

# Spis treści

<b>Wstęp</b> .....	9
<b>1. Ważniejsze problemy i kierunki przemian energetyki</b> .....	11
1.1. Problem zapotrzebowania na energię .....	11
1.2. Konieczność zmian kierunków rozwoju energetyki .....	14
1.3. Efekt cieplarniany .....	17
1.4. Możliwe kierunki przemian energetyki światowej .....	25
1.5. Energetyka odnawialnych źródeł energii .....	26
1.5.1. Energia słoneczna .....	27
1.5.2. Energia geotermalna .....	30
1.5.3. Energia mechaniczna wód powierzchniowych .....	34
1.5.4. Energia wiatru .....	37
1.5.5. Energia biomasy .....	39
1.5.6. Ogniwa paliwowe .....	41
1.5.7. Wodór .....	43
1.5.8. Energia odpadów komunalnych .....	44
1.6. Organizacje i stowarzyszenia zajmujące się wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii .....	46
1.7. Perspektywy rozwoju odnawialnych źródeł energii .....	47
Literatura .....	47
<b>2. Charakterystyki przepływowe i energetyczne wiatru</b> .....	49
2.1. Wiatr jako zjawisko fizyczne. Określenia, źródło powstawania wiatru .....	49
2.2. Podstawowe charakterystyki wiatru .....	51
2.2.1. Rozkłady prędkości wiatru w funkcji wysokości nad powierzchnią gruntu .....	51
2.2.2. Rozkład gęstości mocy strumienia powietrza w funkcji wysokości .....	55
2.2.3. Porywy wiatru, turbulencja atmosferyczna .....	57
2.2.4. Średnioroczna prędkość wiatru i jej rozkład .....	62

2.3. Energetyczna wydajność EW w zależności od $V_{sh}$ oraz $V_o$ .....	73
2.4. Przybliżona ocena zasobów energii wiatru w Polsce oraz jej zmiany sezonowe .....	78
2.5. Wpływ parametrów atmosferycznych powietrza na wydajność energetyczną EW .....	84
2.6. Czynniki wpływające na możliwości wykorzystania energii wiatru .....	85
Literatura .....	87
<b>3. Charakterystyki elektrowni wiatrowych.</b>	
<b>Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych</b> .....	89
3.1. Wprowadzenie .....	89
3.2. Podstawowe parametry i charakterystyki EW .....	90
3.3. Opis EW o pionowej osi obrotu .....	93
3.4. Opis EW o poziomej osi obrotu .....	95
3.4.1. Klasyczne EW o poziomej osi obrotu. Przegląd dotychczasowych konstrukcji EW .....	97
3.5. Opis konstrukcji EW .....	103
3.6. Stosowane rozwiązania konstrukcyjne podstawowych zespołów EW .....	104
3.6.1. Głowica .....	104
3.6.2. Wirnik .....	107
3.7. Podsumowanie .....	132
Literatura .....	132
<b>4. Eksperymentalne metody badawcze w energetyce wiatrowej</b> .....	134
4.1. Wprowadzenie .....	134
4.2. Zarys teorii podobieństwa w aspekcie badań opływu modeli elektrowni wiatrowej i jej elementów .....	134
4.3. Tunele aerodynamiczne .....	140
4.4. Podsumowanie .....	152
Literatura .....	153
<b>5. Teoretyczne metody badawcze energetyki wiatrowej</b> .....	154
5.1. Wprowadzenie .....	154
5.2. Zagadnienia podstawowe .....	155
5.2.1. Równanie ciągłości .....	155
5.2.2. Zasada zachowania pędu .....	157
5.2.3. Równania Eulera i równanie Bernoulliego .....	161
5.2.4. Przepływy potencjalne ośrodka nieściśliwego .....	164
5.2.4.1. Funkcja prądu .....	165

5.2.4.2. Rozwiązania elementarne równia Laplace’a dla potencjału w przepływie płaskim .....	167
5.2.4.3. Opływ walca kołowego .....	171
5.2.4.4. Opływ płaski bryły symetrycznej .....	173
5.2.4.5. Przepływ wokół profilu cienkiego przy niezerowym kącie natarcia .....	175
5.2.4.6. Metody panelowe: zastosowanie rozkładu osobliwości hydrodynamicznych na powierzchni ciała do wyznaczania opływu .....	184
5.2.5. Odcinek wirowy w przestrzeni i prawo Biota–Savarta .....	194
5.2.6. Warstwa przyścienna. Źródła oporu ciał .....	200
5.2.6.1. Równania Prandtla dla warstwy przyściennej .....	200
5.2.6.2. Równania von Kármána dla warstwy przyściennej .....	203
5.3. Elementarne teorie pracy turbiny wiatrowej	
o osi poziomej .....	212
5.3.1. Teoria strumieniowa .....	212
5.3.2. Teoria elementu łopaty .....	217
5.3.3. Uproszczone teorie wirowe .....	220
5.3.3.1. Model Glauerta .....	223
5.3.3.2. Udoskonalona metoda Witoszyńskiego .....	226
5.3.3.3. Rozszerzenie udoskalonej metody Witoszyńskiego na przypadek napływu niejednorodnego .....	230
5.3.3.4. Projektowanie aerodynamiczne wornika turbiny wiatrowej z wykorzystaniem uproszczonych metod wirowych .....	237
5.4. Teoria linii nośnej dla wornika siłowni wiatrowej .....	249
5.5. Teoria pracy turbiny wiatrowej o osi pionowej .....	255
5.6. Elementy aerodynamiki niestacjonarnej .....	263
5.6.1. Wornik o osi poziomej .....	263
5.6.2. Wornik o osi pionowej .....	273
5.7. Elementy aerodynamiki turbiny pracującej w farmie wiatrowej .....	274
Literatura .....	281

## **6. Generatory, układy regulacji, konfiguracje siłowni,**

<b>akumulacja energii elektrycznej .....</b>	<b>284</b>
6.1. Wybrane elementy maszyn elektrycznych .....	284
6.2. Prądnicę prądu stałego .....	288
6.2.1. Prądnicę obcowzbudna .....	290
6.2.2. Prądnicę samowzbudne .....	291
6.2.2.1. Prądnicę bocznikowa .....	291

6.2.2.2. Prądnica szeregowo-.....	292
6.2.2.3. Prądnica szeregowo-bocznikowa .....	293
6.3. Generatory prądu przemiennego .....	293
6.3.1. Moc chwilowa, czynna, bierna i pozorna .....	293
6.3.2. Generator synchroniczny .....	300
6.3.3. Generator asynchroniczny .....	304
6.3.4. Korekcja współczynnika mocy .....	309
6.3.5. Synchronizacja generatora synchronicznego z siecią odbiorczą .....	312
6.4. Rozwiązania konstrukcyjne .....	313
6.4.1. Podstawowe układy pracy elektrowni – układ klasyczny .....	313
6.5. Układy regulacji .....	319
6.5.1. Regulacja ustawienia elektrowni w kierunku wiatru .....	320
6.5.2. Regulacja kąta ustawienia łopat .....	321
6.5.3. Regulacja poprzez zmianę obciążenia .....	322
6.5.4. Regulacja poprzez „przeciążenie” .....	322
6.5.5. Sterowniki PLC .....	323
6.6. Przetworniki częstotliwości .....	324
6.7. Pomiary parametrów mechanicznych .....	328
6.8. Konfiguracje indywidualnych siłowni wiatrowych .....	333
6.9. Akumulacja energii elektrycznej .....	335
6.9.1. Akumulator ołowiowy .....	336
6.9.2. Akumulator kadmowo-niklowy .....	336
6.9.3. Akumulator NIMH niklowo-wodorkowy .....	336
6.9.4. Akumulator jonowo-litowy .....	337
6.10. Podsumowanie .....	337
Literatura .....	337
<b>7. Projektowanie i dobór układu przepływowego elektrowni wiatrowej .....</b>	<b>339</b>
7.1. Wprowadzenie .....	339
7.2. Dobór wirników EW .....	340
7.2.1. Liczba łopat wirnika EW .....	340
7.3. Geometria i konstrukcja łopat wirnika EW .....	344
7.4. Charakterystyka wirników EW .....	345
7.5. Sposób doboru optymalnych parametrów geometrycznych i ruchowych EW .....	349
7.6. Określenie obciążeń normalnych i granicznych EW .....	369
7.7. Obciążenia dynamiczne generowane opływem elementów EW .....	373
7.8. Podsumowanie .....	381
Literatura .....	381

<b>8. Analiza ekonomiczna i realizacja inwestycji w energetyce wiatrowej .....</b>	<b>383</b>
8.1. Znaczenie analiz ekonomicznych dla określenia efektywności inwestycji w energetyce wiatrowej .....	383
8.2. Metody analizy i ważniejsze wskaźniki stosowane do oceny efektywności ekonomicznej inwestycji .....	383
8.3. Przykłady analizy ekonomicznej inwestycji w energetyce wiatrowej .....	385
8.3.1. Analiza wykorzystująca wskaźniki NCF oraz DPBT .....	385
8.3.2. Analiza wykorzystująca wskaźnik NPV .....	399
8.3.3. Analiza wykorzystująca wskaźnik IRR .....	399
8.4. Realizacja inwestycji w energetyce wiatrowej .....	400
8.5. Podsumowanie problematyki analizy ekonomicznej inwestycji w energetyce wiatrowej .....	401
Literatura .....	401