

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 pochyleń 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.	Ciepła 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.	Ciepła 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 Zdanowicz - 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 Gratzela	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 nadażnym	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 ogniwa	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 ogniwa fotowoltaicznego	262
6.1.	Schemat zastępczy ogniwa i jego parametry	262
6.2.	Charakterystyki prądowo-napięciowe ogniwa 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.	Wyposażenie 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>Turanor Planet Solar</i>	483
10.8.5.	Katamaran <i>Energy Obseruer</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