

Fotowoltaika : podręcznik dla studentów, uczniów, instalatorów, inwestorów / Ryszard Tytko. – Wydanie I. – Kraków, 2019

Spis treści

Od autora	15
Perspektywy rozwoju fotowoltaiki w Polsce	17
Struktura nakładów inwestycyjnych kosztów eksploatacyjnych dla elektrowni fotowoltaicznych	27
Wybrane zagadnienia z ustawy Prawo energetyczne dotyczące fotowoltaiki	29
Wykaz wybranych oznaczeń, wielkości i ich jednostek	41
Symbole graficzne wg PN-EN 60617 stosowane w schematach elektrycznych	45
MODUŁ I	
Bezpieczeństwo i higiena pracy. Ochrona przeciwpożarowa	57
1. Bezpieczeństwo i higiena pracy (BHP)	57
2. Instrukcje BHP	57
3. BHP a ergonomia	57
4. Stanowisko pracy	58
5. Elementy stanowiska pracy	58
6. Zadania służb BHP	59
7. Pierwsza pomoc	59
8. Bezpieczeństwo wykonywania prac przy urządzeniach elektrycznych	60
9. Sprzęt ochronny	61
10. Sposoby ratowania porażonych prądem elektrycznym	62
11. Ochrona przeciwpożarowa	64
12. Prewencja pożarowa	64
13. Zapobieganie pożarom	65
14. Sposoby ratowania osoby poszkodowanej w pożarze	65
15. Czynności ratujące	66
MODUŁ II	
Podstawy elektrotechniki	67
1. Prąd stały	67
1.1. Prąd elektryczny	67
1.2. Napięcie elektryczne	68

1.3. Obwody elektryczne	68
1.4. Prawo Ohma	69
1.5. Obliczanie rezystancji	69
1.6. Łączenie rezystorów	69
1.7. Zależność rezystancji od temperatury	70
1.8. Źródła prądu stałego	70
1.9. Prawa obwodu elektrycznego	71
1.9.1. Pierwsze prawo Kirchhoffa	71
1.9.2. Drugie prawo Kirchhoffa	72
1.10. Stany pracy źródeł energii elektrycznej	72
1.11. Moc prądu stałego	72
1.12. Energia prądu stałego	73
1.13. Prawo Joule'a - Lenza	74
2. Prąd przemienny jednofazowy	74
2.1. Analiza obwodów zawierających elementy R, L, C	75
2.1.1. Obwód elektryczny z rezystancją	75
2.1.2. Obwód elektryczny z cewką o indukcyjności L (reaktancją indukcyjną)	76
2.1.3. Obwód elektryczny z kondensatorem o pojemności C (reaktancją pojemnościową)	77
2.1.4. Obwód elektryczny szeregowy z elementami R, L, C	78
2.1.5. Obwód elektryczny równoległy z elementami R, L, C	79
3. Kondensatory	81
3.1. Pojemność kondensatora	81
3.2. Łączenie kondensatorów	82
4. Moc prądu przemiennego jednofazowego	82
4.1. Moc czynna	82
4.2. Moc bierna	83
4.3. Moc pozorna	84
5. Układy trójfazowe	84
5.1. Układ połączeń odbiorników w gwiazdę	84
5.2. Układ odbiorników połączonych w trójkąt	85
6. Pomiar mocy w układach 3 fazowych	86
7. Pomiar energii w obwodach trójfazowych	87

MODUŁ III

Urządzenia i instalacje elektryczne	89
1. Oznaczenia przewodów i zacisków	89
1.1. Wybrane oznaczenia kabli i przewodów według normy PN: 60446	91
1.2. Przekroje przewodów	92
1.3. Wybrane przykłady oznaczeń przewodów	92
1.4. Podział przewodów ze względu na pełnioną funkcję	93
1.5. Oznaczenia przewodów i zacisków odbiorników	93
2. Łączenie przewodów	94
3. Wybrane zagadnienia ochrony przeciwporażeniowej w instalacjach	

elektrycznych do 1 kV	95
3.1. Oddziaływanie prądu elektrycznego na organizm ludzki	95
3.2. Warunki środowiskowe	96
3.3. Stopnie ochrony obudów urządzeń elektrycznych	97
3.4. Klasy ochronności urządzeń elektrycznych i elektronicznych	98
3.5. Napięcia i układy sieciowe	98
3.6. Układy sieci	99
3.7. Charakterystyka układów sieciowych	100
4. Środki ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym przy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych	102
4.1. Rodzaje ochron przeciwporażeniowych	102
4.1.1. Równoczesna ochrona przed dotykiem bezpośrednim i pośrednim	102
4.1.2. Ochrona przed dotykiem bezpośrednim (ochrona podstawowa)	104
4.2. Ochrona przed dotykiem pośrednim (ochrona dodatkowa)	105
4.2.1. Ochrona przez zastosowanie samoczynnego wyłączenia zasilania	105
4.2.2. Wyłączniki nadmiarowo-prądowe	106
4.3. Urządzenia ochronne różnicowoprądowe	109
4.4. Ochrona przed dotykiem pośrednim przez samoczynne wyłączenie zasilania w układzie sieciowym TN	116
4.5. Ochrona przez zastosowanie urządzenia II klasy ochronności	118
4.6. Ochrona przez zastosowanie izolowania stanowiska	119
4.7. Ochrona przez zastosowanie separacji elektrycznej	119
4.8. Ochrona przez zastosowanie nieuziemionych połączeń wyrównawczych miejscowych	121
4.9. Połączenia wyrównawcze	122
5. Przewody ochronne, ochronno-neutralne i wyrównawcze	124
6. Uziomy i przewody uziemiające	125
6.1. Uziomy naturalne	126
6.2. Uziomy sztuczne	126
7. Ochrona przed przepięciami atmosferycznymi lub łączeniowymi	129
8. Przyłączanie urządzeń elektrycznych	132
9. Zasilanie budynku	133
10. Instalacje elektryczne w mieszkaniach i budynkach mieszkalnych	133
11. Wybrane zasady wykonania instalacji elektrycznej w budynku	137
12. Eksploatacja instalacji elektrycznych	139
13. Pomiar ciągłości przewodów	140
14. Pomiar rezystancji izolacji instalacji elektrycznej	141
15. Pomiar rezystancji izolacji podłóg i ścian	143
16. Pomiar rezystancji uziomu	143
17. Sprawdzenie skuteczności ochrony przed dotykiem pośrednim przez samoczynne wyłączenie zasilania	144
18. Sprawdzanie działania urządzeń ochronnych różnicowoprądowych	147
19. Protokół odbiorczy	147
20. Ogólne zasady eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych	147
21. Dokumentacja techniczna	148

22. Przyjmowanie urządzeń do eksploatacji	149
23. Prowadzenie eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych	150
24. Kontrola eksploatacji	150

MODUŁ IV

Technologia wykonania i logistyka robót instalacyjnych	151
1. Kosztorysy - rodzaje i sposoby obliczeń	151
1.1. Kosztorys inwestorski	152
1.2. Kosztorys ofertowy	152
1.3. Kosztorys zamienny	154
1.4. Kosztorys powykonawczy	154
1.5. Rodzaje kalkulacji kosztorysowej	155
1.5.1. Kalkulacja uproszczona	155
1.5.2. Kalkulacja szczegółowa	156
2. Oferty w postępowaniu o udzielenie zamówienia publicznego	157
2.1. Treść projektu oferty	157
3. Specyfikacja Istotnych Warunków Zamówienia (SIWZ)	158
4. Przekazywanie SIWZ dla wykonawców	159
5. Przykładowa specyfikacja wykonania i odbioru robót i materiałów instalacyjnych	159
5.1. Przedmiot zamówienia	160
5.2. Przedmiot i zakres robót instalacyjnych	160
5.3. Prace towarzyszące i roboty tymczasowe	160
5.4. Teren budowy	160
5.4.1. Organizacja robót	160
5.4.2. Harmonogram robót	160
5.4.3. Wprowadzenie na budowę	161
5.4.4. Koordynacja robót	161
5.4.5. Zabezpieczenie interesów osób trzecich	162
5.4.6. Ochrona środowiska i zdrowia ludzi	162
5.4.7. Bezpieczeństwo i higiena pracy	163
5.4.8. Zaplecze budowy	163
5.4.9. Organizacja ruchu	164
5.4.10. Ogrodzenie	164
5.4.11. Zabezpieczenie chodników i jezdni	164
6. Wymagania dotyczące wyrobów instalacyjnych	164
7. Wymagania dotyczące sprzętu i maszyn	165
8. Wymagania dotyczące środków transportu	165
9. Sposób wykonania robót instalacyjnych	166
10. Kontrola oraz odbiór robót instalacyjnych	166
11. Wymagania dotyczące przedmiaru i obmiaru robót	168
12. Odbiór robót i przekazanie do użytku	170
13. Sposób rozliczenia robót tymczasowych i prac towarzyszących	171
14. Dokumenty, normy i przepisy	171

MODUŁ V

Energia słoneczna	173
1. Atmosfera Ziemi	174
2. Oddziaływanie atmosfery z promieniowaniem	174
3. Wielkość energii słonecznej na Ziemi	175
4. Nasłonecznienie w Polsce	176
5. Zalety promieniowania słonecznego jako źródła energii	176
6. Wady promieniowania słonecznego jako źródła energii	176
7. Sposoby produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem energii słonecznej	177
7.1. Metoda heli termiczna	177
7.2. Metoda helioelektryczna	178
8. Rozwiązania przyszłościowe wykorzystania energii słonecznej	179
8.1. Ogniwa perowskitowe	179
8.2. Moduły fotowoltaiczne z warstwą grafenową	180
8.3. Projekt „Quantum Glass” spółki ML System	181
8.4. Technologia skoncentrowanej fotowoltaiki (Concentrated Photovoltaics, CPV)	182
8.5. Moduły PV z powłoką grafenową	182
8.6. Moduły fotowoltaiczne w technologii PERT	183
8.7. Elewacja z folii fotowoltaicznej	185
9. Wiadomości wstępne z optoelektroniki	185
10. Budowa i zasada działania ogniw krzemowych	187
10.1. Podział ogniw PV	188
11. Ogniwa z krzemu monolitycznego	189
11.1. Budowa fotoogniwa	189
11.2. Technologia wytwarzania fotoogniwa	190
12. Ogniwa polikrystaliczne	193
12.1. Budowa fotoogniwa	193
13. Ogniwa polikrystaliczne cienkowarstwowe	196
13.1. Budowa fotoogniwa	196
13.2. Technologia wytwarzania ogniw PV	196
14. Ogniwa z krzemu amorficznego	197
14.1. Budowa i technologia wytwarzania fotoogniwa	197
15. Ogniwa cienkowarstwowe jedno- i wielozłączowe z arsenku galu	198
15.1. Budowa i technologia wytwarzania	198
15.2. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego	199
16. Ogniwa fotowoltaiczne z materiałów organicznych	200
16.1. Budowa i technologia wytwarzania	200
16.2. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne ogniw PV, na podłożu polimerowym	201
16.3. Sposoby produkcji	203
16.4. Sposoby montażu fotoogniw polimerowych elastycznych na dachu płaskim	204
17. Ogniwa fotowoltaiczne uczulane barwnikiem	206

17.1. Zasada działania	206
17.2. Budowa, parametry ogniwa	206
18. Hybrydowe panele słoneczne	206
18.1. Zasada działania	206
18.2. Budowa urządzenia	208
19. Dwustronne baterie słoneczne	210
19.1. Dachy pokryte dachówką w formie paneli fotowoltaicznych	210
20. Utrata mocy fotoogniw funkcji czasu pracy	212
20.1. Dioda bocznikująca fotoogniwo (by-pass)	212
21. Gorący punkt (hot spot)	215
21.1. Napięcie indukowane w module PID (Potential Induced Degradation)	215
21.2. Prąd upływu	216
21.3. Prąd doziemny	216
21.4. Pętla indukcyjna	216
21.5. Zwarcie doziemne po stronie DC instalacji PV	216
21.6. Badanie modułów fotowoltaicznych	217
22. Analiza pracy fotoogniwa	218
22.1. Podstawowe zależności	218
22.2. Wpływ temperatury na parametry fotoogniwa	222
22.3. Sposoby połączeń modułów PV	223
22.4. Wpływ promieniowania słonecznego na parametry modułu fotowoltaicznego	224
22.4.1. Współczynnik wypełnienia FF	225
22.5. Wybrane wyniki badań modułów fotowoltaicznych	226
22.6. Wybrane wyniki badań instalacji fotowoltaicznej „podążającej za słońcem”	235
23. Parametry osprzętu instalacji PV	237
23.1. Regulatory ładowania	237
23.2. Przetwornice napięcia	239
23.2.1. Inwerter w instalacji fotowoltaicznej	241
23.2.2. Przykładowe rozwiązanie	249
23.2.3. Parametry elektryczne pracy falownika 1-fazowego	249
23.2.4. Falowniki 3-fazowe	250
23.2.5. falowniki hybrydowe	252
23.2.6. Zagadnienia eksploatacyjne dotyczące załączenia do sieci falowników	253
23.3. MPP tracker	255
23.4. Monitorowanie na poziomie paneli	256
23.5. Modem komunikacyjny	258
23.5.1. Zasada działania	258
23.5.2. Charakterystyka urządzeń	258
23.6. Sposób łączenia przewodów po stronie DC	259
23.7. Dobór przewodów w instalacji fotowoltaicznej	260
23.7.1. Warunki doboru przekroju przewodów ze względu	

na obciążalność prądową długotrwałą	261
23.7.2. Wyznaczanie przekroju przewodów ze względu na obciążalność długotrwałą po stronie DC	262
23.7.3. Wyznaczanie przekroju przewodów po stronie DC ze względu na dopuszczalne spadki napięcia	263
23.7.4. Sprawdzenie wielkości strat mocy na przewodach łączących łańcuch (string) modułów fotowoltaicznych z falownikiem	263
23.7.5. Wyznaczanie przekroju przewodów i kabli ze względu na obciążalność długotrwałą i przeciążalność po stronie prądu zmiennego AC instalacji fotowoltaicznej	264
23.7.6. Wyznaczanie przekroju przewodów po stronie AC ze względu na dopuszczalne spadki napięcia	264
23.7.7. Dobór zabezpieczeń w instalacjach fotowoltaicznych	265
23.8. Mierniki instalacji fotowoltaicznych	266
23.9. Pomiary natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu fotowoltaicznego	267
24. Dobór parametrów instalacji fotowoltaicznych	268
24.1. Rodzaje instalacji PV	268
24.2. Mała instalacja fotowoltaiczna	269
24.3. Wybrane układy połączeń fotoogniw	273
24.3.1. Sieć autonomiczna off-grid (wydzielona)	273
24.3.2. Praca elektrowni PV na sieć „sztywną” (on-grid)	278
25. Wytyczne montażowe	280
25.1. Etapy realizacji inwestycji	280
25.2. Projekt techniczny	280
25.3. Etapy budowy	281
25.4. Zagadnienia techniczne montażu instalacji	281
25.5. Sposób montażu ogniw PV w rzędach	283
25.6. Systemy zabezpieczeń w instalacjach fotowoltaicznych	285
25.6.1. Rodzaje zabezpieczeń instalacji fotowoltaicznej	285
25.7. Ochrona odgromowa instalacji fotowoltaicznych	285
25.7.1. Ochrona odgromowa-rodzaje ochrony	287
25.7.2. Ochrona odgromowa-ochrona zewnętrzna	287
25.7.3. Ochrona odgromowa farm fotowoltaicznych - ochrona zewnętrzna	291
25.7.4. System ochronny instalacji PV bez zewnętrznej ochrony odgromowej (zwodów pionowych) - ochrona wewnętrzna	291
25.7.5. Ogólne zasady doboru ograniczników po stronie DC	293
25.7.6. Ochrona przetężeniowa i zwarciova	296
25.7.7. Ochrona przeciwporażeniowa w systemach fotowoltaicznych	297
25.8. Odbiór instalacji	298
26. BHP przy montażu instalacji fotowoltaicznej	299
26.1. Zasady BHP przy montażu instalacji fotowoltaicznych	299
26.2. Kompletność dostawy materiałów i urządzeń	301
26.3. Transport i składowanie	301

26.4. Dokumentacja techniczna	301
26.5. Narzędzia i sprzęt dodatkowy	301
26.6. Informacje ogólne	301
26.7. Przepisy bezpieczeństwa	302
26.8. Ochrona przeciwporażeniowa	302
26.8.1. Ochrona przeciwpożarowa	302
26.8.2. Warunki środowiskowe	304
26.8.3. Postępowanie w razie pożaru budynku z instalacją PV	304
26.8.4. Analiza skutków pożarów instalacji fotowoltaicznych	305
26.8.5. Gaszenie pożaru nocą z instalacją PV na dachu	306
26.8.6. Łuk elektryczny	306
26.8.7. Zasady wyposażenia obiektów w gaśnice	306
26.8.8. Gaszenie urządzeń elektrycznych	307
26.8.9. Rozłączniki pożarowe	307
26.8.10. Optymizery	308
26.8.11. Dokumentacja instalacji PV	308
26.8.12. Ubezpieczenie instalacji PV na wypadek pożaru	308
26.9. Bezpieczeństwo wykonywania prac przy urządzeniach elektrycznych	308
26.10. Oznaczenia i symbole	309
27. Montaż instalacji fotowoltaicznej	311
27.1. Systemy montażowe dla modułów skrzynkowych	311
27.1.1. Montaż na dachu spadzistym	311
27.1.2. Montaż ogniw PV na dachu płaskim lub płaszczyźnie poziomej	313
27.1.3. Sposób montażu modułów	314
27.1.4. Zintegrowane z dachem moduły fotowoltaiczne	315
27.1.5. Montaż fotoogniw „podążających za słońcem"	315
27.1.6. Konstrukcja do mocowania na stropie	317
27.1.7. Konstrukcja wsporcza mocowana do betonowych bloków	317
27.1.8. System samonośny	318
27.2. Montaż systemów PV na gruncie	319
27.3. Montaż instalacji fotowoltaicznej na konstrukcji aluminiowej na dachu płaskim	319
27.4. Montaż instalacji fotowoltaicznej na dachu spadzistym pokrytym dachówką betonową	322
27.5. Montaż instalacji fotowoltaicznej na konstrukcji aluminiowej na dachu płaskim pokrytym blachą falistą	325
27.6. Montaż instalacji fotowoltaicznej na dachu spadzistym pokrytym blachodachówką	326
27.7. Fotowoltaika zintegrowana z budynkiem - Instalacje BIPV (Building Integrated Photovoltaics BIPV)	327
27.8. Agrofotowoltaika (APV)	333
28. Eksploatacja instalacji fotowoltaicznych	334
28.1. Wymiana uszkodzonego modułu	334
28.2. Mycie instalacji fotowoltaicznej	334

28.3. Sprawdzenie mocowania paneli	335
28.4. Usuwanie śniegu	335
28.5. Stan przewodów zasilających w instalacji prądu stałego (DC)	336
28.6. Sprawdzenie stanu technicznego falownika	336
28.7. Czynniki wpływające ujemnie na produkcję energii z elektrowni fotowoltaicznej	336
28.8. Uruchamianie systemu fotowoltaicznego	336
28.9. Projektowanie systemów PV za pomocą symulacji komputerowych	340
29. Magazynowanie energii z OZE	341
29.1. Akumulatory litowo-jonowe	341
29.2. Dobór wielkości mocy akumulatorów do instalacji fotowoltaicznej off-grid	344
29.3. Dobór wielkości mocy akumulatorów do instalacji fotowoltaicznej on-grid	346
29.4. Duże magazyny energii	346

MODUŁ VI

Przykładowy projekt budowlano-wykonawczy 349

1. Procedury formalno-prawne związane z budową mikroinstalacji fotowoltaicznej	349
2. Warunki przyłączenia mikroinstalacji fotowoltaicznej do sieci elektroenergetycznej przez osobę fizyczną	350
3. Koncepcja samowystarczalnego budynku niskoenergetycznego zasilanego z OZE, dla domu z Programu „Mieszkanie Plus”	382

MODUŁ VII

Przykładowe zestawy zadań 387

Odpowiedzi do zestawów zadań 421

MODUŁ VIII

Przykładowe tematy zadań obliczeniowych i opisowych: Systemy fotowoltaiczne 425

Literatura 447