

Tabela II.17 Symulacja promieniowania słonecznego padającego na płaszczyzny nachylone pod różnymi kątami do płaszczyzny poziomej:  $\alpha = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$  dla danych uśrednionych z terenu województwa śląskiego

	Energia [kW·h/m <sup>2</sup> ]				
	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 50^\circ$	$\alpha = 70^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
Styczeń	29,7	53,6	63,2	66,4	62,7
Luty	45,4	67,2	74,2	74,0	66,7
Marzec	86,7	113,0	117,6	111,1	94,3
Kwiecień	109,3	123,2	118,8	103,8	80,3
Maj	127,8	130,4	118,6	97,8	70,4
Czerwiec	135,5	132,5	117,6	94,1	65,4
Lipiec	133,3	132,4	118,3	95,8	67,4
Sierpień	121,9	131,6	123,5	104,8	77,7
Wrzesień	92,8	116,6	118,6	109,0	89,0
Październik	63,3	95,7	105,6	104,7	93,1
Listopad	31,0	50,5	57,8	59,5	55,2
Grudzień	22,7	42,6	50,8	53,9	51,4
<b>Średnia za rok</b>	<b>976,7</b>	<b>1146,7</b>	<b>1184,6</b>	<b>1074,9</b>	<b>873,6</b>

Tabela II.18 Średnie wartości energii promieniowania słonecznego w funkcji kątów określających zorientowanie płaszczyzny w przestrzeni (azymut i nachylenie) za okres całego roku

rok		Azymut												
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
nachylenie	90°	0,65	0,70	0,74	0,78	0,81	0,82	0,82	0,82	0,80	0,77	0,73	0,69	0,64
	80°	0,71	0,77	0,82	0,87	0,90	0,92	0,92	0,91	0,89	0,86	0,81	0,76	0,71
	70°	0,78	0,84	0,90	0,94	0,97	0,99	1,00	0,99	0,97	0,93	0,89	0,83	0,77
	60°	0,84	0,90	0,95	1,00	1,04	1,06	1,06	1,05	1,03	0,99	0,94	0,89	0,83
	50°	0,89	0,95	1,00	1,04	1,08	1,10	1,10	1,10	1,07	1,04	0,99	0,94	0,88
	40°	0,93	0,98	1,03	1,07	1,10	1,12	1,13	1,12	1,10	1,06	1,02	0,97	0,92
	30°	0,96	1,00	1,04	1,08	1,11	1,12	1,13	1,12	1,10	1,07	1,04	1,00	0,95
	20°	0,98	1,01	1,04	1,07	1,09	1,10	1,10	1,10	1,09	1,07	1,04	1,01	0,97
	10°	0,99	1,01	1,03	1,04	1,05	1,06	1,06	1,06	1,05	1,04	1,03	1,01	0,99
	0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Wartość współczynnika FT dla układu śledzącego słońce wynosi :

FT=1.40. (23% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w dwu współrzędnych

FT=1.18. (06% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi horyzontalnej (wschód zachód)

FT=1.30. (19% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej -10°

FT=1.34. (21% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej.

Poprzez odpowiednie zorientowanie płaszczyzny odbiornika można optymalnie wykorzystywać docierającą energię. Kąty nachylenia optymalnie zorientowanego modułu zmieniają się w ciągu roku.

Dla miesięcy zimowych (styczeń, luty, grudzień) maksymalne wartości FT występują dla kąta nachylenia  $60^\circ - 70^\circ$  i azymutu  $0^\circ$ . W miesiącach wiosennych (marzec, kwiecień, maj) maksymalne wartości FT występują dla kąta nachylenia  $30^\circ$  i azymutu  $-15^\circ - 15^\circ$ .

W miesiącach letnich (czerwiec, lipiec, sierpień) maksymalne wartości FT występują dla kąta nachylenia  $10^\circ - 20^\circ$  i azymutu  $-15^\circ - 15^\circ$ . Obserwujemy, że dla miesięcy letnich dokładne zorientowanie modułu nie jest tak krytyczne, jak w pozostałych porach roku. Dla miesięcy jesiennych (wrzesień, październik, listopad) maksymalne wartości FT występują dla kąta nachylenia  $50^\circ$  i azymutu  $0^\circ$ .

Z uwagi na niewielką rozciągłość geograficzną województwa śląskiego (ok.  $49.4^\circ$  do  $51^\circ$  szerokości geograficznej) zróżnicowanie warunków solarnych na terenie województwa mieści się w granicach 10%.

Najlepszymi warunkami do wykorzystania energii słonecznej charakteryzują się południowo-zachodnie krańce województwa (powiaty raciborski, cieszyński i wodzisławski) gdzie roczna wartość sumy energii przekracza  $185 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$  dla energii elektrycznej produkowanej przez moduły fotowoltaiczne i odpowiednio  $1,85 \text{ GJ/m}^2/\text{rok}$  dla energii cieplnej produkowanej w cieplnych kolektorach słonecznych. Niewiele mniejsze wartości rocznych sum energii występują na północno-wschodnich krańcach województwa (powiaty: kłobucki, częstochowski, myszkowski i zawierciański) gdzie roczna wartość sumy energii wynosi około  $160 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$  dla energii elektrycznej i odpowiednio około  $1,6 \text{ GJ/m}^2/\text{rok}$  dla energii cieplnej.

Tabela II.19 Średnie wartości energii promieniowania słonecznego w funkcji kątów określających zorientowanie płaszczyzny w przestrzeni (azymut i nachylenie) w okresach trzymiesięcznych

styczeń, luty, grudzień		Azymut												
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
nachylenie	90°	0,74	0,90	1,08	1,25	1,41	1,51	1,54	1,49	1,37	1,21	1,03	0,86	0,71
	80°	0,81	0,98	1,16	1,34	1,49	1,59	1,62	1,57	1,46	1,29	1,11	0,94	0,78
	70°	0,87	1,04	1,22	1,39	1,52	1,64	1,67	1,62	1,51	1,35	1,17	1,00	0,83
	60°	0,92	1,08	1,26	1,42	1,56	1,65	1,67	1,63	1,53	1,38	1,21	1,04	0,89
	50°	0,96	1,11	1,27	1,42	1,55	1,62	1,65	1,61	1,52	1,39	1,23	1,08	0,93
	40°	0,98	1,12	1,26	1,39	1,50	1,56	1,58	1,55	1,47	1,36	1,23	1,09	0,95
	30°	1,00	1,11	1,23	1,33	1,41	1,46	1,48	1,45	1,39	1,31	1,20	1,09	0,97
	20°	1,00	1,09	1,17	1,24	1,30	1,34	1,34	1,33	1,29	1,23	1,15	1,07	0,98
	10°	1,00	1,05	1,09	1,13	1,16	1,18	1,18	1,18	1,16	1,12	1,08	1,04	0,99
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Wartość współczynnika FT dla układu śledzącego słońce wynosi : FT=1.71 (10% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w dwu współrzędnych FT=1.55 (1% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi horyzontalnej (wschód zachód) FT=1.65 (6% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej -10° FT=1.70 (9% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej.														
marzec, kwiecień, maj		azymut												
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
nachylenie	90°	0,65	0,69	0,72	0,74	0,75	0,75	0,75	0,74	0,74	0,73	0,70	0,67	0,63
	80°	0,72	0,77	0,80	0,83	0,84	0,85	0,85	0,84	0,83	0,81	0,79	0,75	0,70
	70°	0,78	0,83	0,88	0,91	0,92	0,93	0,93	0,92	0,91	0,89	0,86	0,82	0,77
	60°	0,84	0,89	0,94	0,97	0,99	1,00	1,00	0,99	0,98	0,95	0,92	0,88	0,82
	50°	0,89	0,94	0,98	1,02	1,04	1,05	1,05	1,05	1,03	1,00	0,97	0,92	0,87
	40°	0,93	0,98	1,02	1,05	1,07	1,08	1,08	1,08	1,06	1,03	1,00	0,96	0,91
	30°	0,96	1,00	1,03	1,06	1,08	1,09	1,09	1,09	1,07	1,05	1,02	0,99	0,95
	20°	0,98	1,01	1,04	1,06	1,07	1,08	1,08	1,08	1,07	1,05	1,03	1,00	0,97
	10°	1,00	1,01	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	0,99
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Wartość współczynnika FT dla układu śledzącego słońce wynosi : FT=1.26 (18% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w dwu współrzędnych FT=1.09 (2% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi horyzontalnej (wschód zachód) FT=1.24 (16% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej -10° FT=1.22 (14% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej.														
czerwiec, lipiec, sierpień		Azymut												
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
nachylenie	90°	0,61	0,62	0,63	0,63	0,61	0,60	0,59	0,59	0,61	0,62	0,62	0,62	0,61
	80°	0,68	0,70	0,71	0,71	0,70	0,69	0,68	0,69	0,70	0,70	0,70	0,69	0,67
	70°	0,75	0,77	0,79	0,79	0,78	0,78	0,77	0,77	0,78	0,78	0,78	0,76	0,74
	60°	0,81	0,84	0,85	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,83	0,80
	50°	0,86	0,89	0,90	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,85
	40°	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,92
	30°	0,95	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,97	0,94
	20°	0,97	0,99	1,00	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	0,98	0,97
	10°	0,99	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00	0,99
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Wartość współczynnika FT dla układu śledzącego słońce wynosi : FT=1.28 (25% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w dwu współrzędnych FT=1.07 (4% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi horyzontalnej (wschód zachód) FT=1.24 (21% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej -10° FT=1.20 (17% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej.														
wrzesień, październik, listopad		azymut												
		-90°	-75°	-60°	-45°	-30°	-15°	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
nachylenie	90°	0,66	0,75	0,84	0,92	1,00	1,06	1,08	1,06	1,01	0,94	0,86	0,77	0,68
	80°	0,73	0,83	0,92	1,01	1,09	1,15	1,17	1,15	1,10	1,03	0,94	0,85	0,75
	70°	0,80	0,89	0,99	1,08	1,16	1,22	1,24	1,22	1,17	1,10	1,01	0,91	0,81
	60°	0,85	0,95	1,04	1,13	1,21	1,26	1,28	1,27	1,22	1,15	1,06	0,97	0,86
	50°	0,90	0,99	1,08	1,16	1,23	1,28	1,30	1,29	1,24	1,18	1,10	1,01	0,91
	40°	0,93	1,02	1,10	1,17	1,23	1,28	1,29	1,28	1,24	1,19	1,11	1,03	0,94
	30°	0,96	1,03	1,10	1,16	1,21	1,24	1,26	1,25	1,22	1,17	1,11	1,04	0,97
	20°	0,98	1,03	1,08	1,13	1,16	1,18	1,19	1,19	1,17	1,13	1,09	1,04	0,99
	10°	0,99	1,02	1,05	1,07	1,09	1,10	1,11	1,10	1,09	1,08	1,05	1,03	1,00
0°	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Wartość współczynnika FT dla układu śledzącego słońce wynosi : FT=1.47 (16% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w dwu współrzędnych FT=1.27 (1% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi horyzontalnej (wschód zachód) FT=1.46 (15% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej -10° FT=1.46 (16% w stosunku do ustalonego optimum) dla układu śledzącego słońce w osi północ - południe przy nachyleniu równym szerokości geograficznej.														

### 3.4. Energia wiatru

Energia wiatru jest związana z ruchem mas powietrza w atmosferze ziemskiej. Przemieszczanie się mas powietrza jest skutkiem nierównomiernego rozkładu ciśnienia spowodowanego nierównomiernym ogrzewaniem powierzchni Ziemi przez Słońce. Energia ta jest zatem ściśle związana z energią słoneczną, jest ona formą przekształconą energii słonecznej. Pozyskanie jej odbywa się w urządzeniach nazywanych siłowniami wiatrowymi. Siłownie wiatrowe produkowane i sprzedawane obecnie przetwarzają energię ruchu mas powietrza w energię elektryczną, która następnie może zostać przez odbiorców przetworzona na dowolny rodzaj energii.

Polska nie należy do krajów o szczególnie korzystnych warunkach wiatrowych. Pomiary prędkości wiatru na terenie Polski wykonywane przez IMiGW pozwoliły na dokonanie wstępnego podziału naszego kraju na pewne strefy zróżnicowania pod względem wykorzystania energii wiatru (Ryc.II.15). Na podstawie tych danych można stwierdzić, że dominująca część województwa śląskiego leży w strefie mało korzystnej pod względem potencjalnego wykorzystania energii wiatru (strefa IV), jedynie południową część województwa uznać można za korzystną (strefa III).

### Metodyka szacowania potencjału energii wiatrowej

Potencjał energii wiatrowej oszacowano jako potencjał teoretyczny i techniczny możliwy do pozyskania.

Potencjał teoretyczny oszacowano przy założeniu stuprocentowej sprawności przetworzenia energii kinetycznej wiatru w energię elektryczną. Przy ich określaniu pominięto technologię przetwarzania energii wiatru na inne formy energii. W celu określenia potencjału posłużono się zależnością:

$$P = \frac{1}{2} \rho A w^3 \quad (II.4)$$

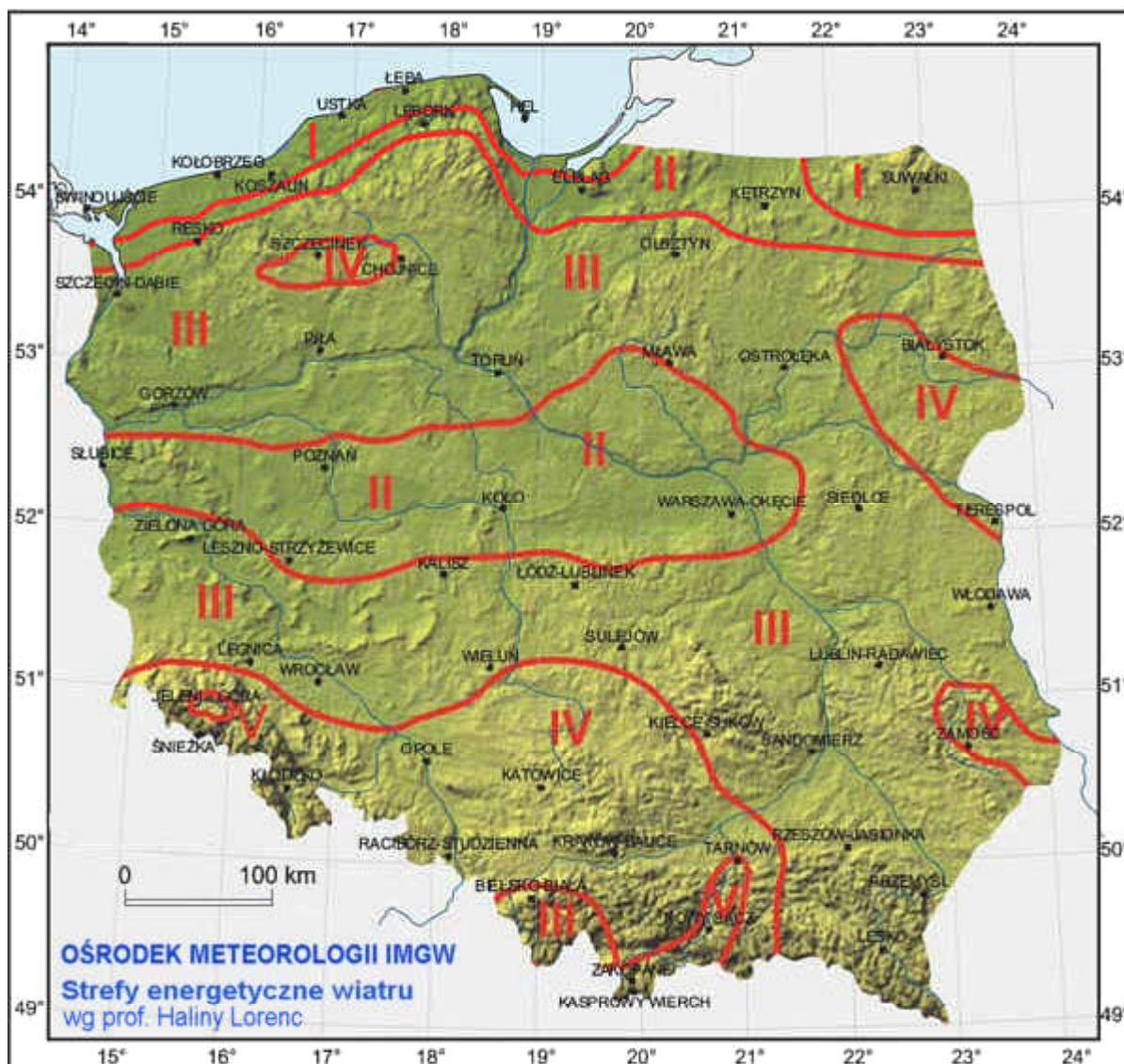
gdzie:

P – moc energii wiatrowej [W];

$\rho$  - gęstość powietrza [kg/m<sup>3</sup>]. Średnioroczna temperatura powietrza na terenie województwa śląskiego waha się w granicach od ok. 4 do 9°C. Na przeważającym jego obszarze można przyjąć, że wynosi ona od ok. 7 do 8°C. Gęstość suchego powietrza w temperaturze 8°C, określona drogą interpolacji liniowej pomiędzy stabelaryzowanymi wartościami w punktach  $\rho(0^\circ\text{C})=1,293 \text{ kg/m}^3$  i  $\rho(10^\circ\text{C})=1,247 \text{ kg/m}^3$ , wynosi 1,256 kg/m<sup>3</sup>.

A – powierzchnia, przez którą przepływa strumień powietrza [m<sup>2</sup>]. Założono, że szacunki dotyczące potencjału energii wiatru odniesione zostaną do 1 m<sup>2</sup> powierzchni;

w – prędkość wiatru [m/s]. Prędkość wiatru jest kluczowym parametrem mającym wpływ na lokalny potencjał energii wiatrowej. Do obliczeń wykorzystano średnioroczną prędkość wiatru mierzone na terenie województwa śląskiego przez stacje pomiarowe IMiGW. W literaturze wartości średniorocznej prędkości wiatru podano dla standardowej wysokości wiatromierza 14 m n.p.t. przy założeniu jednakowej klasy szorstkości terenu dla całego obszaru województwa.



Ryc. Il. 15. Strefy energetyczne wiatru w Polsce: I – wybitnie korzystna, II – bardzo korzystna, III – korzystna, IV – mało korzystna, V – niekorzystna (źródło: Serwis internetowy IMGW)

Ze względu na znaczącą zmienność mocy energii wiatru od prędkości ważne jest precyzyjne określenie tego parametru. W przypadku szacowania potencjału technicznego możliwych do wykorzystania nie bez znaczenia jest określenie częstości występowania prędkości progowych wiatru: minimalnej i maksymalnej. Wyznaczają one zakres prędkości wiatru w jakich możliwa jest produkcja energii. Wartości prędkości progowych uzależnione są od konstrukcji elektrowni wiatrowych. Z reguły minimalna prędkość progowa – tzw. prędkość startowa wynosi ok. 3 – 4 m/s, natomiast prędkość maksymalna – tzw. prędkość wyłączenia ok. 25 m/s. Zaawansowane metody określania potencjału energii wiatrowej muszą uwzględniać zatem dane

pomiarowe lub (w przypadku gdy dokładne dane pomiarowe nie istnieją) statystyczny rozkład prędkości wiatru. Najpowszechniejsza metoda opisująca statystyczny rozkład prędkości wiatru wykorzystuje rozkład Weibulla:

$$f(w) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{w}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left[ - \left( \frac{w}{\beta} \right)^{\alpha} \right] \quad (II.5)$$

gdzie:

$f(w)$  – częstość występowania prędkości wiatru  $w$ ;

$\alpha$  – parametr kształtu. Parametr ten opisuje zmienność prędkości wiatru w stosunku do prędkości średniej w badanym okresie – przykładowo rocznym. Wartości  $\alpha > 2$  są charakterystyczne dla miejsc gdzie zmienność w stosunku do średniej jest niewielka. Wartości  $\alpha < 2$  mówią o dużej zmienności prędkości wiatru w stosunku do prędkości średniej. W niniejszych szacunkach potencjału energii wiatru założono wartość tego parametru  $\alpha = 2$ ;

$\beta$  – parametr skali.

Zależność oczekiwanej wartości zmiennej losowej, którą jest średnia prędkość wiatru, od parametru skali i kształtu przedstawia równanie:

$$\bar{w} = \beta \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (II.6)$$

gdzie:

$\bar{w}$  - średnia prędkość wiatru [m/s];

$\Gamma$  - funkcja gamma Eulera:  $\Gamma(p) = \int_0^{\infty} [x^{p-1} \exp(-x)] dx, p > 0$ .

Prędkość wiatru jest uzależniona również od wysokości na jakiej dokonuje się jej pomiaru. Dla celów ujęcia zmian prędkości wiatru z wysokością zastosowano zależność:

$$w = w_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (II.7)$$

gdzie:

$w$  – prędkość wiatru na wysokości  $h$  [m/s];

$w_0$  – prędkość wiatru na wysokości  $h_0$  [m/s].

Oszacowania potencjału energii wiatru na terenie województwa śląskiego dokonano na trzech wysokościach: 18, 40 i 60 m n.p.t. Wysokości te są charakterystyczne dla masztów siłowni wiatrowych o małych oraz średnich i dużych mocach.

Ostatecznie teoretyczny potencjału energii wiatru przypadający na 1 m<sup>2</sup> powierzchni, przez którą przepływa strumień powietrza oszacowano korzystając z zależności:

$$E_t = \frac{1}{2} \rho t \int_0^{\infty} f(w) w^3 dw \quad (II.8)$$

gdzie:

$E_t$  – teoretyczny potencjał energii wiatrowej [(W·h)/(rok·m<sup>2</sup>)];

$t$  – czas w którym dokonuje się szacowania potencjału i do którego odnosi się wartość prędkości średniej służąca wyznaczeniu częstości występowania prędkości wiatru  $f(w)$ . W niniejszych szacunkach potencjału energii wiatrowej czas ten wynosi 8760 h/rok, a do szacunków posłużono się średnioroczną prędkością wiatru.

Potencjał teoretyczny oszacowano przy założeniu stuprocentowej sprawności przetworzenia energii kinetycznej wiatru w energię elektryczną z pominięciem technologii przetwarzania energii dla trzech wysokości: 18, 40 i 60 m n.p.t. (Ryc. II.16, II.17, II.18).

Potencjał techniczny (Ryc. II.19, II.20, II.21) możliwy do wykorzystania określono dokonując wyboru dostępnych na rynku urządzeń. Dla celów obliczeniowych wybrano dwie siłownie wiatrowe:

- ✓ mała siłownia o mocy 30 kW – wysokość masztu 18 m
- ✓ siłownia o mocy znamionowej 600 kW, reprezentująca urządzenia o średniej i dużej mocy (wysokość masztu 40 i 60 m)