

Spis treści

Przedmowa	13
Wykaz oznaczeń	21
Wykaz skrótów	23
1. Energia Słońca	29
1.1. Charakterystyka Słońca	29
1.2. Promieniowanie emitowane z powierzchni Słońca	30
1.3. Zależności opisujące energię Słońca	33
1.3.1. Relacje między kątami opisującymi położenie odbiornika energii względem Słońca	33
1.3.2. Składowe promieniowania słonecznego	34
1.4. Modelowanie globalnego potencjału promieniowania słonecznego na przestrzeni 100 lat	39
1.4.1. Promieniowanie słoneczne dominującą częścią bilansu energetycznego naszej planety	39
1.4.2. Szacowany globalny potencjał promieniowania słonecznego na podstawie alternatywnych danych meteorologicznych	40
1.5. Kąt pochylenia odbiornika do podłoża – przejście płaszczyzny odbiornika z poziomej do pochylonej	46
1.5.1. Od modelu izotropowego do anizotropowego	46
1.5.2. Metoda Liu-Jordana	47
1.5.3. Modyfikacje metod rozwiązania dla pochylonej płaszczyzny odbiornika ..	49
1.5.4. Dyskusja optymalizacji orientacji przestrzennej odbiornika energii słonecznej ze względu na maksymalny zysk energetyczny	53
1.5.5. Optymalizacja ustawienia odbiornika na podstawie symulacji komputerowej	60
1.5.6. Warunki i wyniki pomiarów gęstości mocy promieniowania	66
1.6. Techniki komputerowe w rozwiązywaniu problemów prognostycznych promieniowania słonecznego	70
1.7. Wnioski	73
1.8. Sonda kosmiczna <i>Parker Solar Probe</i>	76

1.9.	Metody konwersji energii słonecznej	79
1.10.	Zalety i wady energetyki słonecznej	80
	Literatura do rozdziału 1	81
2.	Ciepłna energetyka słoneczna	90
2.1.	Metody konwersji energii słonecznej w ciepłą	90
2.2.	Kolektory	90
2.2.1.	Charakterystyka ogólna	90
2.2.2.	Kolektory cieczowe	91
2.2.3.	Kolektory powietrzne i próżniowe	96
2.3.	Słoneczne instalacje ciepłe na świecie	97
2.3.1.	Kolektory ciepłe w krajach europejskich	97
2.3.2.	Słoneczne systemy ciepłownicze wielkopowierzchniowe	100
2.3.3.	Elektrownie ciepłe wieżowe	103
2.4.	Przykłady zastosowania kolektorów ciepłych	106
2.5.	Ciepłna energetyka słoneczna w Polsce	110
2.5.1.	Rozkład całkowitego promieniowania słonecznego	110
2.5.2.	Możliwości wykorzystania energii słonecznej do celów termicznych	113
	Literatura do rozdziału 2	120
3.	Konwersja energii słonecznej w elektryczną	124
3.1.	Zjawisko fotowoltaiczne wewnętrzne	124
3.1.1.	Mechanizm zjawiska	124
3.1.2.	Powstawanie bariery potencjału	126
3.2.	Kalendarium wydarzeń w rozwoju konwersji fotowoltaicznej	129
3.2.1.	Antoine Cesar Becquerel i jego odkrycie	129
3.2.2.	Badania zjawiska fotowoltaicznego w XIX wieku	131
3.2.3.	Teoria Alberta Einsteina	131
3.2.4.	Jan Czochralski i jego metoda	132
3.2.5.	Dalszy rozwój fotowoltaiki	139
3.2.6.	Witold Żdanowicz – pionier fotowoltaiki w Polsce	142
3.2.7.	Twórcy fotowoltaiki III generacji	143
	Literatura do rozdziału 3	147
4.	Rozwiązania materiałowe, konstrukcyjne i eksploatacyjne ogniw fotowoltaicznych	153
4.1.	Podział materiałowy i strukturalny ogniw fotowoltaicznych	153
4.2.	Ogniwa krzemowe	156
4.2.1.	Ogólna charakterystyka krzemu	156
4.2.2.	Ogniwa mono- i polikrystaliczne	157
4.2.3.	Ogniwa z krzemu amorficznego	161
4.2.4.	Cienkowarstwowe krzemowe ogniwa krystaliczne	164
4.2.5.	Nowe rozwiązania	165
4.3.	Ogniwa z tellurku kadmu	179
4.3.1.	Ogólna charakterystyka tellurku kadmu	179
4.3.2.	Rozwiązania krystaliczne i cienkowarstwowe	181
4.4.	Ogniwa z arsenku galu	184
4.4.1.	Ogólna charakterystyka arsenku galu	184

4.4.2.	Struktury krystaliczne i cienkowarstwowe.	185
4.5.	Ogniwa z diselenku indowo-miedziowego (CIS) i ich modyfikacje (CIGS, CIBS).	187
4.6.	Ogniwa fotowoltaiczne typu tandem.	192
4.7.	Ogniwa fotowoltaiczne z nanorurkami.	194
4.8.	Ogniwa organiczne.	195
4.8.1.	Ogólna charakterystyka ogniw.	195
4.8.2.	Wybrane rozwiązania planarne i struktury 3D.	196
4.8.3.	Ogniwo barwnikowe Grätzela.	197
4.8.4.	Nowe rozwiązania ogniw organicznych.	198
4.9.	Ogniwa perowskitowe.	199
4.10.	Moduły.	202
4.11.	Ogniwo fotowoltaiczno-fototermiczne o konwersji kombinowanej.	204
4.12.	Ogniwo termofotowoltaiczne o konwersji promieniowania podczerwonego.	205
4.13.	Ogniwa zintegrowane z architekturą.	206
4.13.1.	Charakterystyka rozwiązań PV stosowanych w budownictwie.	206
4.13.2.	Systemy dachowe.	208
4.13.3.	Przykład instalacji PV na dachu domu jednorodzinnego – analiza pracy.	211
4.13.4.	Największe na świecie dachowe systemy PV.	212
4.13.5.	Moduły fasadowe i transparentne okienne.	216
4.13.6.	Nowe rozwiązania BIPV i znani producenci.	218
4.14.	Ogniwa współpracujące z koncentratorami.	223
4.14.1.	Koncentratory w układzie nadążnym.	223
4.14.2.	Nowe rozwiązania.	226
	Literatura do rozdziału 4.	227
5.	Wybrane właściwości ogniw fotowoltaicznych.	238
5.1.	Absorpcyjność.	238
5.2.	Refleksyjność.	243
5.3.	Degradacja ogniw.	244
5.4.	Strumień fotonów w funkcji wybranych parametrów ognia.	245
5.5.	Gęstość fotoprądu emitera i bazy.	246
5.6.	Wydajność kwantowa.	248
5.6.1.	Wydajność zewnętrzna i wewnętrzna.	248
5.6.2.	Wpływ prędkości rekombinacji na wydajność kwantową.	249
5.6.3.	Wpływ średniej drogi dyfuzji na wydajność kwantową.	250
5.7.	Czynnik spektralny.	252
5.8.	Badania ogniw fotowoltaicznych w warunkach promieniowania o różnych długościach fali w zakresie światła widzialnego.	252
5.8.1.	Warunki i obiekty badań.	252
5.8.2.	Wyniki badań.	255
5.8.3.	Wnioski.	255
	Literatura do rozdziału 5.	259
6.	Schemat zastępczy, parametry i charakterystyki ognia fotowoltaicznego.	262
6.1.	Schemat zastępczy ognia i jego parametry.	262
6.2.	Charakterystyki prądowo-napięciowe ognia fotowoltaicznego.	264

6.2.1.	Wyznaczanie zależności prądowo-napięciowych w funkcji parametrów ogniwa	264
6.2.2.	Symulacja charakterystyk wybranych ogniw w funkcji nasłonecznienia i temperatury	266
6.2.3.	Parametry charakterystyczne ogniw	266
6.3.	Charakterystyka mocy i sprawność ogniwa fotowoltaicznego	272
6.3.1.	Wpływ nasłonecznienia i temperatury na moc	272
6.3.2.	Wpływ nasłonecznienia i temperatury na sprawność	275
6.3.3.	Optymalizacja pracy w wyniku kształtowania obciążenia ogniwa	277
6.4.	Współpraca baterii słonecznej z silnikiem prądu stałego zasilającym wentylator	278
6.4.1.	Schemat ideowy badanego układu	278
6.4.2.	Model matematyczny	280
6.4.3.	Przykładowe wyniki symulacji	283
6.5.	Praca ogniw fotowoltaicznych w różnych konfiguracjach połączeń	286
6.6.	Wpływ zacienienia na pracę modułu fotowoltaicznego	289
	Literatura do rozdziału 6	290
7.	Technologia produkcji	294
7.1.	Ogniwa krzemowe	294
7.1.1.	Krzem do produkcji ogniw słonecznych	294
7.1.2.	Wytwarzanie bloków krzemu monokrystalicznego	299
7.1.3.	Otrzymywanie bloków krzemu polikrystalicznego	305
7.1.4.	Cięcie bloków krzemowych na płytki	307
7.1.5.	Dalsza obróbka płytek krzemowych	307
7.1.6.	Inne technologie produkcji ogniw krzemowych	310
7.1.7.	Nowe technologie w produkcji krzemu i ogniw krzemowych	313
7.1.8.	Łączenie ogniw w moduły	315
7.1.9.	Wytwarzanie taśm krzemowych	317
7.2.	Ogniwa cienkowarstwowe wykonane w technologii innej niż krzemowa	323
7.2.1.	Ogniwa CdS/CdTe i CIGS	323
7.2.2.	Nowa proekologiczna technologia ogniw CIGS	326
7.2.3.	Ogniwa cienkowarstwowe GaAs	327
7.3.	Technologia samoczyszczenia ogniw słonecznych	329
	Literatura do rozdziału 7	329
8.	Instalacje fotowoltaiczne	335
8.1.	Konfiguracje systemów fotowoltaicznych	335
8.2.	Elementy instalacji fotowoltaicznej	339
8.2.1.	Wprowadzenie	339
8.2.2.	Moduły fotowoltaiczne	341
8.2.3.	Trackery	347
8.2.4.	Magazynowanie energii elektrycznej uzyskanej z fotowoltaiki	349
8.2.5.	Regulatory ładowania	354
8.2.6.	Falowniki	357
8.2.7.	Systemy monitorujące	363
8.2.8.	Zabezpieczenia systemów fotowoltaicznych	363
8.2.9.	Konstrukcja nośna i kable	364
8.3.	Zestaw hybrydowy	368
8.4.	Specyfikacja zapotrzebowania na energię. Sprawność i koszty	368

8.5.	Montaż, obsługa i konserwacja instalacji fotowoltaicznej	370
	Literatura do rozdziału 8	372
9.	Zastosowanie ogniw słonecznych	377
9.1.	Dotychczasowe tempo rozwoju instalacji fotowoltaicznych i perspektywy ..	377
9.2.	Ogniwa słoneczne w urządzeniach powszechnego użytku małej mocy ...	378
9.3.	Systemy autonomiczne	380
9.3.1.	Przegląd możliwości zastosowania	380
9.3.2.	Zasilanie oświetlenia	381
9.3.3.	Biletomaty i parkomaty	382
9.3.4.	Ławki fotowoltaiczne	384
9.3.5.	Drogi zasilane fotowoltaicznie	387
9.3.6.	Latarnie morskie	388
9.3.7.	Systemy ostrzegania i sygnalizacji	392
9.4.	Układy współpracujące z siecią	393
9.4.1.	Systemy rozproszone BIPV	393
9.4.2.	Systemy scentralizowane	396
9.5.	Systemy hybrydowe	407
9.5.1.	Wprowadzenie	407
9.5.2.	Graciosa Acores – przykład systemu hybrydowego gwarantującego samowystarczalność energetyczną	408
9.5.3.	Największe elektrownie hybrydowe z udziałem fotowoltaiki	415
9.5.4.	Inne rozwiązania hybrydowe	415
9.6.	Zastosowania w kosmonautyce	420
	Literatura do rozdziału 9	421
10.	Wykorzystanie energii Słońca i podczerwieni do zasilania w środkach transportu	426
10.1.	Samochody słoneczne	426
10.1.1.	Metody zasilania	426
10.1.2.	Historyczne prototypy	427
10.1.3.	Samochody wyścigowe i ich parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne ..	428
10.2.	Najważniejsze aspekty projektowania pojazdu słonecznego	435
10.2.1.	Strategia projektowania i optymalizacja ruchu	435
10.2.2.	Moc niezbędna do pokonania oporów jazdy	438
10.2.3.	Moc pozyskiwana na drodze konwersji fotowoltaicznej	439
10.2.4.	Moc uzupełniająca z akumulatora	441
10.2.5.	Materiały i elementy konstrukcyjne stosowane w samochodach słonecznych	444
10.3.	Charakterystyki ruchu samochodu słonecznego w funkcji jego parametrów i warunków zewnętrznych	447
10.3.1.	Wpływ parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych samochodu słonecznego na jego charakterystyki ruchu	447
10.3.2.	Optymalizacja doboru prędkości w samochodzie słonecznym z doładowa- niem akumulatora podczas jazdy, ze względu na maksymalny zasięg	450
10.3.3.	Bilans mocy pojazdu elektrycznego zasilanego energią Słońca	454
10.3.4.	Wnioski i uwagi do przeprowadzonych symulacji komputerowych	460
10.3.5.	Osiągnięcia projektowo-konstrukcyjne zespołów studenckich	463
10.4.	Samochody elektryczne i hybrydowe zasilane energią Słońca	465
10.4.1.	Pojazd <i>Solar Bug</i>	465

10.4.2.	Jeep elektryczny	466
10.4.3.	Pojazd <i>Connector 2001</i>	466
10.4.4.	Peugeot BB1 Concept	467
10.4.5.	Fisker Karma	468
10.4.6.	Pojazd <i>Lightyear</i>	469
10.4.7.	Aptera Sol	470
10.4.8.	Dalszy rozwój pojazdów zasilanych energią Słońca	471
10.5.	Wypożyczenie dodatkowe	472
10.5.1.	Dach słoneczny jako stacja ładowania	472
10.5.2.	Samochodowe panele PV	472
10.5.3.	Inne rozwiązania	473
10.6.	Transport kolejowy z udziałem energii Słońca	474
10.6.1.	Pociąg słoneczny w Belgii	474
10.6.2.	Trendy rozwojowe aplikacji PV w kolejnictwie	474
10.6.3.	Pociąg słoneczny w Australii	475
10.7.	Samoloty zasilane energią Słońca	476
10.7.1.	Prace NASA	476
10.7.2.	<i>Solar Challenger</i>	476
10.7.3.	<i>Helios</i>	476
10.7.4.	<i>Solar Impulse</i>	477
10.7.5.	Polski samolot słoneczny <i>Phoenix</i>	478
10.8.	Jednostki pływające zasilane energią Słońca	479
10.8.1.	Katamaran <i>Sun 21</i>	479
10.8.2.	Tramwaj wodny <i>Słonecznik</i>	479
10.8.3.	Katamaran pasażerski <i>Solar</i>	480
10.8.4.	Katamaran <i>Tûranor Planet Solar</i>	483
10.8.5.	Katamaran <i>Energy Observer</i>	484
10.8.6.	Łodzie solarne zespołu Fiten Solar Team	486
10.8.7.	Etapy projektowania łodzi zasilanych energią słoneczną	488
	Literatura do rozdziału 10	489
11.	Zagadnienia prawne, społeczne, ekonomiczne, normalizacja i recykling	494
11.1.	Wprowadzenie	494
11.2.	Strategia Unii Europejskiej dla energetyki słonecznej	495
11.3.	Koszt systemu fotowoltaicznego	500
11.4.	Problem autokonsumpcji	507
11.5.	Koszty zewnętrzne	508
11.6.	Normalizacja	509
11.7.	Konwersja fotowoltaiczna w promocji i edukacji	511
11.8.	Recykling modułów fotowoltaicznych	516
11.8.1.	Problemy recyklingu, koszty, technologie	516
11.8.2.	Linie pilotażowe odzysku i ponownego wykorzystania modułów krzemowych	518
11.8.3.	Metoda odzysku i ponownego wykorzystania modułów z CdTe	520
	Literatura do rozdziału 11	521
12.	Fotowoltaika w Polsce	526
12.1.	Możliwości sektora fotowoltaicznego	526
12.2.	Prace naukowo-badawcze	529

12.2.1. Laboratorium Fotowoltaiczne Instytutu Metalurgii i Inżynierii
Materiałowej PAN w Kozach 529

12.2.2. Prace Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych..... 537

12.2.3. Laboratorium Energetyki Odnawialnej w Sulechowie..... 538

12.2.4. Słupski Inkubator Technologiczny 539

12.2.5. Fotowoltaika w Parku Naukowo-Technologicznym Euro-Centrum
w Katowicach 542

12.3. Największe inwestycje fotowoltaiczne w Polsce 543

12.3.1. Farmy fotowoltaiczne w Polsce 543

12.3.2. Wybrane aplikacje fotowoltaiczne w budownictwie 548

12.4. Producenci modułów..... 557

12.4.1. EKOpower21 Sp. z o.o. z Warszawy 557

12.4.2. Linia produkcyjna modułów Solar-Energy 557

12.4.3. SELFA GE ze Szczecina..... 559

Literatura do rozdziału 12 559

Indeks nazwisk 563

Skorowidz rzeczowy 565