

Spis treści

Od autora	15
Perspektywy rozwoju fotowoltaiki w Polsce	17
Struktura nakładów inwestycyjnych kosztów eksploatacyjnych dla elektrowni fotowoltaicznych	39
Wybrane zagadnienia z ustawy Prawo energetyczne dotyczące fotowoltaiki	41
Wykaz wybranych oznaczeń, wielkości i ich jednostek	55
Symbole graficzne wg PN-EN 60617 stosowane w schematach elektrycznych	59

MODUŁ I

Podstawy elektrotechniki	71
1. Prąd stały	71
1.1. Prąd elektryczny	71
1.2. Napięcie elektryczne	72
1.3. Obwody elektryczne	72
1.4. Prawo Ohma	73
1.5. Obliczanie rezystancji	73
1.6. Łączenie rezystorów	73
1.7. Zależność rezystancji od temperatury	74
1.8. Źródła prądu stałego	74
1.9. Prawa obwodu elektrycznego	75
1.9.1. Pierwsze prawo Kirchhoffa	75
1.9.2. Drugie prawo Kirchhoffa	76
1.10. Stany pracy źródeł energii elektrycznej	76
1.11. Moc prądu stałego	76
1.12. Energia prądu stałego	77
1.13. Prawo Joule'a – Lenza	78
2. Prąd przemienny jednofazowy	78
2.1. Analiza obwodów zawierających elementy R, L, C	79
2.1.1. Obwód elektryczny z rezystancją	79
2.1.2. Obwód elektryczny z cewką o indukcyjności L (reaktancją indukcyjną)	80
2.1.3. Obwód elektryczny z kondensatorem o pojemności C (reaktancją pojemnościową)	81

2.1.4. Obwód elektryczny szeregowy z elementami R, L, C	82
2.1.5. Obwód elektryczny równoległy z elementami R, L, C	83
3. Kondensatory	85
3.1. Pojemność kondensatora	85
3.2. Łączenie kondensatorów	86
4. Moc prądu przemiennego jednofazowego	86
4.1. Moc czynna	86
4.2. Moc bierna	87
4.3. Moc pozorna	88
5. Układy trójfazowe	88
5.1. Układ połączeń odbiorników w gwiazdę	88
5.2. Układ odbiorników połączonych w trójkąt	89
6. Pomiar mocy w układach 3 fazowych	90
7. Pomiar energii w obwodach trójfazowych	91

MODUŁ II

Współpraca mikroinstalacji fotowoltaicznych z siecią dystrybucyjną niskiego napięcia	93
---	----

MODUŁ III

Urządzenia i instalacje elektryczne	99
---	----

1. Oznaczenia przewodów i zacisków	99
1.1. Wybrane oznaczenia kabli i przewodów według normy PN: 60446	101
1.2. Przekroje przewodów	102
1.3. Wybrane przykłady oznaczeń przewodów	102
1.4. Podział przewodów ze względu na pełnioną funkcję	103
1.5. Oznaczenia przewodów i zacisków odbiorników	103
2. Łączenie przewodów	104
3. Wybrane zagadnienia ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach elektrycznych do 1 kV	105
3.1. Oddziaływanie prądu elektrycznego na organizm ludzki	105
3.2. Warunki środowiskowe	106
3.3. Stopnie ochrony obudów urządzeń elektrycznych	107
3.4. Klasy ochronności urządzeń elektrycznych i elektronicznych	108
3.5. Napięcia i układy sieciowe	108
3.6. Układy sieci	109
3.7. Charakterystyka układów sieciowych	110
4. Środki ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym przy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych	112
4.1. Rodzaje ochron przeciwporażeniowych	112

4.1.1. Równoczesna ochrona przed dotykiem bezpośrednim i pośrednim . .	112
4.1.2. Ochrona przed dotykiem bezpośrednim (ochrona podstawowa)	114
4.2. Ochrona przed dotykiem pośrednim (ochrona dodatkowa)	115
4.2.1. Ochrona przez zastosowanie samoczynnego wyłączenia zasilania . .	115
4.2.2. Wyłączniki nadmiarowo-prądowe	116
4.3. Urządzenia ochronne różnicowoprądowe	119
4.4. Ochrona przed dotykiem pośrednim przez samoczynne wyłączenie zasilania w układzie sieciowym TN	126
4.5. Ochrona przez zastosowanie urządzenia II klasy ochronności	128
4.6. Ochrona przez zastosowanie izolowania stanowiska	129
4.7. Ochrona przez zastosowanie separacji elektrycznej	129
4.8. Ochrona przez zastosowanie nieuziemionych połączeń wyrównawczych miejscowych	131
4.9. Połączenia wyrównawcze	132
5. Przewody ochronne, ochronno-neutralne i wyrównawcze	134
6. Uziomy i przewody uziemiające	135
6.1. Uziomy naturalne	136
6.2. Uziomy sztuczne	136
7. Ochrona przed przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi	139
8. Przyłączanie urządzeń elektrycznych	142
9. Zasilanie budynku	143
10. Instalacje elektryczne w mieszkaniach i budynkach mieszkalnych	143
11. Wybrane zasady wykonania instalacji elektrycznej w budynku	147
12. Eksploatacja instalacji elektrycznych	149
13. Pomiar ciągłości przewodów	150
14. Pomiar rezystancji izolacji instalacji elektrycznej	151
15. Pomiar rezystancji izolacji podłóg i ścian	153
16. Pomiar rezystancji uziomu	153
17. Sprawdzenie skuteczności ochrony przed dotykiem pośrednim przez samoczynne wyłączenie zasilania	154
18. Sprawdzanie działania urządzeń ochronnych różnicowoprądowych . .	157
19. Protokół odbiorczy	157
20. Ogólne zasady eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych	157
21. Dokumentacja techniczna	158
22. Przyjmowanie urządzeń do eksploatacji	159
23. Prowadzenie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych	160
24. Kontrola eksploatacji	160

MODUŁ IV

Energia słoneczna 161

1. Atmosfera Ziemi	162
2. Oddziaływanie atmosfery z promieniowaniem	162

3. Wielkość energii słonecznej na Ziemi	163
4. Nasłonecznienie w Polsce	164
5. Zalety promieniowania słonecznego jako źródła energii.	164
6. Wady promieniowania słonecznego jako źródła energii	164
7. Sposoby produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem energii słonecznej.	165
7.1. Metoda heli termiczna.	165
7.2. Metoda helioelektryczna	166
8. Wiadomości wstępne z optoelektroniki	168
9. Budowa i zasada działania ogniw krzemowych	170
9.1. Podział ogniw PV	171
10. Ogniw z krzemu monolitycznego I generacji	172
10.1. Budowa fotoogniwa	172
10.2. Technologia wytwarzania fotoogniwa I generacji	173
11. Ogniw polikrystaliczne	177
11.1. Budowa fotoogniwa	177
12. Rozwiązania techniczne w budowie ogniw fotowoltaicznych II generacji	179
12.1. Budowa fotoogniwa.	179
12.2. Ogniw P – TYPE (PERC)	180
12.3. Technologia N – TYPE	182
12.4. Łączenie ogniw PERC i PERT w moduły	184
12.5. Technologia wykonania busbarów (połączeń ogniw)	185
12.6. Moduł half cut cells – ogniw połówkowe	186
13. Budowa i zasada działania ogniw fotowoltaicznych III generacji	188
13.1. Ogniw CIS	188
13.2. Ogniw CIGS.	189
13.3. Ogniw z tellurku kadmu (CdTe).	190
13.4. Ogniw cienkowarstwowe jedno- i wielozłączowe z arsenku galu (GaAs)	192
14. Ogniw PV III generacji z krzemu amorficznego (a-Si) budowane w technologii HJT	193
14.1. Budowa urządzenia	193
14.2. Technologia produkcji ogniw SHJ.	195
14.3. Polskie rozwiązania techniczne	196
15. Budowa ogniw PV III generacji z krzemu amorficznego (a-Si) w technologii TOPCon	197
15.1. Budowa urządzenia	197
15.2. Technologia produkcji wafli krzemowych c-Si N–TYPE.	198
15.3. Warstwa selektywna (ITO) w ogniwie TOPCon	198
15.4. Urządzenia do nakładania warstwy selektywnej.	199
15.5. Połączenia za pomocą busbasów w ogniwach TOPCon.	199
15.6. Połówkowe ogniw TOPCon	200
15.7. Ocena parametrów ogniw TOPCon	200

15.8. Parametry elektryczne modułu TOPCon firmy Jolywood	201
w standardowych warunkach testowych STC	
15.9. Parametry mechaniczne modułu TOPCon firmy Jolywood,	201
16. Budowa ogniwa PV III generacji w technologii TOPCon i HJT.	202
17. Ogniwa z krzemu amorficznego	203
17.1. Budowa i technologia wytwarzania fotoogniwa	203
18. Ogniwa fotowoltaiczne z materiałów organicznych	204
18.1. Budowa i technologia wytwarzania	204
18.2. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne ogniw PV, na podłożu polimerowym	205
18.3. Sposoby produkcji	208
18.4. Sposoby montażu fotoogniw polimerowych elastycznych na dachu płaskim.	208
19. Organiczne ogniwa fotowoltaiczne (OPV), ogniwa IV generacji	210
20. Ogniwa fotowoltaiczne uczulane barwnikiem (DSSC) IV generacji	211
20.1. Zasada działania	211
20.2. Budowa, parametry ogniwa	212
21. Hybrydowe panele słoneczne	213
21.1. Zasada działania	213
21.2. Budowa urządzenia	214
22. Dwustronne baterie słoneczne	217
22.1. Dachy pokryte dachówką w formie paneli fotowoltaicznych	217
22.2. Angielskie dachówki fotowoltaiczne.	219
23. Najnowsze technologie wytwarzania ogniw fotowoltaicznych.	220
23.1. Ogniwa perowskitowe	220
23.2. Moduły fotowoltaiczne z warstwą grafenową	222
23.3. Projekt „Quantum Glass” spółki ML System.	222
23.4. Technologia skoncentrowanej fotowoltaiki (Concentrated Photovoltaics, CPV)	224
23.5. Moduły PV z powłoką grafenową	225
23.6. Ogniwa budowane w technologii C3 (Configurable Current Cells)	226
23.7. Ogniwa fotowoltaiczne łączące perowskit i krzem	226
23.8. Elewacja z folii fotowoltaicznej.	227
23.9. Ogniwa PV klejone klejem ECA technologii Shingled (układane w formie gontów)	227
24. Utrata mocy fotoogniw funkcji czasu pracy	228
24.1. Dioda bocznikująca fotoogniwo (by-pass)	228
24.2. Optymalizatory firmy Maxim Integrated.	231
24.3. Optymalizatory firmy Tigo Energy (Tigo TS4-R-O).	231
24.4. Moduł fotowoltaiczny firmy AE Solar – odporny na zacinienie	231
25. Gorący punkt (hot spot).	232
25.1. Napięcie indukowane w module PID (Potential Induced Degradation)	233
25.2. Prąd upływu	233
25.3. Prąd doziemny	233

25.4. Pętla indukcyjna.	233
25.5. Zwarcie doziemne po stronie DC instalacji PV.	233
25.6. Badanie modułów fotowoltaicznych	234
25.7. Laboratorium do testowania systemów PV	236
26. Analiza pracy fotoogniwa	237
26.1. Podstawowe zależności	237
26.2. Wpływ temperatury na parametry fotoogniwa	240
26.3. Sposoby połączeń modułów PV	242
26.4. Wpływ promieniowania słonecznego na parametry modułu fotowoltaicznego.	243
26.4.1. Współczynnik wypełnienia FF	244
26.5. Wybrane wyniki badań modułów fotowoltaicznych	245
26.6. Wybrane wyniki badań instalacji fotowoltaicznej „podążającej za słońcem”	254
27. Parametry osprzętu instalacji PV.	256
27.1. Regulatory ładowania.	256
27.2. Przetwornice napięcia	258
27.2.1. Falowniki 3-fazowe	260
27.2.2. Inwerter w instalacji fotowoltaicznej.	262
27.2.3. Przykładowe rozwiązanie	269
27.2.4. Parametry elektryczne pracy falownika 1-fazowego.	270
27.2.5. Wybrane parametry falowników trójfazowych	271
27.2.6. Falowniki średniej mocy	272
27.2.7. Falowniki hybrydowe.	273
27.2.8. Panel fotowoltaiczny ze zintegrowanym mikrofalownikiem.	274
27.2.9. Falowniki fotowoltaiczne z systemem kompensacji mocy biernej	274
27.2.10. Zagadnienia eksploatacyjne dotyczące załączenia do sieci falowników	276
27.3. MPP tracker	278
27.4. Monitorowanie na poziomie paneli	279
27.4.1. Moduły fotowoltaiczne SolarEdge zintegrowane z optymalizatorami mocy.	281
27.5. Modem komunikacyjny	282
27.5.1. Zasada działania.	282
27.5.2. Charakterystyka urządzeń	282
27.6. Sposób łączenia przewodów po stronie DC.	283
27.7. Dobór przewodów w instalacji fotowoltaicznej.	284
27.7.1. Warunki doboru przekroju przewodów ze względu na obciążalność prądową długotrwałą	285
27.7.2. Wyznaczanie przekroju przewodów ze względu na obciążalność długotrwałą po stronie DC	286
27.7.3. Wyznaczanie przekroju przewodów po stronie DC ze względu na dopuszczalne spadki napięcia	287
27.7.4. Sprawdzenie wielkości strat mocy na przewodach łączących łańcuch (string) modułów fotowoltaicznych z falownikiem	287

27.7.5. Wyznaczanie przekroju przewodów i kabli ze względu na	
obciążalność długotrwałą i przeciążalność po stronie prądu	
zmiennego AC instalacji fotowoltaicznej	288
27.7.6. Wyznaczanie przekroju przewodów po stronie AC	
ze względu na dopuszczalne spadki napięcia	288
27.7.7. Dobór zabezpieczeń w instalacjach fotowoltaicznych	289
27.8. Mierniki instalacji fotowoltaicznych	290
27.9. Pomiary natężenia promieniowania słonecznego	
i temperatury modułu fotowoltaicznego.	291
28. Dobór parametrów instalacji fotowoltaicznych.	292
28.1. Rodzaje instalacji PV	292
28.2. Mała instalacja fotowoltaiczna	293
28.3. Wybrane układy połączeń fotoogniw.	297
28.3.1. Sieć autonomiczna off-grid (wydzielona)	297
28.3.2. Praca elektrowni PV na sieć „sztywną” (on-grid)	302
29. Wytyczne montażowe	304
29.1. Etapy realizacji inwestycji.	304
29.2. Projekt techniczny	304
29.3. Etapy budowy	305
29.4. Zagadnienia techniczne montażu instalacji	305
29.5. Sposób montażu ogniw PV w rzędach.	307
29.6. Systemy zabezpieczeń w instalacjach fotowoltaicznych.	309
29.6.1. Rodzaje zabezpieczeń instalacji fotowoltaicznej	309
29.7. Ochrona odgromowa instalacji fotowoltaicznych	309
29.7.1. Ochrona odgromowa – rodzaje ochrony	311
29.7.2. Ochrona odgromowa – ochrona zewnętrzna	311
29.7.3. Ochrona odgromowa farm fotowoltaicznych –	
ochrona zewnętrzna.	315
29.7.4. System ochronny instalacji PV bez zewnętrznej ochrony	
odgromowej (zwodów pionowych) – ochrona wewnętrzna	315
29.7.5. Ogólne zasady doboru ograniczników po stronie DC	317
29.7.6. Ochrona przetężeniowa i zwarciowa	320
29.7.7. Ochrona przeciwporażeniowa w systemach fotowoltaicznych	321
29.8. Odbiór instalacji.	322
30. BHP przy montażu instalacji fotowoltaicznej	323
30.1. Zasady BHP przy montażu instalacji fotowoltaicznych	323
30.2. Kompletność dostawy materiałów i urządzeń	325
30.3. Transport i składowanie	325
30.4. Dokumentacja techniczna	325
30.5. Narzędzia i sprzęt dodatkowy	325
30.6. Informacje ogólne	325
30.7. Przepisy bezpieczeństwa	326
30.8. Ochrona przeciwporażeniowa	326
30.8.1. Ochrona przeciwpożarowa.	326

30.8.2. Warunki środowiskowe	328
30.8.3. Postępowanie w razie pożaru budynku z instalacją PV	328
30.8.4. Analiza skutków pożarów instalacji fotowoltaicznych	329
30.8.5. Gaszenie pożaru nocą z instalacją PV na dachu	330
30.8.6. Łuk elektryczny	330
30.8.7. Zasady wyposażenia obiektów w gaśnice	331
30.8.8. Gaszenie urządzeń elektrycznych	331
30.8.9. Optymizery	331
30.8.10. Dokumentacja instalacji PV	332
30.8.11. Ubezpieczenie instalacji PV na wypadek pożaru	332
30.9. Bezpieczeństwo wykonywania prac przy urządzeniach elektrycznych ..	333
30.10. Oznaczenia i symbole	334
31. Montaż instalacji fotowoltaicznej	335
31.1. Systemy montażowe dla modułów skrzynkowych	336
31.1.1. Montaż na dachu spadzistym	336
31.1.2. Montaż ogniw PV na dachu płaskim lub płaszczyźnie poziomej	338
31.1.3. Sposób montażu modułów	340
31.1.4. Zintegrowane z dachem moduły fotowoltaiczne	340
31.1.5. Montaż fotoogniw „podążających za słońcem”	341
31.1.6. Konstrukcja do mocowania na stropie	342
31.1.7. Konstrukcja wsporcza mocowana do betonowych bloków	343
31.1.8. System samonośny	344
31.2. Montaż systemów PV na gruncie	344
31.3. Montaż instalacji fotowoltaicznej na konstrukcji aluminiowej na dachu płaskim	345
31.4. Montaż instalacji fotowoltaicznej na dachu spadzistym	
pokrytym dachówką betonową	347
31.5. Montaż instalacji fotowoltaicznej na konstrukcji aluminiowej na dachu płaskim pokrytym blachą falistą	351
31.6. Montaż instalacji fotowoltaicznej na dachu spadzistym pokrytym blachodachówką	351
31.7. Najnowsze rozwiązania techniczne w zakresie mocowania modułów PV	352
31.8. Fotowoltaika zintegrowana z budynkiem – Instalacje BIPV (Building Integrated Photovoltaics BIPV)	353
31.9. Agrofotowoltaika (APV)	359
31.10. Łuki fotowoltaiczne	360
31.11. Szklarnie pokryte modułami PV Bifacjal	361
31.12. Pasieki na farmach PV	361
31.13. Instalacje fotowoltaiczne posadowione na wodzie	362
31.14. Naziemna pionowa farma PV z dwustronnymi modułami	363
31.15. Fotowoltaika na polskich autostradach	364
32. Eksploatacja instalacji fotowoltaicznych	365
32.1. Wymiana uszkodzonego modułu	365
32.2. Mycie instalacji fotowoltaicznej	365
32.3. Sprawdzenie mocowania paneli	366

32.4. Usuwanie śniegu	366
32.5. Stan przewodów zasilających w instalacji prądu stałego (DC)	367
32.6. Sprawdzenie stanu technicznego falownika	367
32.7. Czynniki wpływające ujemnie na produkcję energii z elektrowni fotowoltaicznej	367
32.8. Uruchamianie systemu fotowoltaicznego	367
32.9. Projektowanie systemów PV za pomocą symulacji komputerowych	371
33. Magazynowanie energii z OZE	372
33.1. Magazyn energii z instalacji PV u prosumentów	374
33.1. Akumulatory litowo-jonowe	375
33.2. Akumulator sodowo-jonowy	378
33.3. Dobór wielkości mocy akumulatorów do instalacji fotowoltaicznej off-grid	379
33.4. Dobór wielkości mocy akumulatorów do instalacji fotowoltaicznej on-grid	380
33.5. Duże magazyny energii w Polsce – „Podstacja przyszłości w Garbcech” ..	381
33.6. Baterie przepływowe (redox flow cell)	382
33.6.1. Budowa akumulatora przepływowego	382
33.6.2. Wanadowe akumulatory przepływowe (all vanadium)	384
33.6.3. Przykładowe rozwiązania techniczne	384
33.6.4. Dalsze badania naukowe nad ogniwami przepływowymi	387
33.7. Wirtualna elektrownia złożona z tysięcy domowych baterii	387
33.8. Enea Operator zbuduje sieć inteligentną na terenie Szczecina, powiatu gryfińskiego i Świnoujścia	388
33.9. Recykling modułów fotowoltaicznych	388
33.10. Wykorzystywanie energii elektrycznej z fotoogniw, do elektrolizy wody ..	389
33.11. Ogniwa paliwowe (fuel cells)	390
33.12. Metanizacja wodoru z dwutlenkiem węgla ($H_2 + CO_2 = SNG + O_2$) ...	391
34. Zbiorniki na wodę jako magazyny energii z instalacji PV	393

MODUŁ V

Koncepcja samowystarczalnego budynku niskoenergetycznego zasilanego z OZE 397

1. Przepisy unijne i krajowe w tym zakresie	397
2. Budynek o nieomal zerowym zużyciu energii	400
3. Ogrzewanie budynku energią cieplną z powietrza	405
4. Instalacje nawiewno-wywiewne z rekuperatorem w budynkach mieszkalnych	414
5. Kompaktowe stacje ładowania samochodów elektrycznych energią z fotowoltaiki u prosumentów	419
6. Stacje ładowania samochodów elektrycznych w miastach	420
7. Ładowarki wodorowe przy autostradach	422

MODUŁ VI

Przykładowy projekt budowlano-wykonawczy423

1. Procedury formalno-prawne związane z budową mikroinstalacji fotowoltaicznej obejmują: 423
2. Warunki przyłączenia mikroinstalacji fotowoltaicznej do sieci elektroenergetycznej przez osobę fizyczną 424

MODUŁ VII

Przykładowe schematy instalacji PV i zagadnienia zawarte w projektach technicznych instalacji PV431

MODUŁ VIII

Przykładowe zestawy zadań437

Odpowiedzi do zestawów zadań475

MODUŁ IX

Przykładowe tematy zadań obliczeniowych i opisowych: Systemy fotowoltaiczne477

MODUŁ X

Przykładowe tematy zadań praktycznych: Systemy fotowoltaiczne501

Literatura507