prędkości zwanej włączeniową prędkością wiatru v_{Cl} . Od tej prędkości moc generowana przez turbozespół wzrasta, aż do osiągnięcia mocy znamionowej P_r przy „znamionowej” prędkości wiatru v_r . Przy większych prędkościach wiatru moc generowana przez turbozespół pozostaje na stałym poziomie (przy regulacji typu „pitch”). Ponieważ zbyt duża prędkość wiatru mogłaby doprowadzić do zniszczenia turbozespołu, po przekroczeniu pewnej wartości prędkości zwanej prędkością wyłączeniową v_{CO} wirnik zostaje zatrzymany i moc przestaje być generowana. Podstawowe parametry charakteryzujące turbozespół wiatrowy to zatem: moc znamionowa (ang. *rated power*), włącze-

niowa (startowa) prędkość wiatru (ang. *cut-in wind speed*), „znamionowa” prędkość wiatru (ang. *rated wind speed*) oraz wyłączeniowa prędkość wiatru (ang. *cut-out wind speed*). Zależność mocy wytwarzanej przez turbozespół wiatrowy prędkości wiatru nosi nazwę „krzywej mocy” turbozespołu i jest podawana przez producenta.

Na rys. 4 została pokazana „krzywa mocy” dla turbozespołu Leitwind LTW77 o następujących parametrach:

- moc znamionowa 1500 kW;
- włączeniowa prędkość wiatru 2,7 m/s;
- „znamionowa” prędkość wiatru 13 m/s;
- wyłączeniowa prędkość wiatru 25 m/s.



Rys. 4. „Krzywe mocy” turbozespołu Leitwind LTW77: pomierzona oraz aproksymalizowane.

Znając roczną wielkość rocznej produkcji energii można wyznaczyć roczny czas użytkowania mocy zainstalowanej T_i oraz średnią moc generowaną P_{sr} :

$$T_i = \frac{A}{P_n}, \quad P_{sr} = \frac{A}{8760}, \quad (10)$$

gdzie: A – roczna produkcja energii [MWh], P_n – moc znamionowa turbozespołu wiatrowego [MW].

2. Symulator elektrowni wiatrowych

Program „symulacyjne badanie elektrowni wiatrowych” pozwala na zapoznanie się z pracą i charakterystyką energetycznych turbozespołów wiatrowych dużych mocy. Pozwala on na analizę pracy takich jednostek wytwórczych w krajowych warunkach. Do pracy programu wykorzystuje się dane jednostek wytwórczych

zawarte w plikach (.trb) oraz dane meteorologiczne dostępne na stronie Ministerstwa Infrastruktury [6].

Symulator znajduje się w katalogu Symulator EW. Jego uruchomienie odbywa się za pomocą pliku Windsim.exe (Rys. 7)

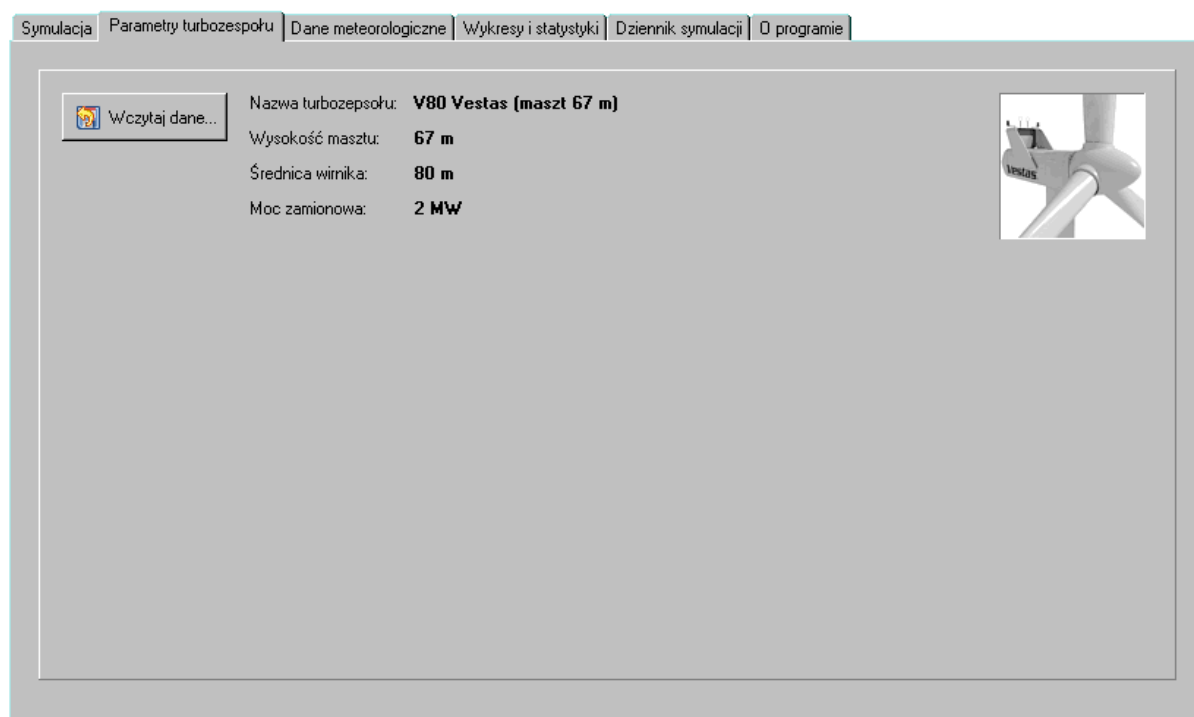


Rys. 5. Ikona programu symulatora

Obsługa programu odbywa się za pomocą głównego okna programu, które zostało podzielone na zakładki. Na dole okna znajduje się pasek wspólny dla wszystkich zakładek pozwalający na sterowanie symulacją oraz zawierający dwa liczniki: czasu symulacji (h) i wyprodukowanej energii elektrycznej (MWh).

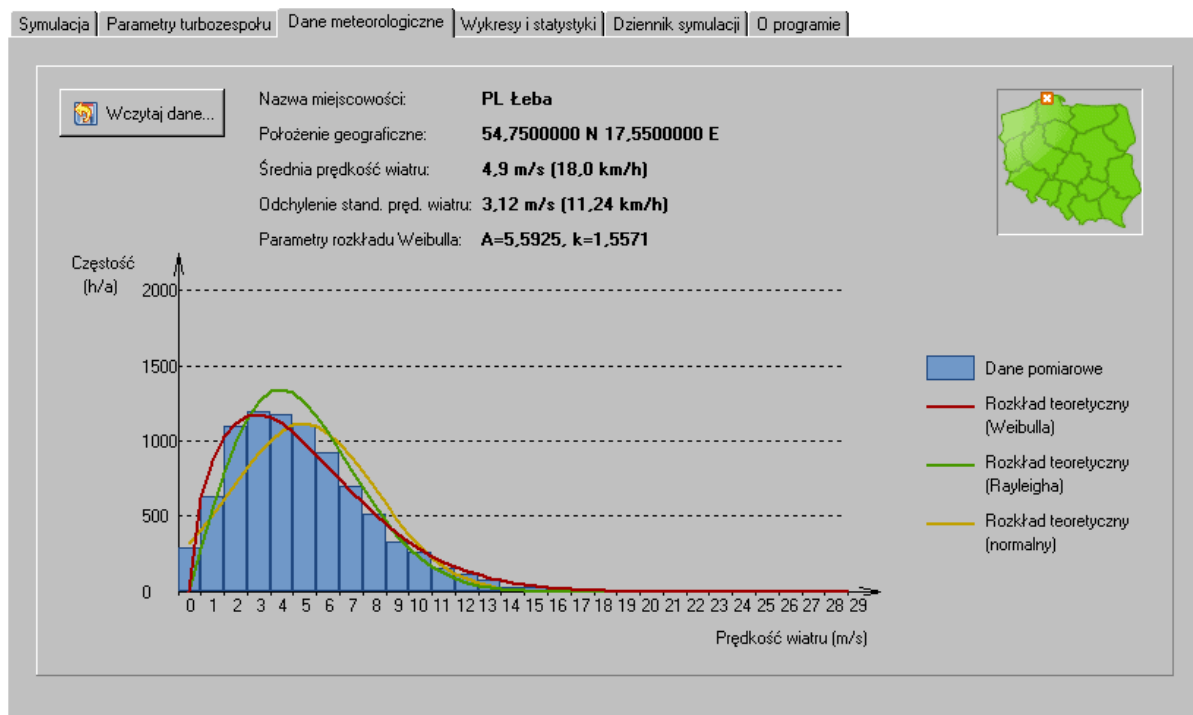
a) Wczytywanie danych

Do pracy programu potrzebne są dwa typy danych: parametry turbozespołu wiatrowego oraz dane meteorologiczne. Do wczytania danych turbozespołu służy przycisk „Wczytaj dane...” na zakładce „Parametry turbozespołu” (rys. 6). Po jego naciśnięciu pojawi się okno, w którym można wybrać plik z danymi wiatrowych jednostek wytwórczych (pliki typu .trb). Po wczytaniu informacje o wybranym turbozespolu zostaną wyświetlone w zakładce.



Rys. 6. Zakładka „Parametry turbozespołu”

Kolejnymi danymi, które są potrzebne do symulacji, są to dane meteorologiczne. Można je wczytać za pomocą przycisku „Wczytaj dane...” na zakładce „Dane meteorologiczne”. Po wybraniu pliku z danymi (plik typu .txt zgodny ze standardem EN ISO 15927:4) w zakładce zostaną wyświetlone informacje statystyczne dotyczące prędkości wiatru w danej lokalizacji (rys. 7).



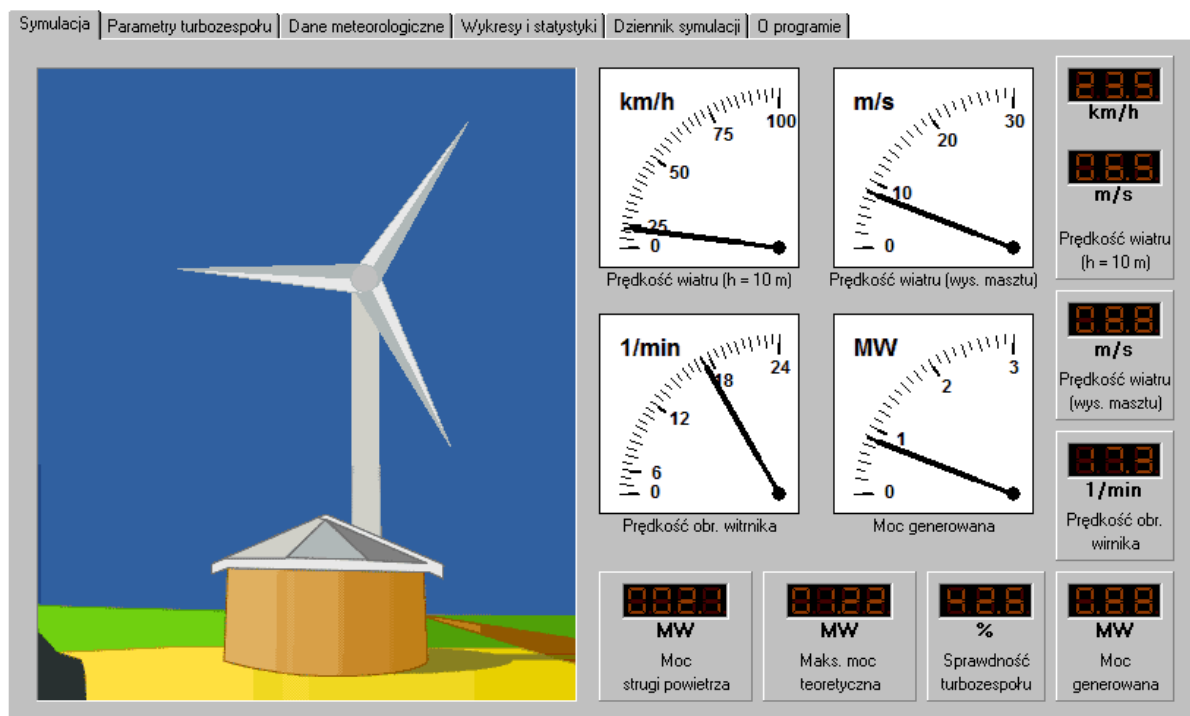
Rys. 7. Zakładka „Dane meteorologiczne”

b) Sterowanie symulacją



Rys. 8. Pasek sterowania symulacją. Z lewej strony znajduje się licznik czasu symulacji (h). Dalej kolejno: przycisk uruchamiający symulację pracy turbozespołu w wybranej lokalizacji (uruchom), przycisk zatrzymywania symulacji (zatrzymaj – pauza) oraz przycisk zakończenia symulacji (zakończ – stop). Po środku znajduje się suwak pozwalający ustawić prędkość wiatru. Suwak ten jest nieaktywny przy uruchomionym trybie symulacji. Po prawej stronie znajduje się licznik wyprodukowanej podczas symulacji energii elektrycznej oraz przycisk kończący pracę programu (zakończ program).

Program może pracować w dwóch trybach: trybie badania charakterystyki turbozespołu oraz trybie symulacji pracy w danej lokalizacji. W pierwszym trybie możliwe jest ustawienie określonej prędkości wiatru (na wysokości 10 m). Pozwala to na zbadanie charakterystyki wybranego turbozespołu. Prędkość wiatru ustawia się za pomocą suwaka znajdującego się na dole okna programu (rys. 8). Skrajna lewa pozycja odpowiada brakowi wiatru, skrajna prawa oznacza zaś prędkość wiatru 100 km/h na wysokości 10 m nad poziomem gruntu.

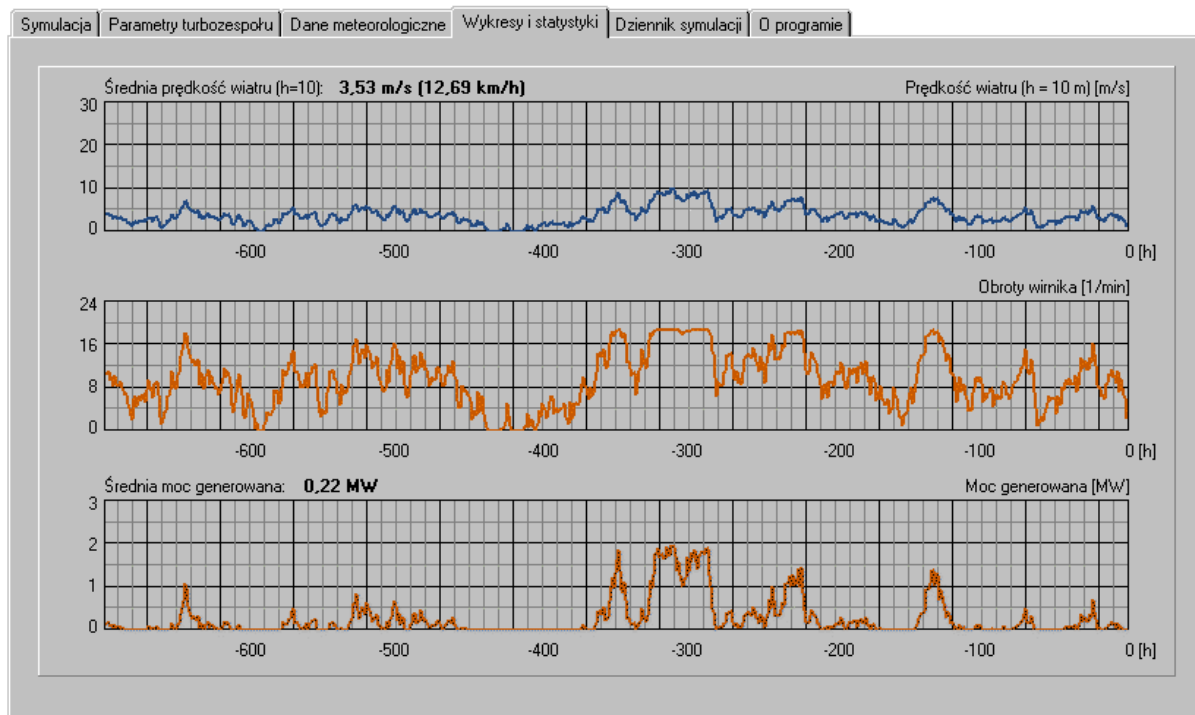


Rys. 9. Zakładka „Symulacja”

Parametry pracy turbozespołu przy wybranej prędkości wiatru można odczytać na zakładce „Symulacja” (rys. 9). W edukacyjnej wersji programu część wyświetlanych parametrów jest nieaktywna. Można je wyznaczyć na podstawie pozostałych parametrów korzystając ze wzorów zamieszczonych w niniejszej instrukcji.

Drugi z trybów – symulowanie pracy w danej lokalizacji uruchamiany jest za pomocą przycisku „Uruchom symulację” znajdującego się w dolnej części okna (rys. 8). Wówczas prędkość wiatru jest losowana na podstawie wczytanych danych meteorologicznych. Symulacja zostaje zatrzymana automatycznie po upływie każdej wielokrotności 8760 h (1 roku). Możliwe jest również zatrzymanie symulacji w dowolnym momencie za pomocą przycisku „Zatrzymaj symulację”. Zarówno po automatycznym, jak i po ręcznym zatrzymaniu można wznowić symulację naciskając ponownie przycisk „Uruchom symulację”. Wówczas kolejne wyniki zostaną dodane do uprzednio wygenerowanych. Natomiast naciśnięcie przycisku „Zatrzymaj symulację” spowoduje, że kolejne uruchomienie spowoduje skasowanie dotychczasowych wyników. Podobnie wybranie innego turbozespołu bądź innej lokalizacji spowoduje, że symulacja nie będzie kontynuowana, tylko zacznie się od początku.

W czasie symulacji zwiększają się wartości liczników czasu oraz wygenerowanej energii elektrycznej. Dodatkowo tworzone są wykresy: prędkości wiatru, prędkości obrotowej wirnika i mocy elektrycznej generowanej w danej godzinie dostępne na zakładce „Wykresy i statystyki” (rys. 10).



Rys. 10. Zakładka „Wykresy i statystyki”. Od góry widoczne są przebiegi: prędkości wiatru na wysokości 10 m (w m/s), prędkości obrotowej wirnika (1/min) oraz mocy generowanej (MW) podczas ostatnich 700 h symulacji

Cały przebieg symulacji jest również zapisywany w postaci tekstowego dziennika, który można zobaczyć w zakładce „Dziennik symulacji” (rys. 11). Za pomocą przycisków znajdujących się po lewej stronie można wyczyścić aktualny dziennik, skopiować dziennik do schowka lub zapisać w postaci pliku tekstowego (plik typu .txt). Dzięki temu można wyniki symulacji przetwarzać za pomocą np. arkusza kalkulacyjnego Excel.

Czas t [h]	v_10 [m/s]	v_10 [km/h]	v_mast [m/s]	obr[1/min]	P_el [MW]	En_el [MWh]
1	1,26	4,32	1,61	2,07	0,00	0,00
2	1,77	6,36	2,37	3,95	0,00	0,00
3	2,93	10,19	3,80	7,57	0,03	0,03
4	2,67	9,62	3,53	7,03	0,01	0,04
5	3,12	11,24	4,19	8,78	0,05	0,16
6	3,25	11,69	4,35	8,75	0,07	0,15
7	3,21	11,56	4,28	8,72	0,06	0,14
8	3,21	11,56	4,28	8,72	0,06	0,14
9	3,21	11,56	4,28	8,72	0,06	0,14
10	3,21	11,56	4,28	8,72	0,06	0,14

Rys. 11. Zakładka „Dziennik symulacji”. Z prawej strony widoczny tekstowy dziennik symulacji, po lewej stronie przyciski „Wyczyść dziennik”, „Skopiuj dziennik do schowka”, „Zapisz dziennik do pliku”

Dziennik składa się z nagłówka zawierającego datę i czas wykonania symulacji, nazwę wybranego turbozespołu, nazwę i położenie wybranej lokalizacji. Po nagłówku znajdują się w kolumnach wyniki symulacji. Są to kolejno: czas (h), prędkość wiatru na wysokości 10 m nad poziomem gruntu (w m/s oraz w km/h),

prędkość wiatru na wysokości gondoli (m/s), prędkość obrotowa wirnika (1/min), moc generowana (MW) oraz łączna wyprodukowana energia (MWh).

3. Wykonanie ćwiczenia

Ćwiczenie należy wykonywać po kolei według instrukcji prowadzącego.

a) Badanie charakterystyki turbozespołu wiatrowego

- Uruchomić symulator. Dla wskazanych turbozespołów wyznaczyć charakterystyki. Uzupełnić protokół pomiarowy (tabela 1).

Tabela 1.

Producent i typ turbozespołu: Wys. masztu (m): Średnica wirnika (m): Moc znamionowa (MW): Sprawność turbozespołu ($\max \eta_{tbz}$): Wyróżnik szybkobieżności (przy $\max \eta_{tbz}$):									
Lp.	Prędkość wiatru			Prędk. obr. wir- nika ω (min^{-1})	Moc gen. P_{el} (MW)	Moc strugi pow. P_w (MW)	Moc maks. teor. P_{wmax} (MW)	η_{tbz} (%)	η_{tsG} (%)
	h=10 m v_{10} (km/h)	h=10 m v_{10} (m/s)	wys. masztu v_m (m/s)						
1									
...									
...									

- Wyznaczyć prędkości włączeniową v_{CL} , znamionową v_r i wyłączeniową v_{CO} wiatru. Narysować „krzywą mocy” $P_{el}=f(v)$ turbozespołu. Narysować charakterystyki sprawności η_{tbz} oraz $\eta_{tbz} = f(v)$. Omówić otrzymane wyniki obliczeń i wykresy.

b) Symulacyjne badanie pracy turbozespołu wiatrowego

- Spośród dostępnych danych meteorologicznych wybrać trzy lokalizacje o różnych charakterystykach wietrzności. Zanotować oraz omówić parametry rozkładów statystycznych (normalnego, Rayleigha oraz Weibulla) charakteryzujące te lokalizacje. Które spośród rozkładów najlepiej odwzorowują rzeczywisty charakter prędkości wiatru?
- Dla wybranych lokalizacji wybrać dwa turbozespoły wiatrowe o tej samej mocy znamionowej.
- Przeprowadzić w każdej lokalizacji 5 symulacji rocznej pracy wybranych turbozespołów. Zanotować w protokole roczną energię wyprodukowaną A (tabela 2).

Tabela 2.

Lp.	Lokalizacja:			Lokalizacja:			Lokalizacja:		
	Położenie:			Położenie:			Położenie:		
	N	E		N	E		N	E	
	v_{sr} (m/s):			v_{sr} (m/s):			v_{sr} (m/s):		
	A (MWh)	T_i (h)	P_{sr} (MW)	A (MWh)	T_i (h)	P_{sr} (MW)	A (MWh)	T_i (h)	P_{sr} (MW)
Turbozespół: $P_i =$									
1									
2									
3									
4									
5									
Śred.									
Turbozespół: $P_i =$									
1									
...									

- Uzupełnić protokół, wyznaczając roczny czas użytkowania mocy zainstalowanej T_i oraz średnią moc generowaną P_{sr} . Wyznaczyć średnie wartości tych parametrów na podstawie 5 symulacji.

4. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- 1) Tabelę tytułową (nazwa i numer ćwiczenia, nazwiska i imiona wykonujących ćwiczenie, data wykonania ćwiczenia oraz data oddania sprawozdania);
- 2) Uzupełnione protokoły pomiarów, wymagane wykresy oraz ich opisy.
- 3) Wnioski z otrzymanych wyników symulacji.
- 4) Wnioski ogólne i spostrzeżenia dotyczące: ćwiczenia, pracy elektrowni wiatrowej, roli i przyszłości energetyki wiatrowej, możliwości wykorzystania energii wiatru w Polsce.

5. Przykładowe pytania

- Z jakich podstawowych elementów zbudowana jest elektrownia wiatrowa?
- Co to jest wyróżnik szybkobieżności silnika wiatrowego?
- Jaką maksymalną moc można uzyskać w silniku wiatrowym przy określonej prędkości wiatru?
- Narysuj „krzywą mocy” przykładowego turbozespołu wiatrowego zaznaczając parametry charakteryzujące ten turbozespół.

6. Literatura

- [1] Chmielniak T. „*Technologie energetyczne*”, WNT Warszawa 2008
- [2] Dane techniczne turbozespołu Leitwind LTW77 ze strony producenta: <http://www.windandpower.com/dokument.php?id=401>
- [3] Lorenc H. „*Atlas klimatu Polski*”, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Warszawa 2005
- [4] Paska J., „*Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła*”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010
- [5] Pawlik M., Strzelczyk F. „*Elektrownie*”, WNT Warszawa 2011
- [6] *Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków*, ze strony Ministerstwa Infrastruktury: http://www.mi.gov.pl/2-48203f1e24e2f-1787735-p_1.htm