

Charles Platt

# Encyklopedia elementów elektronicznych



Rezystory, kondensatory, cewki indukcyjne,  
przełączniki, enkodery, przekaźniki i tranzystory



Tytuł oryginału: Encyclopedia of Electronic Components Volume 1: Resistors, Capacitors, Inductors,  
Switches, Encoders, Relays, Transistors

Tłumaczenie: Zbigniew Waśko

ISBN: 978-83-283-6945-0

© 2021 Helion SA

Authorized Polish translation of the English edition of *Encyclopedia of Electronic Components Volume 1*  
ISBN 9781449333898 © 2012 Helpful Corporation

This translation is published and sold by permission of O'Reilly Media, Inc., which owns or controls  
all rights to sell the same.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means,  
electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system,  
without permission from the Publisher.

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji  
w jakiegokolwiek postaci jest zabronione. Wykonywanie kopii metodą kserograficzną, fotograficzną, a także  
kopiowanie książki na nośniku filmowym, magnetycznym lub innym powoduje naruszenie praw autorskich  
niniejszej publikacji.

Wszystkie znaki występujące w tekście są zastrzeżonymi znakami firmowymi bądź towarowymi ich właścicieli.

Autor oraz Helion SA dołożyli wszelkich starań, by zawarte w tej książce informacje były kompletne i rzetelne.  
Nie biorą jednak żadnej odpowiedzialności ani za ich wykorzystanie, ani za związane z tym ewentualne  
naruszenie praw patentowych lub autorskich. Autor oraz Helion SA nie ponoszą również żadnej  
odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Helion SA

ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice

tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63

e-mail: [helion@helion.pl](mailto:helion@helion.pl)

WWW: <http://helion.pl> (księgarnia internetowa, katalog książek)

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

[http://helion.pl/user/opinie/enele1\\_ebook](http://helion.pl/user/opinie/enele1_ebook)

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

- [Poleć książkę na Facebook.com](#)
- [Kup w wersji papierowej](#)
- [Oceń książkę](#)

- [Księgarnia internetowa](#)
- [Lubię to! » Nasza społeczność](#)

Markowi Frauenfelderowi, który ponownie zaraził mnie majsterkowaniem.



---

# Spis treści

---

**Wstęp .....xix**

**I. Kwestie organizacyjne .....1**

Układ encyklopedyczny a podręcznikowy .....1

Teoria i praktyka .....1

Struktura książki .....1

Powiązania tematyczne .....2

Co jest w encyklopedii i czego brakuje .....2

Konwencje typograficzne .....3

Zawartość poszczególnych tomów .....3

**> ZASILANIE**

**>> ŹRÓDŁA**

**2. Bateria .....5**

Funkcja .....5

Działanie .....6

Nazewnictwo elektrod .....7

Rodzaje .....7

Baterie jednorazowe .....8

Baterie wielokrotnego użytku (akumulatory) .....9

Wartości .....11

Natężenie prądu .....11

Pojemność .....11

Napięcie .....13

Stosowanie .....14

Możliwe błędy .....15

Zwarcie — przegrzanie i pożar .....15

Pogorszenie sprawności baterii z powodu  
jej niewłaściwego ładowania .....15

Całkowite rozładowanie akumulatora kwasowo-ołowiowego ...15

Zbyt duże zapotrzebowanie prądowe .....15

Niewłaściwa polaryzacja .....15

Ładowanie odwrotne .....15

Zasiarczenie .....16

Zbyt duży prąd między bateriami połączonymi równolegle .....16

## >> POŁĄCZENIA

<b>3. Zworka</b>	<b>17</b>
Funkcja	17
Działanie	17
Rodzaje	18
Wartości	18
Stosowanie	18
Możliwe błędy	19
<b>4. Bezpiecznik</b>	<b>21</b>
Funkcja	21
Działanie	21
Wartości	22
Rodzaje	22
Małe wkładki topikowe	23
Bezpieczniki samochodowe	23
Bezpieczniki taśmowe	24
Bezpieczniki do montażu przewlekanego	24
Bezpieczniki resetowalne	25
Bezpieczniki montowane powierzchniowo	26
Stosowanie	26
Możliwe błędy	27
Źle dobrany bezpiecznik	27
Uszkodzenie bezpiecznika podczas lutowania	28
Niewłaściwa lokalizacja bezpiecznika	28
<b>5. Przycisk</b>	<b>29</b>
Funkcja	29
Działanie	30
Rodzaje	30
Bieguny i terminale	30
Stany ON-OFF	30
Przycisk suwakowy (typu ISOSTAT)	31
Wygląd	31
Pokrycie końcówek i styków	32
Sposoby mocowania	32
Uszczelnienia i brak uszczelnień	33
Blokowanie	33
Przycisk nożny	33
Keypad	34
Mikroprzycisk (tact switch)	34
Panel membranowy	35
Przyciski zależne	35
Przełącznik migowy	35
Przycisk alarmowy	35
Wartości	35

Stosowanie .....	35
Możliwe błędy .....	36
Brak nakładki .....	36
Niewłaściwy montaż .....	36
Problemy z podświetleniem LED-owym .....	36
Inne problemy .....	36
<b>6. Przelącznik .....</b>	<b>37</b>
Funkcja .....	37
Działanie .....	38
Rodzaje .....	38
Terminologia .....	38
Bieguny i terminale .....	38
Stany ON-OFF .....	39
Działanie migowe .....	39
Przelącznik kołyskowy .....	40
Przelącznik suwakowy .....	40
Przelącznik dźwigniowy .....	41
Przelącznik typu DIP .....	43
Przelącznik typu SIP .....	44
Przelącznik płetwowy .....	44
Przelącznik wandaloodporny .....	45
Mikroprzelącznik (tact switch) .....	45
Sposoby mocowania .....	45
Wyprowadzenia .....	45
Pokrycie końcówek i styków .....	45
Wartości .....	45
Stosowanie .....	46
Łączniki zasilania .....	46
Wyłączniki krańcowe .....	46
Obwody logiczne .....	47
Rozwiązania alternatywne .....	47
Możliwe błędy .....	47
Powstawanie łuku elektrycznego .....	47
Zimne luty .....	48
Zwarcia .....	48
Zabrudzenie styków .....	48
Niewłaściwy rodzaj wyprowadzeń .....	48
Drganie styków .....	48
Zużycie mechaniczne .....	48
Niewłaściwy montaż .....	49
Zagmatwane schematy połączeń .....	49
<b>7. Przelącznik obrotowy .....</b>	<b>51</b>
Funkcja .....	51
Działanie .....	52
Rodzaje .....	52

Tradycyjne przełączniki obrotowe .....	52
Przełączniki obrotowe typu DIP .....	53
Kod Graya .....	54
Miniaturowy przełącznik obrotowy .....	55
Mechaniczny enkoder obrotowy .....	55
Przełącznik tarczowy z przyciskami lub pokrętle	55
Przełącznik kluczykowy .....	55
Wartości .....	56
Stosowanie .....	56
Możliwe błędy .....	56
Odsłonięte styki .....	56
Przeciążenie styków .....	56
Niedopasowanie oznaczeń .....	57
Nierozpoznanie przełącznika o działaniu zwarciovym .....	57
Nadużywanie siły przez użytkownika .....	57
Niewłaściwa ośka, niedopasowana gałka, zagubione nakrętki, zbyt duże gabaryty przełącznika .....	57
<b>8. Enkoder obrotowy .....</b>	<b>59</b>
Funkcja .....	59
Działanie .....	59
Rodzaje .....	60
Impulsy a system zapadkowy .....	61
Sposób montażu .....	61
Wyjście .....	61
Opory ruchu obrotowego .....	61
Wartości .....	61
Odbijanie się styków .....	61
Zakłócenia poślizgowe .....	62
Stosowanie .....	62
Możliwe błędy .....	62
Odbijanie się styków .....	62
Wypalanie się styków .....	62
<b>9. Przekaznik .....</b>	<b>63</b>
Funkcja .....	63
Działanie .....	64
Rodzaje .....	65
Zatrzaski .....	65
Polaryzacja .....	65
Wyprowadzenia .....	65
Przekazniki kontaktronowe .....	66
Przekazniki małosygnałowe .....	67
Przekazniki samochodowe .....	67
Przekazniki ogólnego przeznaczenia (przemysłowe) .....	67
Przekazniki czasowe .....	68
Styczniki .....	68

Wartości .....	68
Stosowanie .....	69
Możliwe błędy .....	70
Nieprawidłowy układ wyprowadzeń .....	70
Niewłaściwe ustawienie przy montażu .....	70
Niewłaściwy typ .....	70
Nieprawidłowa polaryzacja .....	70
Prąd stały i przemienny .....	70
Stukanie .....	70
Przebiecia na cewce .....	71
Powstawanie łuku elektrycznego .....	71
Pola magnetyczne .....	71
Czynniki środowiskowe .....	71

## >> WYGŁADZANIE

<b>IO. Rezystor .....</b>	<b>73</b>
Funkcja .....	73
Działanie .....	74
Rodzaje .....	74
Matryca rezystorowa .....	75
Wartości .....	77
Tolerancja .....	77
Kodowanie wartości .....	77
Stabilność .....	80
Materiały .....	80
Stosowanie .....	82
Ograniczanie prądu diody LED .....	82
Ograniczanie prądów w tranzystorze .....	82
Rezystory podciągające i ściąające .....	82
Regulacja barwy dźwięku .....	82
Układ RC .....	83
Dzielnik napięcia .....	83
Szeregowe połączenie rezystorów .....	84
Równoległe połączenie rezystorów .....	84
Możliwe błędy .....	84
Ciepło .....	84
Szum .....	85
Indukcyjność .....	85
Niedokładność .....	85
Niewłaściwa wartość rezystora .....	85
<b>II. Potencjometr .....</b>	<b>87</b>
Funkcja .....	87
Działanie .....	88
Rodzaje .....	88
Potencjometry liniowe i logarytmiczne .....	88

Potencjometr klasyczny .....	89
Potencjometr wielobrotowy .....	90
Potencjometr wielosekcyjny .....	91
Potencjometr z przełącznikiem .....	91
Potencjometr suwakowy .....	91
Potencjometr montażowy .....	91
Stosowanie .....	92
Możliwe błędy .....	93
Zużycie .....	93
Niedopasowane gałki .....	93
Zagubione nakrętki .....	93
Zbyt krótka ośka .....	94
Suwaki bez uchwytu .....	94
Niewłaściwe wymiary potencjometru .....	94
Przegrzanie .....	94
Niewłaściwa charakterystyka .....	94

## **12. Kondensator .....** **95**

Funkcja .....	95
Działanie .....	95
Rodzaje .....	97
Kształt .....	97
Rodzaje podstawowe .....	99
Dielektryki .....	101
Wartości .....	102
Pojemność .....	102
Wartości najczęściej stosowane .....	102
Stała dielektryczna .....	103
Stała czasowa .....	103
Łączenie kondensatorów .....	104
Prąd zmienny i reaktancja pojemnościowa .....	104
Szeregowa rezystancja zastępcza (ESR) .....	104
Stosowanie .....	105
Kondensator bocznikujący .....	105
Kondensator sprzęgający .....	105
Filtr górnoprzepustowy .....	105
Filtr dolnoprzepustowy .....	106
Kondensator wygładzający .....	106
Tłumik .....	106
Kondensator w roli akumulatora .....	108
Możliwe błędy .....	108
Niewłaściwa biegunowość .....	108
Przeciążenie napięciowe .....	108
Upływność .....	108
Absorpcja dielektryczna .....	108
Problemy typowe dla kondensatorów elektrolitycznych .....	108
Ciepło .....	109

Wibracje .....	109
Mylna nomenklatura .....	109
<b>B. Kondensator zmienny .....</b>	<b>111</b>
Funkcja .....	111
Działanie .....	111
Rodzaje .....	112
Wartości .....	113
Formaty .....	113
Stosowanie .....	113
Możliwe błędy .....	115
Brak uziemienia trymera podczas jego regulacji .....	115
Nanoszenie materiału wierzchniego lub powłoki zabezpieczającej .....	115
Brak ekranowania .....	115
<b>I4. Cewka indukcyjna .....</b>	<b>117</b>
Funkcja .....	117
Działanie .....	118
Przepływ prądu stałego przez cewkę .....	119
Rdzeń magnetyczny .....	120
Siły elektromotoryczna i przeciwelektromotoryczna .....	120
Biegunowości elektryczna i magnetyczna .....	121
Rodzaje .....	122
Rdzeń magnetyczny .....	122
Rdzeń niemagnetyczny .....	123
Cewka regulowana .....	123
Filtr (koralik) ferrytowy .....	124
Rdzeń toroidalny .....	124
Żyrator .....	125
Wartości .....	126
Obliczanie indukcyjności .....	126
Obliczanie reaktancji .....	127
Obliczanie reluktancji .....	127
Terminologia używana w kartach produktu .....	127
Układy szeregowo i równoległe .....	127
Stała czasowa .....	127
Stosowanie .....	128
Możliwe rdzenie .....	129
Miniaturyzacja .....	130
Możliwe błędy .....	130
Usterki w rzeczywistych zastosowaniach .....	130
Nasylenie .....	130
Problemy związane z częstotliwością radiową .....	131

## >> PRZEKSZTAŁCANIE

<b>15. Transformator</b> .....	<b>133</b>
Funkcja .....	133
Działanie .....	134
Rdzeń .....	135
Odczepy .....	135
Rodzaje .....	136
Kształt rdzenia .....	136
Transformator zasilający .....	136
Transformator wtykowy .....	137
Transformator separacyjny .....	137
Autotransformator .....	138
Transformator regulowany .....	138
Transformator audio .....	138
Transformator z dzielonym karkasem .....	139
Transformator do montażu powierzchniowego .....	139
Wartości .....	139
Stosowanie .....	140
Możliwe błędy .....	140
Odwrócenie wejścia i wyjścia .....	140
Ryzyko porażenia z powodu wspólnej masy .....	140
Przypadkowe doprowadzenie prądu stałego .....	140
Przeciążenie .....	140
Nieprawidłowa częstotliwość prądu przemiennego .....	140
<b>16. Zasilacz</b> .....	<b>141</b>
Funkcja .....	141
Rodzaje .....	141
Zasilacz liniowy stabilizowany .....	141
Zasilacz impulsowy .....	142
Zasilacz niestabilizowany .....	144
Zasilacz nastawny .....	144
Powielacz napięcia .....	144
Forma zewnętrzna .....	144
Stosowanie .....	145
Możliwe błędy .....	145
Porażenie prądem o wysokim napięciu .....	145
Usterka kondensatora .....	145
Zakłócenia .....	145
Udar prądowy .....	145
<b>17. Przetwornica DC-DC</b> .....	<b>147</b>
Funkcja .....	147
Działanie .....	147
Rodzaje .....	148
Przetwornica obniżająca (typu buck) .....	148

Przetwornica podwyższająca (typu boost) .....	149
Przetwornica typu flyback z cewką indukcyjną .....	149
Przetwornica typu flyback z transformatorem .....	149
Forma zewnętrzna .....	149
Wartości .....	150
Znamionowe napięcie wejściowe i częstotliwość znamionowa .....	150
Napięcie wyjściowe .....	151
Prądy wejściowy i wyjściowy .....	151
Obciążeniowy współczynnik stabilizacji .....	151
Sprawność .....	151
Poziom tętnienia i szumu .....	152
Wersja izolowana lub nieizolowana .....	152
Stosowanie .....	152
Możliwe błędy .....	153
Zakłócenia elektryczne na wyjściu .....	153
Zbyt wysoka temperatura przy braku obciążenia .....	153
Niewłaściwe napięcie wyjściowe przy małym obciążeniu .....	153

## **18. Falownik .....** **155**

Funkcja .....	155
Działanie .....	155
Rodzaje .....	156
Wartości .....	156
Stosowanie .....	157
Możliwe błędy .....	157

## **>> REGULACJA**

## **19. Stabilizator napięcia .....** **159**

Funkcja .....	159
Działanie .....	159
Rodzaje .....	161
Obudowy .....	161
Popularne odmiany .....	161
Stabilizatory regulowane .....	161
Stabilizatory napięć dodatnich i ujemnych .....	162
Stabilizatory liniowe LDO .....	162
Stabilizatory liniowe quasi-LDO .....	162
Funkcje dodatkowego pinu .....	163
Wartości .....	163
Stosowanie .....	163
Możliwe błędy .....	164
Niewystarczająca kontrola ciepła .....	164
Odpowiedź przejściowa .....	164
Nieprawidłowa identyfikacja komponentu .....	164
Niewłaściwe rozpoznanie wyprowadzeń .....	165

Spadek napięcia spowodowany rozładowaniem baterii .....	165
Niedokładność dostarczanego napięcia .....	165

## >ELEKTROMAGNETYZM

### >>WYJŚCIE LINIOWE

<b>20. Elektromagnes .....</b>	<b>167</b>
Funkcja .....	167
Działanie .....	168
Rodzaje .....	168
Wartości .....	169
Stosowanie .....	169
Możliwe błędy .....	170

<b>21. Solenoid (elektromagnes z ruchomym rdzeniem) .....</b>	<b>171</b>
Funkcja .....	171
Działanie .....	172
Rodzaje .....	174
Solenoid kompaktowy .....	174
Solenoid zatrzaskowy .....	174
Solenoid obrotowy .....	174
Solenoid kłapkowy .....	174
Wartości .....	174
Rozmiar solenoidu a jego moc .....	175
Stosowanie .....	175
Możliwe błędy .....	175
Ciepło .....	175
Udarowy prąd przemienny .....	175
Niepożądana siła elektromotoryczna .....	175
Luźny trzpień .....	175

### >>WYJŚCIE OBROTOWE

<b>22. Silnik prądu stałego .....</b>	<b>177</b>
Funkcja .....	177
Działanie .....	177
Rodzaje .....	179
Konfiguracje uzwojeń wirnika .....	179
Motoreduktor .....	179
Silnik bezszczotkowy .....	181
Siłownik liniowy .....	182
Wartości .....	182
Stosowanie .....	183
Regulacja prędkości obrotowej .....	184
Sterowanie bezpośrednie .....	184

Wyłączniki krańcowe .....	185
Możliwe błędy .....	185
Szczotki i komutator .....	185
Szum elektryczny .....	185
Efekty cieplne .....	186
Warunki zewnętrzne .....	186
Źle dobrany wał silnika .....	186
Niewłaściwe mocowanie silnika .....	186
Luz kątowy .....	186
Łożyska .....	186
Nadmierny hałas .....	187

## **23. Silnik prądu przemiennego ..... 189**

Funkcja .....	189
Działanie .....	189
Budowa stojana .....	189
Budowa wirnika .....	190
Rodzaje .....	193
Jednofazowy silnik indukcyjny .....	193
Trójfazowy silnik indukcyjny .....	194
Silnik synchroniczny .....	194
Silnik reluktancyjny .....	194
Napęd o zmiennej częstotliwości .....	195
Silnik indukcyjny pierścieniowy .....	196
Silnik uniwersalny .....	196
„Pozorne” silniki prądu przemiennego .....	197
Wartości .....	197
Stosowanie .....	197
Możliwe błędy .....	198
Zbyt wczesne ponowne uruchomienie .....	198
Częste wyłączanie i włączanie .....	198
Zbyt niskie lub niezrównoważone napięcie .....	198
Utykanie silnika .....	198
Przełączniki zabezpieczające .....	198
Nadmierny moment obrotowy .....	198
Uszkodzenia wewnętrzne .....	198

## **24. Serwomechanizm ..... 199**

Funkcja .....	199
Działanie .....	200
Rodzaje .....	201
Wartości .....	202
Stosowanie .....	203
Modyfikacje konieczne do uzyskania ciągłego ruchu obrotowego .....	204
Możliwe błędy .....	204
Nieprawidłowe podłączenie przewodów .....	204

Niedopasowanie orczyka i wałka .....	205
Zbyt szybko wysyłane polecenia .....	205
Wahania impulsów .....	205
Przeciążenie silnika .....	205
Nieprawidłowy cykl pracy .....	205
Zakłócenia elektryczne .....	205
<b>25. Silnik krokowy .....</b>	<b>207</b>
Funkcja .....	207
Działanie .....	207
Reluktancyjne silniki krokowe .....	208
Silniki krokowe z magnesem trwałym .....	209
Bipolarnie silniki krokowe .....	211
Silniki unipolarne .....	211
Rodzaje .....	212
Silnik o wielu fazach .....	212
Silnik hybrydowy .....	214
Silnik z cewkami bifilarnymi .....	214
Silnik o wielu fazach .....	214
Sterowanie mikrokrokowe .....	215
Detekcja położenia wirnika i sprzężenie zwrotne .....	215
Sterowanie napięciowe .....	215
Wartości .....	215
Stosowanie .....	216
Diody zabezpieczające .....	216
Kontrola położenia .....	217
Możliwe błędy .....	217
Niewłaściwe okablowanie .....	217
Gubienie kroków .....	217
Nadmierny moment obrotowy .....	217
Histereza .....	218
Rezonans .....	218
Kołysanie .....	218
Nasylenie magnetyczne .....	218
Rozmagnesowanie wirnika .....	218

## > PÓŁPRZEWODNIKI DYSKRETNE

### >> JEDNOZŁĄCZOWE

<b>26. Dioda .....</b>	<b>219</b>
Funkcja .....	219
Działanie .....	221
Rodzaje .....	222
Obudowy .....	222
Diody impulsowe .....	222
Diody prostownicze .....	222
Dioda Zenera .....	223

Transil (dioda TVS) .....	223
Dioda Schottky'ego .....	223
Dioda pojemnościowa .....	224
Dioda tunelowa, dioda Gunna, dioda PIN .....	224
Matryca diodowa .....	224
Mostek prostowniczy .....	224
Wartości .....	224
Stosowanie .....	225
Prostowanie .....	225
Tłumienie siły przeciwelektromotorycznej .....	227
Wybór napięcia zasilającego .....	227
Obcinanie napięcia .....	228
Bramka logiczna .....	228
Stabilizacja napięcia DC i tłumienie szumów .....	228
Sterowanie napięciem AC i obcinanie sygnału .....	229
Wykrywanie zmian napięcia .....	230
Możliwe błędy .....	231
Przeciążenie .....	231
Odwrócona polaryzacja .....	231
Niewłaściwy rodzaj diody .....	231

## **27. Tranzystor jednozłączowy .....** **233**

Funkcja .....	233
Działanie .....	234
Rodzaje .....	236
Wartości .....	236
Stosowanie .....	237
Możliwe błędy .....	237
Pomyłki terminologiczne .....	237
Niewłaściwa polaryzacja .....	238
Przeciążenie .....	238

## **>> WIELOZŁĄCZOWE**

## **28. Tranzystor bipolarny .....** **239**

Funkcja .....	239
Działanie .....	239
Wzmocnienie prądowe .....	242
Terminologia .....	242
Rodzaje .....	243
Obudowy .....	244
Rozkład wyprowadzeń .....	244
Wartości .....	245
Stosowanie .....	246
Układ Darlingtona .....	246
Wzmacniacze .....	248
Przełączniki (klucze tranzystorowe) .....	248

Możliwe błędy .....	248
Niewłaściwe podłączenie tranzystora bipolarnego .....	248
Niewłaściwe podłączenie chipu z układami Darlingtona .....	249
Nieostrożne lutowanie .....	250
Zbyt wysokie napięcie lub za duży prąd .....	250
Zbyt duży prąd upływu .....	250
<b>29. Tranzystor polowy (FET) .....</b>	<b>251</b>
Funkcja .....	251
Działanie .....	251
JFET .....	251
Działanie tranzystora JFET .....	253
MOSFET-y .....	255
Podłoże tranzystora MOSFET .....	259
Rodzaje .....	260
MESFET-y .....	260
VMOSFET-y .....	260
MOSFET rowkowy (Trench MOSFET) .....	260
Wartości .....	260
Stosowanie .....	260
Wady kanału typu P .....	260
Zamienność z tranzystorami bipolarnymi .....	261
Przedwzmacniacz .....	261
Rezystor sterowany napięciem .....	261
Kompatybilność z urządzeniami cyfrowymi .....	261
Możliwe błędy .....	261
Elektryczność statyczna .....	261
Ciepło .....	261
Niewłaściwa polaryzacja .....	262
<b>Dodatek A. Symbole schematyczne .....</b>	<b>263</b>
<b>Skorowidz .....</b>	<b>267</b>

W czasach, gdy informacja jest powszechnie dostępna, i to znacznie obficie niż kiedykolwiek wcześniej, można by mieć wątpliwości, czy *Encyklopedia podzespołów elektronicznych* jest potrzebna. Ale czy rzeczywiście wszystko można znaleźć w internecie?

No cóż, i tak, i nie. Przyjrzyjmy się dostępnym źródłom wiedzy.

## 1. Karty produktu

Karty produktu są niezastąpione, ale mają swoje ograniczenia. Niektóre są szczegółowe, a inne zawierają tylko ogólności. W niektórych można znaleźć przykładowy schemat pokazujący zastosowanie danej części, ale w wielu niczego takiego nie ma. Żadna karta nie objaśnia działania podzespołu, ponieważ nie do tego są przeznaczone. Często też nie zawierają informacji o innych częściach, które trzeba podłączyć. Na przykład karty danych przetwornic DC-DC w ogóle nie wspominają o kondensatorach bocznikowych, choć ich obecność jest bardzo ważna. Karta informacyjna transoptora nie mówi nic o rezystorze podciągającym wymagany w układach z wyjściem typu otwarty kolektor.

Karty produktu nie zawierają porównań ułatwiających podejmowanie decyzji zakupowych. Karta od jednego producenta nie zawiera porównania z produktami innych producentów, a nawet z ewentualnymi zamiennikami oferowanymi przez tego samego producenta. Na przykład karta liniowego stabilizatora napięcia nie podpowie, że tam, gdzie potrzebna jest duża wydajność, lepszym rozwiązaniem może być zastosowanie przetwornicy DC-DC.

Największym mankamentem kart produktu jest jednak to, że nie informują o często popełnianych błędach montażowych.

Co może się stać, jeśli nie zachowamy właściwej polaryzacji montowanego kondensatora tantalowego? W karcie znajdziesz jedynie listę dopuszczalnych wartości maksymalnych. Gdy zmontowany układ działa niezgodnie z Twoimi oczekiwaniami lub, co gorsza, zaczyna się palić, sam musisz znaleźć przyczynę, a karta wcale Ci nie podpowie tego, o czym inni wiedzą już od dawna. Z własnego doświadczenia wiem, że poleganie tylko na kartach produktu często prowadzi do wyważania otwartych drzwi.

## 2. Wikipedia

Ilość informacji na tematy elektroniczne zawartych w Wikipedii jest imponująca, ale ich poziom zaawansowania jest niespójny. Niektóre artykuły zawierają informacje elementarne, a inne są napisane językiem bardzo technicznym. Jedne traktują temat pobieżnie, a inne szczegółowo i dogłębnie. Jedne są przemyślane i dobrze opracowane, a inne koncentrują się na ulubionym temacie autora, co niekoniecznie musi mieć wartość praktyczną dla większości czytelników. Wiele tematów jest rozłożonych na kilka artykułów, co zmusza czytelnika do przeskakiwania między różnymi stronami internetowymi. Ogólnie można stwierdzić, że Wikipedia jest dobra pod względem teoretycznym, ale mało przydatna dla tych, którzy szukają porad praktycznych.

## 3. Poradniki producentów

Kilku rozsądnych producentów opracowało rzetelne instrukcje na temat praktycznych zastosowań sprzedawanych podzespołów. Na przykład firma Littelfuse opublikowała serię znakomitych dokumentów zawierających niemal wszystko, co wypadałoby wiedzieć na temat bezpieczników. Tu jednak

napotykamy kolejny problem związany z nadmiarem informacji — żeby przez nie wszystkie przebrnąć, nierzadko potrzeba nawet paru godzin. Poza tym tego typu poradniki z reguły nie są zbyt wysoko pozycjonowane przez wyszukiwarki internetowe, więc raczej trudno je odnaleźć. Nie ma też co liczyć na to, że w swoim poradniku producent wspomni o niekompletności linii swojego produktu. W rezultacie klient nawet nie wie, że mógłby wybrać coś lepszego.

## 4. Porady znawców

Internet jest znany z tego, że wiele osób daje tam upust swojej potrzebie dzielenia się wszystkim, co wiedzą (albo sądzą, że wiedzą) na dany temat. Wśród tego typu porad można znaleźć zadziwiająco dużo informacji na stosunkowo wąskie tematy. Tam można się dowiedzieć, jakie kondensatory są najlepsze do zwrotnic głośnikowych lub jak prawidłowo wyznaczyć liczbę amperogodzin akumulatora kwasowo-ołowiowego. Niestety oprócz ważnych i przydatnych informacji jest tam również sporo błędów, niepotwierdzonych teorii, plagiatów i zwykłych dziwactw. Ja przyjąłem regułę, zgodnie z którą zaczynam wierzyć w jakąś informację dopiero wtedy, gdy potwierdzę ją w co najmniej trzech różnych źródłach — ale nawet to nie uwalnia mnie całkowicie od wątpliwości. Oczywiście taki proces szukania i weryfikowania wiedzy może niekiedy trwać dość długo.

Tak, wiedza, której szukasz zapewne gdzieś w sieci jest, ale dotarcie do niej niekoniecznie musi być proste i szybkie. W bezmiarze internetu nie ma takiego porządku jak w niniejszej encyklopedii.

A co z książkami? Ogólnie należy stwierdzić, że są one albo dla początkujących i omawiają pobieżnie wszystko, albo dla zaawansowanych i wtedy ich tematyka ogranicza się do specjalistycznych zagadnień. W pierwszej grupie można znaleźć kilka naprawdę znakomitych książek, ale w większości mają one charakter podręcznikowy, czyli przekazują wiedzę w sposób uporządkowany od zagadnień elementarnych do coraz bardziej złożonych. Nie są to książki typu encyklopedycznego.

## Rozwiązanie encyklopedyczne

Już od wielu lat nie możemy narzekać na niedostatek lub niedostępność informacji. Nowymi przeszkodami w pozyskiwaniu wiedzy stały się za to nadmierna obfitość i nieuporządkowanie dostępnych informacji. Jeśli w poszukiwaniu wiedzy trzeba się przedzierać przez gąszcz kart produktów, stron Wikipedii, poradników producentów (które niekoniecznie muszą istnieć), porad znawców (które czasami mogą prowadzić na manowce) i licznych podręczników książkowych, to znaczy, że traci się sporo czasu i łatwo się zniechęcić. A żeby w przyszłości móc wrócić do pewnych zagadnień, trzeba zapamiętać tytuły książek i (lub) adresy właściwych stron internetowych — a przecież wiele z nich może po jakimś czasie przestać istnieć.

Gdy sam zmagalem się z tymi problemami podczas pracy jako redaktor działu elektronicznego w czasopiśmie „Make”, dostrzegłem rzeczywistą potrzebę posiadania tematycznej encyklopedii, która udostępniałaby najważniejsze informacje o poszczególnych elementach elektronicznych w sposób uporządkowany i w jednolitej formie z poglądowymi rysunkami, schematami i wykresami. Gdyby w jednym miejscu były zgromadzone informacje o działaniu każdego elementu, zasadach jego stosowania, ewentualnych zamiennikach i najczęściej popełnianych błędach montażowych, czas potrzebny na dotarcie do tego typu danych byłby o wiele krótszy.

Właśnie to jest skromną ambicją niniejszej *Encyklopedii podzespołów elektronicznych*.

## Czytelnik docelowy

Jak każda publikacja encyklopedyczna, książka ta jest kierowana do dwóch kategorii czytelników: tych, którzy już mają pewną wiedzę, i tych, którzy jeszcze tej wiedzy nie mają.

Skoro w ogóle wzięłeś do ręki tę książkę, to pewnie interesujesz się elektroniką i szukasz źródła informacji o częściach, które widzisz w sklepach lub katalogach, ale nie wiesz, jak działają i do czego mogą służyć. Pewnie nie wiesz za bardzo, gdzie i jak szukać tego typu informacji. Dzięki tej encyklopedii uprościsz proces poszukiwania, uchronisz się przed zakupem niewłaściwego podzespołu i nie popełnisz oczywistego błędu przy montażu swojego układu.

A może jesteś inżynierem elektronikiem lub hobbystą obmyślającym zupełnie nowy układ i potrzebujesz zastosować część, której używałeś już mniej więcej trzy lata temu, ale nie masz pewności, czy Twoja wiedza na jej temat jest nadal aktualna. Za pomocą encyklopedii szybko zweryfikujesz swoją wiedzę.

## Kompletność informacji

Oczywiście jedna książka nie może zawierać informacji o wszystkich istniejących elementach elektronicznych. Firma Mouser Electronics twierdzi, że w swojej internetowej bazie danych ma opisanych ponad 2 miliony podzespołów. W *Encyklopedii podzespołów elektronicznych* znalazło się miejsce tylko dla niewielkiego ułamka tej liczby — ale wszystkie podstawowe typy są w niej opisane. Wersja elektroniczna książki może być dowolnie często aktualizowana, więc mam nadzieję, że będzie to zawsze aktualne i wciąż poszerzane źródło wiedzy.

## Współtwórcy

Każde dzieło czerpie inspirację z wielu prac już istniejących i tak też było tym razem. Niewątpliwie najważniejszymi wśród nich były dla mnie następujące opracowania:

Paul Scherz, *Practical Electronics* (wydanie drugie), McGraw-Hill, 2007.

Robert L. Boylestad i Louis Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory* (wydanie dziewiąte), Pearson Education Inc., 2006.

Paul Horowitz i Winfield Hill, *The Art of Electronics* (wydanie drugie), Cambridge University Press, 2006<sup>1</sup>.

Dużą pomocą były dla mnie również informacje udostępniane przez firmy Mouser Electronics oraz Jameco Electronics. Nie mogę pominąć również klasycznych pozycji w dziedzinie elektroniki, takich jak *Getting Started in Electronics* Forresta M. Mimsa III czy *The TTL Cookbook* Dona Lancastera.

W pracach nad tą książką brało udział wiele osób. Niezwykle zaangażowanie wykazał redaktor Brian Jepson. We

wczesnych pracach koncepcyjnych i opracowywaniu struktury książki uczestniczył wydatnie Michael Butler. Wielką pomoc w wyszukiwaniu informacji okazał mi Josh Gates. Wydawnictwo O'Reilly Media uwierzyło w to, co robię. Kevin Kelly niechcący zaraził mnie swoją słynną ideą „dostępności narzędzi”.

Głównymi redaktorami merytorycznymi byli: Eric Moberg, Chris Lirakis, Jason George, Roy Rabey, Emre Tuncer i Patrick Fagg. Jestem im niezmiernie wdzięczny za okazaną pomoc. Wszelkie błędy, które jeszcze pozostały, są oczywiście moją „zasługą”.

Na koniec pragnę jeszcze wspomnieć o moich kolegach ze szkolnych lat, Hugh Levinsonie, Patricku Faggu, Grahamie Rogersie, Williamie Edmondsonie i Johnie Witty'm, którzy w tamtym czasie wspierali moje amatorskie próby budowania sprzętu nagłaśniającego.

— Charles Platt, 2012.

---

<sup>1</sup> Wydanie polskie: *Sztuka elektroniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, 2020.



# Kwestie organizacyjne



Aby uniknąć nieporozumień co do przeznaczenia tej książki, zacznę od krótkiej prezentacji zasad, według których jej treść została opracowana i zorganizowana.

## Układ encyklopedyczny a podręcznikowy

Jak sugeruje tytuł, książka ma charakter encyklopedyczny, a nie podręcznikowy. Innymi słowy, nie zaczyna się od prostych pojęć, aby stopniowo przechodzić do coraz trudniejszych, lecz grupuje zagadnienia na zasadzie tematycznej.

Przy takim układzie publikacji czytelnik może w każdej chwili sięgnąć po nią, odszukać interesujący go temat, zdobyć potrzebne informacje i odłożyć książkę. Jeśli postanowi przeczytać ją od początku do końca, nie znajdzie tam pojęć wprowadzanych stopniowo zgodnie z zasadami poszerzania wiedzy i stopniowania jej trudności.

Układ podręcznikowy zastosowałem w książce *Elektronika. Od praktyki do teorii*, ale jej zakres tematyczny jest dużo węższy, ponieważ dużo miejsca jest tam przeznaczone na dokładne wyjaśnienia i szczegółowe opisy wykonywania ćwiczeń.

## Teoria i praktyka

Ta książka jest ukierunkowana w większym stopniu na praktykę niż teorię. Uznałem, że czytelnik będzie bardziej zainteresowany praktycznymi zastosowaniami poszczególnych elementów niż teoretycznymi podstawami ich działania. Dlatego nie zamieszczam tu żadnych dowodów słuszności przytaczanych wzorów ani definicji znanych z teorii obwodów. Nie przywołuję też żadnych faktów historycznych

związanych z omawianym zagadnieniem. Jednostki definiuję tylko w stopniu koniecznym do uniknięcia nieporozumień.

Jeśli interesuje Cię teoria elektroniki, masz mnóstwo innych książek do wyboru.

## Struktura książki

Zawartość merytoryczna encyklopedii jest podzielona na hasła, z których każde jest poświęcone jednemu typowi urządzeń. O tym, czy dany komponent otrzymał własne hasło, czy też został dołączony do innego, decydowały dwie reguły:

1. Element zasługuje na własne hasło, jeśli (a) jest powszechnie używany lub (b) jest jedyny w swoim rodzaju (niekiedy ze względów historycznych). Przykładem komponentu powszechnie używanego może być  **tranzystor bipolarny**, a jedynego w swoim rodzaju —  **tranzystor jednozłączowy**.
2. Element nie zasługuje na własne hasło, jeśli (a) jest rzadko używany lub (b) pod względem działania bardzo przypomina inny element, który jest stosowany znacznie częściej. Na przykład *opornica* została przydzielona do hasła **potencjometr**, a *dioda krzemowa*, *dioda Zenera* i *dioda germanowa* znalazły się w obrębie hasła **dioda**.

Niewątpliwie w wielu przypadkach podjąłem decyzje, które mogą być odbierane jako arbitralne, ale w sytuacjach wątpliwych ostatecznie umieszczałem element tam, gdzie sam bym go szukał, gdybym miał z niniejszej encyklopedii korzystać.

## Powiązania tematyczne

Hasła nie są ułożone alfabetycznie, lecz zostały pogrupowane tematycznie, podobnie jak zasoby biblioteczne w klasyfikacji dziesiętnej Deweya. Takie uporządkowanie jest bardzo wygodne w sytuacjach, gdy nie bardzo wiemy, czego mamy szukać, lub nie znamy wszystkich możliwości realizacyjnych naszego projektu.

Każda kategoria główna dzieli się na podkategorie, a te dzielą się na typy elementów. Cały ten hierarchiczny układ jest pokazany na rysunku 1.1. Na pierwszej stronie każdego hasła znajduje się zapis informujący o położeniu tego hasła w opisanej strukturze. Na przykład hasło **kondensator** jest poprzedzone następującym zapisem:

zasilanie > ograniczanie > kondensator.

Każdy system klasyfikacyjny ma swoje wyjątki. Weźmy na przykład *matrycę rezystorów*. Z technicznego punktu widzenia jest to *analogowy układ scalony*, ale czy rzeczywiście należy ten element potraktować na równi z przekaźnikiem półprzewodnikowym czy komparatorem? Ostatecznie uznałem, że sensowniejsze będzie umieszczenie go w hasle **rezystor**.

Niektóre części elektroniczne mają charakter hybrydowy. W tomie 2. w podkategorii *układów scalonych* wprowadziłem podział na układy *analogowe* i *cyfrowe*. I tu pojawił się problem z **przetwornikiem analogowo-cyfrowym** — w której podkategorii powinien się znaleźć? Umieściłem go w podkategorii *analogowej*, ponieważ ta wydaje się mocniej związana z podstawową funkcją tego elementu i chyba większość ludzi właśnie tu zacznie go szukać.

## Co jest w encyklopedii i czego brakuje

Przede wszystkim trzeba było odpowiedzieć na pytanie, co jest podzespołem, a co nim nie jest. Czy przewód jest podzespołem? Według tej encyklopedii odpowiedź jest przecząca. A **przetwornik DC-DC**? Jako że przetworniki są teraz sprzedawane w sklepach z częściami elektronicznymi jako niewielkie podzespoły, zaliczyłem je do podzespołów i umieściłem w encyklopedii.

Przy opracowywaniu kolejnych haseł często musiałem podejmować tego typu decyzje. Nie wątpię, że wielu

Kategoria główna	Kategoria podrzędna	Typ podzespołu
zasilanie	źródło	bateria, akumulator
	połączenie	zworka
		bezpiecznik
		przycisk
		przełącznik
		przełącznik obrotowy
		enkoder obrotowy
	wyglądanie	przełącznik
		rezystor
		potencjometr
		kondensator
		kondensator zmienny
	dławik	
regulacja	regulator napięcia	
elektromagnetyzm	wyjście liniowe	elektromagnes
		solenoid
	wyjście obrotowe	silnik DC
		silnik AC
		silownik
	silnik krokowy	
półprzewodniki dyskretnie	jednozłączowe	dioda
		tranzystor jednozłączowy
	wielozłączowe	tranzystor bipolarny
		tranzystor polowy

Rysunek 1.1. Struktura organizacyjna kategorii i haseł zastosowana w tej encyklopedii

czytelników nie zgodzi się z ostatecznym rezultatem, ale pogodzenie wszystkich opinii byłoby chyba niemożliwe. Jedyne, co mogłem zrobić, to tak zorganizować tę książkę, aby jak najlepiej odpowiadała moim wyobrażeniom o potrzebach ludzi interesujących się elektroniką.

## Konwencje typograficzne

W całej encyklopedii nazwy podzespołów mających własne hasła są zapisywane **czcionką pogrubioną**. Pozostałe pojęcia elektroniczne i nazwy podzespołów niemających swoich haseł są zapisywane *kursywą*, jeśli występują po raz pierwszy w rozdziale encyklopedii.

Nazwy komponentów i ich kategorii są zapisywane małymi literami, chyba że są skrótowcami lub nazwami zastrzeżonymi. Na przykład *Trimpot* (potencjometr nastawny) jest nazwą zastrzeżoną przez firmę Bourns, a *trymer* (kondensator dostrojczy) jest nazwą zwykłą. **LED** jest skrótowcem, a nie jest nim *trafo* (skrót od **transformatora**).

Wszystkie przytaczane wzory matematyczne zapisałem w notacji używanej raczej przez programistów komputerowych niż przez pozostałych ludzi. Znakiem mnożenia jest gwiazdka (\*), a dzielenia — ukośnik (/). W przypadku zagnieżdżenia nawiasów działania zawarte w nawiasach wewnętrznych powinny być wykonywane w pierwszej kolejności.

## Zawartość poszczególnych tomów

Ze względów praktycznych cała książka została podzielona na trzy tomy. Podział zagadnień jest następujący:

### Tom 1.

Zasilanie, elektromagnetyzm i półprzewodniki dyskretne.

Kategoria *zasilanie* obejmuje źródła zasilania oraz metody przesyłania, gromadzenia, odcinania i modyfikowania energii elektrycznej. Kategoria *elektromagnetyzm* obejmuje urządzenia generujące ruch posuwisty lub obrotowy. W kategorii *półprzewodniki dyskretne* znalazły się podstawowe rodzaje diod i tranzystorów.

### Tom 2.

Układy scalone, źródła światła, źródła dźwięku.

*Układy scalone* dzielą się na analogowe i cyfrowe. Kategoria *źródła światła* obejmuje wiele urządzeń emitujących światło, począwszy od żarówek, przez LED-y, po małe wyświetlacze, a także urządzenia wykorzystujące zjawisko odbicia światła, takie jak ekrany ciekłokrystaliczne i e-papierowe. *Źródła dźwięku* są reprezentowane głównie przez urządzenia elektromagnetyczne.

### Tom 3.

Czujniki

Liczba stosowanych obecnie sensorów stała się tak duża, że musiałem im poświęcić oddzielny tom encyklopedii. Do *czujników* zaliczyłem urządzenia wykrywające reagujące na światło, dźwięk, ciepło, ruch, ciśnienie, obecność gazów, wilgoć, pole magnetyczne, elektryczność, bliskość innych przedmiotów, wywieraną siłę i promieniowanie.

W czasie pisania tego wstępu wciąż pracuję nad tomami 2. i 3., ale najprawdopodobniej ich zawartość będzie zgodna z tym, co napisałem powyżej.



# Bateria

To hasło obejmuje źródła energii elektrochemicznej. Wprawdzie prąd elektryczny jest w przeważającej mierze generowany przez urządzenia elektromagnetyczne, ale ich nie można zaliczyć do podzespołów elektronicznych, więc nie znalazły się w *Encyklopedii*. Z tego samego powodu wykluczyłem też źródła elektrostatyczne.

Zamiast baterii mówimy czasem *ogniwo* lub *ogniwo elektryczne*, ale w rzeczywistości najczęściej chodzi o kilka ogniw w jednej obudowie.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **kondensator** (rozdział 12.).

## Funkcja

Bateria zawiera jedno lub kilka *ogniw galwanicznych*, w których reakcje chemiczne wytwarzają różnicę potencjału między elektrodami zanurzonymi w elektrolicie. Różnica ta wywołuje przepływ *prądu* przez zewnętrzne *obciążenie*, co z kolei powoduje rozładowywanie baterii.

Ogniwa galwanicznego nie należy mylić z *ogniwem elektrolitycznym*<sup>1</sup>, które wymaga zasilania z zewnętrznego źródła prądu w celu przeprowadzenia *elektrolizy* polegającej na rozkładzie związków chemicznych. Ogniwo elektrolityczne zużywa energię elektryczną, a ogniwo galwaniczne ją wytwarza.

Baterie mogą przybierać formę od pojedynczego *ogniwa guzikowego (pastylkowego)* po duże akumulatory kwasowo-olowiowe stosowane do gromadzenia energii wygenerowanej przez panele fotowoltaiczne lub turbiny wiatrowe w miejscach odległych od sieci energetycznej. Zestawy dużych akumulatorów mogą służyć jako źródła zasilania awaryjnego w zakładach produkcyjnych lub nawet małych społecznościach położonych w miejscach, gdzie tradycyjna sieć energetyczna działa niepewnie. Na rysunku 2.1 widać zestaw akumulatorów o łącznej mocy 60 kW i stałym napięciu

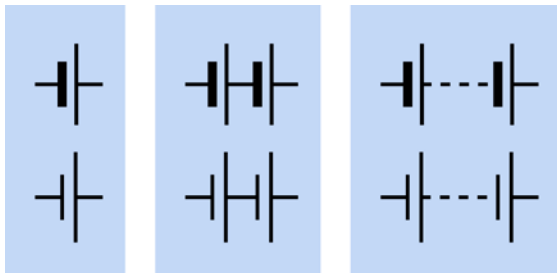
wyjściowym 480 V zainstalowany w korporacyjnym centrum obliczeniowym w celu uzupełnienia energii dostarczanej przez panele fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe w okresach szczytowego poboru prądu albo gromadzenia jej, gdy zapotrzebowanie jest mniejsze. Każdy z tych akumulatorów ma wymiary 70 × 60 × 30 cm i waży około 450 kg.



**Rysunek 2.1.** Zestaw akumulatorów o łącznej mocy 60 kW i stałym napięciu wyjściowym 480 V zainstalowany w korporacyjnym centrum obliczeniowym jako uzupełniające źródło zasilania. (Zgodę na publikację zdjęcia wydała firma Hybridne Power Systems Canada Inc. będąca właścicielem praw autorskich. Dalsza reprodukcja wymaga dodatkowej zgody ze strony wymienionej firmy)

<sup>1</sup> Zwane też *komórką elektrolityczną* — przyp. red.

Symbole schematyczne baterii są pokazane na rysunku 2.2. W każdym przypadku dłuższa linia oznacza dodatni biegun baterii. Jednym ze sposobów zapamiętania tego faktu może być wyobrażenie sobie, że z dłuższej kreski — po podzieleniu jej na pół — da się ułożyć znak plus (+). Teoretycznie kilka połączonych symboli powinno oznaczać baterię złożoną z kilku ogniw, i tak symbol środkowy powinien oznaczać baterię o napięciu 3 V, a symbol po prawej stronie — baterię o napięciu większym niż 3 V, ale w praktyce wygląda to różnie. Nie ma jednej spójnej zasady.

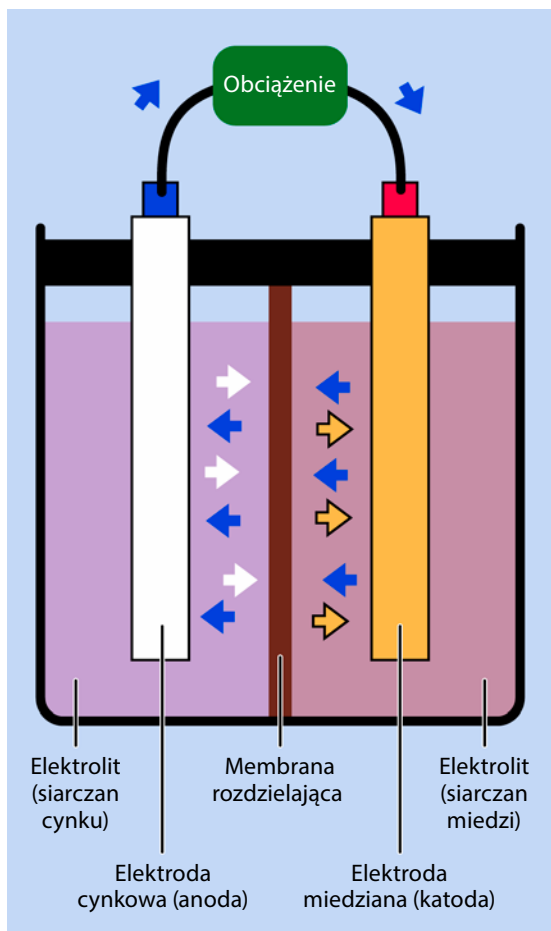


**Rysunek 2.2.** Symbole schematyczne baterii. Symbole zawarte w tym samym niebieskim prostokącie są równoważne

## Działanie

W najprostszej postaci, stosowanej w celach pokazowych, ogniwo składa się z dwóch *elektrod*, miedzianej i cynkowej, zanurzonych częściowo w *elektrolitach* będących siarczanami, odpowiednio, miedzi i cynku. Często cały taki układ bywa nazywany *ogniwem*, a poszczególne zestawy złożone z elektrody i elektrolitu — *półogniwami*.

Schemat takiego ogniwa jest pokazany na rysunku 2.3. Niebieskie strzałki nad obwodem zewnętrznym wskazują kierunek przepływu elektronów od elektrody cynkowej (*anoda*) poprzez obciążenie do elektrody miedzianej (*katoda*). *Membrana rozdzielająca* przepuszcza elektrony powracające do anody, ale zapobiega mieszanii się elektrolitów.



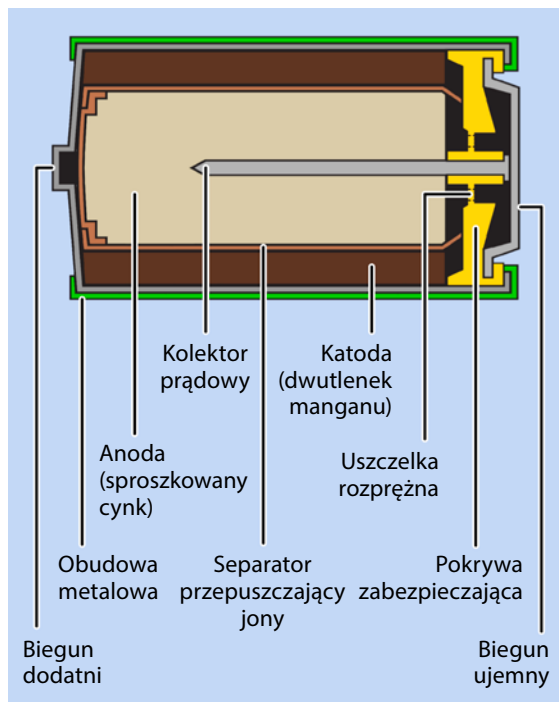
**Rysunek 2.3.** Klasyczny układ ogniwa galwanicznego; szczegółowe objaśnienia znajdują się w tekście

Strzałki pomarańczowe reprezentują dodatnie *jony* miedzi. Strzałki białe symbolizują dodatnie jony cynku. (Jon to atom pozbawiony jednego lub więcej elektronów). Jony cynku przechodzą z elektrody do elektrolitu, co powoduje stopniowe zmniejszanie się jej masy.

Elektrony docierające do elektrody miedzianej przyciągają dodatnie jony miedzi z elektrolitu (symbolizują to strzałki pomarańczowe). Jony te osadzają się na elektrodzie, co prowadzi do zwiększania się jej masy.

Cały ten proces wynika po części z tego, że cynk łatwiej uwalnia elektrony niż miedź.

Baterie stosowane w sprzęcie konsumenckim zazwyczaj mają elektrolit w formie pasty zamiast cieczy i dlatego nazywano je *ogniwami suchymi*, ale obecnie już się tej nazwy nie używa. Po zamontowaniu obu półogniw koncentrycznie w jednej walcowatej obudowie otrzymujemy typową baterię 1,5 V typu C (R14), D (R20), AA (R6) lub AAA (R03) (patrz rysunek 2.4).



Rysunek 2.4. Przekrój poprzeczny typowej baterii alkalicznej 1,5 V

Bateria o napięciu znamionowym 1,5 V składa się z jednego ogniwa, a baterie o napięciu 6 V lub 9 V zawierają po kilka ogniw połączonych szeregowo; przy takim połączeniu całkowite napięcie baterii jest sumą napięć wszystkich jej ogniw.

## Nazewnictwo elektrod

Elektrody ogniwa zwykle się nazywać *anodą* i *katodą*. Z jednoznacznością tych nazw jest pewien problem, ponieważ wewnątrz ogniwa elektrony wpływają do anody, a na zewnątrz wypływają z niej. W przypadku katody wszystko jest dokładnie na odwrót. A zatem, gdy patrzymy na ogniwo z zewnątrz, emitorem elektronów jest anoda, a gdy patrzymy od środka, emitorem jest katoda.

*Umowny kierunek prądu* jest odwrotny w stosunku do kierunku przepływu elektronów, a zatem w obwodzie zewnętrznym płynie on od katody do anody, a to z kolei oznacza, że katoda ma wyższy potencjał (jest „bardziej dodatnia”) niż anoda. Aby to zapamiętać, skojarz sobie literę *t* w słowie katoda ze znakiem plus (ka+oda). W dużych akumulatorach katoda jest często oznaczana kolorem czerwonym, a anoda — czarnym lub niebieskim.

Gdy akumulator (bateria wielokrotnego użytku) jest ładowany, elektrony przepływają w odwrotnym kierunku, a więc i anoda z katodą zamieniają się miejscami. Producenci akumulatorów zwykle nazywają anodą zacisk o wyższym potencjale. Całe to zamieszanie z nazewnictwem elektrod potęgują producenci części elektronicznych, którzy używają słowa „katoda” do oznaczania „bardziej ujemnej” (mającej niższy potencjał) końcówki **diody**.

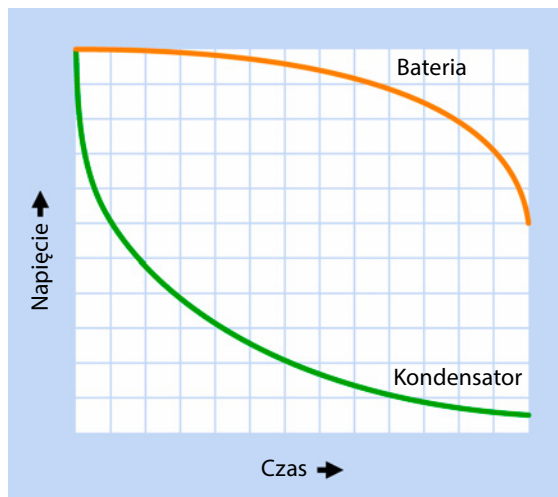
Żeby uniknąć nieporozumień, lepiej w przypadku baterii nie mówić o anodzie i katodzie, lecz po prostu o biegunach: ujemnym i dodatnim. W niniejszej *Encyklopedii* słowo „katoda” będzie odtąd oznaczało wyłącznie „bardziej ujemną” końcówkę diody.

## Rodzaje

Istnieją trzy rodzaje baterii:

1. *Baterie jednorazowe* zwane też (poprawnie, choć niezbyt często) *ogniwami pierwotnymi*. Ich ponowne naładowanie jest niemożliwe, ponieważ zachodzące w nich reakcje chemiczne są nieodwracalne.
2. *Baterie wielokrotnego użytku (akumulatory)* zwane też (poprawnie, choć niezbyt często) *ogniwami wtórnymi*. Ich ponowne naładowanie jest możliwe przez przyłożenie napięcia do biegunów z zewnętrznego źródła prądu zwanego *ładowarką*. Tempo stopniowej degradacji elektrod będącej skutkiem procesu ładowania zależy w dużej mierze od materiałów użytych przy produkcji baterii i sposobu jej użytkowania. Tak czy inaczej, liczba cykli ładowania i rozładowania jest ograniczona.
3. *Ogniwa paliwowe* do długotrwałej pracy wymagają ciągłego dopływu gazu reaktywnego, na przykład wodoru. Zastosowania i zasada działania takich ogniw wykraczają poza tematykę tej encyklopedii.

W pewnych zastosowaniach baterię można zastąpić **kondensatorem**, ale jego gęstość energii jest mniejsza, a koszty produkcji — przy porównywalnej pojemności energetycznej — są znacznie większe. Kondensator ładuje się i rozładowuje znacznie szybciej niż bateria, ponieważ nie są w to zaangażowane żadne reakcje chemiczne. Bateria ma jednak tę przewagę, że przez większą część cyklu rozładowywania utrzymuje napięcie wyjściowe na poziomie bliskim znamionowemu (patrz rysunek 2.5).



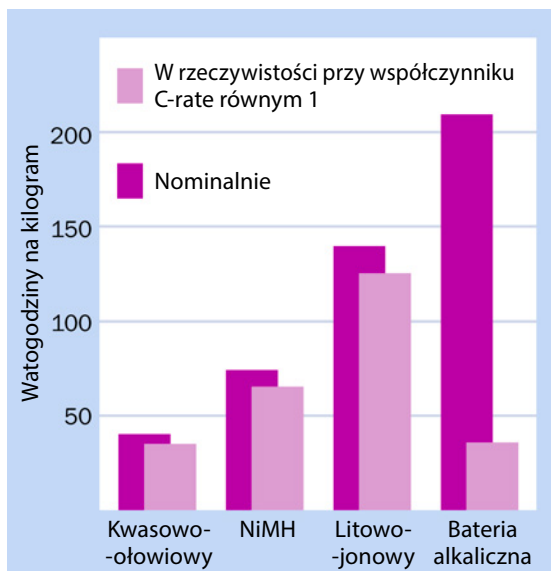
**Rysunek 2.5.** Szybki spadek napięcia rozładowującego się kondensatora wyklucza go jako zamiennik baterii w większości zastosowań. Niekiedy jednak możliwość szybkiego rozładowania się przy dużym natężeniu prądu może być wielką zaletą kondensatora

Kondensatory zdolne do gromadzenia bardzo dużych ilości energii są często nazywane *superkondensatorami*.

## Baterie jednorazowe

Gęstość energii dowolnej baterii jednorazowej jest większa niż jakiegokolwiek baterii wielokrotnego użytku. Baterie jednorazowe mają też dłuższy okres trwałości, ponieważ znacznie wolniej tracą ładunek podczas przechowywania (nazywamy to szybkością *samorozładowania*). Swoje właściwości zachowują przez pięć lat, a nawet dłużej, co czyni je szczególnie przydatnymi w takich zastosowaniach, jak czujniki dymu, piloty zdalnego sterowania czy światła ostrzegawcze.

Baterie jednorazowe nie są przystosowane do pracy z obciążeniem o rezystancji mniejszej niż  $75 \Omega$ . W takich sytuacjach lepiej spisują się akumulatory. Wykres słupkowy z rysunku 2.6 przedstawia znamionowe i rzeczywiste możliwości baterii alkalicznej na tle trzech najpopularniejszych rodzajów akumulatorów w warunkach obciążenia powodującego całkowite rozładowanie w ciągu jednej godziny.



**Rysunek 2.6.** Z powodu stosunkowo dużej rezystancji wewnętrznej baterie alkaliczne zupełnie nie nadają się do szybkiego rozładowywania, więc powinno się je stosować tam, gdzie jest potrzebne dostarczenie prądu o niewielkim natężeniu przez długi czas (wykres pochodzi ze strony <https://batteryuniversity.com>)

Podawana przez producenta liczba watogodzin jest zwykle ustalana na drodze testów polegających na obciążeniu baterii odbiornikiem o stosunkowo dużej rezystancji i pomiarze czasu jej powolnego rozładowywania. Wartość ta nie potwierdzi się w praktyce, jeśli bateria będzie rozładowywana zbyt szybko, na przykład w ciągu 1 godziny (ze współczynnikiem *C-rate* równym 1).

Popularnymi typami baterii są *cyinkowo-węglowe* i *alkaliczne*. W ogniwie cyinkowo-węglowym elektroda ujemna jest wykonana z cynku, a dodatnia — z węgla. Ograniczona pojemność tego typu baterii zmniejszyła ich popularność, ale jako że są tanie w produkcji, wciąż znajdują zastosowanie, szczególnie tam, gdzie firmy sprzedają swoje produkty z „dołączoną baterią”. Elektrolitem jest najczęściej chlorek amonu

lub chlorek cynku. Widoczna na rysunku 2.7 bateria 9 V jest taką właśnie baterią cynkowo-węglową, a ta mniejsza, 12 V alkaliczna, znalazła zastosowanie w systemach alarmowych. Już te dwa przykłady dowodzą, że na podstawie samego wyglądu nie da się za wiele powiedzieć o budowie i parametrach baterii.



**Rysunek 2.7.** Po lewej: tania bateria cynkowo-węglowa; po prawej: 12 V bateria alkaliczna stosowana w systemach alarmowych — więcej szczegółów znajdziesz w tekście

W ogniwie alkalicznym elektroda ujemna jest wykonana ze sproszkowanego cynku, a dodatnia — z wodorotlenku potasu. Tego typu bateria może mieć od 3 do 5 razy większą pojemność energetyczną niż tej samej wielkości bateria cynkowo-węglowa i dłużej utrzymuje użyteczną wartość napięcia podczas cyklu rozładowywania.

W niektórych zastosowaniach militarnych pożądany jest długi czas przydatności do użytku. Można to osiągnąć, stosując *baterie rezerwowe*, w których wewnętrzne składniki chemiczne są początkowo odseparowane od siebie, a ich połączenie następuje dopiero tuż przed użyciem baterii.

## Baterie wielokrotnego użytku (akumulatory)

Powszechnie stosowane są następujące typy akumulatorów: *kwasowo-ołowiowe*, *niklowo-kadmowe* (w skrócie *NiCd* lub *NiCad*), *niklowo-metalowo-wodorkowe* (w skrócie *NiMH*), *lito-wo-jonowe* (w skrócie *Li-ion*) i *litowo-polimerowe* (w skrócie *LiPo* lub *Li-Poly*).

Akumulatory kwasowo-ołowiowe istnieją od ponad wieku i są nadal powszechnie stosowane w samochodach, systemach alarmowych, oświetleniu awaryjnym i w układach

zasilania rezerwowego. W pierwszych konstrukcjach, zwanych często *akumulatorami mokrymi*, jako elektrolit wykorzystywany był kwas siarkowy (stąd dość popularne określenie *kwasy akumulatorowy*), którego stężenie musiało być utrzymywane na odpowiednim poziomie, co wymagało okresowego dolewania wody destylowanej. Konieczne było też zapewnienie wentylacji takiego akumulatora, z czym wiązało się ryzyko wylania kwasu przez otwór wentylacyjny przy mocniejszym przechyleniu urządzenia.

Później dużą popularność zyskały akumulatory *kwasowo-ołowiowe z zaworem regulacyjnym (VRLA)*, które są szczelne i nie wymagają dolewania wody destylowanej. Wbudowany zawór regulacyjny otwiera się przy wzroście wewnętrznego ciśnienia gazów, ale zapobiega wylewaniu się elektrolitu bez względu na usytuowanie akumulatora. Urządzenia tego typu są chętnie stosowane w *układach ciągłego zasilania* systemów przetwarzania danych, a także w samochodach i elektrycznych wózkach inwalidzkich, ponieważ ze względu na szczelność i bezobsługowość mają dość duży współczynnik bezpieczeństwa.

Akumulatory VRLA można podzielić na dwa rodzaje: AGM z matą szklaną jako absorbentem elektrolitu i elektrolity żelowe. W pierwszym elektrolit jest absorbowany przez porowatą matę z włókna szklanego, a w drugim jest mieszany z pyłem silikonowym, co nadaje mu formę nieruchomego żelu.

Pojęcie *głębokiego rozładowania* odnosi się do akumulatorów kwasowo-ołowiowych i wiąże się z ich odpornością na rozładowanie do niskiego poziomu, zazwyczaj 20% pojemności (choć niektórzy producenci podają jeszcze niższe wartości). Płytki typowego akumulatora kwasowo-ołowiowego są wykonywane z ołowiu *gąbczastego*, co zwiększa maksymalnie powierzchnię kontaktu z kwasem, ale przy głębokim rozładowaniu zwiększa ryzyko powstawania fizycznych ubytków. W akumulatorach przystosowanych do głębokich rozładowań płytki są pełne, a więc bardziej wytrzymałe pod względem fizycznym, ale za to ich wydajność prądowa jest mniejsza. Jeśli taki akumulator ma służyć do uruchamiania silnika spalinowego, powinien mieć większą pojemność elektryczną niż zwykłe urządzenia kwasowo-ołowiowe używane do tego celu.

Na rysunku 2.8 jest pokazany szczelny akumulator kwasowo-ołowiowy przeznaczony do zasilania oświetlenia zewnętrznego włączanego przez czujnik ruchu. Urządzenie waży kilka

kilogramów i jest w ciągu dnia doładowywane przez panel fotowoltaiczny o wymiarach 15 cm × 15 cm.



**Rysunek 2.8.** Akumulator kwasowo-ołowiowy przeznaczony do zasilania zewnętrznego oświetlenia włączanego przez czujnik ruchu

Akumulatory niklowo-kadmowe (NiCd) mają dużą wydajność prądową, ale ich używanie zostało w Europie zakazane ze względu na toksyczność kadmu. Obecnie są zastępowane akumulatorami *niklowo-metalowo-wodorkowymi* (NiMH), które są mniej szkodliwe i nie wykazują *efektu pamięci* polegającego na tym, że ogniwo Ni-Cd pozostawione na kilka tygodni lub miesięcy w stanie częściowego rozładowania zmniejsza swoją pojemność.

Akumulatory litowo-jonowe i litowo-polimerowe mają lepszy stosunek pojemności energetycznej do masy niż baterie NiMH i są szeroko stosowane w urządzeniach elektronicznych, takich jak laptopy, odtwarzacze multimedialne, cyfrowe aparaty fotograficzne i telefony komórkowe. Duże zestawy takich akumulatorów są również stosowane w niektórych samochodach o napędzie elektrycznym.

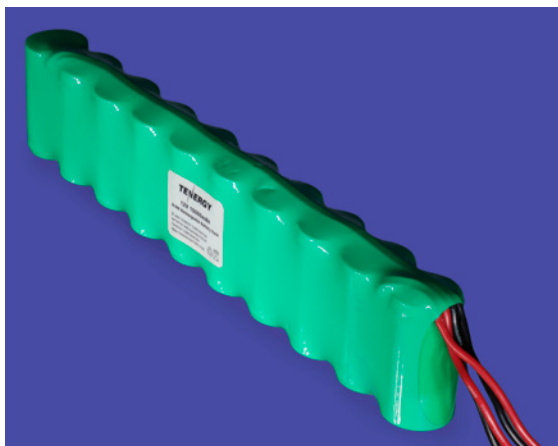
Kilka rodzajów małych akumulatorów jest pokazanych na rysunku 2.9. Zestaw ogniwi NiCd (w lewym górnym rogu) był stosowany w telefonach bezprzewodowych, ale obecnie nie jest już produkowany. Litowy akumulator 3V (w prawym górnym rogu) znalazł zastosowanie w cyfrowych aparatach fotograficznych. Pozostałe trzy akumulatory są typu NiMH i pełnią funkcję zamienników baterii 6F22 (9 V), AA i AAA. Pojedyncze ogniwa NiMH mają napięcie wyjściowe 1,2 V, a nie 1,5 V, jak jest w przypadku alkalicznych baterii AA i AAA, ale producenci twierdzą, że to w niczym nie przeszkadza,

ponieważ akumulatory dłużej utrzymują napięcie na stałym poziomie, więc po pewnym czasie napięcia wyjściowe obu źródeł i tak się wyrównują.



**Rysunek 2.9.** U góry po lewej: zestaw ogniwi NiCd stosowany w telefonach bezprzewodowych; u góry po prawej: akumulator litowy do aparatu fotograficznego; u dołu: trzy akumulatory NiMH będące zamiennikami popularnych baterii alkalicznych

Zestawy NiMH dostarczają stosunkowo duże ilości energii przy rozmiarach i masie mniejszych niż ich odpowiedniki kwasowo-ołowiowe. Zestaw pokazany na rysunku 2.10 ma pojemność 10 Ah i składa się z 10 akumulatorów NiMH o rozmiarze D połączonych szeregowo, co w sumie daje napięcie wyjściowe 12 V. Takie zestawy znajdują zastosowanie w robotyce i innych gałęziach techniki, w których istotna jest mobilność zasilanego urządzenia.



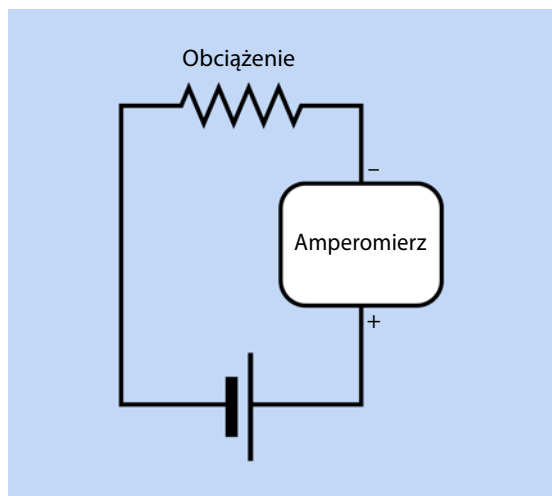
**Rysunek 2.10.** Ten zestaw połączonych szeregowo akumulatorów NiMH ma znamionową pojemność 10 Ah i napięcie wyjściowe 12 V

## Wartości

### Natężenie prądu

Natężenie prądu pobieranego z baterii jest w dużym stopniu zależne od rezystancji obciążenia podłączonego do zewnętrznych zacisków. Jednakże, aby obwód mógł być zamknięty (warunek przepływu prądu), wewnątrz baterii musi następować przepływ jonów, a więc prąd będzie ograniczany także przez *rezystancję wewnętrzną*. Rezystancję tę należy traktować na równi z innymi elementami obwodu.

Bateria dostarcza prąd tylko wtedy, gdy jest do niej podłączone obciążenie, i tylko wtedy można mierzyć natężenie tego prądu — obciążeniem nie może być sam amperomierz. Miernik podłączony bezpośrednio do zacisków baterii (również równolegle do obciążenia) natychmiast ulegnie przeciążeniu, co może się skończyć jego uszkodzeniem. Przy pomiarze natężenia prądu miernik należy zawsze włączać do obwodu szeregowo z obciążeniem, zachowując odpowiednią biegunowość (patrz rysunek 2.11).



**Rysunek 2.11.** Przy mierzeniu natężenia prądu za pomocą amperomierza (lub miernika uniwersalnego w trybie pomiaru natężenia prądu) miernik należy włączyć do obwodu szeregowo z baterią i jej obciążeniem; aby zapobiec uszkodzeniu miernika, nie należy go przyłączać bezpośrednio do zacisków baterii (równolegle z obciążeniem); konieczne jest również zachowanie właściwej biegunowości

### Pojemność

*Pojemność energetyczna* baterii jest wyrażana w *amperogodzinach* (w skrócie *Ah*). Jednostką tysiąc razy mniejszą jest *miliamperogodzina* (*mAh*). Jeśli przez *I* oznaczymy natężenie prądu pobieranego z baterii (w amperach), a przez *T* czas pobierania tego prądu (w godzinach), to pojemność energetyczną baterii możemy wyliczyć za pomocą następującego wzoru:

$$Ah = I \cdot T$$

Jeśli producent podał pojemność baterii, to po przekształceniu tego wzoru można łatwo obliczyć, przez jaki czas bateria będzie mogła dostarczać prąd o określonym natężeniu:

$$T = Ah / I$$

Teoretycznie pojemność energetyczna jest wartością stałą dla danej baterii, a zatem bateria o pojemności 4 Ah powinna dostarczać prąd o natężeniu 1 A przez 4 godziny albo 4 A przez 1 godzinę, albo 5 A przez 0,8 godziny (48 minut) itd.

W rzeczywistości taka liniowa zależność nie istnieje. Załamuje się dość szybko przy wzroście natężenia prądu, a dotyczy to szczególnie akumulatorów kwasowo-ołowiowych, które

nie sprawują się najlepiej, gdy mają dostarczać prąd o dużym natężeniu. Część energii jest w nich zamieniana na ciepło, a będące podstawą ich działania reakcje chemiczne po prostu nie są w stanie podołać większym zapotrzebowaniom.

Zastosowanie *prawa Peukerta* (odkrytego przez niemieckiego naukowca w 1897 roku) pozwala uzyskać realniejszy wynik dla dużych prądów. Jeśli przez  $n$  oznaczymy wartość współczynnika Peukerta (tzw. *liczba Peukerta*) dla danej baterii, to poprzedni wzór możemy zmodyfikować następująco:

$$T = Ah / I^n$$

Producenci baterii zazwyczaj (ale nie zawsze) podają wartość współczynnika Peukerta dla danego modelu, więc można ten czas wyliczyć. Załóżmy na przykład, że bateria o pojemności 4 Ah ma współczynnik Peukerta 1,2 i pobieramy z niej prąd o natężeniu 5 A. Obliczmy, przez jaki czas będziemy mogli to robić.

$$T = 4 / 5^{1,2} = \text{w przybliżeniu } 4 / 6,9$$

Czas ten wynosi 0,58 h, czyli 35 minut — znacznie mniej, niż wynikało to z poprzedniego wzoru.

Niestety obliczenia te są obciążone dość istotnym błędem. Otóż w czasach Peukerta producenci wyznaczali pojemność baterii, pobierając z niej prąd o stałym natężeniu 1 A i mierząc czas, w ciągu którego bateria była w stanie taki prąd dostarczać. Jeśli ten czas wynosił 4 godziny, przypisywano baterii pojemność 4 Ah.

Obecnie wszystko odbywa się na odwrót. Zamiast ustalać natężenie prądu pobieranego z baterii, producenci ustalają czas trwania testu i wyznaczają maksymalny prąd, jaki bateria może przez ten czas dostarczać. Na ogół taki test trwa 20 godzin, a więc jeśli bateria ma w ten sposób wyznaczoną pojemność 4 Ah, to znaczy, że przez 20 godzin może ona dostarczać prąd o natężeniu 0,2 A, a nie 1 A przez 4 godziny.

Różnica jest zasadnicza, ponieważ bateria mogąca dostarczać prąd 0,2 A przez 20 godzin nie będzie w stanie dostarczać prądu 1 A przez 4 godziny. Pojemności wyznaczone według starych i nowych zasad mają różne znaczenia i nie można ich używać zamiennie. Jeśli do starego wzoru Peukerta wstawimy pojemność wyznaczoną według nowych reguł (jak to zrobiłem przed chwilą), wynik będzie zbyt optymistyczny. Niestety mało kto zwraca na to uwagę. Wzór Peukerta jest nadal stosowany, a wydajność baterii jest obliczana w sposób nieprawidłowy.

Wzór został oczywiście poprawiony (wstępnie przez Chrisa Gibsona z firmy SmartGauge Electronics) w celu uwzględnienia nowej metody wyznaczania pojemności. Wprowadzono nowy współczynnik  $H$  oznaczający czas trwania testu;  $n$ , jak poprzednio, jest liczbą Peukerta i jest ustalana przez producenta baterii, a  $I$  — natężeniem prądu, który chcemy pobierać. Nowa wersja wzoru wygląda następująco:

$$T = H * (AhM / (I * H)^n)^2$$

Gdzie szukać wartości współczynnika  $H$ ? Większość producentów (nie wszyscy) podaje ją wśród danych technicznych baterii lub akumulatora. Niektórzy zamiast niej podają wartość współczynnika wydajnościowego *C-rate*, który można określić jako odwrotność czasu trwania testu ( $1/H$ ). A zatem, jeśli znamy *C-rate*, możemy łatwo obliczyć  $H$ :

$$H = 1 / C\text{-rate}$$

Zastosujmy teraz zmodyfikowany wzór w naszych poprzednich obliczeniach. A zatem, jeśli bateria ma znamionową pojemność 4 Ah i wartość ta została wyznaczona nowoczesną metodą podczas testu trwającego 20 godzin (a więc przy *C-rate* wynoszącym 0,05), a współczynnik Peukerta nadal wynosi 1,2, to czas, przez jaki możemy pobierać prąd o natężeniu 5 A, obliczymy w sposób następujący:

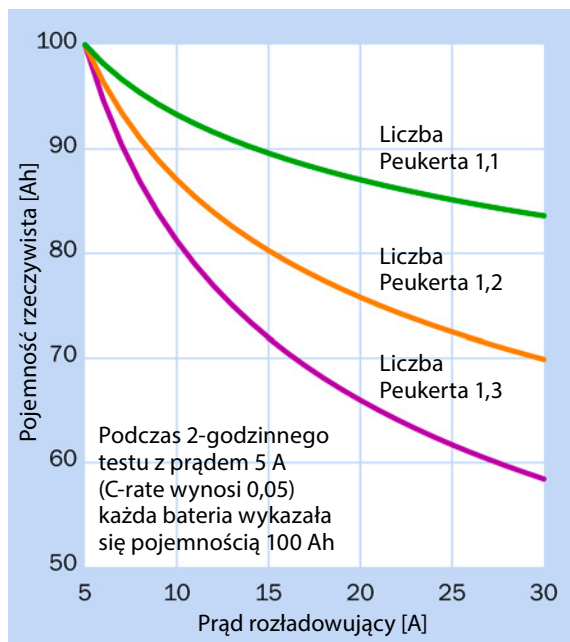
$$T = 20 * (4 / (5 * 20)^{1,2}) = \text{w przybliżeniu } 20 * 0,021$$

To daje 0,42 godziny, czyli około 25 minut, a zatem znacznie mniej niż przy zastosowaniu starego wzoru, kiedy to otrzymaliśmy wartość wynoszącą 35 minut. Widać więc wyraźnie, że nie można obliczać czasu rozładowania baterii według starego wzoru, jeśli pojemność baterii została wyznaczona zgodnie z nowymi standardami. Całe to zagadnienie może wydawać się zbyt wydumane, ale jest naprawdę bardzo ważne, gdy w grę wchodzi obliczanie sprawności urządzeń zasilanych bateryjnie, na przykład samochodów z napędem elektrycznym.

Rysunek 2.12 przedstawia wykresy prognozowanych sprawności baterii z liczbami Peukerta wynoszącymi 1,1, 1,2 i 1,3. Krzywe zostały wykreślone na podstawie obliczeń przeprowadzonych przy użyciu zmodyfikowanego wzoru Peukerta. Pokazują one, jak zmniejsza się liczba amperogodzin każdej

2 AhM oznacza tu pojemność baterii wyznaczoną zgodnie z nowymi regułami (od angielskiego słowa *modern* — nowoczesny) — *przyp. tłum.*

z tych baterii wraz ze wzrostem pobieranego z niej prądu. Na przykład, jeśli z baterii o liczbie Peukerta wynoszącej 1,2 i pojemności (wyznaczonej w teście 20-godzinnym) na poziomie 100 Ah będzie pobierany prąd o natężeniu 30 A, to jej rzeczywista pojemność wyniesie tylko 70 Ah.



**Rysunek 2.12.** Rzeczywiste pojemności trzech baterii z liczbami Peukerta wynoszącymi 1,1, 1,2 i 1,3 przy rozładowywaniu ich prądem o natężeniu z zakresu od 5 A do 30 A; pojemność nominalna każdej baterii wynosi 100 Ah i została wyznaczona na podstawie testu 20-godzinnego (z C-rate równym 0,05)

Istnieje jeszcze jeden czynnik, który należy uwzględnić w tego typu obliczeniach, a mianowicie wiek baterii — wraz z pogarszaniem się właściwości chemicznych baterii rośnie jej liczba Peukerta.

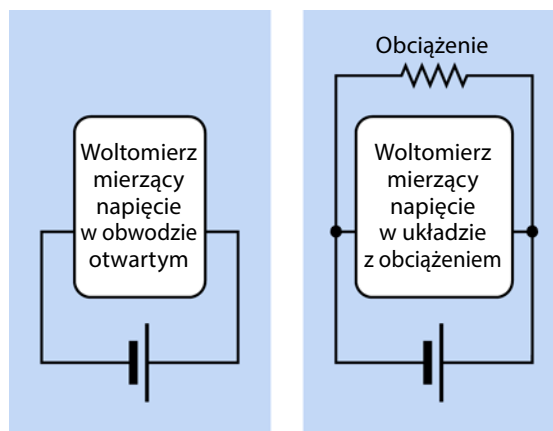
## Napięcie

Napięcie znamionowe baterii jest definiowane jako różnica potencjałów między biegunami przy pełnym naładowaniu i braku obciążenia — tzw. *siła elektromotoryczna* (oznaczana jako SEM lub z angielska *OCV* bądź  $V_{oc}$ ). Jako że rezystancja wewnętrzna woltomierza (lub miernika uniwersalnego przełączonego w tryb pomiaru napięcia stałego) jest bardzo duża, można przeprowadzić pomiar bezpośrednio

na zaciskach zewnętrznych baterii bez ryzyka uszkodzenia aparatu i bez wpływania na wartość mierzonego napięcia — wskazanie przyrządu będzie całkiem dobrze odzwierciedlać wartość rzeczywistą. W pełni naładowany akumulator samochodowy o napięciu nominalnym 12 V może mieć  $V_{oc}$  na poziomie 12,6 V, a nieużywana jeszcze bateria 9 V ma  $V_{oc}$  wynoszące około 9,5 V. Przy pomiarach tego napięcia za pomocą multimetru należy dokładnie sprawdzać, czy przyrząd ma włączony właściwy tryb — pomiar napięcia stałego. Czasami może się to wiązać z koniecznością przełożenia sondy pomiarowej do gniazda zarezerwowanego dla pomiarów napięcia, a nie natężenia prądu.

Napięcie generowane przez baterię mocno spada po podłączeniu obciążenia i potem nadal maleje w miarę rozładowywania się baterii. Dlatego w przypadku urządzeń wymagających stabilnego zasilania, takich jak cyfrowe układy scalone, konieczne jest zastosowanie **regulatora napięcia**.

W celu zmierzenia napięcia baterii należy podłączyć do niej woltomierz równolegle z obciążeniem, tak jak na rysunku 2.13. Taki pomiar umożliwia stwierdzenie, jakiej wielkości napięcie jest przyłożone do obciążenia, z tym większą dokładnością, im większa jest różnica między rezystancją wewnętrzną miernika a rezystancją obciążenia.



**Rysunek 2.13.** Przy mierzeniu napięcia za pomocą woltomierza (lub miernika uniwersalnego w trybie pomiaru napięcia) miernik można podłączyć bezpośrednio do zacisków baterii (miernik wskaże wtedy napięcie obwodu otwartego  $V_{oc}$ ) lub równolegle z jej obciążeniem (wtedy miernik wskaże rzeczywiste napięcie robocze); w przypadku użycia przyrządu uniwersalnego należy się upewnić, że ma on ustawiony tryb pomiaru napięcia

Na rysunku 2.14 pokazano tabelę z osiągnięciami pięciu popularnych baterii alkalicznych. Pojemność każdej z nich wyznaczono w typowych warunkach polegających na zastosowaniu obciążenia o stosunkowo dużej rezystancji przez długi czas (od 40 do 400 godzin w zależności od baterii). Test trwał za każdym razem do momentu, gdy napięcie rozładowywanej baterii osiągało poziom 0,8 V (w przypadku baterii 1,5 V) lub 4,8 V (w przypadku baterii 9 V). Wartości te uznano za akceptowalne w przypadku wyznaczania pojemności baterii przez jej producenta, ale w większości praktycznych zastosowań spadek napięcia zasilającego prawie o połowę jest nie do przyjęcia.

Typ baterii	Pojemność [Ah]	Napięcie końcowe	Obciążenie [ $\Omega$ ]	Prąd [mA]
AAA	1,15	0,8	75	20
AA	2,87	0,8	75	20
C	7,8	0,8	39	40
D	17	0,8	39	40
9V	0,57	4,8	620	14

**Rysunek 2.14.** Napięcie generowane przez baterię może znacznie zmaleć, ale tylko podczas wyznaczania jej znamionowej pojemności; podane tu wartości natężenia prądu są rezultatem obliczeń uśredniających i należy je traktować jako przybliżone (zaprezentowane tu dane zostały zaczerpnięte z materiałów informacyjnych firmy Panasonic)

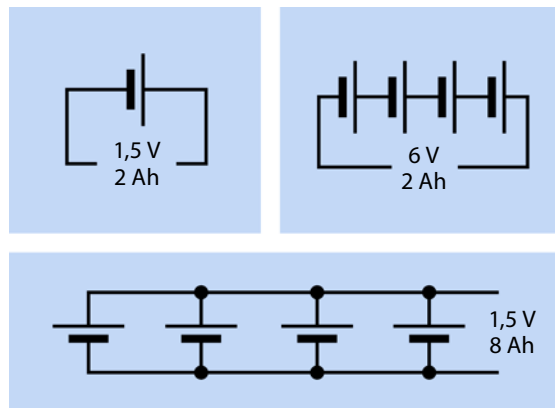
Jako ogólną zasadę oceniania przydatności baterii do konkretnego zastosowania należy przyjąć, że jej rzeczywista pojemność jest dwukrotnie mniejsza niż podana przez producenta wartość nominalna.

## Stosowanie

Przy wyborze baterii mającej zasilać konkretny obwód należy wziąć pod uwagę m.in. okres trwałości, typową i maksymalną wydajność prądową oraz masę. Pojemność energetyczną można traktować jedynie jako wartość przybliżoną i mającą charakter pomocniczy. W przypadku obwodów wymagających zasilania napięciem 5 V i pobierających prąd o natężeniu nieprzekraczającym 100 mA zazwyczaj stosuje się baterię 9 V lub sześć baterii 1,5 V połączonych szeregowo oraz **regulator napięcia**, na przykład LM7805. Trzeba przy

tym pamiętać, że działanie takiego regulatora wymaga energii, która częściowo zostanie rozproszona w formie ciepła. Minimalny spadek napięcia, jaki może zapewnić regulator, zależy od zastosowanego modelu.

Ogniwa, baterie i akumulatory można łączyć szeregowo lub równolegle. Przy połączeniu szeregowym napięcia się sumują, a pojemność energetyczna pozostaje na poziomie pojedynczego egzemplarza (przy założeniu, że wszystkie egzemplarze są jednakowe). Z kolei przy połączeniu równoległym napięcie wyjściowe pozostaje na poziomie pojedynczego egzemplarza (przy założeniu, że wszystkie egzemplarze są jednakowe), a pojemności energetyczne sumują się (patrz rysunek 2.15).



**Rysunek 2.15.** Teoretyczne wartości napięcia i pojemności czterech baterii (1,5 V i 2 Ah) połączonych szeregowo lub równolegle

Poza oczywistą mobilnością dużą zaletą baterii jest brak przepięć i szumów mogących zakłócać pracę zasilanych urządzeń. Konieczność wygładzania napięcia zasilającego może tu wynikać jedynie z nieregularnej pracy innych składników obwodu.

Silniki i inne elementy indukcyjne potrafią w fazie rozruchu pobrać prąd o natężeniu wielokrotnie większym niż ten, który pobierają podczas normalnej pracy. Bateria zasilająca obwód z takimi elementami powinna wytrzymać krótkotrwałe wzrosty obciążenia.

Niektóre linie lotnicze nie zezwalają na zabieranie do samolotu baterii litowo-jonowych o większych pojemnościach z powodu ich skłonności do samozapłonu. Jeśli pasażer musi

mieć przy sobie urządzenie bateryjne (na przykład przyrząd medyczny), powinien użyć raczej baterii NiMH.

## Możliwe błędy

### Zwarcie — przegrzanie i pożar

W stanie zwarcia bateria o dużej wydajności prądowej może ulec przegrzaniu, może się zapalić, a nawet wybuchnąć. Upuszczenie metalowego klucza na zaciski akumulatora samochodowego wywoła mocne iskrzenie, głośny trzask i nadtopienie metalu. Nawet alkaliczna bateria AA, jeśli połączy się jej bieguny, może się tak rozgrzać, że jej dotknięcie będzie niemożliwe. (Nigdy nie należy zwierać biegunów baterii wielokrotnego użytku, które ze względu na mniejszą rezystancję wewnętrzną umożliwiają przepływ prądu o większym natężeniu). Szczególnie niebezpieczne są baterie litowo-jonowe, które w stanie zwarcia mogą nawet wybuchnąć, i dlatego zawsze są wyposażone w ogranicznik prądu (pod żadnym pozorem nie należy tego ogranicznika demontować).

Jeśli akumulator jest używany jako proste źródło zasilania stołu warsztatowego, w obwodzie zasilającym powinien być zamontowany **bezpiecznik**. Zawsze w obwodzie zasilania urządzenia o stosunkowo dużym poborze prądu powinien być zamontowany bezpiecznik.

### Pogorszenie sprawności baterii z powodu jej niewłaściwego ładowania

Wiele typów baterii wielokrotnego użytku wymaga ściśle określonego napięcia ładowania i automatycznego zakończenia tego procesu we właściwym momencie. Nieprzebranie tych wymagań może prowadzić do nieodwracalnych zmian chemicznych skutkujących zmniejszeniem sprawności urządzenia. Ładowarka powinna być dostosowana do konkretnego typu baterii. Szczegółowe porównywanie baterii i ładowarek wykracza poza ramy tej *Encyklopedii*.

### Całkowite rozładowanie akumulatora kwasowo-ołowiowego

Całkowite lub prawie całkowite rozładowanie akumulatora kwasowo-ołowiowego znacząco skraca jego żywotność (chyba że jest do tego konstrukcyjnie przystosowany, ale

nawet wtedy nie zaleca się przekraczać progu 80% rozładowania).

### Zbyt duże zapotrzebowanie prądowe

Reakcje chemiczne w baterii zachodzą zdecydowanie wolniej w niskich temperaturach. Dlatego zimna bateria nie jest w stanie dostarczyć tak dużego prądu jak bateria ciepła. Akumulator samochodowy jest zimą mniej sprawny niż latem. Na domiar złego olej silnikowy w niskiej temperaturze zwiększa swoją lepkość i rozrusznik potrzebuje większego prądu, żeby pokonać zwiększone przez to opory ruchu smarowanych części silnika. Połączenie tych dwóch czynników sprawia, że po mroźnej nocy wiele aut ma problem z rozruchem silnika.

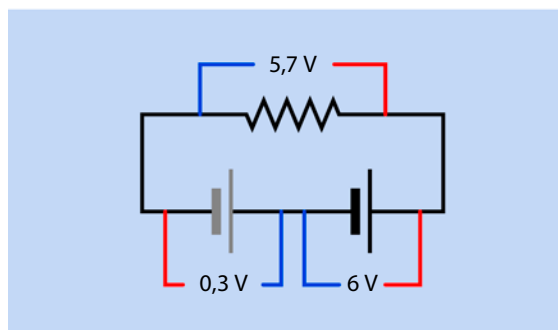
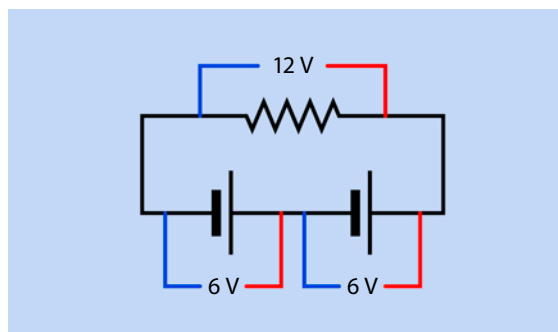
### Niewłaściwa polaryzacja

Pomylenie biegunów przy podłączaniu akumulatora do ładowarki może zaowocować trwałym uszkodzeniem jednego z tych urządzeń. Odpowiednio dobrany **bezpiecznik** (*przerwywacz obwodu*) zainstalowany w ładowarce może uratować sytuację, ale nigdy nie ma stuprocentowej gwarancji.

Jeśli dwa akumulatory zostaną ze sobą połączone bez zachowania zgodności biegunów (co może się zdarzyć podczas nieostrożnej próby uruchomienia samochodu za pomocą kabli rozruchowych), może dojść do eksplozji. Podczas przyłączania kabli rozruchowych nie należy też przechylać akumulatora. Na wszelki wypadek warto na ten czas założyć okulary ochronne.

### Ładowanie odwrotne

Zjawisko *ładowania odwrotnego* może zaistnieć w obwodzie z kilkoma bateriami (właściwie połączonymi w szereg), z których jedna jest całkiem rozładowana, a pozostałe wciąż dostarczają prąd do obwodu. W górnym schemacie z rysunku 2.16 dwie naładowane baterie 6-woltowe zasilają obciążenie rezystancyjne. Bateria z lewej podnosi potencjał o 6 V, a bateria z prawej dodaje do tego kolejne 6 V i obie w sumie utrzymują na obciążeniu napięcie o wartości 12 V. Czerwone i niebieskie linie symbolizują sondy miernicze woltomierzy, a liczby odpowiadają wskazaniom tych przyrządów.



**Rysunek 2.16.** Gdy jedna z tych dwóch baterii ulega całkowitemu rozładowaniu, staje się obciążeniem, a nie źródłem zasilania, i podlega procesowi ładowania odwrotnego prowadzącego do nieodwracalnych uszkodzeń

Drugi schemat przedstawia ten sam obwód, ale z wyczerpaną baterią po lewej stronie, co ma symbolizować jej szary kolor. Bateria po prawej nadal utrzymuje swoje napięcie wyjściowe na poziomie 6 V. Jeśli rezystancja wewnętrzna baterii wyczerpanej wynosi około  $1 \Omega$ , a obciążenie ma rezystancję  $20 \Omega$ , to napięcie na martwej baterii wyniesie 0,3 V i będzie skierowane odwrotnie niż wtedy, gdy bateria była naładowana. Dojdzie więc do ładowania odwrotnego tej baterii, co może skończyć się jej uszkodzeniem. Aby tego uniknąć, nie należy dopuszczać do całkowitego rozładowania którejkolwiek z połączonych w ten sposób baterii.

## Zasiarczenie

Akumulator kwasowo-ołowiowy pozostawiony na dłuższy czas w stanie kompletnego lub prawie kompletnego rozładowania ulega tzw. zasiarczeniu, które polega na pokrywaniu się elektrod kryształkami siarczanu ołowiu. Warstwa kryształków utrudnia zachodzenie reakcji chemicznych

odpowiedzialnych za ponowne naładowanie akumulatora. Dlatego nigdy nie należy przechowywać akumulatorów kwasowo-ołowiowych bez uprzedniego naładowania ich. Niektórzy twierdzą, że nawet niewielki prąd ładujący może zapobiec procesowi zasiarczenia, i dlatego zalecają stosowanie małych paneli fotowoltaicznych wszędzie tam, gdzie akumulatory są rzadko używane — na przykład na żaglówkach napędzanych silnikiem tylko wtedy, gdy wiatr jest zbyt słaby.

## Zbyt duży prąd między bateriami połączonymi równolegle

Jeśli dwie baterie są prawidłowo połączone równolegle, ale jedna z nich jest rozładowana, a druga nie, ta druga zaczyna pełnić funkcję ładowarki. Wielkość prądu ładującego jest ograniczana tylko rezystancjami wewnętrznymi obu baterii i łączących je przewodów. Przy zbyt dużym natężeniu tego prądu może dojść do przegrzania jednej lub obu baterii i w rezultacie do ich uszkodzenia. Ryzyko jest tym większe, im większą pojemność mają łączone baterie. W takich sytuacjach zawsze warto zastosować wysokoamperowy bezpiecznik.

# Zworka

Nie należy mylić zworki z *przewodem połączeniowym*, którego nie traktujemy jako elementu elektronicznego.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **przełącznik** (rozdział 6.).

## Funkcja

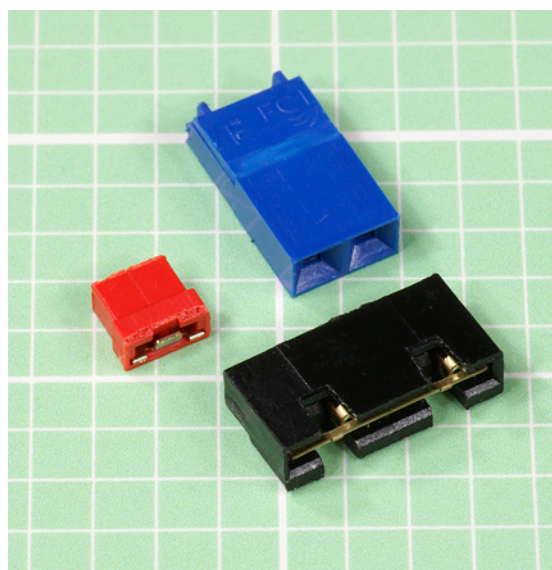
Zworka jest tanią wersją **przełącznika** możliwą do zastosowania w miejscu, w którym łączenie lub rozłączanie elementów obwodu wykonuje się niezwykle rzadko. Zazwyczaj służy do ustawiania parametrów działania urządzenia na etapie jego produkcji z możliwością późniejszej ich modyfikacji. *Przełącznik DIP* pełni tę samą funkcję, ale jest wygodniejszy (patrz rozdział 6.).

Zworka nie ma ogólnie przyjętego symbolu graficznego.

## Działanie

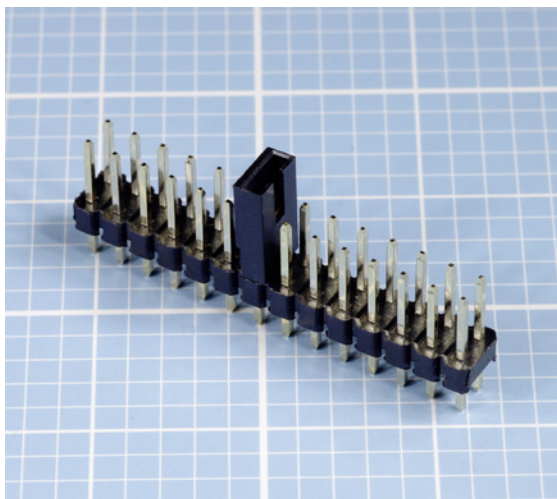
Zworka jest bardzo małą plastikową kostką z dwoma metalowymi gniazdami (a niekiedy większą ich liczbą) odległymi od siebie o 2,54 mm lub 2 mm. Gniazda są elektrycznie połączone, więc gdy zworka jest nałożona na piny zamontowane w płytce obwodu drukowanego, piny te są ze sobą zwarte. Piny (kołki) mają zazwyczaj przekrój kwadratowy o boku 0,64 mm i często są częścią *listwy kołkowej* wlutowanej w płytkę. W katalogach części elektronicznych zworka bywa umieszczana w dziale obejmującym wszystkie rodzaje złączy.

Na rysunku 3.1 są pokazane trzy różne zworki. Niebieska zawiera dwa gniazda z odstępem 2,54 mm i jest na tyle głęboka, że może całkowicie osłonić zwierane piny. Czerwona zawiera dwa gniazda z odstępem 2 mm i umożliwia dostęp do końcówek pinów. Czarna zawiera cztery gniazda z odstępem 2,54 mm.



**Rysunek 3.1.** Trzy różne zworki zawierające dwa gniazda z odstępem 2 mm (po lewej), dwa gniazda z odstępem 2,54 mm (u góry) i cztery gniazda w odstępach 2,54 mm

Zestaw pinów, na które nakłada się zworki, nosi nazwę *listwy kołkowej* (można też spotkać nazwy *listwa pinowa* lub *szpilkowa*). Listwy te są dostępne jako jednorzędowe i dwurzędowe. Niektóre można przycinać na żądaną długość (liczbę pinów). Na rysunku 3.2 widoczna jest dwurzędowa listwa zawierająca 28 pinów z nałożoną mniej więcej na środku zworką.



**Rysunek 3.2.** Para środkowych pinów tej 28-kołkowej listwy jest połączona zworką

## Rodzaje

**Zestaw zworek** może zawierać nie tylko rozmaite zworki, ale także listwy kołkowe pasujące do tych zworek. Przed zakupem warto sprawdzić, co dokładnie taki zestaw zawiera.

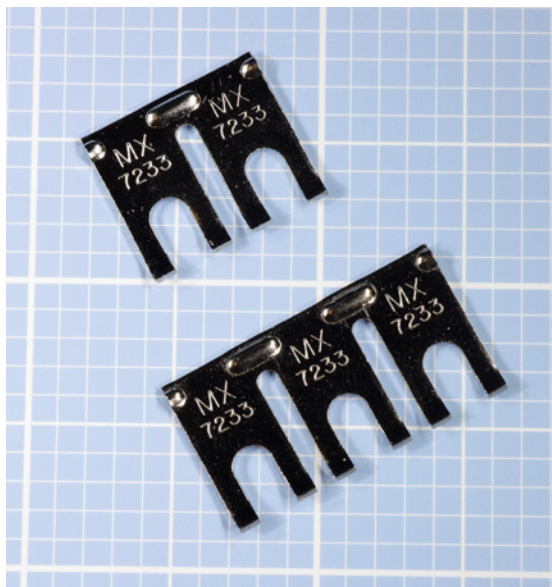
Najpopularniejsze są zworki z dwoma gniazdami, ale dostępne są nawet 12-gniazdowe w wersjach 1- i 2-rzędowych. Listwy złączy żeńskich mogą służyć jako zworki specjalnego przeznaczenia, a ich zaletą jest to, że można je dowolnie przycinać. Aby taka listwa mogła pełnić funkcję zworki, należy oczywiście odpowiednie gniazda połączyć za pomocą krótkich odcinków przewodu.

Niektóre zworki mają mały plastikowy uchwyt długości około 1 cm, co ułatwia ich chwytanie palcami przy zakładaniu i zdejmowaniu. Jest to bardzo wygodne, jeśli tylko jest dostatecznie dużo miejsca wokół zworki.

Gniazda wewnętrzne w zworkach są na ogół wykonywane z fosforobrazu, stopów niklowo-miedziowych, stopów cynowych lub mosiądzu. Często są pokrywane złotem lub po prostu cyną.

Niekiedy zworka może mieć formę blaszki z wycięciami w kształcie litery U pasującymi do zacisków śrubowych. Dwie tego typu zworki są pokazane na rysunku 3.3. Nie należy ich

mylić z wysokoprądowymi bezpiecznikami, które wyglądają dość podobnie.



**Rysunek 3.3.** Te zworki umożliwiają połączenie dwóch lub trzech zacisków śrubowych

## Wartości

Odległości pomiędzy gniazdami zworki są określane jako *raster* i najczęściej wynoszą 2,54 mm lub 2 mm.

Typową wartością dopuszczalną natężenia prądu dla zworki z rastrem 2,54 mm jest 2 A lub 2,5 A przy 250 V.

## Stosowanie

Zworki mogą służyć do włączania funkcji typu „ustaw i zapomnij”. Przykładem może być przystosowanie urządzenia do zasilania z sieci o napięciu 115 V lub 230 V. W latach 80. ubiegłego wieku nabywcy nowych komputerów musieli sami przestawiać niektóre zworki, aby dostosować sprzęt do swoich potrzeb, ale obecnie większość ustawień jest wykonywana programowo.

## Możliwe błędy

---

Zworki lubią wypadać, łatwo się gubią i nie zawsze są prawidłowo zakładane. Przy kupowaniu warto pomyśleć o sztukach zapasowych w związku z ich podatnością na uszkodzenia i łatwością gubienia się.

Każde miejsce wymagające zastosowania zworki powinno być wyraźnie opisane, aby wszystkie możliwe ustawienia były jasno zdefiniowane.

Tanie, niskiej jakości zworki mogą ulegać uszkodzeniom mechanicznym podczas ich zdejmowania z pinów. Zdarza się, że plastikowa kostka pęka i odpada, a na pinach wystających z płytki pozostają gołe gniazda. Dlatego zawsze warto mieć pewien zapas nowych zworek.

Utlenianie się powierzchni stykowych, które nie zostały pozłoczone lub posrebrzone, może być przyczyną wzrostu rezystancji połączenia i (lub) obniżenia jego niezawodności.



# Bezpiecznik

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- brak.

## Funkcja

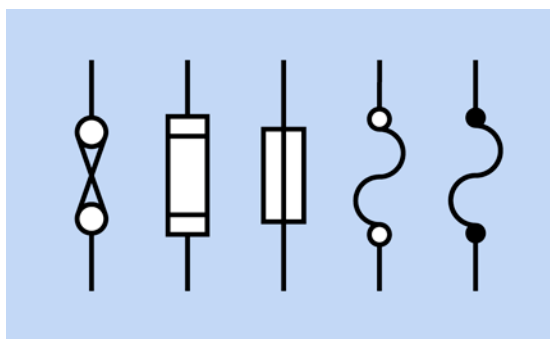
Bezpiecznik chroni obwód lub urządzenie przed prądem o zbyt dużym natężeniu, sprawiającym, że metalowy element wewnątrz bezpiecznika ulega stopieniu, a to oznacza przerwanie obwodu i brak przepływu prądu. Jeśli nie jest to *bezpiecznik resetowalny* (opis znajduje się w punkcie „Bezpieczniki resetowalne”), to egzemplarz, który spełnił swoją funkcję, należy wyrzucić, a w jego miejsce zamontować nowy.

Gdy duży prąd przetapia bezpiecznik, zwykle się mówi, że bezpiecznik uległ *przepaleniu*, że jest *spalony*. (W odniesieniu do bezpieczników resetowalnych mówi się raczej o *wybicciu*).

Bezpiecznik może działać zarówno w obwodzie prądu stałego, jak i zmiennego. Może być zaprojektowany na dowolną wartość natężenia prądu. W budynkach mieszkalnych i handlowo-usługowych popularne stały się *wyłączniki nadprądowe*, ale duże wkładki topikowe są nadal używane do zabezpieczania całych systemów energetycznych przed skutkami zwarcia lub przetężeń wywołanych uderzeniem pioruna w linię napowietrzną.

Większość urządzeń elektronicznych ma **zasilacze** wyposażone w stosowne bezpieczniki.

Schematyczne symbole bezpiecznika są pokazane na rysunku 4.1. Najczęściej używane są dwa ostatnie, licząc od lewej strony. Środkowy jest zatwierdzony przez takie instytucje, jak ANSI, IEC i IEEE, ale rzadko się go widuje. Drugi od lewej można często spotkać w planach architektonicznych, a pierwszy, kiedyś bardzo popularny, praktycznie wyszedł z użycia.



**Rysunek 4.1.** Różne symbole bezpiecznika; objaśnienie znajduje się w tekście

## Działanie

*Elementem* czynnym w bezpieczniku jest zazwyczaj metalowy drucik lub pasek (*topik*) przymocowany do dwóch końcówek. Wszystko to jest zamknięte w szklanej, ceramicznej lub metalowej obudowie w kształcie walca z przewodzącymi stykami na obu końcach. (Zdarzają się jeszcze bezpieczniki starego typu o dużym amperażu w obudowie papierowej bądź tekturowej). Tradycyjna konstrukcja szklana pozwala wizualnie ocenić stan topika — czy jest cały, czy przepalony.

Bezpiecznik reaguje wyłącznie na wzrost natężenia prądu, a nie napięcia. Przy wyborze bezpiecznika dla danego urządzenia dobrze jest przyjąć zasadę, według której powinien on wytrzymać maksymalne natężenie przy włączonych wszystkich podzespołach powiększone o mniej więcej 50%. Nie bez znaczenia jest też spodziewany czas trwania ewentualnych przetężeń. Jeśli przez  $I$  oznaczymy natężenie prądu w amperach, a przez  $t$  — czas trwania przetężenia, to

wrażliwość bezpiecznika na przetężenia (oznaczaną zwykle jako  $I_{2t}$ ) będziemy mogli obliczyć zgodnie z następującym wzorem:

$$I_{2t} = I^2 \cdot t$$

Niektóre elementy półprzewodnikowe też mają określoną wartość  $I_{2t}$  i powinny być chronione przez podobne im bezpieczniki.

Każdy bezpiecznik stawia przepływającemu prądowi pewien opór. Gdyby tak nie było, prąd nie byłby w stanie wygenerować energii cieplnej potrzebnej do stopienia elementu czynnego. Producenci bezpieczników podają spadki potencjału, jakie rezystancje wewnętrzne tych urządzeń mogą wnosić do obwodów, w których się znajdują.

## Wartości

Wartość *prądu znamionowego* bezpiecznika jest zazwyczaj wytłoczona lub nadrukowana na obudowie i oznacza maksymalne natężenie prądu, jaki może przez dłuższy czas płynąć przez bezpiecznik w temperaturze otoczenia określonej przez producenta (zwykle 25°C). Otoczenie oznacza tu niewielką przestrzeń bezpośrednio wokół bezpiecznika, a nie jakiś szerszy obszar, w którym znajduje się całe urządzenie z zainstalowanym bezpiecznikiem. Chodzi o to, że temperatura wewnątrz obudowy działającego urządzenia jest na ogół znacząco wyższa niż na zewnątrz.

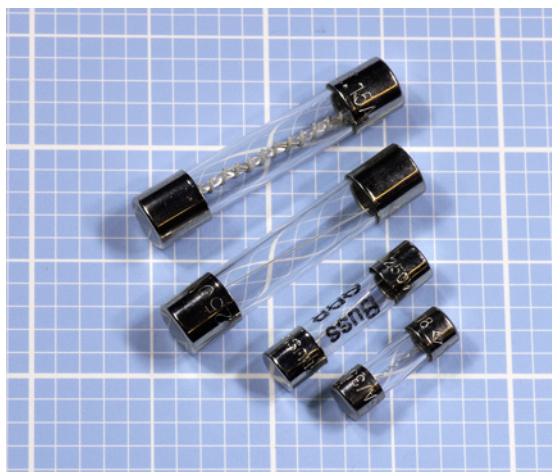
Teoretycznie bezpiecznik powinien działać pewnie i nieskończenie długo przy prądzie znamionowym, a przepalenie powinno nastąpić po przekroczeniu tej wartości o 20%. W praktyce, zgodnie z zaleceniami większości producentów, ciągłe obciążenie bezpiecznika nie powinno przekraczać 75% wartości nominalnej przy temperaturze 25°C.

*Napięcie znamionowe* wyznacza górny pułap napięcia, przy którym przepalenie bezpiecznika z powodu przeciążenia będzie przebiegało w sposób przewidywalny. Niekiedy mówi się w tym kontekście o *zdolności wyłączenia*. Przy napięciu wyższym od znamionowego po przepaleniu elementu czynnego pozostałe komponenty bezpiecznika mogą uformować łuk elektryczny, co będzie oznaczało podtrzymanie przepływu prądu.

Bezpiecznik zawsze może być użyty przy napięciu niższym od znamionowego. Jeśli jego napięcie znamionowe wynosi

250 V, to równie skutecznie zabezpieczy on urządzenie działające przy napięciu 5 V.

Na rysunku 4.2 są pokazane cztery bezpieczniki szklane o różnych wartościach prądu znamionowego. Pierwszy od góry to bezpiecznik zwłoczny o prądzie znamionowym 15 A. Jego element czynny jest w stanie zakumulować dużo energii cieplnej, zanim ulegnie przetopieniu. Poniżej jest bezpiecznik 0,5 A z proporcjonalnie cieńszym elementem czynnym. Pozostałe dwa bezpieczniki mają prądy znamionowe o wartości 5 A. Dwa środkowe mają napięcie znamionowe na poziomie 250 V, pierwszy od góry ma znacznie niższe, bo wynoszące zaledwie 32 V, a najmniejszy z nich ma na poziomie 350 V. Jak z tego wynika, na podstawie wymiarów bezpiecznika nie da się nic powiedzieć o jego parametrach elektrycznych.



**Rysunek 4.2.** Cztery bezpieczniki szklane; szczegółowy opis znajduje się w tekście

## Rodzaje

Dawne bezpieczniki stosowane w instalacjach domowych miały postać drutu chromonikielinowego nawiniętego na korpus porcelanowy. W 1890 roku Edison wynalazł *bezpiecznik wkręcany*, w którym wkładka topikowa była umieszczana w porcelanowej główce z metalowym gwintem pasującym do opraw żarówkowych. Konstrukcja ta była stosowana w niektórych zurbanizowanych obszarach amerykańskich przez ponad 70 lat i nadal gdzieś tam jeszcze jest produkowana.

## Małe wkładki topikowe

Małe wkładki topikowe stosowane w sprzęcie elektronicznym — takie jak te z rysunku 4.2 — występują w rozmiarach podanych w tabeli pokazanej na rysunku 4.3<sup>1</sup>. Każda z nich jest dostępna w wersji z przewodami po obu stronach do montażu przewlekanego, więc można je montować bezpośrednio na płytkach drukowanych.

Typ bezpiecznika	Średnica (imperialne)	Średnica (metryczne)	Długość (imperialne)	Długość (metryczne)
1AG	1/4"	6 mm	5,8"	16 mm
2AG	0,177"	4,5 mm	0,588"	15 mm
3AG	1/4"	6 mm	1-1/2"	32 mm
4AG	9/32"	7 mm	1-1/4"	32 mm
5AG	13/32"	10 mm	1-1/2"	38 mm
7AG	1/4"	6 mm	7/8"	22 mm
8AG	1/4"	6 mm	1"	25 mm

**Rysunek 4.3.** Przybliżone wymiary powszechnie stosowanych bezpieczników szklanych i ceramicznych pokazano tutaj z kodami używanymi często w celach identyfikacyjnych

Bezpieczniki mogą działać szybko, średnio szybko lub powoli, przy czym te ostatnie są nazywane *zwłocznymi*. Niektórzy producenci oferują też bezpieczniki superszybkie. Niekiedy można spotkać określenie bezpieczników zwłocznych *Slo-Blo*, ale tak naprawdę jest to nazwa zastrzeżona przez firmę Littelfuse. Jak dotąd nie opracowano jeszcze żadnych standardów jednoznacznie klasyfikujących bezpieczniki pod względem szybkości działania.

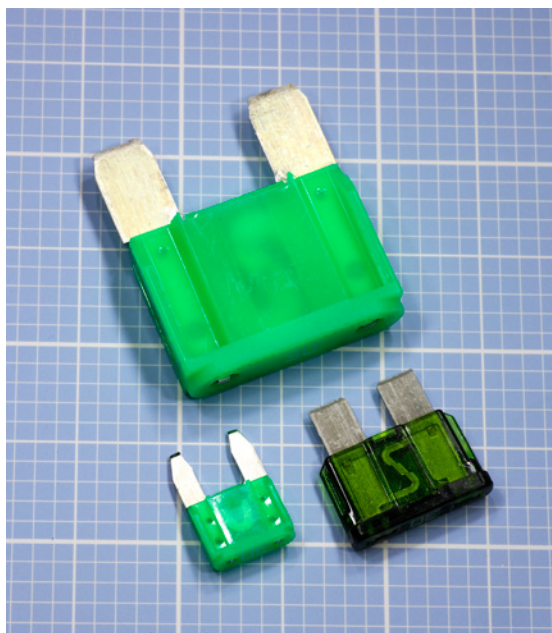
Niektóre szklane wkładki topikowe mają swoje odpowiedniki ceramiczne. Jeśli w obwodzie może przypadkowo pojawić się prąd o ekstremalnie dużym natężeniu (na przykład w mierniku uniwersalnym w trybie amperomierza podłączonym przez nieuwagę bezpośrednio do mocnego akumulatora), to wskazane jest zastosowanie tam bezpiecznika ceramicznego, który zawiera specjalny wypełniacz utrudniający powstanie łuku elektrycznego. Poza tym w przypadku

mechanicznego uszkodzenia (rozerwania) bezpiecznika przez zbyt duży prąd odłamki ceramiczne będą mniej niebezpieczne od szklanych.

## Bezpieczniki samochodowe

Bezpieczniki samochodowe są łatwo rozpoznawalne ze względu na płaskie końcówki przystosowane do wciskania w wąskie gniazda, dzięki czemu taki bezpiecznik nie wypada ani nie obłuzowuje się pod wpływem wibracji i zmian temperatury. Bezpieczniki samochodowe mają różne rozmiary, ale za to ujednocloną kolorystykę pozwalającą szybko określić prąd znamionowy.

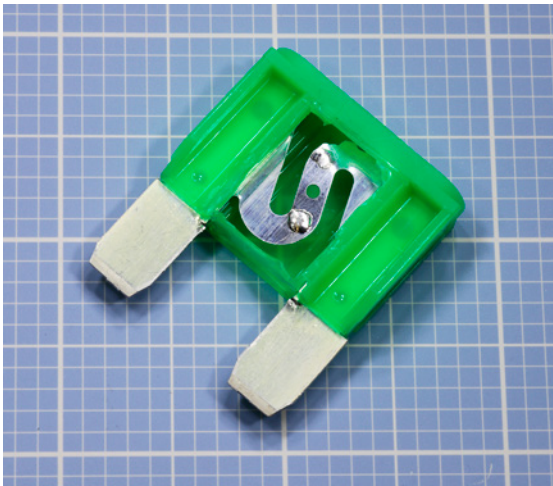
Kilka takich bezpieczników jest pokazanych na rysunku 4.4. Pierwszy od góry ma rozmiar określany jako maxi, a ten u dołu po lewej to bezpiecznik typu mini. I tu też wymiary nie mają żadnego przełożenia na parametry elektryczne — wszystkie trzy egzemplarze pokazane na rysunku mają prąd znamionowy 30 A i napięcie 32 V.



**Rysunek 4.4.** Trzy bezpieczniki samochodowe; wszystkie mają jednakowe parametry elektryczne: 30 A i 32 V

Na rysunku 4.5 widać największy z tych bezpieczników z usuniętą połową obudowy, dzięki czemu można zobaczyć, jak wygląda jego element czynny.

<sup>1</sup> W tabeli pominięto popularny rozmiar 20 mm × 5 mm oznaczany na rynku anglojęzycznym kodem M205 — *przyp. tłum.*



**Rysunek 4.5.** Największy bezpiecznik z poprzedniego rysunku ze ściętą obudową i odsłoniętym elementem czynnym

W samochodzie bezpieczniki są fabrycznie montowane w zestawach i zabezpieczają poszczególne elementy wyposażenia elektrycznego, a jeśli użytkownik dodaje później kolejny element tego wyposażenia, może go podłączyć za pośrednictwem bezpiecznika umieszczonego w specjalnej oprawce zaopatrzonej w dwa przewody przyłączeniowe (patrz rysunek 4.6). Podobne oprawki są produkowane również dla innych typów bezpieczników.

## Bezpieczniki taśmowe

Wysokoamperowe bezpieczniki samochodowe mogą mieć postać blaszek montowanych pomiędzy zaciskami śrubowymi. Nazywane są *bezpiecznikami taśmowymi* lub *blaszkowymi*. Jako że niektóre **zworki** są do nich bardzo podobne, należy je przechowywać w odrębnych i odpowiednio oznakowanych pojemnikach. Przykładowy egzemplarz jest pokazany na rysunku 4.7.

## Bezpieczniki do montażu przewlekanego

Małe bezpieczniki z wystającymi przewodami i przez to wyglądające, jakby miały być przeznaczone do montażu przewlekanego, w rzeczywistości są montowane w odpowiednich gniazdach, dzięki czemu łatwo się je wymienia. W katalogach części elektronicznych występują najczęściej jako „bezpieczniki miniaturowe”. Można je znaleźć w takich

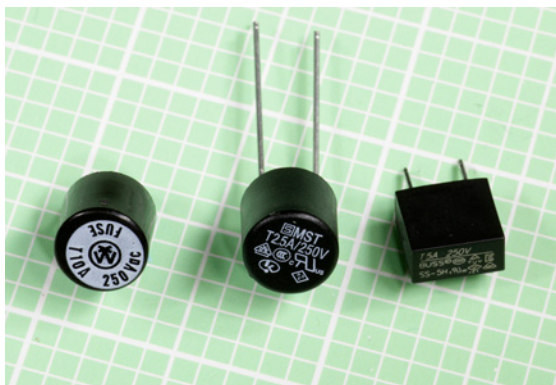


**Rysunek 4.6.** Dwa typowe bezpieczniki samochodowe i oprawka przelotowa umożliwiająca bezpieczne zasilanie dodatkowych akcesoriów elektrycznych; po zamontowaniu bezpiecznika oprawka jest zamykana widoczną z prawej strony osłonką



**Rysunek 4.7.** Takie bezpieczniki taśmowe są stosowane w samochodach z silnikami wysokoprężnymi. Wartości znamionowe widocznego tu egzemplarza wynoszą 100 A i 36 V

urządzeniach, jak laptopy i ich zasilacze, telewizory, ładowarki i klimatyzatory. Trzy przykładowe egzemplarze są pokazane na rysunku 4.8. Wszystkie są typu zwłocznego.



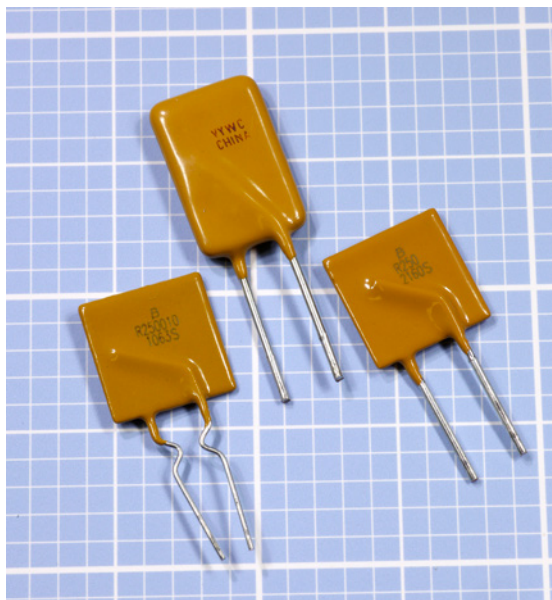
**Rysunek 4.8.** Trzy miniaturowe bezpieczniki z drutowymi wyprowadzeniami; od lewej do prawej: 10 A/250 V, 2,5A/250 V i 5 A/250 V

## Bezpieczniki resetowalne

*Bezpieczniki resetowalne*, których prawidłowa nazwa brzmi *polimerowe o dodatnim współczynniku temperaturowym* (w skrócie *PTC* lub *PPTC*), są półprzewodnikowymi elementami o rezystancji gwałtownie rosnącej w sytuacji nadmiernej przeciążenia i stopniowo powracającej do standardowej wartości, gdy prąd przestaje płynąć. Są swoistymi **termistorami** o nieliniowej charakterystyce. Trzy przykładowe egzemplarze przystosowane do montażu przewlekanego są pokazane na rysunku 4.9. Wkładki topikowe o różnych rozmiarach mogą mieć takie same wartości nominalne prądu i napięcia, a z kolei bezpieczniki resetowalne o różnych wartościach nominalnych mogą mieć takie same rozmiary. Pierwszy od lewej ma 40 A i 30 V, a ten po prawej — zaledwie 2,5 A i 30 V. (Warto zwrócić uwagę na to, że kody nadrukowane na tych bezpiecznikach nie pokrywają się z ich numerami katalogowymi). Bezpiecznik pokazany tu jako pierwszy od góry ma prąd znamionowy 1 A i napięcie 135 V.

Gdy natężenie prądu przepływającego przez taki bezpiecznik wzrasta ponad wartość nominalną, jego rezystancja wewnętrzna gwałtownie wzrasta od zaledwie kilku omów do setek kiloomów. Nazywamy to *wyzwalaniem* bezpiecznika. Reakcja na przeciążenie nie jest tu błyskawiczna, ale jest porównywalna z reakcją topikowego bezpiecznika zwłocznego.

Bezpiecznik resetowalny jest zbudowany z polimeru, w którego krystalicznej strukturze znajdują się cząsteczki grafitu odpowiedzialne za przewodzenie prądu. Gdy przepływający



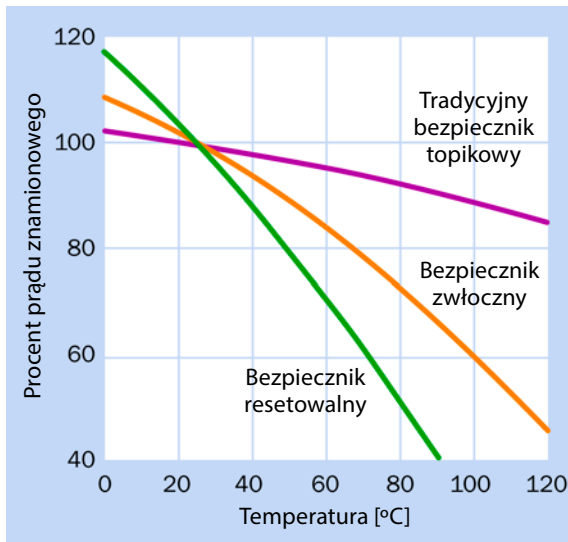
**Rysunek 4.9.** Przykłady bezpieczników resetowalnych przystosowanych do montażu przewlekanego; szczegółowe dane są podane w tekście

prąd znacząco zwiększy temperaturę polimeru, ten przechodzi w stan amorficzny, w którym cząsteczki grafitu są skutecznie separowane od siebie, a to oznacza przerywanie ścieżek przepływu prądu. Niewielki prąd wciąż jednak przepływa i podtrzymuje stan amorficzny polimeru aż do momentu wyłączenia zasilania. W miarę ochładzania się bezpiecznika polimer stopniowo się krystalizuje i odzyskuje zdolność przewodzenia, z tym że na odzyskanie pełnej sprawności potrzebuje co najmniej godzinę.

Maksymalny prąd, jaki może swobodnie przepływać przez bezpiecznik resetowalny, nosi nazwę *prądu podtrzymania*, a prąd, przy którym następuje wyzwolenie bezpiecznika, jest nazywany *prądem wyzwala*nia. Obecnie produkowane są bezpieczniki z prądem wyzwalania w zakresie od 20 mA do 100 A. Bezpieczniki konwencjonalne mają zakres napięć dopuszczalnych sięgający 600 V, a resetowalne rzadko przekraczają 100 V.

Zwykle bezpieczniki topikowe w niewielkim stopniu zmieniają swoje parametry elektryczne w zależności od temperatury, natomiast resetowalne mogą zmniejszyć swój prąd znamionowy do 75% wartości nominalnej, jeśli temperatura

otoczenia wzrośnie do 50°C, a przy 80°C spadek ten może osiągnąć nawet 50%. Innymi słowy, bezpiecznik o prądzie znamionowym 4 A w temperaturze 25°C może tolerować prąd o natężeniu maksymalnie 3 A, jeśli temperatura wzrośnie dwukrotnie (patrz rysunek 4.10).



**Rysunek 4.10.** Te trzy krzywe w sposób przybliżony ilustrują wrażliwość różnych typów bezpieczników stosowanych w sprzęcie elektronicznym; oś pionowa reprezentuje orientacyjną wartość prądu wyzwalającego

Tradycyjne bezpieczniki zwłoczne są wrażliwe na temperaturę otoczenia, ale w mniejszym stopniu niż bezpieczniki resetowalne.

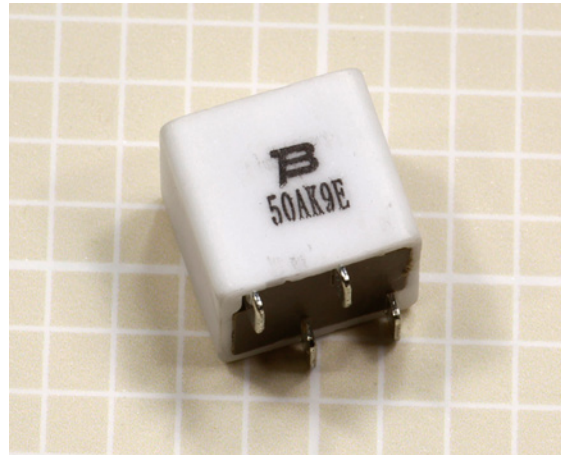
Bezpieczniki resetowalne są stosowane w zasilaczach komputerowych, ładowarkach USB i kolumnach głośnikowych, gdzie zabezpieczają cewki głośników przed przeciążeniem. Powinno się ich używać wszędzie tam, gdzie przekroczenie dopuszczalnego natężenia prądu może występować stosunkowo często, albo tam, gdzie użytkownik słabiej przygotowany technicznie mógłby mieć problem z wymianą wkładki topikowej lub włączeniem bezpiecznika automatycznego.

Różni producenci nadają swym produktom różne nazwy: PolySwitch, OptiReset, Everfuse, Polyfuse czy Multifuse. Jeśli chodzi o warianty montażowe, to dostępne są zarówno SMT (*montaż powierzchniowy*), jak i THT (*montaż przewlekany*), ale nigdy w formie wymiennych wkładek.

## Bezpieczniki montowane powierzchniowo

Wymiana bezpiecznika zamontowanego powierzchniowo może być bardzo trudna lub wręcz niemożliwa, więc najczęściej są to bezpieczniki resetowalne.

Przykład takiego bezpiecznika w formie kostki o boku ok. 8 mm jest pokazany na rysunku 4.11. Można go stosować w układach o napięciu do 230 V, a jego pozostałe parametry elektryczne to: rezystancja wewnętrzna 50 Ω, prąd podtrzymania 0,09 A i prąd wyzwalania 9,19 A.



**Rysunek 4.11.** Bezpiecznik resetowalny przystosowany do montażu powierzchniowego; szczegóły techniczne są podane w tekście

## Stosowanie

Każdy sprzęt, który można podłączyć do gniazdka instalacji energetycznej, powinien zawierać bezpiecznik chroniący nie tylko ów sprzęt, ale również użytkownika, gdyż ten może przecież zdjąć obudowę i zacząć manipulować w środku przy użyciu śrubokręta.

Urządzenia z silnikami, pompami i innymi podzespołami stanowiącymi obciążenie o charakterze indukcyjnym powinny być wyposażone w bezpieczniki zwłoczne, ponieważ w chwili rozruchu mogą pobierać prąd o natężeniu znacznie przekraczającym wartość nominalną bezpiecznika. Bezpiecznik zwłoczny wytrzyma przeciążenie trwające kilka sekund, a inne od razu zadziałają i urządzenie w ogóle się nie uruchomi.

Bezpieczniki szybkie należy stosować wszędzie tam, gdzie trzeba chronić elementy półprzewodnikowe, które nie są w stanie wytrzymać nawet krótkotrwałych przeciążeń.

Każde urządzenie z zasilaniem bateryjnym powinno mieć w obwodzie zasilania zainstalowany bezpiecznik, ponieważ reakcja **baterii** na zbyt duże obciążenie może być trudna do przewidzenia i niebezpieczna zarówno dla samego urządzenia, jak i jego użytkownika. Zestawy baterii (akumulatorów) połączonych równolegle powinny być zabezpieczone przed możliwością rozładowywania jednych baterii przez drugie. W zestawach akumulatorów kwasowo-ołowiowych stosowanych w instalacjach fotowoltaicznych jako rezerwuary energii popularne stały się bezpieczniki klasy J o prądzie znamionowym z zakresu od 125 A do 450 A. Mają one grube mosiężne płaskowniki po obu stronach, dzięki czemu mogą być przykręcane lub po prostu wciskane w odpowiednie [gniazda bezpiecznikowe](#).

Wkładki topikowe o średnicy do 6,3 mm i niemające przymocowanych drutowych końcówek można montować w różnego rodzaju gniazdach bezpiecznikowych:

**Gniazdo tablicowe** jest chyba najbardziej rozpowszechnione i składa się z plastikowej rurki ze sprężynującym stykiem na dnie oraz plastikowego kapturka z drugim stykiem w środku. Kapturek jest nakręcany na rurkę bądź tylko nakładany i lekko przekręcany. W komplecie jest również nakrętka, za pomocą której można przytwierdzić gniazdo do tablicy po włożeniu go do wywierconego w tym celu otworu. Wkładkę topikową należy włożyć do rurki, a potem nakręcić lub nałożyć kapturek. Tego typu gniazda są dostępne w pełnym wymiarze lub w formie skróconej, jako niskoprofilowe. Takie właśnie niskoprofilowe gniazdo tablicowe jest pokazane na rysunku 4.12. Po prawej stronie widać to gniazdo w pełni złożone, a obok znajdują się poszczególne elementy składowe.

**Gniazdo do montażu w płycie drukowanej** wygląda w zasadzie tak samo jak gniazdo tablicowe, ale ma zamontowane dwa kołki umożliwiające montaż przewlekany.

**Uchwyt bezpiecznika** jest małą plastikową kostką z dwoma zaciskami na górnej powierzchni, w których można zamontować wkładkę topikową.

**Zacisk bezpiecznika** może być kupowany i montowany samodzielnie, ale do zamocowania wkładki potrzebne są zawsze dwie sztuki.



**Rysunek 4.12.** Niskoprofilowe gniazdo tablicowe rozłożone na części (po lewej) i zmontowane (po prawej)

**Oprawa przelotowa** umożliwia zamontowanie bezpiecznika między końcami przewodu. Zazwyczaj jest wykonana z plastiku i ma po obu stronach kawałki przewodu lub styki umożliwiające przylutowanie bądź zaciśnięcie przewodów (patrz rysunek 4.6).

**Oprawa do montażu przewlekane** przystosowana jest do bezpieczników miniaturowych.

## Możliwe błędy

### Źle dobrany bezpiecznik

Jeśli dochodzi do częstego przepalania lub wybijania bezpiecznika przy uruchamianiu urządzenia, czyli mamy do czynienia z tzw. *trudnym rozruchem*, często powodem jest pominięcie jakiegoś ważnego czynnika przy ustalaniu wartości nominalnych bezpiecznika. Jednym z takich czynników może być duża pojemność kondensatora filtrującego napięcie zasilające, który pobiera duży prąd w pierwszych chwilach po włączeniu zasilacza. Prawidłowa procedura rozwiązania takiego problemu polega na zmierzeniu za pomocą oscyloskopu *wartości szczytowej prądu rozruchowego*, obliczeniu parametru  $I^2 \cdot t$  dla zaobserwowanego przebiegu i wybraniu bezpiecznika o prądzie znamionowym co najmniej 5 razy większym od obliczonej wartości.

Nigdy nie należy zastępować bezpiecznika kawałkiem drutu lub jakimkolwiek innym przewodnikiem.

### **Uszkodzenie bezpiecznika podczas lutowania**

Podczas lutowania bezpiecznika montowanego na płycie drukowanej metodą SMT lub THT może dojść do nadtopienia elementu czynnego i przez to zmiany jego parametrów

nominalnych. Proces lutowania takich bezpieczników należy przeprowadzać z taką samą ostrożnością jak proces lutowania elementów półprzewodnikowych.

### **Niewłaściwa lokalizacja bezpiecznika**

Bezpiecznik należy umieścić jak najbliżej źródła zasilania lub punktu, do którego zasilanie ma być doprowadzone, aby ochrona obejmowała możliwie największą część obwodu.

# Przycisk

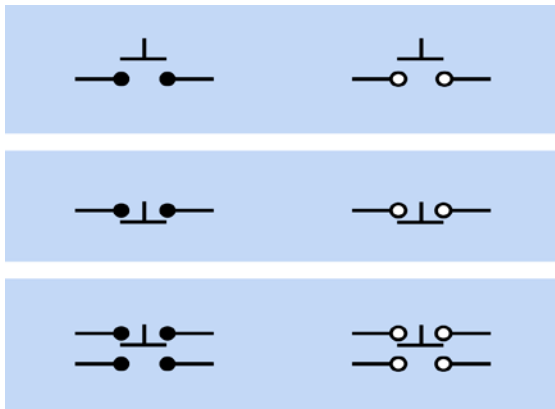
Często określany jako *przełącznik klawiszowy*, *przełącznik chwilowy* lub *monostabilny*. W tej encyklopedii określenie przycisk oznacza co innego niż **przełącznik**. W większości przełączników występuje dźwignia zamiast klawisza i zawsze można wskazać przynajmniej jeden wyróżniony styk zwany *biegunem*, podczas gdy w przycisku styki są zazwyczaj całkowicie równorzędne.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **przełącznik** (rozdział 6.),
- **przełącznik obrotowy** (rozdział 7.).

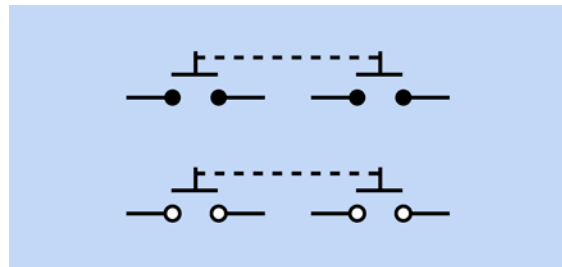
## Funkcja

Przycisk zawiera co najmniej dwa styki, które są zwierane lub rozwierane przez naciśnięcie przycisku. Zawiera też element sprężynujący, który przywraca pierwotne położenie przycisku po ustąpieniu zewnętrznej siły naciskającej. Kilka różnych symboli schematycznych przycisku pokazano na rysunku 5.1. Symbole zawarte w tym samym niebieskim prostokącie są funkcjonalnie identyczne. W górnym prostokącie są symbole przycisku pojedynczego zwiernego (normalnie otwartego), w środkowym — pojedynczego rozwiernego (normalnie zamkniętego), a w dolnym — podwójnego.



**Rysunek 5.1.** Powszechnie stosowane symbole prostych przycisków; szczegóły w tekście

W przeciwieństwie do **przełącznika** zwykły przycisk nie ma wyróżnionego styku, który można by określić mianem *biegunna*. Przycisk pojedynczy może jednak zwierać lub rozwierać dwie odrębne pary styków i w takim przypadku bywa określany, trochę myląc, jako przycisk dwubiegunowy (patrz rysunek 5.2). Do oznaczania przycisków suwakowych typu ISOSTAT z wieloma parami styków są stosowane inne symbole, opisane w punkcie „Przycisk suwakowy (typu ISOSTAT)”.



**Rysunek 5.2.** Powszechnie stosowane symbole przycisku dwubiegunowego

Typowy pojedynczy przycisk (z dwoma stykami) jest pokazany na rysunku 5.3.



**Rysunek 5.3.** Prosty klasyczny przycisk, w którym naciśnięcie klawisza powoduje zwarcie obu styków

## Działanie

Na rysunku 5.4 pokazano przekrój poprzeczny przycisku z jedną sprężyną oporopowrotną stawiającą opór sile naciskającej i dwiema sprężynami dociskającymi styki w celu zapewnienia pewniejszego połączenia. Choć tego na rysunku nie widać, oba górne styki są ze sobą elektrycznie stale połączone.

## Rodzaje

### Bieguny i terminale

Skróty określające liczbę biegunów (styków wejściowych) i terminali (styków wyjściowych) w przycisku są takie same jak w przypadku **przełącznika**. Oto przykłady takich skrótów:

*SPST lub 1P1T*

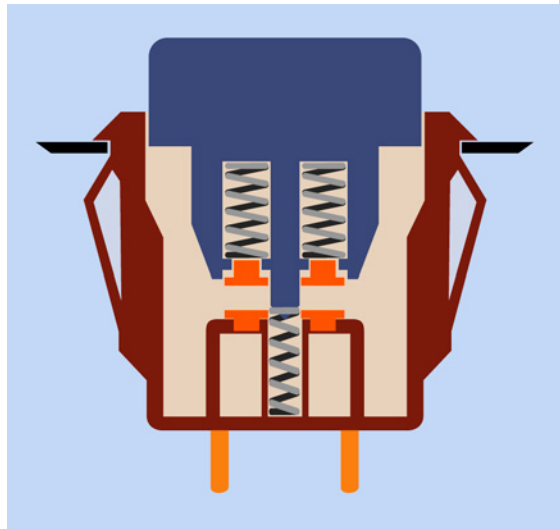
Jeden biegun z pojedynczym terminalem

*DPST lub 2P1T*

Dwa bieguny z pojedynczymi terminalami

*SPDT lub 1P2T*

Jeden biegun z podwójnym terminalem



**Rysunek 5.4.** Przekrój poprzeczny przycisku z jedną sprężyną oporopowrotną i dwiema sprężynami dociskającymi styki

*DPDT lub 2P2T*

Dwa bieguny z podwójnymi terminalami

O ile przełącznik może mieć dodatkowe, pośrednie położenie, o tyle przycisk z reguły takiego położenia nie ma.

### Stany ON-OFF

Oznaczenie stanu elektrycznego, w jakim znajduje się przycisk, gdy działa zewnętrzna siła naciskająca, jest umieszczane w nawiasie. Gdy ta siła ustępuje, przycisk powraca do stanu wyjściowego.

*OFF-(ON) lub (ON)-OFF*

Styki są normalnie rozwarte, a zwarcie występuje tylko wtedy, gdy przycisk jest wciśnięty. Niektórzy nazywają to przyciskiem *typu A*.

*ON-(OFF) lub (OFF)-ON*

Styki są normalnie zwarte, a rozwarcie występuje tylko wtedy, gdy przycisk jest wciśnięty. Niektórzy nazywają to przyciskiem *typu B*.

*ON-(ON) lub (ON)-ON*

Jeden styk podwójnego terminala jest normalnie zwarty z biegunem, a gdy przycisk jest wciśnięty,

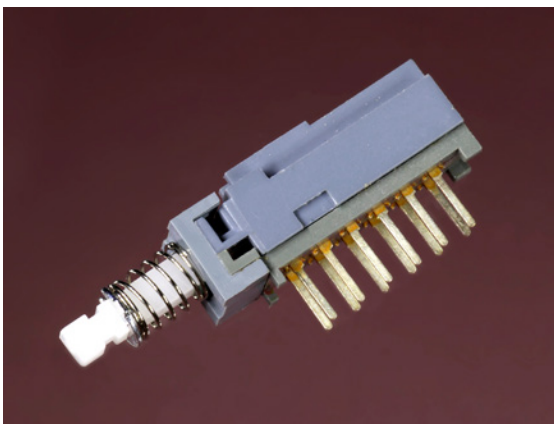
połączenie to ulega przerwaniu i następuje zwarcie drugiego styku z biegunem. Niektórzy nazywają to przyciskiem *typu C*.

W przypadku przycisków z terminalem pojedynczym stosuje się także określenia NC (*normalnie zamknięty*) i NO (*normalnie otwarty*).

## Przycisk suwakowy (typu ISOSTAT)

*Przycisk suwakowy* zawiera cienki trzpień, który wsuwa się do obudowy lub z niej wysuwa. Styki zamontowane na trzpieniu przesuwają się po stykach zamontowanych w obudowie. Przycisk suwakowy (bardzo podobny do przełącznika suwakowego) jest tani, niewielki i może być wielobiegunowy — niektóre modele są nawet 8-biegunowe. Może pracować tylko w układach niskoprądowych, ma ograniczoną wytrzymałość i jest wrażliwy na zanieczyszczenia.

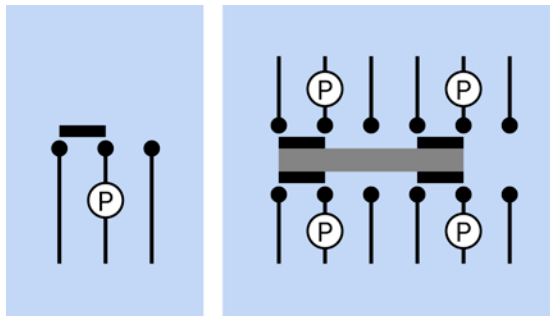
Na rysunku 5.5 jest pokazany przycisk suwakowy 4-biegunowy z podwójnymi terminalami. Na białym nylonowym trzpieniu można osadzić klawisz o dowolnym kształcie i rozmiarze.



**Rysunek 5.5.** Przycisk suwakowy typu 4PDT bez klawisza, który można zamocować na końcu trzpienia

Przykłady symboli schematycznych dwóch różnych przycisków suwakowych są pokazane na rysunku 5.6. Czarne prostokąty symbolizują tu styki ruchome. Styki pełniące funkcję biegunów są wyróżnione literą P (od ang. *pole* = biegun). Nie ma jeszcze jednolitego standardu w tym zakresie, ale przedstawione przykłady są dość typowe. Wykonany z materiału izolacyjnego trzpień, na którym są osadzone styki

ruchome, jest tu przedstawiony jako szary prostokąt, ale w niektórych kartach produktu może mieć postać zwykłej linii lub otwartego prostokąta.



**Rysunek 5.6.** Po lewej: symbol prostego przycisku suwakowego SPDT, w którym styk ruchomy zwiiera lewą lub prawą parę styków nieruchomych; po prawej: symbol bardziej rozbudowanego przycisku 4PDT; ruchome styki są zamontowane na izolacyjnym trzpieniu, a nieruchome styki biegunowe są oznaczone literą P

Symbol przycisku suwakowego może być identyczny z symbolem przełącznika suwakowego, więc przy analizowaniu schematu należy dokładnie sprawdzić, o jakiego rodzaju element chodzi.

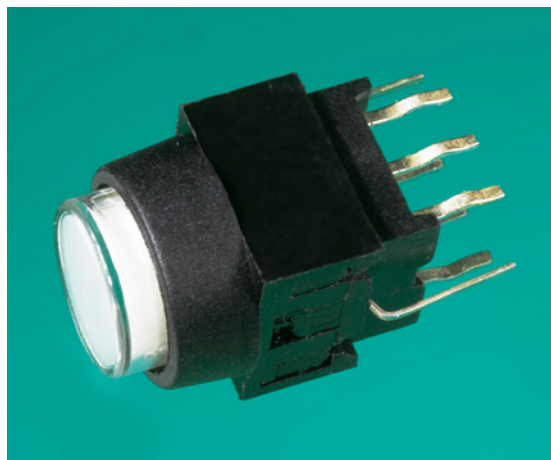
## Wygląd

Wiele przycisków i przełączników jest sprzedawanych bez nakładek klawiszowych i uchwytów. Użytkownik ma więc możliwość dobrania tych elementów według własnych potrzeb i upodobań. Zazwyczaj taka nakładka czy uchwyt są nakładane na odpowiednio wyprofilowane zakończenie ruchomego trzpienia. Kilka przykładowych nakładek pokazano na rysunku 5.7 wraz z pasującym do nich miniaturowym przyciskiem typu DPDT. Każdą z tych nakładek można nacisnąć na trzpień tego przycisku.



**Rysunek 5.7.** W przypadku niektórych przycisków nakładki (klawisze, uchwyty) są dostępne jako odrębne akcesoria

Przyciski *podświetlane* mają wbudowaną małą *żarówkę, świetlówkę* lub *diodę świecącą (LED)*. Źródło światła z reguły ma własne wyprowadzenia odizolowane od styków roboczych i można je tak podłączyć do zasilania, aby włączało się, gdy przycisk jest wciśnięty, gdy jest w stanie neutralnym lub w jakiegokolwiek innej sytuacji. Przyciski z LED-ami na ogół wymagają zewnętrznych rezystorów szeregowych o wartości dopasowanej do napięcia zasilającego diodę. Więcej informacji na temat doboru rezystorów szeregowych znajduje się w drugim tomie *Encyklopedii*, w rozdziale poświęconym **LED-om**. Przykładowy przycisk podświetlany jest pokazany na rysunku 5.8. Jest to element typu DPDT przeznaczony do montażu na płytce drukowanej i wyposażony w dodatkowe wyprowadzenia zasilające diodę świecącą umiejscowioną pod półprzezroczystą nakładką w kolorze białym.



**Rysunek 5.8.** Ten przycisk zawiera diodę typu LED umiejscowioną pod półprzezroczystą nakładką w kolorze białym

## Pokrycie końcówek i styków

Te opcje są dokładnie takie same jak w przypadku **przełącznika** i zostały opisane w tamtym haśle.

## Sposoby mocowania

Tradycyjne przyciski panelowe są mocowane zazwyczaj przy użyciu nakrętki nakręcanej na nagwintowaną część korpusu i dociskającej płytę panelu do górnego kołnierza przycisku. Inny sposób mocowania polega na wykorzystaniu sprężystych wypustek wystających z korpusu przycisku i zatrzaśnięciu ich po wciśnięciu w odpowiedniej wielkości otwór wykonany w płycie panelu. Ten rodzaj mocowania jest pokazany na rysunku 5.4.

Popularne są przyciski PCB przystosowane do montażu na płytkach drukowanych. Po przylutowaniu takiego elementu na płytce jego klawisz (nakładka) musi przy składaniu urządzenia wejść w odpowiedni otwór obudowy i z niego wystawać albo na obudowie musi się znajdować przycisk mechaniczny (nieelektryczny), który będzie pośredniczył w uruchamianiu przycisku właściwego.

Jeśli chodzi o przyciski montowane powierzchniowo, to raczej rzadko użytkownik ma do nich bezpośredni dostęp, a przecież obecnie około jednej czwartej wszystkich przycisków dotykowych jest montowana właśnie w taki sposób. Zazwyczaj są one ukryte pod membranami, które

użytkownik musi nacisnąć, aby odpowiedni przycisk zadziałał — tak jest na przykład w pilotach do zdalnego sterowania urządzeniami elektronicznymi.

## Uszczelnienia i brak uszczelnień

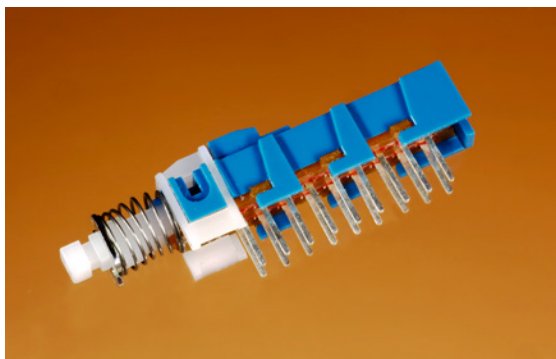
Uszczelnienie przycisku zabezpieczające go przed wodą, pyłem, brudem i innymi czynnikami środowiskowymi wiąże się z odpowiednio wyższą ceną.

## Blokowanie

Przycisk z wewnętrzną blokadą zwany *zatraskowym* zawiera mechaniczną zapadkę, która obraca się przy każdym wciśnięciu przycisku. Pierwsze wciśnięcie blokuje styki w stanie zwarcia, a drugie przywraca stan rozwarcia. Potem cały cykl się powtarza. Takie przyciski z dwukrotnym wciskaniem są stosowane w latarkach, sprzęcie audio i w elektrycznych instalacjach samochodowych. Przyciski zatraskowe są też czasem nazywane *naprzemiennymi*.

W przycisku zatraskowym w stanie *zablokowania* końcówka trzpienia jest wyraźnie niżej niż w stanie odblokowania. Informacja ta nie zawsze jest jednak dostępna w karcie produktu.

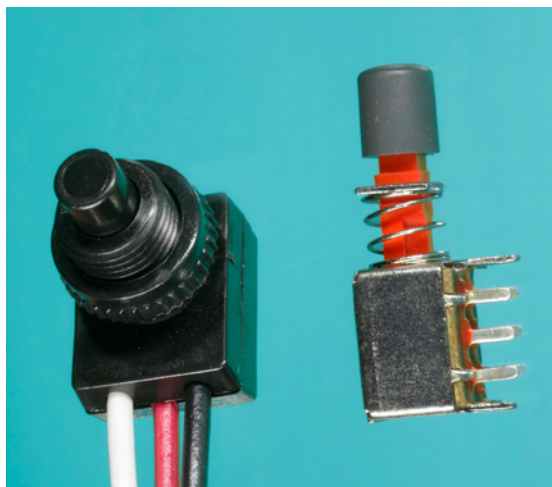
Przycisk zatraskowy z sześcioma biegunami i podwójnymi terminalami jest pokazany na rysunku 5.9.



**Rysunek 5.9.** Ten przycisk typu 6PDT na przemian blokuje się i odblokowuje przy kolejnych wciśnięciach trzpienia

Dwa inne rodzaje są pokazane na rysunku 5.10. Po prawej jest zwykły przycisk naprzemienny typu DPDT. Po lewej znajduje się przycisk zatraskowy z cyklem czterostanowym

obejmującym jeden stan wyłączenia i trzy stany zwarcie pomiędzy różnymi parami styków.



**Rysunek 5.10.** Po prawej: prosty przycisk zatraskowy typu DPDT; po lewej przycisk zatraskowy z czterema stanami, z których jeden jest stanem wyłączenia, a w pozostałych trzech zwierane są różne pary styków

Prosty przycisk OFF-(ON) może również działać jak zatraskowy, jeśli się go połączy z **mikrokontrolerem**, którego oprogramowanie reaguje na sygnał wejściowy przełączeniem wyjścia ze stanu wysokiego w niski lub na odwrót. W konfiguracji z mikrokontrolerem wciśnięcie przycisku może skutkować jedną z wielu możliwych odpowiedzi. Przykładami mogą być przyciski w telefonach komórkowych czy przenośnych odtwarzaczach multimedialnych.

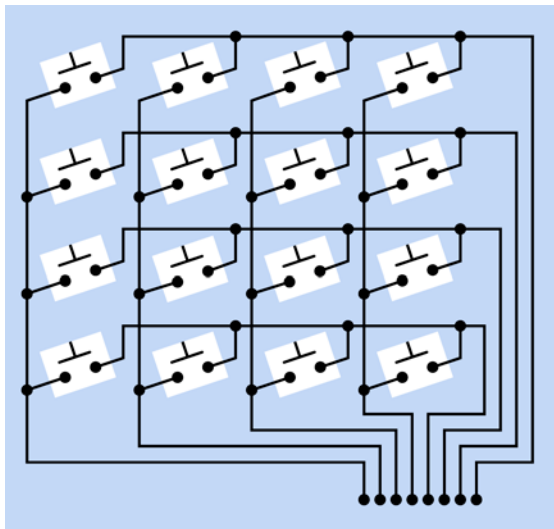
Przycisk z mechanizmem zatraskowym ma wyższy wskaźnik awaryjności niż zwykły przycisk OFF-(ON), ale jego zaletą jest to, że do wygenerowania właściwej odpowiedzi na wciśnięcie nie potrzebuje mikrokontrolera. Mikrokontrolery są opisane w drugim tomie *Encyklopedii*.

## Przycisk nożny

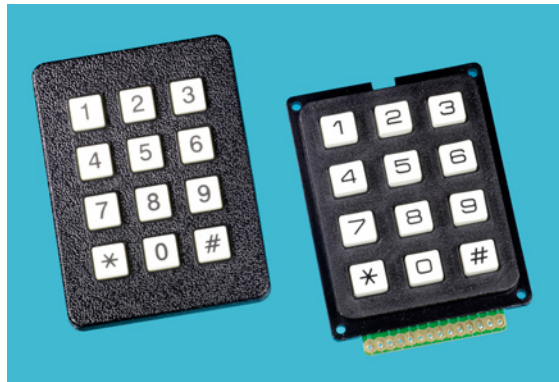
Przycisk nożny przy wciskaniu wymaga zazwyczaj użycia większej siły niż zwykły przycisk obsługiwany ręką. Są solidniej zbudowane, a można je znaleźć w odkurzaczach, pedałach będących elementami zestawów transkrypcyjnych czy stompboksach używanych przez muzyków.

## Keypad

Keypad jest prostokątnym zestawem 12 lub 16 przycisków typu OFF-(ON). Styki tych przycisków są połączone z *listwą kołkową* umożliwiającą komunikację ze sterowanym urządzeniem za pomocą wieloprzewodowej taśmy. W niektórych keypadach każdy przycisk łączy jeden ze swoich styków z odrębnym kołkiem listwy, a drugi ze wspólnym dla wszystkich przycisków kołkiem masy. Częściej przyciski są *kodowane matrycowo*, co oznacza, że każdy z nich łączy określoną parę przewodów matrycy. Schemat matrycy 16-przyciskowej jest pokazany na rysunku 5.11. Taką konfigurację można łatwo przepytować za pomocą **mikrokontrolera** zaprogramowanego do wysyłania impulsu prądowego kolejno do wszystkich przewodów poziomych i jednoczesnego sprawdzania, w którym (jeśli w ogóle) przewodzie pionowym ten impuls się pojawi. Przewody wyjściowe matrycy powinny być połączone z rezystorami podciągającymi (*pull-up*) lub ściągającymi (*pull-down*), aby wyjścia mikrokontrolera miały jednoznacznie określony stan przy braku sygnału. Dwa keypady 12-przyciskowe są pokazane na rysunku 5.12.



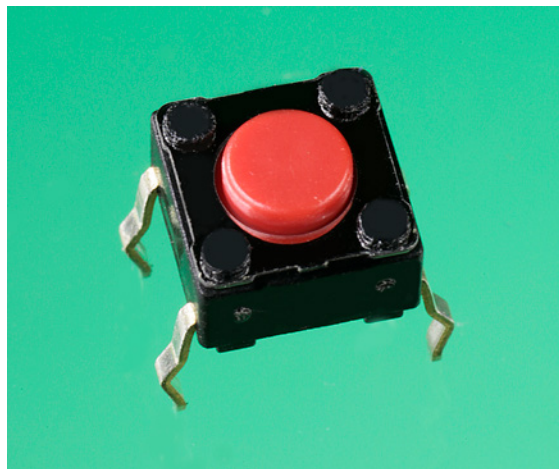
**Rysunek 5.11.** Przyciski keypada numerycznego są zwykle połączone w układzie matrycowym, w którym każdy przycisk służy do zwierania określonej pary przewodów; stan takiego układu można łatwo ustalić za pomocą mikrokontrolera



**Rysunek 5.12.** Keypad widoczny po lewej ma konstrukcję matrycową i odczytywanie stanu poszczególnych przycisków odbywa się za pośrednictwem siedmiu pinów wystających z tylnej ścianki; keypad widoczny po prawej ma przypisany każdy przycisk do innego kołka w złączu listwowym. Opis systemu matrycowego jest zawarty w tekście

## Mikroprzycisk (tact switch)

Mikroprzycisk jest miniaturowym urządzeniem o rozmiarze mniej więcej 6 mm, przystosowanym do montowania metodą przewlekana na płytkach drukowanych lub bez lutowania na płytkach stykowych. Niemal zawsze jest to przycisk typu SPST, ale z czterema pinami — dwa piny są połączone z jednym stykiem. Mikroprzyciski są często przykrywane klawiszami membranowymi. Przykład mikroprzycisku jest pokazany na rysunku 5.13.



**Rysunek 5.13.** Typowy mikroprzycisk

## Panel membranowy

Często występuje w kuchenkach mikrofalowych, gdzie styki muszą być zabezpieczone przed dostępem cząsteczek tłuszczu i wody. Naciśnięcie palcem membrany powoduje wciśnięcie ukrytego pod nią przycisku. Takie panele są z reguły projektowane z myślą o konkretnym produkcie i raczej nie są dostępne w sklepach z częściami elektronicznymi. Niekiedy można je nabyć na portalach aukcyjnych lub u dostawców części zamiennych.

## Przyciski zależne

Określenie *przyciski zależne* oznacza zestaw przycisków powiązanych ze sobą mechanicznie w taki sposób, że w danej chwili tylko jeden z nich może być wciśnięty. Wciśnięcie przycisku powoduje jego zablokowanie w tej pozycji. Aby go odblokować, należy wcisnąć inny przycisk z tego samego zestawu. Przyciski zestawu można wcisnąć w dowolnej kolejności. Zestawy takie mają zastosowanie na przykład w sprzęcie nagłaśniającym do przełączania źródeł dźwięku, jeśli w danej chwili tylko jedno z nich może być aktywne. Obecnie wychodzą jednak z użycia, gdyż są wypierane przez przełączniki elektroniczne.

## Przełącznik migowy

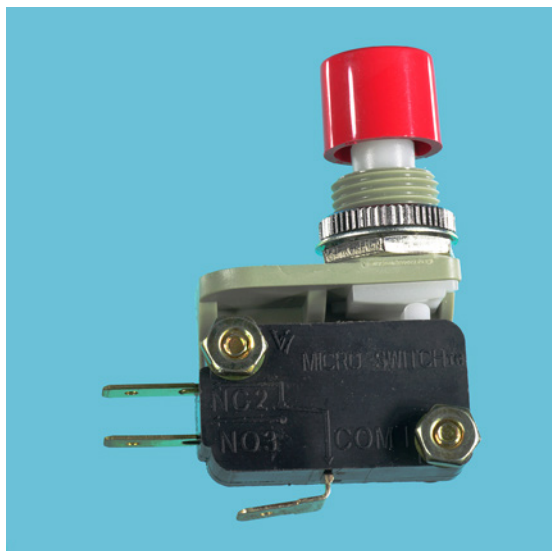
Przełącznik migowy (opisany szczegółowo w haśle **Przełącznik**) często bywa konstrukcyjnie uzupełniany przyciskiem, tak jak na rysunku 5.14. Uzyskuje się przez to poprawę parametrów działania przełącznika, większą niezawodność i możliwość przełączania prądów o natężeniu do 5 A. Są to jednak prawie zawsze urządzenia jednobiegunowe.

## Przycisk alarmowy

Przycisk alarmowy jest urządzeniem typu NC (normalnie zamknięte), które pod wpływem nacisku pewnie przechodzi w stan wyłączenia i nie powraca samoczynnie do położenia pierwotnego. Odpowiednio uformowany kołnierz umożliwia wyciągnięcie przycisku i tym samym przywrócenie stanu włączenia.

## Wartości

Natężenia prądów, jakie mogą być przełączane za pomocą rozmaitych przycisków, obejmują przedział od kilku mA do



**Rysunek 5.14.** Przycisk zablokowany z przełącznikiem migowym typu SPDT

20 A, a nawet więcej. Na niektórych przyciskach wartość ta jest nadrukowana, ale nie na wszystkich. Zwykle jest ona podawana dla określonej wartości napięcia i może się różnić w zależności od tego, czy prąd jest stały, czy zmienny.

## Stosowanie

Po ustaleniu zasadniczych wymogów dotyczących napięcia, natężenia prądu i wytrzymałości o wyborze konkretnego modelu przycisku często decydują takie czynniki, jak wygląd, wrażenie dotykowe, wymiary i łatwość montażu. Jak większość urządzeń elektrycznych, przyciski są wrażliwe na zabrudzenie i zawilgocenie. Jeśli przycisk ma być używany w środowisku niegwarantującym dostatecznej ochrony przed tymi czynnikami, należy rozważyć poniesienie dodatkowych kosztów i zastosowanie komponentu uszczelnionego.

W obwodach, w których przycisk steruje pracą urządzenia o charakterze indukcyjnym, warto go zbocznikować *tłumikiem przepięć* w celu zminimalizowania ryzyka powstania łuku elektrycznego. Więcej informacji na ten temat jest podanych w punkcie „Powstawanie łuku elektrycznego”, w rozdziale 6, „Przełącznik”.

## Możliwe błędy

---

### Brak nakładki

Przy zamawianiu przycisku należy uważnie przestudiować kartę produktu i sprawdzić, czy w skład zestawu wchodzi również nakładka. Nakładki często są sprzedawane oddzielnie i nie zawsze jest możliwość dopasowania nakładki pochodzącej od innego producenta.

### Niewłaściwy montaż

W przypadku przycisków mocowanych do obudowy urządzenia za pomocą nakrętki ta może się obluźnić, co może się skończyć tym, że przy kolejnej próbie naciśnięcia przycisku zostanie on wciśnięty do wnętrza urządzenia. Z kolei zbyt mocne dokręcanie nakrętki może doprowadzić do zerwania gwintu na korpusie przycisku — szczególnie trzeba na to uważać przy montażu tanich komponentów z korpusami plastikowymi. Przy ostatecznym mocowaniu takiego przycisku warto rozważyć zabezpieczenie nakrętki kropelką kleju LOCTITE lub podobnego. Rozmiary nakrętek są mocno zróżnicowane i w razie uszkodzenia bądź zgubienia znalezienie zamiennika może być dość czasochłonne.

### Problemy z podświetleniem LED-owym

Przy montażu przycisków z wbudowanymi diodami świecącymi należy dobrze zidentyfikować końcówki tych diod. W kartach produktu publikowanych przez producentów końcówki te są na ogół wyraźnie odróżnione od końcówek przycisku, ale nie zawsze dobrze oznaczona jest ich biegunowość. Jeśli nie dysponujemy miernikiem z funkcją testowania diod, można wykonać próbne podłączenie LED-a do źródła o napięciu od 3 V do 5 V poprzez rezystor o wartości 2 k $\Omega$ . Krótkotrwałe zamknięcie takiego obwodu wywoła słaby błysk diody, jeśli biegunowość jest poprawna, i nie spowoduje żadnego uszkodzenia przy biegunowości niewłaściwej.

### Inne problemy

Problemy związane z powstawaniem łuku elektrycznego, przeciążeniem, zwarcie, niewłaściwym rodzajem wyprawadzeń i drganiem styków nie różnią się od tych, jakie zostały opisane w ramach hasła **Przełącznik**.

# Przełącznik

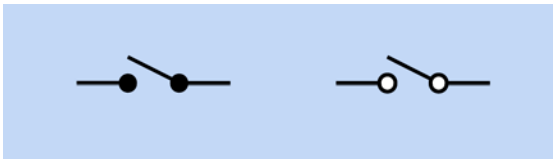
Termin **przełącznik** oznacza mechaniczne urządzenie służące do trwałego zamykania lub otwierania obwodu elektrycznego. Zazwyczaj jest ono uruchamiane za pośrednictwem mechanizmu kołyskowego, dźwigni lub suwaka. Choć ma wiele wspólnego z **przyciskiem** i **przełącznikiem obrotowym**, każdy z tych elementów ma w *Encyklopedii* odrębne hasło. Przełączniki półprzewodnikowe znalazły swoje miejsce w hasłach **Tranzystor bipolarny**, **Tranzystor jednozłączowy** i **Tranzystor polowy**. Przełączniki w postaci układów scalonych są opisane w drugim tomie *Encyklopedii*. *Przełączniki RF* stosowane w układach wysokich częstotliwości nie mają swojego hasła w *Encyklopedii*, podobnie jak *przełączniki wielokierunkowe*, których działanie zależy od kierunku przyłożonej siły.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **przycisk** (rozdział 5.),
- **przełącznik obrotowy** (rozdział 7.).

## Funkcja

Przełącznik zawiera co najmniej dwa styki, które są zwierane lub rozwierane przez przesunięcie dźwigni bądź suwaka. Symbole schematyczne przełącznika pokazano na rysunku 6.1.



**Rysunek 6.1.** Powszechnie stosowane symbole przełącznika typu SPST zwanego również przełącznikiem ON-OFF; oba symbole oznaczają dokładnie to samo

Najprostszą konstrukcją ma **przełącznik nożowy** pokazany na rysunku 6.2. Szczyt jego popularności przypadał na pierwsze lata po odkryciu elektryczności, a obecnie jest stosowany w szkolnych zestawach do ćwiczeń i pokazów oraz (w solidniejszym wykonaniu) w urządzeniach energetycznych, w których zachodzi potrzeba przełączania dużych prądów przy pełnym obciążeniu, co wymaga zapewnienia dużej powierzchni czynnej styków.



**Rysunek 6.2.** Przełącznik nożowy typu DPST przeznaczony do celów edukacyjnych

## Działanie

*Biegun* przełącznika jest zazwyczaj połączony z ruchomym stykiem, który tworzy lub przerywa połączenie z terminalem (drugim nieruchomym stykiem). Jeśli jest tylko jeden biegun, to mamy do czynienia z przełącznikiem *jednobiegunowym*. Jeśli jest drugi biegun, elektrycznie odizolowany od pierwszego, z własnym stykiem ruchomym (lub zestawem takich styków), to taki przełącznik jest nazywany *dwubiegunowym* lub po prostu *podwójnym*. Przełączniki z więcej niż czterema biegunami są raczej rzadko spotykane.

Jeśli na każdy biegun przypada tylko jeden styk drugorzędny zwany *terminalem*, to jest to przełącznik typu *ST* (lub po prostu *ON-OFF* albo *OFF-ON*). Jeśli zaś istnieją dwa terminale dla każdego bieguna i bieguny łączą się z nimi naprzemiennie, to jest to przełącznik typu *DT*, zwany niekiedy *dwukierunkowym*.

Przełącznik o podwójnych terminalach może mieć dodatkowe położenie środkowe, w którym biegun nie łączy się z żadnym terminalem (położenie *OFF*) lub łączy się z trzecim stykiem terminalowym.

Jeśli wewnętrzna sprężyna powoduje samoczynny powrót przełącznika do jednego z ustalonych położeń, to takie urządzenie należy traktować raczej jako **przycisk**, choć fizycznie może nie różnić się od klasycznego przełącznika.

## Rodzaje

Przełączniki *plywakowy*, *rtęciowy*, *ciśnieniowy* i *Halla* zostały potraktowane jako czujniki i są opisane w 3. tomie *Encyklopedii*.

## Terminologia

W wielu różnych typach przełączników występują podzespoły pełniące zawsze tę samą funkcję. Dźwignia, gałka i klawisz to wszystko są *manipulatory*, które użytkownik wprawia w ruch przez naciskanie lub obracanie. *Przepust* jest elementem otaczającym manipulator przełącznika. *Styk wspólny* to inaczej biegun przełącznika. Zazwyczaj do niego podłączony jest *styk ruchomy*, który podczas działania przełącznika łączy się z *terminalem* zwanym także *stykiem nieruchomym*.

## Bieguny i terminale

Liczby biegunów i terminali w przełączniku są oznaczane odpowiednimi skrótami. Oto kilka przykładów, które powinny wszystko wyjaśnić:

*SPST lub 1P1T*

Jeden biegun z pojedynczym terminalem

*DPST lub 2P1T*

Dwa bieguny z pojedynczymi terminalami

*SPDT lub 1P2T*

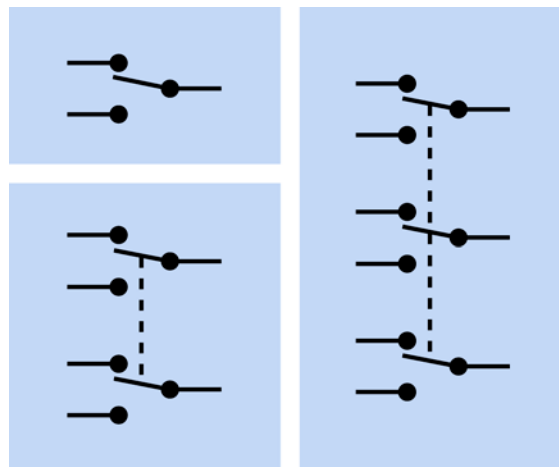
Jeden biegun z podwójnym terminalem

*DPDT lub 2P2T*

Dwa bieguny z podwójnymi terminalami

Oczywiście możliwe są także inne kombinacje.

Na rysunku 6.3 są pokazane symbole schematyczne przełączników z podwójnymi terminalami i mających odpowiednio, 1, 2 oraz 3 bieguny. Linia przerywana oznacza połączenie mechaniczne wymuszające równoczesność ruchów wszystkich sekcji przełącznika. Nie ma tu żadnych połączeń elektrycznych między biegunami.



**Rysunek 6.3.** Symbole trzech typów przełączników z podwójnymi terminalami; u góry po lewej: jednobiegunowy; u dołu po lewej: dwubiegunowy; po prawej: trybiegunowy

## Stany ON-OFF

Do oznaczania stanów, w jakich może się znajdować przełącznik, zwykle się używać słów **ON** (włączony) i **OFF** (wyłączony). Niektórzy producenci dodają jeszcze słowo **NONE** (neutralny), aby wyraźnie zaznaczyć, że przełącznik nie ma położenia środkowego. Inni pomijają to słowo, uznając, że brak jakiegokolwiek słowa oznaczającego położenie środkowe jest wystarczająco wymowny.

### ON-OFF lub ON-NONE-OFF

Podstawowy przełącznik typu SPST bez położenia środkowego.

### ON-ON lub ON-NONE-ON

Podstawowy przełącznik typu SPDT bez położenia środkowego.

### ON-OFF-ON

Przełącznik z podwójnym terminalem i neutralnym położeniem środkowym (w tym położeniu żadne styki nie są zwarte).

### ON-ON-ON

Przełącznik z potrójnym terminalem i położeniem środkowym, w którym biegun jest zwarty z właściwym dla tego położenia stykiem terminalowym.

Oznaczenie chwilowego stanu elektrycznego, w jakim znajduje się przełącznik, gdy działa zewnętrzna siła naciskająca, jest umieszczane w nawiasie. Gdy ta siła ustępuje, przełącznik powraca do stanu wyjściowego.

### (ON)-OFF lub OFF-(ON)

Styki są normalnie rozwarte, a zwarcie występuje tylko wtedy, gdy przycisk jest wciśnięty. Niektórzy nazywają takie urządzenie przełącznikiem *typu A* lub po prostu **NO** (normalnie otwarty). Pod względem działania nie różni się on od przycisku.

### ON-(OFF) lub (OFF)-ON

Styki są normalnie zwarte, a rozwarcie występuje tylko wtedy, gdy przycisk jest wciśnięty. Niektórzy nazywają takie urządzenie przyciskiem *typu B* lub po prostu **NC** (normalnie zamknięty).

### (ON)-OFF-(ON)

Przełącznik ze sprężyną powrotną, podwójnym terminalem i neutralnym położeniem środkowym, do którego manipulator powraca po ustąpieniu siły zewnętrznej.

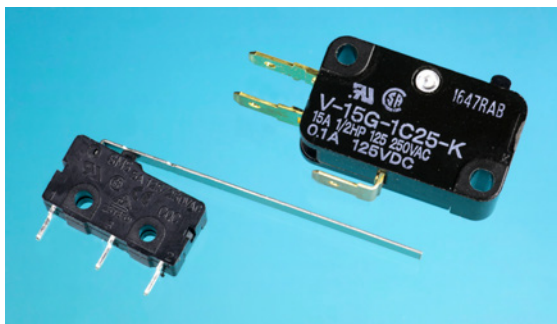
Możliwe są także inne kombinacje tych oznaczeń.

Większość przełączników z podwójnymi terminalami najpierw przerywa połączenie z jednym stykiem terminalowym i dopiero potem tworzy połączenie z drugim stykiem (lub zestawem styków). Taki tryb pracy bywa określany jako *rozwarcie przed zwarcie* (**BBM** — ang. *Break Before Make*). Zdecydowanie mniej popularne są przełączniki pracujące w trybie *zwarcie przed rozwarciem* (**MBB** — ang. *Make Before Break*) polegającym na utworzeniu nowego połączenia tuż przed przzerwaniem istniejącego. Zastosowanie takiego przełącznika w niewłaściwym dla niego miejscu może mieć trudne do przewidzenia konsekwencje, gdyż przez chwilę wszystkie styki terminalowe są zwarte z biegunem.

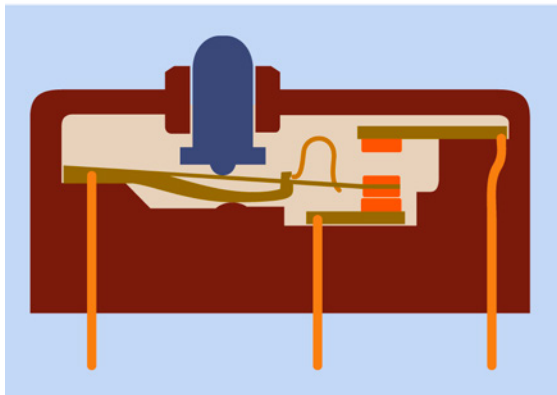
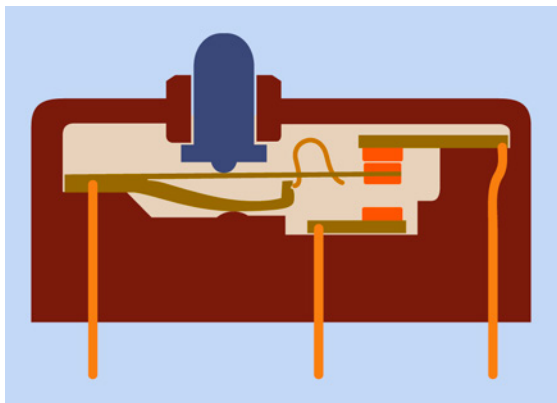
## Działanie migowe

Przełączniki o działaniu migowym, zwane też *mikroprzełącznikami*, często pełnią funkcję *wyłączników krańcowych*. W takich zastosowaniach są uruchamiane przez rozmaite mechanizmy, a nie bezpośrednio przez człowieka. Mimo niskich cen są dość niezawodne.

Dwa przykłady przełączników migowych są pokazane na rysunku 6.4. Natomiast rysunek 6.5 przedstawia przekrój poprzeczny takiego przełącznika — w tym przypadku ON-(ON). Styki bieguna są zamontowane na elastycznym płaskowniku, który może się wyginać w górę lub w dół. W płaskowniku jest wycięty podłużny otwór, w którym sprężyna w kształcie odwróconej litery U przechyła się w jedną bądź drugą stronę, dociskając zwierane styki, a to zapewnia szybkość i pewność przełączenia.



**Rysunek 6.4.** Dwa przełączniki migowe zwane też mikroprzełącznikami; ten po prawej ma wymiary standardowe, a ten po lewej jest typu miniaturowego, ale za to ma długie ramię aktywatora; ramię to można przyciąć do odpowiedniej długości



**Rysunek 6.5.** U góry: dwa górne styki są domyślnie zwarte; u dołu: wciśnięcie przycisku wygina metalowy płaskownik w dół, aż do zwarcia styków dolnych; element w kształcie odwróconej litery U jest sprężyną zamocowaną w wycięciu płaskownika i stawiającą opór przy przechodzeniu płaskownika przez położenie środkowe

Określenie *działanie migowe* odnosi się do sprężynowego mechanizmu wewnętrznego wymuszającego szybkie przejścia między dwoma skrajnymi położeniami elementu przełączającego. Tego typu przełączniki są zwykle typu SPDT i działają w trybie ON-(ON), chociaż dostępne są również wersje działające w trybie OFF-(ON) lub ON-(OFF). Są zamknięte w szczelnej obudowie, z której wystaje niewielki przycisk. Niektóre modele są wyposażone w metalową dźwignię naciskającą na przycisk. Na końcu tej dźwigni może być zamontowana rolka, która z kolei może się toczyć po powierzchni krzywki i w odpowiednich momentach powodować zmianę stanu przełącznika. Często taki układ jest wykorzystywany do ograniczania ruchu posuwistego lub obrotowego rozmaitych urządzeń. Przełączniki występują w wielu odmianach różniących się rozmiarami i wielkością siły, której należy użyć, aby przełącznik zadziałał. W przypadku najmniejszych przełączników wystarczy na ogół siła rzędu kilku setnych niutona.

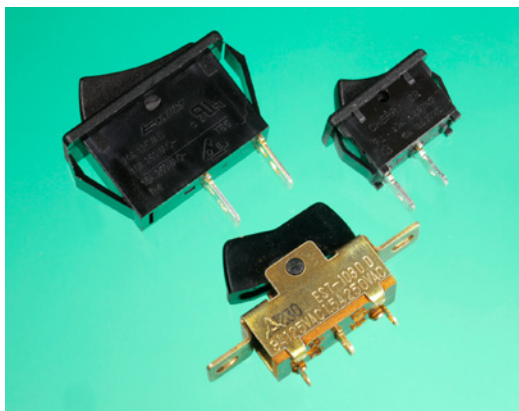
### Przełącznik kołyskowy

Trzy różne przełączniki kołyskowe są pokazane na rysunku 6.6, a przekrój poprzeczny tego typu urządzenia — na rysunku 6.7. Dociskana sprężyną kulka przetacza się do jednego lub drugiego końca kołyskowej dźwigni, gdy użytkownik naciska jedną lub drugą stronę klawisza. Tego typu przełączniki najczęściej służą do zamykania i przerywania obwodów zasilających.

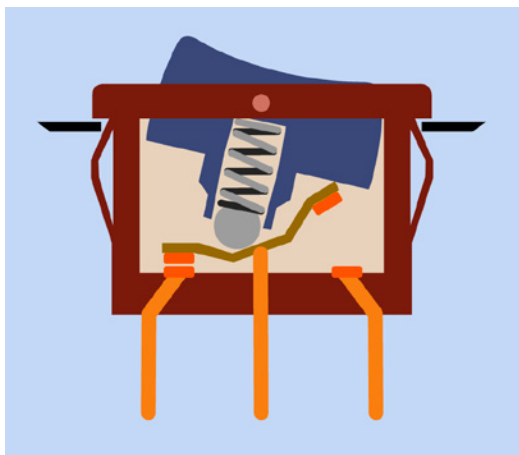
### Przełącznik suwakowy

Istnieje wiele różnych typów *przełączników suwakowych*, które są powszechnie stosowane w układach sterujących pracą niewielkich urządzeń elektronicznych, takich jak radiobudziki, czy trochę większych, jak amplitunery stereofoniczne. Zazwyczaj sam przełącznik jest montowany na płytce drukowanej, a na zewnątrz panelu sterującego wystaje tylko gałka lub nakładka. Tego typu przełączniki są bardziej wrażliwe na brud i wilgoć niż wszystkie pozostałe. Są tańsze od przełączników dźwigniowych, ale raczej nie stosuje się ich do przełączania prądów o dużym natężeniu.

Większość przełączników suwakowych ma dwa położenia i funkcjonuje jako urządzenia SPDT lub DPDT, choć zdarzają się także konfiguracje z większą liczbą biegunów i (lub) terminali. Na rysunku 6.8 jest pokazany miniaturowy przełącznik



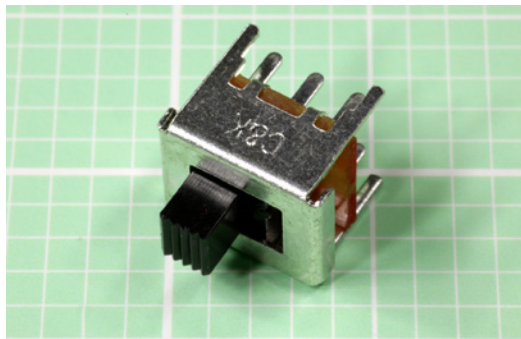
**Rysunek 6.6.** Trzy przełączniki kołyskowe, z których dwa górne są przystosowane do montażu na wcisk w odpowiednich otworach panelu sterującego; trzeci wymaga przykręcenia do płyty montażowej i jest modelem sprzed ponad 20 lat — widać różnicę w zastosowanych materiałach, ale zasada działania pozostała ta sama



**Rysunek 6.7.** Gdy użytkownik naciska jedną lub drugą stronę klawisza, dociskana sprężyna kulka przetacza się do jednego lub drugiego końca kołyskowej dźwigni, która zwiera wtedy odpowiednią parę styków

suwakowy, a na rysunku 6.9 pokazano kilka przykładowych symboli schematycznych. Widoczne w tych symbolach czarne prostokąty oznaczają styki ruchome, a styki pełniące funkcję biegunów są wyróżnione literą P (od ang. *pole* = biegun). U góry po lewej jest symbol dwupołożeniowego przełącznika typu SPDT. U góry po prawej jest symbol przełącznika typu 4PDT. Symbol zamieszczony u dołu po lewej nie ma wyróżnionych biegunów i reprezentuje przełącznik mogący zwierać dowolną z czterech par styków. Przełącznik,

którego symbol znajduje się u dołu po prawej stronie, może w danej chwili zwierać jedną z trzech par styków. Tutaj też nie ma wyróżnionych biegunów.



**Rysunek 6.8.** Ten miniaturowy przełącznik suwakowy ma około 1 cm długości i może przełączać prądy stałe o natężeniu do 0,3 A przy napięciu nieprzekraczającym 30 V. Większe modele wyglądają niemal identycznie i mogą przełączać tylko nieznacznie większe prądy

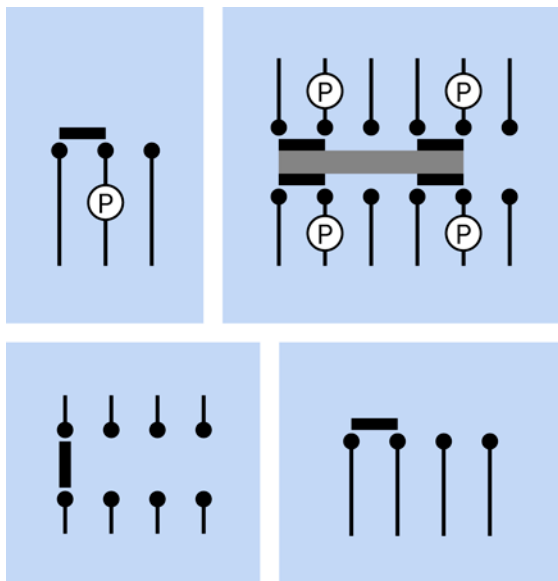
Symbol przełącznika suwakowego może być identyczny z symbolem **przycisku suwakowego**, więc przy analizowaniu schematu należy dokładnie sprawdzić, o jakiego rodzaju element chodzi.

Symbole schematyczne przełączników suwakowych jeszcze nie zostały ustandaryzowane, ale zaprezentowane tu przykłady są dość powszechnie stosowane.

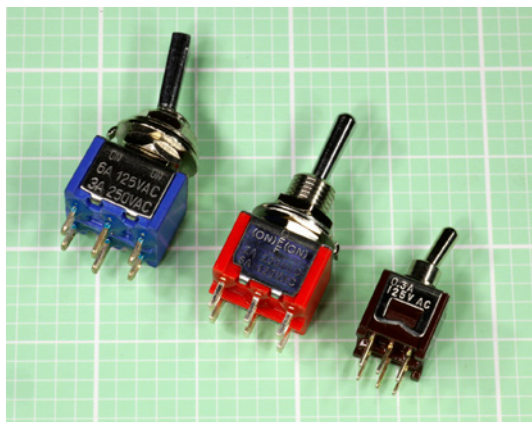
## Przełącznik dźwigniowy

*Przełącznik dźwigniowy* gwarantuje pewne działanie dzięki zastosowaniu dźwigni, która często przyjmuje kształt łezki i ma niklowaną powierzchnię, choć w tańszych modelach bywa po prostu plastikowa. Początkowo przełączniki tego typu były używane do sterowania niemal każdym urządzeniem elektronicznym (włącznie z pierwszymi komputerami), ale później straciły na popularności i obecnie można je spotkać w samochodach, motorówkach i urządzeniach przemysłowych.

Na rysunku 6.10 pokazano trzy miniaturowe przełączniki dźwigniowe typu DPDT, a na rysunku 6.11 — dwa urządzenia pełnowymiarowe i przystosowane do przełączania większych prądów. Przełącznik pokazany na rysunku 6.12 jest podobny do dwóch poprzednich, ale ma aż cztery bieguny. Urządzenia z większą liczbą biegunów są raczej rzadko spotykane.



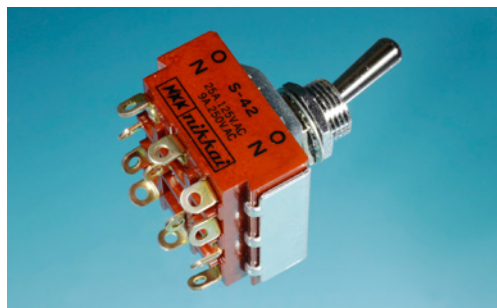
**Rysunek 6.9.** Schematy przełączników suwakowych; każdy czarny prostokąt reprezentuje styk ruchomy, który w danej chwili może zwierać tylko jedną parę styków stałych; szczegółowy opis poszczególnych schematów znajduje się w tekście; producenci mogą podawać w kartach produktu różne wersje przytoczonych tu symboli (na przykład szary prostokąt reprezentujący izolacyjny trzpień przełącznika — u góry po prawej — może być zastąpiony pojedynczą kreską lub czarnym konturem prostokąta)



**Rysunek 6.10.** Trzy miniaturowe przełączniki dźwigniowe o prądzie znamionowym z zakresu od 0,3 A do 6 A przy napięciu 125 V AC; każdy mały kwadracik w tle ma bok o długości 2,54 mm



**Rysunek 6.11.** Dwa przełączniki pełnowymiarowe i przystosowane do przełączania większych prądów; po lewej: urządzenie przystosowane do podłączenia przewodów za pomocą nasuwek konektorowych; po prawej: przełącznik z końcówkami przystosowanymi do lutowania (na niektórych widać resztki cyny)



**Rysunek 6.12.** Pełnowymiarowy przełącznik dźwigniowy typu 4PDT z końcówkami do lutowania przystosowany do przełączania prądów o natężeniu do 25 A przy napięciu 125 V AC; czterobiegunowe przełączniki są raczej rzadko używane

Na rysunku 6.13 widoczny jest dźwigniowy przełącznik samochodowy. Wykonana z tworzywa sztucznego dźwignia ma wydłużony kształt ułatwiający kierowcy zlokalizowanie przełącznika i jednoznaczne określenie jego stanu.



**Rysunek 6.13.** Przełącznik dźwigniowy przeznaczony do sterowania elektrycznymi urządzeniami wyposażenia samochodowego

Przełączniki dźwigniowe specjalnego przeznaczenia są niezwykle wytrzymałe i mogą być zabezpieczone przed zabrudzeniem wnętrza. Zabezpieczenie to ma zwykle formę gumowej lub winylowej *osłonki* obejmującej dźwignię i nakręcaną na gwintowany przepust dźwigni (patrz rysunek 6.14).



**Rysunek 6.14.** Gumowa lub winylowa osłonka chroni wnętrze przełącznika przed brudem i wilgocią; osłonka ma gwint i może być nakręcona na przepust dźwigni, co pokazano w lewej części rysunku

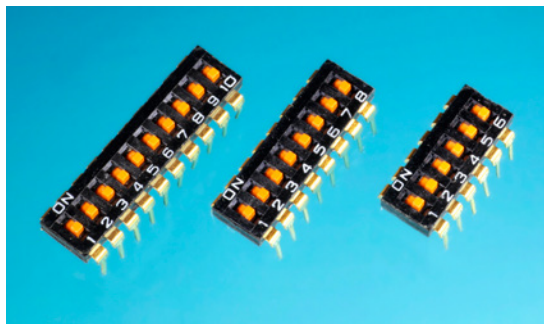
*Przełącznik dźwigniowy blokowany* wymaga pociągnięcia dźwigni, aby móc ją przestawić w inne położenie. Potem dźwignia jest ponownie blokowana w nowym położeniu. Często blokowanie polega na wprowadzeniu dźwigni w niewielkie wyżłobienie wykonane w przepuście.

## Przełącznik typu DIP

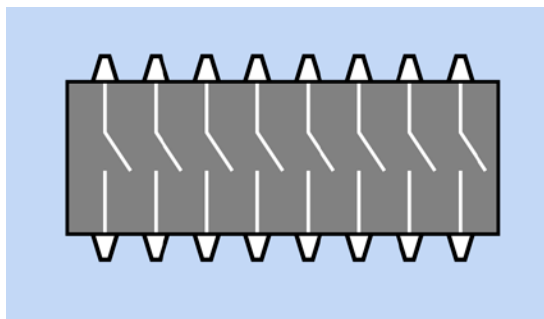
Przełącznik DIP jest układem bardzo małych przełączników przystosowanych do bezpośredniego montażu na płycie drukowanej metodą przewlekaną lub powierzchniową. W wersji do montażu przewlekanego przełącznik DIP ma dwa rzędy pinów w odstępach 2,54 mm, przy czym odstęp między rzędami wynosi 7,62 mm zgodnie ze standardem DIP (ang. *Dual-Inline Package* — pakiet dwurzędowy) i podobną konfiguracją otworów w płycie drukowanej. Przełączniki DIP montowane powierzchniowo mogą mieć rozstaw pinów wynoszący 2,54 mm lub 1,27 mm.

Większość układów DIP składa się z przełączników SPST, z których każdy może tworzyć lub przerywać połączenie między dwoma pinami umieszczonymi po przeciwnych stronach przełącznika. Położenia przełącznika są zwykle

oznaczone napisami *ON* (połączony) i *OFF* (rozłączony). Kilka przykładowych przełączników DIP pokazano na rysunku 6.15, a na rysunku 6.16 pokazano schemat wewnętrznych połączeń takiego przełącznika.



**Rysunek 6.15.** Przełączniki DIP mogą mieć różne liczby sekcji zwanych również torami, segmentami lub pozycjami



**Rysunek 6.16.** Schemat wewnętrznych połączeń przełącznika 8-sekcyjnego (16-pinowego)

Sekcje przełącznika DIP są niekiedy nazywane „pozycjami”, ale nie należy tego mylić z dwiema możliwymi pozycjami suwaka w każdym z przełączników składowych. Przełączniki DIP są produkowane jako 1-, 2-, 3-, 4-, 5-, 6-, 7-, 8-, 9-, 10-, 12- i 16-sekcyjne.

W pierwszych komputerach biurowych zgodnych ze standardem IBM podczas instalowania nowych podzespołów, na przykład dysku twardego, należało ustawić określone przełączniki DIP w wymaganej dla danej procedury kombinacji. Chociaż te zabiegi nie są już wymagane, przełączniki DIP są nadal obecne wszędzie tam, gdzie użytkownik jest wystarczająco kompetentny, aby umożliwić mu modyfikowanie sprzętowych ustawień urządzenia. Ze względu na małe wymiary przełączników składowych przestawianie

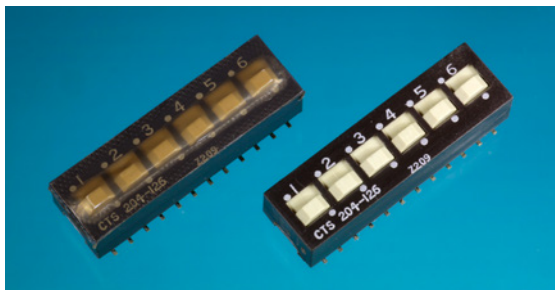
suwaków łatwiej się wykonuje małym wkrętakiem lub końcówką długopisu niż palcem.

Przełączniki DIP znajdują zastosowanie również w konstrukcjach prototypowych, gdyż umożliwiają szybkie i wygodne testowanie obwodów w różnych konfiguracjach połączeniowych i różnych trybach działania.

Większość tego typu przełączników ma wyprowadzenia na tyle długie, że można je wciskać bezpośrednio w płytkę stykową.

Jeśli chodzi o rodzaje przełączników DIP, to można wyróżnić standardowe, niskoprofilowe, pionowe (ustawione pod kątem prostym do płytki montażowej) i fortepianowe (z dźwigienkami naciskanymi podobnie jak klawisze fortepianu, a nie przesuwanymi w płaszczyźnie równoległej do powierzchni przełącznika).

Istnieją odmiany typu SPDT, DPST, DPDT, 3PST i 4PST, ale są mało popularne. W takich przełącznikach zewnętrzne wyprowadzenia łączą się z dodatkowymi stykami, więc przed montażem warto sprawdzić w karcie produktu, jak te wewnętrzne połączenia wyglądają. Na rysunku 6.17 pokazano przełącznik DIP z rozstawem pinów 2,54 mm przystosowany do montażu powierzchniowego. Po lewej jest widoczny z osłoną chroniącą przez zanieczyszczeniami w czasie lutowania metodą „na fali”, a po prawej — bez tej osłony.



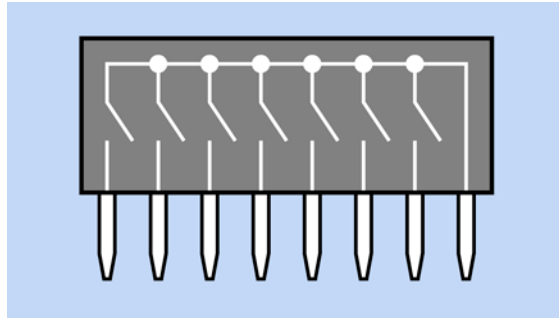
**Rysunek 6.17.** Powierzchniowo montowany przełącznik DIP typu SPDT jest sprzedawany z osłoną chroniącą suwaki w czasie lutowania na fali (po lewej); po prawej ten sam przełącznik ze zdjętą osłoną

## Przełącznik typu SIP

Przełącznik SIP jest układem bardzo małych przełączników, czym przypomina przełącznik typu DIP, ale zamiast dwóch rzędów wyprowadzeń ma tylko jeden rząd. Zastosowania obu typów przełączników są podobne, a o wyborze jednego

lub drugiego zwykle decyduje ilość dostępnego miejsca na płytce montażowej.

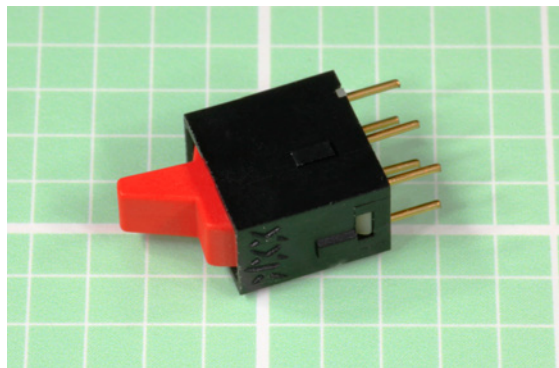
Zwykle jedna strona przełączników składowych ma wspólne wyprowadzenie. Wewnętrzne połączenia w typowym przełączniku SIP 8-sekcyjnym pokazano na rysunku 6.18. Rozstaw pinów jest tu taki sam jak w klasycznym przycisku DIP i wynosi 2,54 mm.



**Rysunek 6.18.** Schemat wewnętrznych połączeń 8-sekcyjnego przełącznika SIP ze wspólną szyną dla wszystkich sekcji

## Przełącznik płetwowy

Przełącznik płetwowy ma spłaszczoną i stosunkowo dużą dźwignię, która umożliwia operowanie przełącznikiem w sposób wygodny i pewny. Pod względem budowy wewnętrznej przypomina przełącznik kołyskowy i najczęściej jest stosowany w obwodach zasilających prądu przemiennego. Niektóre przełączniki dźwigniowe są też sprzedawane z aktywatorami płetwowymi. Miniaturowy przełącznik płetwowy jest pokazany na rysunku 6.19.



**Rysunek 6.19.** Miniaturowy przełącznik płetwowy; wersje pełnowymiarowe są często stosowane jako wyłączniki zasilania

## Przełącznik wandaloodporny

Zazwyczaj ma korpus wykonany ze stali nierdzewnej i jest odporny na rozmaite próby uszkodzenia mechanicznego. Przeważnie jest także wodoodporny. Przykładem tego typu konstrukcji są przyciski służące do przełączania sygnalizacji świetlnej przez przechodniów.

## Mikroprzełącznik (tact switch)

Jest w zasadzie **mikroprzyciskiem**, a ten jest opisany w punkcie „Mikroprzycisk (tact switch)”, w rozdziale 5., „Przycisk”.

## Sposoby mocowania

Przycisk przeznaczony do *montażu panelowego* ma nagwintowany przepust i ten jest wkładany od tyłu panelu w otwór o odpowiednio dopasowanej średnicy. Na wystającą z przodu część przepustu nakładane są podkładka zabezpieczająca i nakręcana nakrętka (często nawet dwie).

*Montaż panelowy przedni* oznacza, że wkręty widoczne na przedniej powierzchni panelu są wkręcane w specjalne uchwyty na obudowie przełącznika. Manipulator przełącznika jest wtedy dostępny poprzez otwór wycięty w panelu. W ten sposób montowane są zazwyczaj przełączniki kołyskowe i niekiedy suwakowe.

W *montażu podpanelowym* przełącznik jest mocowany do odrębnej płytki lub chassis za panelem sterującym. Manipulator przełącznika jest dostępny poprzez otwór wycięty w panelu.

*Montaż zatrzaskowy* wymaga, aby przełącznik był wyposażony w sprężyste wypusty po obu stronach obudowy. Wypusty te po przecięciu przez otwór wycięty w panelu rozprężają się i blokują położenie przycisku.

Przełączniki przeznaczone do *montażu na płycie drukowanej* mają wyprowadzenia przystosowane do przewlekania przez płytkę i lutowania; mogą też mieć dodatkowe punkty lutownicze wzmacniające konstrukcję pod względem mechanicznym.

Przełączniki przeznaczone do *montażu powierzchniowego* są przytwierdzane do płytki w taki sam sposób jak wszystkie inne elementy montowane powierzchniowo.

## Wyprowadzenia

Przełączniki (i przyciski) są dostępne z różnego rodzaju wyprowadzeniami.

*Uszka lutownicze* to małe blaszki z dziurką, przez którą można przeciągnąć końcówkę przewodu, zanim się ją przylutuje.

*Końcówki przewlekane* to piny wystające z dolnej części korpusu przełącznika, które można wkładać w otwory płytki drukowanej. Ten sposób mocowania nosi nazwę *montażu przewlekanego*. Niekiedy wyprowadzenia są wygięte pod kątem prostym, a przełącznik jest montowany na płasko z manipulatorem wystającym z boku. Mówimy wtedy o *montażu przewlekanym prostopadłym*. Wielu producentów oferuje ten sam produkt z wyprowadzeniami prostymi i zgiętymi, ale katalogi raczej o tym nie informują. Trzeba po prostu dokładnie przejrzeć kartę danego produktu.

*Końcówki konektorowe* mają kształt łopatkowy i nadają się do łączenia z nasuwkami konektorowymi powszechnie stosowanymi w elektrycznych instalacjach samochodowych. Zdarzają się też rozwiązania hybrydowe będące połączeniem końcówki konektorowej z uszkiem lutowniczym.

*Złącza śrubowe* składają się z płaskiej końcówki i zamontowanej w niej śruby umożliwiającej podłączenie przewodu bez lutowania.

*Wyprowadzenia drutowe* są elastycznymi izolowanymi przewodami o długości kilku centymetrów, często z odizolowanymi i ocynowanymi końcami. Ten rodzaj wyprowadzeń jest coraz rzadziej stosowany.

## Pokrycie końcówek i styków

Styki wewnętrzne są zazwyczaj powlekanie srebrem lub złotem. Stopy niklu, cyny i srebra są tańsze, ale rzadziej się je stosuje. Inne rozwiązania są mało popularne.

## Wartości

Przełączniki przeznaczone do stosowania w urządzeniach elektronicznych są mocno zróżnicowane pod względem mocy. Przełączniki kołyskowe, płetwowe i dźwigniowe są często używane do włączania i wyłączania zasilania, a ich wartości znamionowe to przeważnie 10 A przy 125 V AC, choć niektóre przełączniki dźwigniowe są w stanie przełączać

prądy o natężeniu sięgającym nawet 30 A. Przełączniki mi-gowe i wyłączniki krańcowe mają podobne wartości znamionowe, ale wersje miniaturowe są oczywiście słabsze. Przełączniki suwakowe nie potrafią przełączać dużych mocy i zazwyczaj nie przekraczają 0,5 A przy 30 V DC. W przypadku przełączników DIP i SIP wartości te wynoszą zaledwie 100 mA i 50 V, a ponadto urządzenia te nie są przystosowane do ich częstego używania. Zazwyczaj są używane przy całkowicie wyłączonym zasilaniu.

## Stosowanie

### Łączniki zasilania

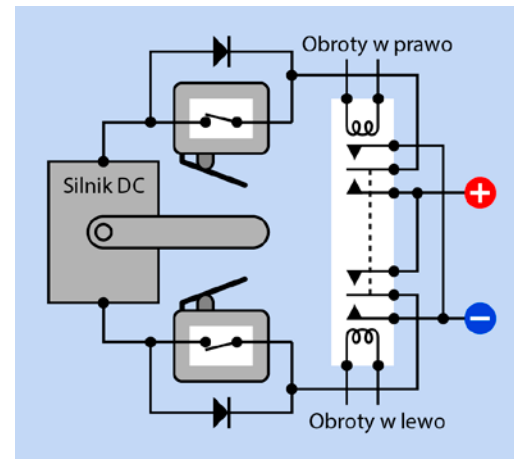
Gdy prosty przełącznik SPST jest używany do włączania i wyłączania zasilania w obwodzie prądu stałego, zazwyczaj jest umieszczany po stronie dodatniego bieguna źródła prądu, czyli po stronie *wyższego potencjału*. Podstawowym powodem, dla którego powinno się postępować zgodnie z tą powszechnie uznawaną konwencją, jest przewidywalność konstrukcji urządzeń elektronicznych zmniejszająca możliwość popełniania błędów przy ich użytkowaniu i konserwacji.

W obwodach prądu przemiennego przełącznik załączająco-wyłączający należy zawsze montować po stronie zacisku „gorącego”, a nie „neutralnego”. Jeśli te sprawy nie są dla Ciebie oczywiste (ich wyjaśnienie wykracza poza ramy *Encyklopedii*), zajrzyj do podręcznika z podstaw elektrotechniki. Zastosowanie przełącznika DPST w celu zamykania i przerywania obwodu po obu stronach zasilania prądem przemiennym może być w pewnych sytuacjach dodatkowym zabezpieczeniem przeciwporażeniowym. Obwód uziemienia w żadnym przypadku nie powinien być przerywany, gdyż urządzenie podłączone do źródła prądu powinno być zawsze uziemione.

### Wyłączniki krańcowe

Na rysunku 6.20 pokazano układ zasilania silnika elektrycznego na prąd stały. Oprócz silnika układ zawiera dwie **diody** prostownicze zbcownikowane wyłącznikami krańcowymi i dwucewkowy **przełącznik** zatraskowy typu DPDT. Autor schematu przyjął założenie, że silnik obraca się w prawo (zgodnie z ruchem wskazówek zegara), gdy jego dolny zacisk jest połączony z dodatnim biegunem źródła prądu, i zmienia kierunek obrotów na przeciwny, gdy dodatni biegun źródła

jest podłączony do zacisku górnego. W każdym wyłączniku krańcowym zostały użyte (i pokazane) tylko dwa styki NC (normalnie zamknięte). Pozostałe styki, jeśli istnieją, nie mają tu znaczenia.



**Rysunek 6.20.** W tym układzie normalnie zwarte styki wyłączników krańcowych rozwierają się pod naciskiem ramienia zamocowanego na osi silnika i odłączają zasilanie, gdy silnik wykona obrót o dozwolony kąt; dzięki temu nie dochodzi do przecięcia silnika i w konsekwencji spalenia jego uzwojeń; za podawanie odpowiednio spolaryzowanego napięcia na zaciski silnika odpowiada dwucewkowy przełącznik zatraskowy; dioda prostownicza zamyka obwód dla prądu płynącego w przeciwnym kierunku, gdy odpowiadający jej wyłącznik krańcowy jest otwarty

Silnik jest zasilany za pośrednictwem dwucewkowego przełącznika zatraskowego typu DPDT, który podtrzymuje swój bieżący stan bez pobierania jakiegokolwiek energii (nie jest do tego potrzebny przepływ prądu przez jego cewki). Gdy w górnej cewce przełącznika pojawia się impuls prądowy (z innego źródła), następuje zwarcie styków ruchomych z górnymi stykami nieruchomymi i w konsekwencji połączenie dodatniego bieguna baterii z dolnym zaciskiem silnika. Silnik obraca się w prawo do momentu, w którym ramię naciśnie dźwignię dolnego wyłącznika krańcowego i spowoduje rozwarcie jego styków. Dioda bocznikująca ten wyłącznik nie przewodzi prądu płynącego od źródła do silnika, więc silnik przestaje działać.

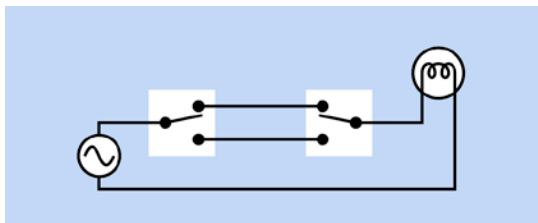
Pojawienie się impulsu prądowego w dolnej cewce przełącznika powoduje zwarcie styków ruchomych z dolnymi stykami nieruchomymi i tym samym połączenie dodatniego bieguna baterii z górnym zaciskiem silnika. Silnik obraca się

więc w lewo i dzieje się tak do momentu, w którym ramię zamocowane na osi silnika naciśnie dźwignię górnego wyłącznika krańcowego, powodując rozwarcie jego styków, co oznacza przerwę w obwodzie i ponowne zatrzymanie silnika. Ten prosty układ umożliwia włączanie silnika z obrotami w jedną lub drugą stronę za pomocą dowolnie krótkich impulsów prądowych bez obawy, że zostanie przeciążony, gdy osiągnie skrajne położenie i napotka zbyt duży opór. Właśnie w taki sposób odbywa się podnoszenie i opuszczanie szyby bocznych w samochodach.

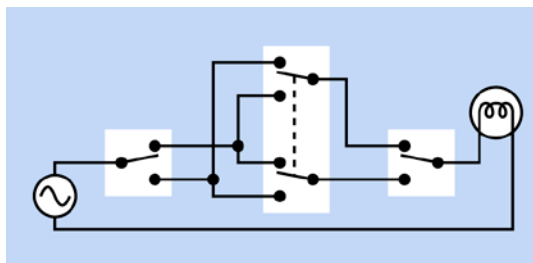
Jeśli przewidywane jest sterowanie wyłącznie ręczne, bez żadnej automatyki, to zamiast przekaźnika zatraskowego można zastosować przycisk typu DPDT. Wtedy jednak trzeba naciskać przycisk tak długo, jak długo silnik będzie obracał ramię do przeciwnego położenia skrajnego. W niektórych sytuacjach przekaźnik może się okazać lepszym rozwiązaniem, a na pewno wygodniejszym.

## Obwody logiczne

Można konstruować obwody logiczne złożone z samych przełączników (na przykład obwód sumujący liczby binarne), ale zazwyczaj jest to mało praktyczne. Zapewne najbardziej znanymi i najprostszymi przykładami takiego układu jest para przełączników SPDT służących do włączania światła na klatce schodowej, w przedpokoju lub długim korytarzu. Jeden z tych przełączników (zwanymi schodowymi) jest montowany na dole, drugi u góry (lub na obu końcach korytarza) i każdy z nich może włączyć światło, jeśli jest wyłączone, lub je wyłączyć, jeśli jest włączone. Schemat połączeń jest pokazany na rysunku 6.21. Aby umożliwić włączanie i wyłączenie światła w trzecim punkcie, należy umieścić tam przełącznik DPDT (zwany w tym przypadku krzyżowym) i połączyć go z tamtymi dwoma w sposób pokazany na rysunku 6.22.



**Rysunek 6.21.** Taki sposób połączenia przełączników SPDT tworzy instalację schodową umożliwiającą włączanie światła, jeśli jest wyłączone, i wyłączenie go, jeśli jest włączone, za pomocą dowolnego z tych przełączników



**Rysunek 6.22.** Jeśli oświetlenie schodowe ma być włączane i wyłączane za pomocą więcej niż dwóch przełączników, te dodatkowe przełączniki powinny być typu DPDT

## Rozwiązania alternatywne

Zdecydowany spadek kosztów produkcji **mikrokontrolerów** spowodował, że coraz częściej są one stosowane zamiast tradycyjnych przełączników. Samochodowy system opcji nagłośnienia wybieranych za pośrednictwem mikrokontrolera może być sterowany przy użyciu jednego **enkodera obrotowego** z wbudowanym przyciskiem SPST, a nie tak jak kiedyś za pomocą wielu przełączników i potencjometrów. Rozwiązanie z enkoderem obrotowym zajmuje mniej miejsca, jest tańsze (zwłaszcza gdy mikrokontroler pełni jeszcze inne funkcje) i bardziej niezawodne, ponieważ zmniejsza się liczba zastosowanych części elektromechanicznych. Inną kwestią jest łatwość użycia — to już zależy od gustu i przyzwyczajzeń użytkownika. O stosowaniu tradycyjnych przełączników powinny decydować przede wszystkim koszty i ergonomia.

## Możliwe błędy

### Powstawanie łuku elektrycznego

Jeśli podczas zwierania i rozwierania styków powstaje między nimi **łuk elektryczny**, ich powierzchnia ulega szybko erozji. Do takich wylądowań dochodzi zazwyczaj w układach z dużymi prądami (powyżej 10 A) lub wysokimi napięciami (powyżej 100 V). Częstym powodem powstania łuku jest indukcyjny charakter obciążenia, który wywołuje ujemną siłę elektromotoryczną podczas zamykania obwodu i dodatnią podczas przerywania. Uderzenie prądowe może być wtedy wielokrotnie większe w porównaniu z prądem płynącym podczas normalnej pracy urządzenia. W obwodach prądu stałego można to zjawisko ograniczać przez bocznikowanie

obciążenia **diodą** prostowniczą (spolaryzowaną wstecznie w stosunku do kierunku przepływu prądu roboczego). Taką diodę często określa się mianem *rozładowniczej* lub *upustowej*. W obwodach prądu przemiennego, w których diody bocznikującej nie da się zastosować, wprowadza się *tłumik przebieg* (prostą kombinację rezystancji i pojemności). Tłumik przebieg można zastosować również w obwodzie prądu stałego jako bocznik samego przełącznika. Więcej informacji na ten temat znajdziesz w punkcie „Tłumik”, w rozdziale 12., „Kondensator”.

Do wyłączania obciążeń o charakterze indukcyjnym powinno się stosować przełączniki o prądzie znamionowym dwukrotnie większym od prądu pobieranego przez to obciążenie w stanie ustalonym.

## Zimne luty

Przełączniki służące do włączania i wyłączania prądów o dużym natężeniu mają solidne wyprowadzenia, które łączą się z równie solidnymi przewodami. Ze względu na dużą pojemność cieplną przewodów i wyprowadzeń podczas lutowania są one w stanie przejść znacznie więcej ciepła bez podnoszenia swojej temperatury niż małe elementy montowane na płytkach drukowanych. Dlatego potrzebna jest odpowiednio duża moc zastosowanej lutownicy — przynajmniej 30 W. Słabsze lutownice mogą sobie nie poradzić z dostatecznym roztopieniem spoiwa lutowniczego, w rezultacie czego powstają tzw. zimne luty. Połączenia z zimnymi lutami mają zwiększoną rezystancję i małą wytrzymałość mechaniczną. Wcześniej czy później dochodzi do zerwania takiego połączenia. Prawidłowo zlutowane połączenie powinno wytrzymać próbę kilkukrotnego odginania przewodu.

## Zwarcia

Wiele przełączników jest podłączanych do obwodu za pomocą uszek lutowniczych, zacisków śrubowych lub nasuwek, więc trudno wykluczyć samoistne i przypadkowe przerywanie się takich połączeń, a odłączone przewody mogą stanowić poważne zagrożenie. Jako dodatkowe zabezpieczenie tych połączeń należy stosować koszulki termokurczliwe, a wyłączniki zasilania powinny być zawsze montowane w połączeniu z odpowiednimi **bezpiecznikami**.

## Zabrudzenie styków

Wszędzie tam, gdzie może dojść do zawilgocenia lub zabrudzenia, należy stosować przełączniki uszczelnione. Przełączniki suwakowe są szczególnie podatne na zabrudzenie i przy tym trudne do uszczelnienia. Zabrudzenie lub pogorszenie stanu styków w przełącznikach stosowanych w sprzęcie audio może być przyczyną nieprzyjemnych dla ucha trzasków.

## Niewłaściwy rodzaj wyprowadzeń

Przełączniki są zazwyczaj sprzedawane w wielu odmianach różniących się rodzajem wyprowadzeń, więc łatwo popełnić błąd przy ich zamawianiu. Wyprowadzeniami mogą tu być piny przystosowane do montażu przewlekanego, zaciski śrubowe, wsuwki do szybkiego łączenia z nasuwkami lub uszka lutownicze. Mogą też być wyprowadzenia przystosowane do montażu powierzchniowego. Jeśli w projekcie przewidziano montaż przełącznika na płytce drukowanej metodą przewlekaną, a zakupiony egzemplarz będzie miał uszka lutownicze, projektu nie da się zrealizować.

Części elektroniczne z reguły mają przypisane kody oznaczające rodzaj wyprowadzeń, więc warto te kody poznać i zwracać na nie uwagę.

## Drganie styków

Gdy dwa styki łączą się gwałtownie ze sobą, powstają mikroskopijne wibracje powodujące krótkotrwałe zakłócenia połączenia. Ludzkie zmysły mogą tego nie rejestrować, ale czułe **układy logiczne** mogą te krótkie przerwy połączenia traktować jako serię impulsów. Dlatego stosuje się różne metody *tłumienia drgań* w przełącznikach przeznaczonych do pracy w obwodach logicznych. Zagadnienie to jest dokładniej opisane w drugim tomie *Encyklopedii*, w haśle poświęconym układom logicznym.

## Zużycie mechaniczne

W każdym przełączniku dźwigniowym lub kołyskowym istnieje mechanizm obrotowy, który w trudnych warunkach pracy może dość szybko ulec zużyciu. Problemem jest tu również tarcie pomiędzy zaokrągloną końcówką dźwigni a blaszką ruchomego styku.

Zmęczenie lub wada materiału może być przyczyną awarii sprężyny w przełączniku migowym lub krańcowym, choć

takie usterki zdarzają się raczej rzadko. Znacznie mniej trwałe są przełączniki suwakowe, ponieważ styki trą tu jeden o drugi przy każdej zmianie stanu przełącznika.

Wszędzie tam, gdzie przewiduje się częste używanie przełącznika, a jego uszkodzenie byłoby dużym problemem, należy zdecydowanie unikać stosowania tanich egzemplarzy.

### Niewłaściwy montaż

W przypadku przełączników mocowanych do obudowy urządzenia za pomocą nakrętki ta może się obłuzować, co może skończyć się tym, że przy kolejnej próbie użycia przełącznika zostanie on wciśnięty do wnętrza urządzenia. Z kolei zbyt mocne dokręcanie nakrętki może doprowadzić do zerwania gwintu na korpusie przełącznika — szczególnie trzeba na to uważać przy montażu tanich komponentów z korpusami plastikowymi. Przy ostatecznym mocowaniu

takiego elementu warto rozważyć zabezpieczenie nakrętki kropelką kleju LOCTITE lub podobnego. Rozmiary nakrętek są mocno zróżnicowane i w razie uszkodzenia bądź zgubienia znalezienie zamiennika może być dość czasochłonne.

### Zagmatwane schematy połączeń

W niektórych schematach urządzeń elektronicznych poszczególne segmenty przełącznika wielobiegunowego mogą być narysowane w różnych, dość odległych od siebie, miejscach. Zazwyczaj, ale nie zawsze, segmenty te są połączone linią przerywaną. W przypadku braku takiej linii należy szukać oznaczeń wskazujących na wspólne pochodzenie poszczególnych segmentów przełącznika. Na przykład oznaczenia SW<sub>1</sub>(a) i SW<sub>1</sub>(b) niemal na pewno odnoszą się do dwóch segmentów tego samego przełącznika wielobiegunowego.



# Przełącznik obrotowy

Nie należy go mylić z **enkoderm obrotowym**, któremu poświęcono w *Encyklopedii* odrębne hasło.

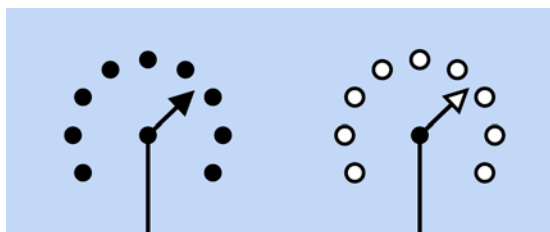
## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **przełącznik** (rozdział 6.),
- **enkoder obrotowy** (rozdział 8.).

## Funkcja

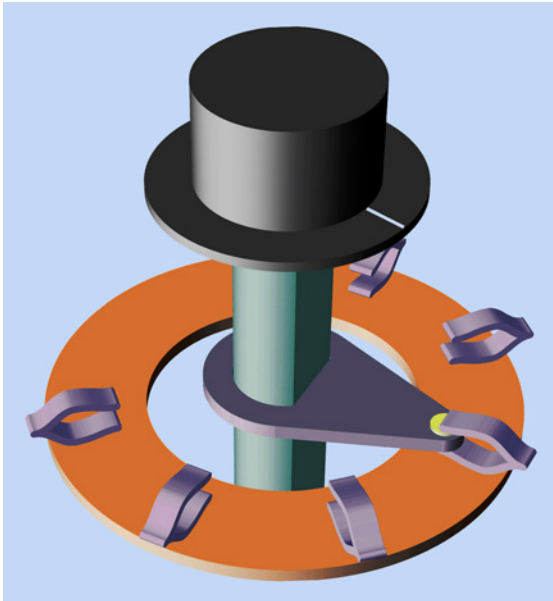
Przełącznik obrotowy realizuje połączenie elektryczne między *stykiem obrotowym* zamontowanym na ośce obracanej za pomocą pokrętła a jednym lub kilkoma stykami stałymi. Dawniej służył do wybierania zakresów fal w odbiorniku radiowym, kanałów w telewizorze i wejść sygnałowych we wzmacniaczu stereofonicznym. Od lat 90. ubiegłego wieku jest sukcesywnie wypierany przez **enkoder obrotowy**. Nadal odgrywa jednak istotną rolę w zastosowaniach militarnych, w sprzęcie przenośnym, w przemysłowych systemach sterujących oraz innych zastosowaniach wymagających elementów odpornych na trudne warunki środowiskowe i dobrze znoszących intensywne użytkowanie. W przeciwieństwie do enkodera nie wymaga żadnych dodatkowych urządzeń elektronicznych interpretujących jego sygnały wyjściowe.

Dwa typowe symbole schematyczne przełącznika obrotowego są pokazane na rysunku 7.1. Pod względem funkcjonalnym są identyczne. Budowa wewnętrzna takiego przełącznika jest pokazana na rysunku 7.2. Oddzielne wyprowadzenie (nie widać go na rysunku) łączy się z ruchomym stykiem, który z kolei łączy się z poszczególnymi stykami nieruchomymi. Kolory na tym rysunku zostały dobrane pod kątem wyraźnego odróżnienia poszczególnych części i nie mają nic wspólnego z kolorystyką prawdziwego przełącznika.



**Rysunek 7.1.** Typowe symbole schematyczne przełącznika obrotowego; oba symbole są funkcjonalnie takie same; liczba styków nieruchomych może być inna w zależności od przełącznika

Kilka rzeczywistych przełączników obrotowych pokazano na rysunku 7.3. U góry po lewej jest przełącznik *otwarty*, którego styki nie są w żaden sposób chronione przed zabrudzeniem. Takie urządzenia są już rzadko spotykane. U góry po prawej jest przełącznik 12-pozycyjny jednobiegunowy o prądzie znamionowym 2,5 A przy 125 V AC. U dołu po lewej jest przełącznik 4-pozycyjny jednobiegunowy o prądzie znamionowym 0,3 A przy 16 V DC lub 100 V AC. U dołu po prawej jest przełącznik dwupozycyjny dwubiegunowy o takich samych parametrach elektrycznych jak ten po lewej. Wszystkie widoczne tu przełączniki w obudowach są przystosowane do montażu panelowego lub na płytce drukowanej metodą przewlekania końcówek.



**Rysunek 7.2.** Uproszczony obraz wnętrza przełącznika obrotowego typu SP6T; kolory zostały dobrane tak, aby rysunek był przejrzysty



**Rysunek 7.3.** Przykłady przełączników obrotowych; szczegółowy opis znajduje się w tekście powyżej

## Działanie

Przełącznik może mieć kilka biegunów połączonych z odrębnymi stykami obrotowymi. Styki te najczęściej znajdują się na odrębnych *poziomach*, ale dwa, trzy lub cztery styki ustawione w różnych kierunkach mogą być umieszczone na jednym poziomie, jeśli przełącznik ma niewiele pozycji przełączeniowych.

Przełączniki obrotowe zwykle są wykonywane w wersji 12-pozycyjnej, ale są wyposażane w *ograniczniki* pozwalające obniżyć tę liczbę do żądanej wartości. Ogranicznikiem może być bolec przymocowany do podkładki otaczającej tuleję przepustową przełącznika. Bolec włożony w odpowiedni otwór podkładki zapobiega obracaniu się ruchomego styku poza wyznaczone w ten sposób położenie graniczne. Na przykład w przełączniku 8-pozycyjnym można ograniczyć liczbę możliwych pozycji do siedmiu, sześciu, a nawet tylko do dwóch.

W informacjach technicznych dotyczących przełącznika obrotowego często podawany jest kąt obrotu pomiędzy sąsiednimi pozycjami. W przełącznikach 12-pozycyjnych zazwyczaj wynosi on 30°.

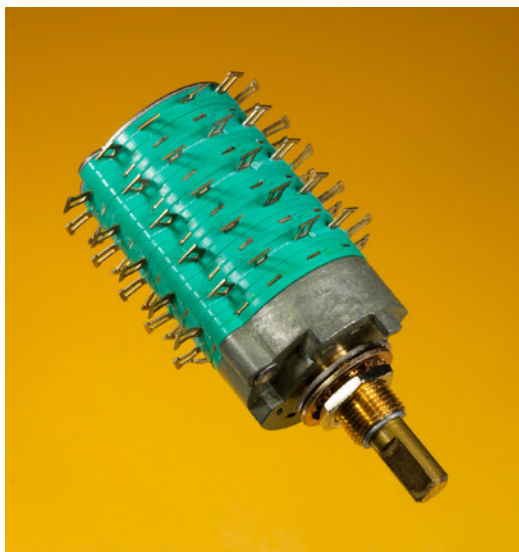
## Rodzaje

### Tradycyjne przełączniki obrotowe

Tradycyjne przełączniki obrotowe są przystosowane do montażu w płycie panelowej i mają średnicę od 2,5 cm do 4 cm. Odległości między poziomami przełącznika wynoszą ok. 0,8 cm. Przy przejściu z jednej pozycji do drugiej przełącznik wydaje charakterystyczne kliknięcie, które jest nie tylko słyszalne, ale także wyczuwalne.

Na rysunku 7.4 jest pokazany potężny przełącznik o pięciu poziomach, pięciu biegunach (po jednym na każdym poziomie) i maksymalnie 12 pozycjach. Styki mogą przełączać prąd o natężeniu do 0,5 A przy 28 V DC. Tego typu solidne przełączniki obrotowe należą już do rzadkości.

Jeśli styk obrotowy łączy się z następnym stykiem nieruchomym przed całkowitym rozłączeniem się z poprzednim stykiem, to przełączanie ma charakter *zwarciaowy*, określane też jako *zwarcie przed rozwarciem*. W przełącznikach działających *bezzwarciaowo*, czyli w trybie określanym jako *rozwarcie*



**Rysunek 7.4.** Obrotowy przełącznik 5-poziomowy i 12-poziocynny

*przed zwarcie*m, ma miejsce krótka przerwa między jednym połączeniem a drugim. Jest to niezwykle ważny aspekt działania przełącznika i ma istotne znaczenie dla funkcjonowania podłączonych do niego urządzeń.

Ośka może mieć zakończenie gładkie, rowkowane lub o przekroju w kształcie litery D. Pokrętło jest raczej rzadko dołączane do przełącznika i przy wyborze należy je dopasować do zakończenia ośki. Średnica ośki może być podana w calach lub milimetrach, ale najczęściej wynosi 6 mm. Niektóre przełączniki z ośką rowkowaną są sprzedawane z przejściówką umożliwiającą zastosowanie pokrętła z otworem w kształcie litery D. Przejściówkę można nakładać w co najmniej 12 różnych położeniach, co pozwala ustawić pokrętło zgodnie z nadrukiem informacyjnym na płycie panelowej.

Miniaturowe przełączniki obrotowe mogą mieć średnicę rzędu 1 cm i zwykle mają wyprowadzenia w formie pinów przystosowanych do montażu przewlekanego na płytkach drukowanych. Takie przełączniki mają zazwyczaj mniejsze wartości znamionowe prądu i napięcia niż ich odpowiedniki pełnowymiarowe.

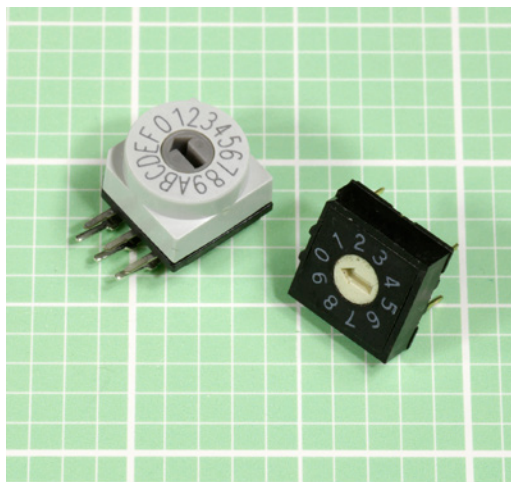
Przełączniki obrotowe należy solidnie mocować, aby mogły oprzeć się dużym siłom wywieranym przez użytkowników. Przy montażu na płycie panelu sterującego należy mocno dociągnąć nakrętkę na nagwintowanym przepuście

przełącznika. Przełączniki montowane na płytce drukowanej mają ośkę wyprowadzoną na zewnątrz obudowy urządzenia. W celu zminimalizowania skutków zbyt dużego nacisku na płytkę stosuje się przełączniki z zaczepami o mniejszej wytrzymałości niż w egzemplarzach pełnowymiarowych, a na ośkę zakłada się mniejsze pokrętła utrudniające stosowanie większych sił.

## Przełączniki obrotowe typu DIP

Typowy *przełącznik DIP* jest liniowym układem miniaturowych przełączników SPST zaprojektowanym zgodnie ze standardem DIP (ang. *Dual-Inline Package* — pakiet dwurzędowy), aby wyprowadzenia pasowały do układu otworów w płytce drukowanej. Ten typ przełącznika jest opisany w rozdziale 6, „Przełącznik”. *Przełącznik obrotowy DIP* (zwany również *przełącznikiem obrotowym o wyjściu kodującym*, *przełącznikiem kodującym* lub po prostu *DIP-em obrotowym*) może się kojarzyć ze standardem DIP tylko dzięki nazwie. Ma kształt kwadratu o boku 6 mm i najczęściej pięć wyprowadzeń, z których jedno pełni funkcję wejścia, a pozostałe są wyjściami. Odstępy między wyprowadzeniami wynoszą 2,54 mm. Funkcje poszczególnych pinów i ich układ nie są ujednolicone.

Tarcza na górnej powierzchni przełącznika ma 10 pozycji (cyfry od 0 do 9) lub 16 (cyfry od 0 do 9 i litery od A do F). Przykłady obu rodzajów są pokazane na rysunku 7.5.



**Rysunek 7.5.** Obrotowy przełącznik DIP zwany także przełącznikiem kodującym może być w niektórych zastosowaniach zamiennikiem typowego przełącznika DIP

Każda pozycja na tarczy przełącznika oznacza zwarcie określonych par styków wewnętrznych zgodnie z kodem dwójkowo-dziesiętnym (w przełączniku 10-pozycyjnym) lub szesnastkowym (w przełączniku 16-pozycyjnym). Stany pinów wyjściowych odpowiadające poszczególnym pozycjom tarczy są pokazane na rysunku 7.6. Przełączniki obrotowe typu DIP są elementami bardzo delikatnymi i nie powinno się ich stosować z myślą o częstym lub forsownym używaniu. Należy je raczej traktować jako urządzenia typu „nastaw i zapomnij”, których stan jest ustalany po zamontowaniu na płytce drukowanej i potem rzadko modyfikowany.

Każda pozycja przełącznika oznacza konkretną kombinację kodu binarnego, a zatem można to potraktować jako przykład *kodowania absolutnego*. Przeciwieństwem jest *kodowanie przyrostowe* realizowane przez typowy **enkoder obrotowy**, który po prostu generuje serię nieróżniących się impulsów elektrycznych podczas obrotu tarczy.

Przełącznik o *kodowaniu prostym* tworzy połączenia między pinem wejściowym i odpowiednimi pinami wyjściowymi w taki sposób, aby pojawienie się logicznej jedynki na wejściu oznaczało pojawienie się jej również na wyjściu. W wersji z *kodowaniem komplementarnym* wyjście jest odwrotnością wejścia. Przełącznik stosuje się z reguły w połączeniu z **mikrokontrolerem**, którego cztery piny wejściowe odbierają informację o bieżącej pozycji przełącznika — jednej z dziesięciu lub jednej z szesnastu.

Niektórzy producenci oferują obrotowe przełączniki DIP 6-pinowe z dwoma rzędami po trzy piny, przy czym oba piny środkowe są wewnętrznie połączone i pełnią funkcję bieguna.

DIP-y obrotowe są dostępne w wersjach z rowkiem na wkrętak, małą gałką rowkowaną lub dużą gałką. Wersja z rowkiem na wkrętak ma minimalną wysokość, co może mieć znaczenie, gdy nad płytką drukowaną jest niewiele miejsca. Wariant *prostopadły* jest montowany pod kątem 90° do powierzchni płytki i zajmuje na niej mniej miejsca niż wersja równoległa. Taki właśnie przełącznik jest pokazany na rysunku 7.5, po lewej stronie.

Większość tego typu przełączników jest przystosowana do montażu przewlekanego, ale produkowane są także wersje do montażu powierzchniowego.

Switch Position	Pin 1	Pin 2	Pin 3	Pin 4
0	●	●	●	●
1	●	●	●	●
2	●	●	●	●
3	●	●	●	●
4	●	●	●	●
5	●	●	●	●
6	●	●	●	●
7	●	●	●	●
8	●	●	●	●
9	●	●	●	●
A	●	●	●	●
B	●	●	●	●
C	●	●	●	●
D	●	●	●	●
E	●	●	●	●
F	●	●	●	●

**Rysunek 7.6.** Stany dodatnie (kropki czerwone) i ujemne (kropki czarne) czterech pinów wyjściowych 16-pozycyjnego obrotowego przełącznika DIP przy założeniu, że pin wspólny jest połączony z dodatnim biegunem źródła zasilania; w przełączniku 10-pozycyjnym dostępne są tylko stany dla pozycji od 0 do 9; w przełączniku z kodowaniem komplementarnym stany dodatnie i ujemne zamieniają się miejscami

Zazwyczaj są to elementy uszczelnione na tyle, aby ich wnętrze nie uległo zanieczyszczeniu podczas lutowania na fali.

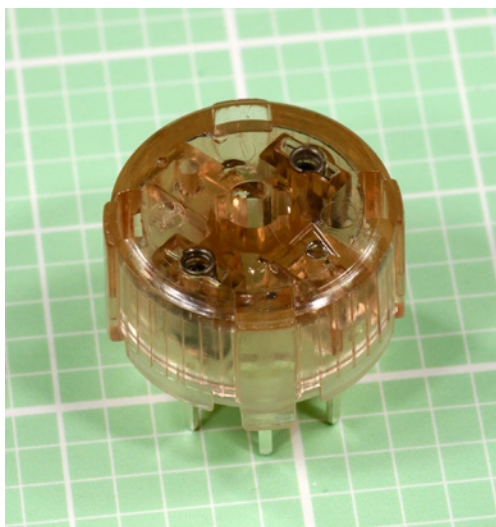
## Kod Graya

Kod Graya (dzieło Franka Graya) jest systemem absolutnego kodowania wyjść przełącznika przy użyciu ciągu liczb binarnych doboranych w taki sposób, aby sąsiednie liczby różniły się tylko jednym bitem. Taki ciąg ma tę zaletę, że minimalizuje ryzyko wygenerowania przypadkowych kodów przy obracaniu tarczą przełącznika — szczególnie w sytuacji, gdy

ma dojść do jednoczesnej zmiany kilku bitów, a ze względów mechanicznych (luzy, drgania itp.) ta jednoczesność może być zachwiana. Ten sposób kodowania jest raczej rzadko stosowany w przełącznikach obrotowych i enkoderach. Zazwyczaj to mikrokontroler zajmuje się właściwym interpretowaniem sygnałów wyjściowych z tych przyrządów i na podstawie zapisanej w jego pamięci tabeli kodowej ustala rzeczywisty kąt obrotu sterowanego mechanizmu.

## Miniaturowy przełącznik obrotowy

W sprzedaży dostępne są również miniaturowe przełączniki obrotowe o zwykłej konstrukcji z wyjściem niekodowanym i przeznaczone do montażu bezpośrednio na płytce drukowanej. W tego typu przełącznikach właściwą pozycję ustala się za pomocą małego wkrętaka lub klucza imbusowego. Na rysunku 7.7 pokazano przykładowy przełącznik miniaturowy jednobiegunowy, 8-pozycyjny. Jego styki mogą przełączać prąd stały o natężeniu do 0,5 A przy napięciu wynoszącym maksymalnie 30 V, ale nie jest przystosowany do częstego przełączania takich prądów.



**Rysunek 7.7.** Ten miniaturowy przełącznik obrotowy jest przystosowany do montażu na płytce drukowanej i może być używany do ustawiania parametrów urządzenia elektronicznego na etapie produkcji

## Mechaniczny enkoder obrotowy

*Mechaniczny enkoder obrotowy* działa podobnie jak obrotowy DIP, ale jest przeznaczony do pracy w trudniejszych

warunkach i przy większych obciążeniach. Przystosowany do montażu w płycie panelu sterowniczego ma zazwyczaj wymiary małego przełącznika obrotowego, a jego wyjścia są kodowane w systemie dwójkowo-dziesiętnym. Model Grayhill Series 51 umożliwia korzystanie z maksymalnie 12 pozycji generujących stosowne kody dla czterech wyprowadzeń wyjściowych. Model Bourns EAW oferuje 128 pozycji, z których każda generuje inny kod dla ośmiu wyprowadzeń.

## Przełącznik tarczowy z przyciskami lub pokrętłem

*Przełącznik tarczowy z przyciskami* jest prostym urządzeniem elektromechanicznym umożliwiającym wprowadzanie kodu liczbowego najczęściej jako parametru wejściowego w urządzeniach sterujących procesami przemysłowymi. Wersja dziesiętna zawiera tarczę z nadrukowanymi cyframi od 0 do 9, przy czym tylko jedna z tych cyfr jest widoczna w okienku wyciętym w przedniej ściance obudowy przełącznika. Przycisk ze znakiem plus umieszczony poniżej tarczy służy do jej obracania w stronę większych cyfr, a przycisk ze znakiem minus znajdujący się po przeciwnej stronie tarczy służy do jej obracania w stronę cyfr malejących. Złącze zajmujące tylną ściankę obudowy składa się z jednego pinu wejściowego i czterech wyjściowych oznaczonych cyframi 1, 2, 4 i 8. Niekiedy dodawany jest drugi zestaw pinów wyjściowych z cyframi 1, 2, 3 i 4. Suma stanów pinów wyjściowych jest zawsze równa wartości wskazywanej przez tarczę. Często takie przełączniki są fabrycznie łączone w zestawy po dwa, trzy lub cztery (każdy z odrębnymi złączami pinowymi), ale można także nabywać je pojedynczo i samodzielnie łączyć w zestawy.

*Przełącznik tarczowy z pokrętłem* różni się od tego z przyciskami tylko tym, że do obracania tarczy ma zamiast dwóch przycisków jedno pokrętło.

Dostępne są też wersje szesnastkowe z cyframi od 1 do 9 i literami od A do F, ale są mniej popularne niż dziesiętne.

## Przełącznik kluczykowy

*Przełącznik kluczykowy* jest w zasadzie 2-pozycyjnym przełącznikiem obrotowym, ale takim, który można obrócić dopiero po włożeniu kluczyka do zamka blokującego ośkę. Ten rodzaj przełącznika niemal zawsze ma konfigurację OFF-(ON) i jest używany do włączania i wyłączenia zasilania.

Przełączniki kluczykowe są stosowane w windach (kluczykami dysponuje straż pożarna), kasach fiskalnych i w urządzeniach do przetwarzania danych jako wyłączniki zasilania, jeśli czynność włączania i wyłączania zasilania jest zarezerwowana dla administratora systemu.

## Wartości

W przypadku pełnowymiarowych przełączników obrotowych wartości znamionowe zawierają się w przedziale od 0,5 A przy 30 V DC do 5 A przy 125 V AC w zależności od przeznaczenia danego elementu.

Typowy DIP obrotowy jest w stanie przełączać prąd 30 mA przy 30 V DC i może ciągle (bez przełączania) przewodzić prąd o natężeniu nie większym niż 100 mA przy 50 V DC.

## Stosowanie

Tradycyjnym zastosowaniem przełączników obrotowych jest ustawianie trybów działania rozmaitych urządzeń elektrycznych, ale mogą również służyć jako przyjazny dla użytkownika sposób wprowadzania danych. Na przykład za pomocą trzech 10-pozycyjnych przełączników użytkownik może łatwo wprowadzić dowolną liczbę całkowitą z przedziału od 0 do 999.

Do **mikrokontrolera** można podłączyć przełącznik obrotowy, którego piny wyjściowe są połączone z *drabinką rezystorową* na zasadzie wielopunktowego *dzielnika napięcia*, a wtedy każda pozycja tego przełącznika będzie dostarczała na wejście mikrokontrolera ściśle określone napięcie z zakresu od 0 do pełnego napięcia zasilającego. Schemat takiego połączenia jest pokazany na rysunku 7.8. Wszystkie rezystory mają tu jednakową wartość. Jeśli mikrokontroler będzie miał wspólną masę z przełącznikiem, to za pomocą widocznego tu dzielnika będzie można ustawiać napięcie wejściowe mikrokontrolera. Przetwornik analogowo-cyfrowy w mikrokontrolerze zamieni to napięcie na określoną wartość cyfrową. Zaletą takiego rozwiązania jest przede wszystkim to, że użytkownik może szybko ustawiać różne wartości na wyjściu mikrokontrolera, angażując tylko jedno jego wejście.

W przypadku drabinki złożonej z 8 rezystorów, jak na rysunku, każdy z nich mógłby mieć wartość 250  $\Omega$  (konkretna wartość będzie zależała od parametrów mikrokontrolera). Aby

uniknąć niejednoznaczności na wejściu mikrokontrolera, należałoby zastosować przełącznik działający bezzwarcowo. To z kolei oznaczałoby konieczność dodania na wejściu mikrokontrolera *rezystora podciągającego* o wartości ok. 10 k $\Omega$ , aby nie dopuścić do „zawieszenia w próżni” tego wejścia w czasie przemieszczania się ruchomego styku przełącznika pomiędzy dwoma stykami nieruchomymi. Poza tym program sterujący pracą mikrokontrolera może wymuszać ignorowanie wszelkich stanów wejściowych mających miejsce podczas zmian pozycji przełącznika.

Przełącznik obrotowy, jako urządzenie elektromechaniczne, jest dość wrażliwy na zabrudzenie i zawilgocenie, a na dodatek jest większy, cięższy i droższy od **enkodera obrotowego**. W niektórych zastosowaniach coraz częściej jest zastępowany przyciskami współpracującymi z mikrokontrolerem. Takie rozwiązanie można spotkać w cyfrowych budzikach i telefonach komórkowych. Jest ono nie tylko tańsze, ale również zajmuje mniej miejsca na panelu sterującym i pod nim.

## Możliwe błędy

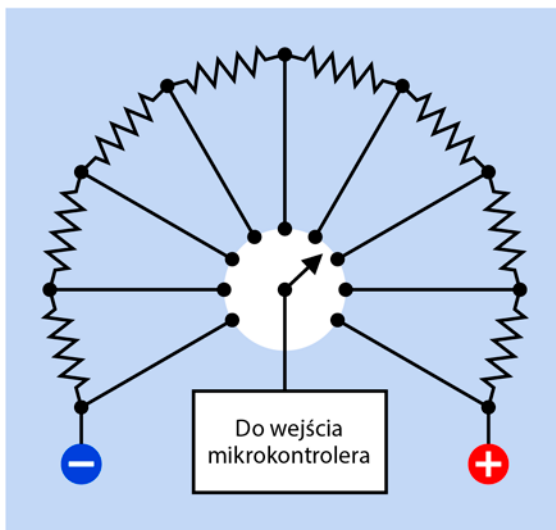
### Odsłonięte styki

Większość obecnie produkowanych przełączników obrotowych jest uszczelniona, ale nie wszystkie. Każdy przełącznik z odsłoniętymi stykami jest mocno narażony na zabrudzenie i zawilgocenie, a te czynniki mają negatywny wpływ na jakość połączeń między stykami. Z problemem tym borykali się użytkownicy dawnych telewizorów, w których konieczne było regularne czyszczenie styków przełącznika kanałów.

Odsłonięte styki są również bardziej narażone na skutki uboczne zmian temperatury występujących przy załączaniu i wyłączaniu urządzenia.

### Przeciążenie styków

W tanich przełącznikach obrotowych styki są mało odporne na wyładowania łukowe powstające przy powolnych zmianach pozycji przełącznika, gdy następuje powolne rozłączanie się i złączanie styków zamiast działania migowego charakteryzującego urządzenie o lepszej jakości wykonania. Jeśli w grę wchodzi przełączanie dużych prądów lub istnieje możliwość występowania udarów prądowych, należy zastosować przełącznik o odpowiednich wartościach znamionowych prądu i napięcia, bez względu na dodatkowe koszty.



**Rysunek 7.8.** Wyjścia przełącznika obrotowego można połączyć drabinką rezystorów, a do bieguna przyłączyć wejście mikrokontrolera z wbudowanym przetwornikiem analogowo-cyfrowym; przetwornik zamieni napięcie wejściowe na wartość cyfrową, a to oznacza, że jedno wejście mikrokontrolera wystarczy, aby uzyskać zróżnicowaną reakcję na wiele stanów wejściowych

Więcej informacji na temat tłumienia wyładowań łukowych w przełącznikach znajduje się w punkcie „Powstawanie łuku elektrycznego”, w rozdziale 6., „Przełącznik”.

## Niedopasowanie oznaczeń

Większość gałek służących do przestawiania pozycji przełącznika obrotowego ma wskaźnik — w postaci wypustu, wgłębienia lub namalowanej linii bądź kropki — pozwalający na wyraźne oznaczenie aktualnej pozycji. Jeśli ten wskaźnik nie pokrywa się z odpowiednim oznaczeniem na płycie panelu, użytkownik może mieć problem z ustawieniem właściwej pozycji. W urządzeniach budowanych własnoręcznie należy najpierw zamontować przełącznik, a dopiero potem przymocować do panelu płytkę laminatową, plastikową lub metalową z nadrukowanymi bądź wyrytymi oznaczeniami wszystkich pozycji. Należy też zadbać o solidne przymocowanie przełącznika, gdyż w przeciwnym razie może się on poluzować i zmienić położenie względem stałych oznaczeń.

## Nierozpoznanie przełącznika o działaniu zwarciovym

Zastosowanie przełącznika zwarciovego w miejscu, gdzie przewidziano użycie przełącznika bezzwarciovego, może oznaczać kłopoty lub prowadzić do uszkodzenia innych urządzeń, gdyż w trakcie zmiany pozycji takiego przełącznika dochodzi do krótkotrwałego połączenia styku ruchomego z dwoma stykami nieruchomymi jednocześnie. Skutkiem może być jednoczesne włączenie dwóch różnych funkcji urządzenia sterowanego, a w najgorszym przypadku zwarcie obu biegunów tego samego źródła zasilania (jeśli te bieguny zostały podłączone do sąsiednich styków przełącznika).

## Nadużywanie siły przez użytkownika

Siła obrotowa, jakiej należy użyć, by zmienić pozycję dużego przełącznika o tradycyjnej konstrukcji, jest znacząco większa niż siła wystarczająca do przekręcenia ośki w większości typowych przełączników montowanych w płycie panelu sterowniczego. Niektórzy użytkownicy mają skłonność do jednakowego traktowania obu rodzajów urządzeń, co często prowadzi do obluźniania się nakrętki mocującej przełącznik do panelu. Delikatniejsza konstrukcja i inna charakterystyka działania nowoczesnych przełączników o mniejszych gabarytach nie rozwiązują problemu, gdyż użytkownicy przywykli do dawnych urządzeń nadal mogą używać zbyt dużych sił.

Przełączniki obrotowe należy montować z nastawieniem, że użytkownicy niekoniecznie będą się z nimi obchodzili delikatnie. Rozsądek podpowiada, żeby zawsze stosować podkładkę blokującą nakrętkę i nie montować przełącznika w płycie, która jest zbyt cienka lub krucha. W przypadku przełączników montowanych na płytce drukowanej metoda przewlekania końcówek płytka powinna być dostatecznie wytrzymała i solidnie zamocowana.

## Niewłaściwa ośka, niedopasowana gałka, zagubione nakrętki, zbyt duże gabaryty przełącznika

Są to te same problemy, jakie można napotkać przy montażu **potencjometru** i które są obszerniej opisane w haśle poświęconym temu elementowi.



# Enkoder obrotowy

Dawniej nazwa *enkoder obrotowy* była zarezerwowana dla bardziej zaawansowanych instrumentów mierzących ruch obrotowy z dużą precyzją (ponad 100 przedziałów na 360°) przy użyciu metod optycznych. Tańsze i prostsze urządzenia elektromechaniczne były określane mianem *czujnika położenia wału*. Obecnie niemal każde urządzenie przetwarzające położenie ciała w ruchu obrotowym na sygnał cyfrowy przez zwieranie i rozwieranie styków mechanicznych jest nazywane enkoderem obrotowym i w takim też znaczeniu to określenie jest używane w niniejszej *Encyklopedii*. Niektórzy dodają do tego określenia słowo *mechaniczny*, aby odróżnić takie enkodery od urządzeń optycznych i magnetycznych, które na potrzeby *Encyklopedii* zostały zaliczone do kategorii *czujników* i są opisane w tomie 3. W praktyce tego typu czujniki można znaleźć chociażby w *optycznej myszy komputerowej*.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **przełącznik obrotowy** (rozdział 7.).

## Funkcja

Enkoder obrotowy ma gałkę, którą użytkownik może obracać, aby wyświetlać na ekranie LCD rozmaite opcje z menu określającego tryb pracy jakiegoś urządzenia, na przykład amplitunera stereofonicznego, lub ustalającego parametry jego funkcjonowania. Niemal zawsze enkoder jest podłączony do wejść **mikrokontrolera** i zazwyczaj jest wyposażony w *mechanizm zapadkowy* umożliwiający użytkownikowi wyczuwanie przejścia między sąsiednimi pozycjami gałki. Często enkoder umożliwia też wybranie konkretnej opcji przez wciśnięcie gałki i tym samym zwarcie wewnętrznego przełącznika chwilowego. Tego typu enkoder można traktować jako połączenie przycisku i przełącznika.

Enkoder obrotowy jest urządzeniem typu *inkrementalnego* albo inaczej: *obrotowo-impulsowego*, co oznacza, że jego działanie sprowadza się do zwierania lub rozwierania wewnętrznych styków, gdy ruchoma część jest wprawiana w ruch obrotowy — nie jest przy tym generowany żaden kod wskazujący bieżące położenie tej części. Taki kod jest generowany przez enkodery *absolutne* (zwane też *obrotowo-kodowymi*) opisane w rozdziale 7., „Przełącznik obrotowy”.

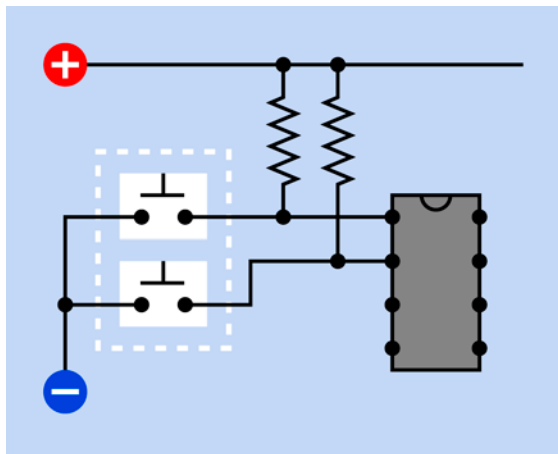
Nie ma specjalnych symboli schematycznych reprezentujących enkodery obrotowe.

## Działanie

Enkoder zawiera dwie pary styków (A i B), które mogą być zwierane i rozwierane niezależnie jedna od drugiej. Gdy wałek się obraca w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, para styków A jest zwierana nieco wcześniej niż para B. Przy obrocie wałka w przeciwnym kierunku wcześniej zwierana jest para B. Jeśli jedne styki każdej pary zostaną połączone z masą (ujemnym biegunem zasilania), a drugie z odpowiednio zaprogramowanym mikrokontrolerem, to ten mikrokontroler będzie w stanie określić na podstawie przesunięcia czasowego w zwieraniu styków, w którą stronę wałek się obraca. Potem mikrokontroler może zliczyć impulsy generowane przez styki i na tej podstawie ustawić odpowiednio wyjście lub zaktualizować zawartość wyświetlacza.

Uproszczony schemat zastosowania enkodera obrotowego przedstawiono na rysunku 8.1. Dwa przyciski otoczone białą przerywaną linią reprezentują dwie pary styków wewnętrznych enkodera, a symbol układu scalonego to mikrokontroler współpracujący z enkoderem. Pokrętko

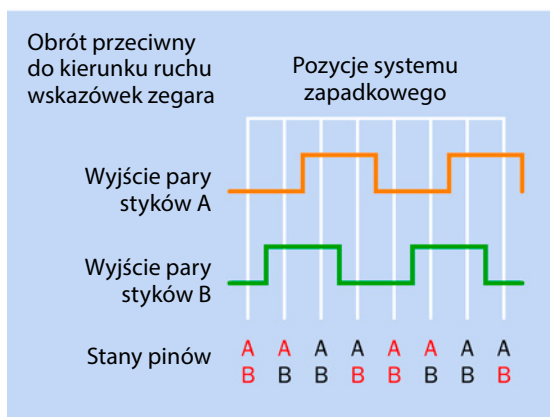
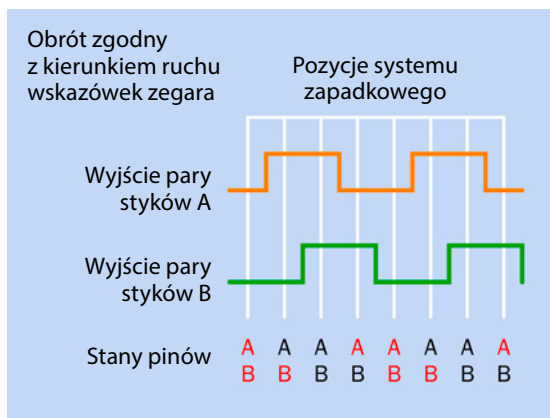
i wałek uruchamiający przełączniki wewnętrzne nie zostały pokazane. Ze schematu wynika, że gdy styki łączą się (są zwierane), wejście układu scalonego osiąga stan niski. Aby uniknąć stanów nieokreślonych na wejściach mikrokontrolera, do każdego pinu wejściowego podłączono rezystor podciągający.



**Rysunek 8.1.** Uproszczony schemat przedstawiający typowe zastosowanie enkodera obrotowego; przyciski w obrębie linii przerywanej reprezentują styki enkodera, a układ scalony jest tu mikrokontrolerem

Rysunek 8.2 przedstawia przykładowe stany wyjść enkodera obrotowego, którego wałek jest obracany zgodnie z ruchem wskazówek zegara (u góry), a następnie w kierunku przeciwnym (u dołu). W niektórych dekodernach ta sekwencja impulsów może być odwrócona. Kolory (czerwony i czarny) zostały przyporządkowane stanom styków zgodnie z założeniem, że zaciski wspólne obu styków są połączone z masą (biegunem ujemnym zasilania). Zatem „wysoki” impuls na wykresie wskazuje w istocie, że wyjście enkodera jest połączone z masą.

Mikrokontrolery stały się tak wszechobecne, a enkodery obrotowe tak tanie, że w wielu zastosowaniach, w których przełączany mały prąd ma niewielkie natężenie, układy takie jak ten wyparły przełączniki obrotowe. Połączenie enkodera obrotowego i mikrokontrolera jest bardzo uniwersalne i umożliwia sterowanie niemal nieograniczoną liczbą menu i opcji.



**Rysunek 8.2.** Przykładowy układ stanów na wyjściu enkodera obrotowego przy założeniu, że wspólne zaciski par styków są połączone z biegunem ujemnym (masą) — wysoki impuls na wykresie oznacza zatem, że para styków jest połączona z masą. Liczba pozycji systemu zapadkowego (podziałek) w stosunku do liczby impulsów na obrót jest zależna od typu kodera

## Rodzaje

Istnieją dwa typy enkoderów obrotowych ze stykami mechanicznymi: absolutne i impulsowe. Enkoder absolutny generuje kod odpowiadający każdemu konkretnemu położeniu wałka. Kod jest zazwyczaj binarnym układem napięć na czterech lub większej liczbie pinów. Ten typ enkoderów jest opisany szerzej w punkcie „Mechaniczny enkoder obrotowy”, w rozdziale 7. „Przełącznik obrotowy”. Wszystkie wymienione tutaj odmiany enkoderów są enkoderami impulsowymi.

## Impulsy a system zapadkowy

Enkodery obrotowe różnych producentów mogą generować od zaledwie 4 do nawet 24 impulsów na obrót (PPR — ang. *Pulses Per Rotation*), przy 12 lub 36 zapadkach (a w przypadku kilku modeli w ogóle bez zapadek). Związek pomiędzy impulsami a zapadkami pokazany na rysunku 8.2 jest typowy, ale bynajmniej nie można go uznać za uniwersalny. Liczba zapadek może być równa liczbie impulsów przypadających na pełny obrót, większa od tej liczby lub mniejsza od niej.

## Sposób montażu

Enkodery obrotowe są na ogół urządzeniami montowanymi w płycie panelu sterowniczego lub metodą przewlekaną na płytce drukowanej. W tej ostatniej kategorii większość jest montowana poziomo, a tylko nieliczne modele są wlotowywane pod kątem  $90^\circ$  względem płyty.

## Wyjście

W enkoderze zawierającym dwa przełączniki możliwe są cztery kombinacje stanów przełącznikowych: OFF-OFF, ON-OFF, OFF-ON i ON-ON. Taki system jest znany jako wyjście *kwadraturowe*. Wszystkie opisane tu enkodery obrotowe są zgodne z tym systemem.

## Opory ruchu obrotowego

Enkodery obrotowe różnią się znacznie pod względem oporów wyczuwanych przez użytkownika podczas obracania pokręteł. Jest to w dużej mierze zależne od systemu zapadkowego, jeśli in ogóle taki został zastosowany w danym modelu enkodera. Tak czy owak, enkodery obrotowe zazwyczaj stawiają mniejszy opór niż przełączniki obrotowe i raczej nie wymagają tak solidnych pokręteł jak w przełącznikach obrotowych. Ponieważ enkoder generuje tylko ciąg impulsów bez żadnych informacji o położeniu bezwzględny, pokrętko nie musi mieć żadnych znaczników.

## Wartości

Prawie wszystkie enkodery obrotowe są przystosowane do pracy w obwodach niskonapięciowych — 12V DC lub mniej. Wszystkie są dostosowane do małych prądów, co odzwierciedla ich przeznaczenie, jakim jest sterowanie mikrokontrolerem. Kilka przykładowych enkoderów jest

pokazanych na rysunku 8.3. Z tyłu: 9-impulsowy (9 PPR), 36-zapadkowy, 10 mA przy 10 V DC. Po lewej: 20-impulsowy (20 PPR), 20-zapadkowy z przełącznikiem. Z prawej: 24-impulsowy (24 PPR), bez zapadek, 1 mA przy 5 V DC. Na środku (niebieski): 16-impulsowy (16 PPR), bez zapadek, 1 mA przy 5 V DC. Z przodu: 12-impulsowy (12 PPR), 24-zapadkowy, 1 mA przy 10 V DC, wymaga klucza imbusowego lub podobnego wałka sześciokątnego do sprężenia z rotorem.



**Rysunek 8.3.** Przykładowe enkodery obrotowe o różnych parametrach użytkowych; szczegółowy opis znajduje się w tekście

## Odbijanie się styków

W każdym przełączniku mechanicznym występuje w mniejszym lub większym stopniu *odbijanie się styków*, gdy są zwierane. W danych katalogowych zwykle są podawane czasy trwania tych odbić i najczęściej mieszczą się one w zakresie od około 2 ms do 5 ms. Niektórzy nazywają to *czasem ustalenia*. Naturalnie im mniejsza wartość tego parametru, tym lepiej. Mikrokontroler, który przetwarza informacje pochodzące z enkodera, może w swym algorytmie zawierać procedurę pomijania opisywanego efektu, która po prostu nie uwzględni żadnych sygnałów w zadanym okresie po zwarcu przełącznika.

## Zakłócenia poślizgowe

Gdy dwa styki zwierają się, a następnie trą o siebie wzajemnie (co w przypadku enkodera obrotowego dzieje się wtedy, gdy pokrętko jest obracane), połączenie może chwilowo zostać przerwane. Dane katalogowe enkoderów obrotowych nie zawierają żadnych informacji na ten temat.

## Stosowanie

Jak wspomniano powyżej, enkoder obrotowy może być używany tylko w połączeniu z mikrokontrolerem lub podobnym urządzeniem, które jest w stanie interpretować różnice fazowe między zwieraniem i rozwieraniem par styków i ma zdolność zliczania zdarzeń rozwierania/zwierania zachodzących podczas obracania wałka. (Niektóre dedykowane układy scalone są przeznaczone do tego konkretnego zastosowania).

Enkoder obrotowy może być napędzany za pomocą **silnika krokowego** i wtedy generuje informacje zwrotne dotyczące obrotów wału silnika, a te z kolei mogą służyć do obliczania przyspieszenia kątownego.

Największą trudnością jest właściwe zaprogramowanie mikrokontrolera. Ogólnie program powinien realizować podaną niżej sekwencję czynności.

Sprawdzanie:

- Jeśli enkoder zawiera przycisk, sprawdź, czy jest wciśnięty. Jeśli przycisk jest wciśnięty, przejdź do odpowiedniej procedury.
- Stan styków A.
- Stan styków B.

Porównaj ich stan z poprzednio zapisanym stanem par styków A i B. Jeśli stan nie zmienił się, powtórz punkt „Sprawdzanie”.

Eliminacja zakłóceń:

- Szybko i wielokrotnie sprawdzaj stan styków przez 50 ms i zliczaj stany dla styków A i B. (Czas 50 ms może być dobierany w zależności od enkodera, ponieważ enkoder o większej liczbie impulsów na obrót będzie generował krótsze impulsy).

- Porównaj całkowitą liczbę sprawdzianów wykazujących zmianę stanów z liczbą sprawdzianów wykazujących brak takiej zmiany.

Jeśli liczba sprawdzianów wykazujących zmianę stanu styków jest dużo mniejsza od liczby sprawdzianów ze stanami ustalonymi, prawdopodobnie sygnał był błędny, spowodowany odbijaniem się styków lub zakłóceniami ślizgowymi. Wróć do punktu „Sprawdzanie” i zacznij od nowa.

Interpretacja:

- Wywnioskuj kierunek obrotów na podstawie czterech możliwości:
  - styki A były rozwarte i zostały zwarte,
  - styki A były zwarte i zostały rozwarte,
  - styki B były rozwarte i zostały zwarte,
  - styki B były zwarte i zostały rozwarte (o sposobie interpretacji zmiany stanów styków decyduje konkretny typ enkodera).
- W razie potrzeby sprawdź wartość zmiennej przechowującej kierunek obrotów.
- W zależności od kierunku obrotu zwiększ lub zmniejsz wartość zmiennej przechowującej liczbę impulsów.
- Podejmij działanie właściwe dla aktualnego kierunku obrotu i skumulowanej liczby impulsów.
- Wróć do punktu „Sprawdzanie”.

## Możliwe błędy

### Odbijanie się styków

Problemy wynikające z odbijania się styków można eliminować nie tylko za pomocą oprogramowania mikrokontrolera, ale także przez bocznikowanie wyjść enkodera kondensatorami o pojemności 0,1  $\mu$ F.

### Wypalanie się styków

Enkodery obrotowe są kompatybilne z techniką TTL i na ogół nie są przeznaczone do sterowania nawet niewielkimi urządzeniami wyjściowymi, jak chociażby diodą LED. Styki są niezwykle delikatne i łatwo ulegają zniszczeniu przy próbie przełączenia prądu o dużym natężeniu.

# Przekaźnik

Dla odróżnienia od *przekaźnika półprzewodnikowego* powinno się go nazywać *przekaźnikiem elektromagnetycznym*, ale ta dłuższa nazwa jest rzadko używana. W praktyce przyjęło się, że samo słowo **przekaźnik** oznacza urządzenie elektromagnetyczne, a nie półprzewodnikowe.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **przekaźnik półprzewodnikowy** (tom 2.),
- **przełącznik** (rozdział 6.).

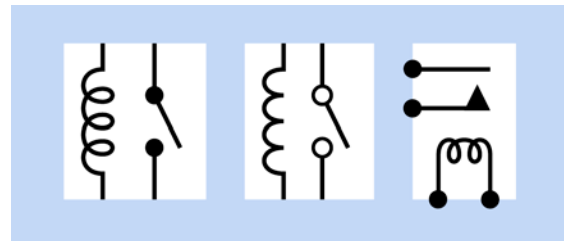
## Funkcja

Przekaźnik umożliwia zamykanie i otwieranie obwodu elektrycznego (wyjściowego) za pośrednictwem impulsu wyzwalanego w odrębnym obwodzie (wejściowym). Często jest używany do sterowania obwodem o wysokim napięciu lub dużym prądzie za pomocą obwodu o znacznie niższym napięciu i (lub) mniejszym prądzie. Sygnał prądowy o niskim napięciu i (lub) natężeniu można wywołać za pomocą stosunkowo małego, taniego przełącznika i doprowadzić do przekaźnika za pośrednictwem cienkich, tanich przewodów. Na przykład w samochodzie przekręcenie kluczyka w stacyjce wysyła niskoprądowy sygnał do przekaźnika i dopiero ten zamyka wysokoprądowy obwód rozrusznika.

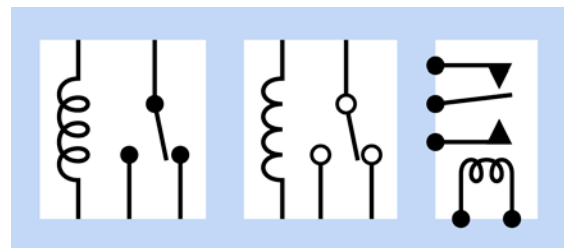
Półprzewodnikowe urządzenia przełączające są szybkie i niezawodne, ale tradycyjne przekaźniki też mają pewne zalety — mogą działać jako przełączniki o podwójnych terminalach i (lub) wielu biegunach i są tańsze w zastosowaniach związanych z przełączaniem dużych napięć i (lub) prądów. Porównanie przekaźników elektromagnetycznych z **przekaźnikami półprzewodnikowymi i tranzystorami** znajduje się w tabeli zamieszczonej w rozdziale 28. „Tranzystor bipolarny” jako rysunek 28.15.

Symbole schematyczne przekaźnika jednobiegunowego z pojedynczym terminalem są pokazane na rysunku 9.1, a jednobiegunowego z podwójnym terminalem — na rysunku 9.2. Wygląd i usytuowanie użytych tu symboli cewki

i styków mogą się mocno różnić, ale zasada działania pozostaje ciągle ta sama.



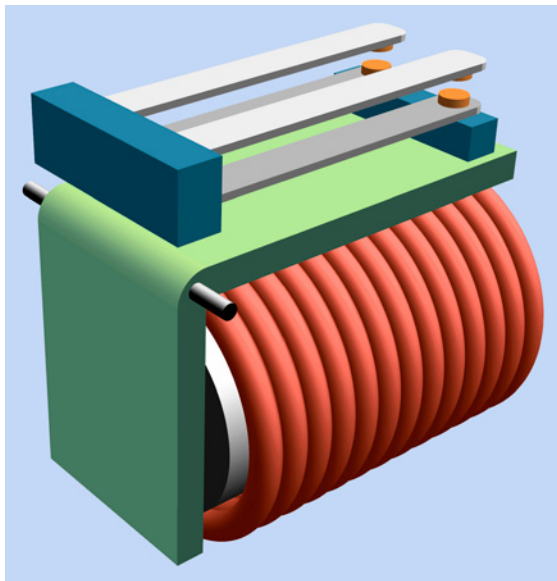
**Rysunek 9.1.** Popularne symbole przekaźnika typu SPST; choć różnią się wyglądem, oznaczają to samo



**Rysunek 9.2.** Popularne symbole przekaźnika typu SPDT; choć różnią się wyglądem, oznaczają to samo

## Działanie

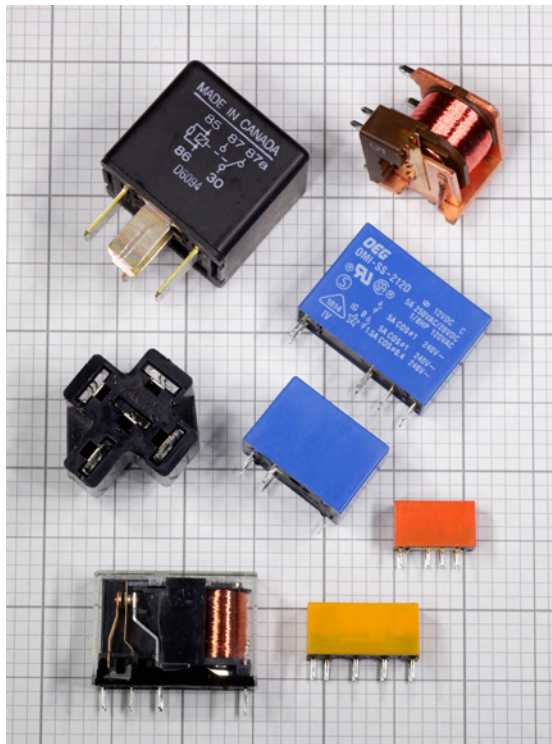
Przekaźnik składa się z *cewki*, *kotwicy* i przynajmniej jednej pary *styków*. Cewka działa jak **elektromagnes** i, gdy przepływa przez nią prąd, wytwarza pole magnetyczne, które przyciąga kotwicę, a ta z kolei zwiera (lub rozwiera) styki. Schemat konstrukcyjny całego przekaźnika typu DPST jest pokazany na rysunku 9.3. Kotwica ma tu kolor zielony, cewka — czerwony, a styki — pomarańczowy. Dwa niebieskie bloczki są wykonane z materiału nieprzewodzącego, przy czym ten po lewej służy jako podstawa do zamocowania blaszek ze stykami, a ten po prawej dociska styki ruchome do nieruchomych, gdy kotwica odchyła się pod wpływem pola magnetycznego wywołanego przepływem prądu przez cewkę. Dla uproszczenia rysunku pominięto wyprowadzenia zarówno styków, jak i cewki.



**Rysunek 9.3.** Uproszczony schemat konstrukcji przekaźnika typu DPST; szczegółowy opis znajduje się w tekście

Kilka przykładowych przekaźników przystosowanych do różnych prądów i napięć pokazano na rysunku 9.4. U góry po lewej znajduje się 12-woltowy przekaźnik samochodowy pasujący do gniazda widocznego bezpośrednio pod nim. U góry po prawej widać model 24-woltowy typu SPDT z odsłoniętymi stykami i cewką, a zatem nadający się tylko do pracy w środowisku czystym i suchym. Pod nim znajdują

się cztery przekaźniki zamknięte w szczelnych obudowach wykonanych z kolorowych tworzyw sztucznych i przystosowane do przełączania prądów, odpowiednio, 5 A przy 250 V AC, 10 A przy 120 V AC, 0,6 A przy 125 V AC i 2 A przy 30 V DC. Te w kolorze niebieskim mają cewki 12-woltowe, a czerwonym i żółtym — 5-woltowe. Wszystkie są niezatrząskowe. U dołu po lewej znajduje się przekaźnik w przezroczystej obudowie z 12-woltową cewką przystosowany do przełączania prądów o natężeniu do 5 A przy napięciu 240 V AC lub 30 V DC.



**Rysunek 9.4.** Przykłady rzeczywistych przekaźników o różnych konstrukcjach i parametrach użytkowych; szczegółowy opis znajduje się w tekście

Konfiguracje styków przekaźnika określa się przy użyciu tych samych skrótów, co w przypadku **przełącznika**. Skrót SP, DP, 3P i 4P oznaczają liczbę biegunów, odpowiednio: 1, 2, 3 i 4 (przekaźniki więcej niż 4-biegunowe należą do rzadkości). ST i DT symbolizują terminal pojedynczy i podwójny. Jedne i drugie skróty są zazwyczaj łączone w jeden ciąg, na przykład 3PST lub SPDT. Spotyka się też oznaczenia: Form A (równoważne określeniu normalnie otwarty), Form B

(normalnie zamknięty) i Form C (z podwójnymi terminalami) poprzedzone liczbą biegunów. W tym systemie oznaczeń zapis „2 Form C” jest równoznaczny zapisowi DPDT.

## Rodzaje

### Zatrzaski

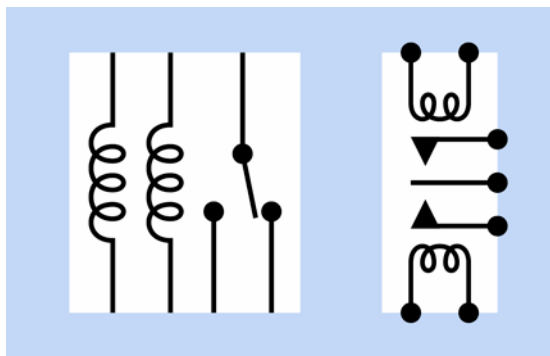
Wszystkie przekaźniki można podzielić na dwa rodzaje: *zatrzaskowe* i *niezatrzaskowe*. Przekaźnik niezatrzaskowy, zwany także *monostabilnym*, jest najbardziej rozpowszechniony i swoim działaniem przypomina przełącznik chwilowy lub klasyczny **przycisk**, gdyż wraz z zanikiem prądu w cewce styki powracają do położenia domyślnego. Takie działanie ma znaczenie w sytuacjach, w których przy braku prądu w cewce przekaźnik powinien być zawsze w jednym i tym samym stanie. W przeciwieństwie do niego przekaźnik zatrzaskowy (*bistabilny*) nie ma takiego jednego, wyróżnionego stanu. Zazwyczaj ma podwójny terminal i przy braku zasilania cewki jego styk ruchomy może być zwarty z jednym lub drugim stykiem nieruchomym. Do zmiany swojego stanu (zwarcia styku ruchomego z drugim stykiem nieruchomym) potrzebuje tylko krótkiego impulsu prądowego. Spośród urządzeń półprzewodnikowych podobnie zachowuje się *przerzutnik*.

W przekaźniku zatrzaskowym *jednocewkowym* o tym, która para styków jest zwarta, decyduje polaryzacja napięcia przyłożonego do cewki. W wersji *dwucewkowej* każda cewka przesuwają kotwicę w inne położenie i tym samym zwiera drugą parę styków.

Symbole przekaźnika dwucewkowego są pokazane na rysunku 9.5. Nie każdy symbol jednoznacznie wskazuje, która cewka odpowiada za zwarcie danej pary styków. Aby to ustalić, należy przejrzeć dokumentację techniczną konkretnego modelu lub przeprowadzić test polegający na przyłożeniu napięcia o wartości znamionowej do jednej z cewek i sprawdzeniu, które styki zostały zwarte.

### Polaryzacja

Jeśli chodzi o biegunowość napięcia zasilającego cewkę, wszystkie przekaźniki można podzielić na trzy kategorie. W *przekaźniku neutralnym* kierunek prądu płynącego przez cewkę jest obojętny. Zmiana polaryzacji napięcia zasilającego obwód wejściowy nie zmienia niczego w działaniu urządzenia. *Przekaźnik spolaryzowany* zawiera diodę włączoną



**Rysunek 9.5.** Symbole schematyczne dwucewkowego przekaźnika zatrzaskowego; pod względem funkcjonalnym oba symbole są równoważne

szeregowo z cewką, więc w obwodzie wejściowym prąd może płynąć tylko w jednym kierunku. *Przekaźnik ukierunkowany* ma wbudowany magnes stały, który zwiększa siłę działania na kotwicę, gdy przez cewkę płynie prąd w określonym kierunku, i zmniejsza tę siłę (w praktyce blokuje ruch kotwicy) przy prądzie płynącym w kierunku przeciwnym. W danych katalogowych raczej nie są podawane tego typu szczegółowe informacje — można się dowiedzieć jedynie, czy przekaźnik jest wrażliwy na polaryzację napięcia zasilającego obwód wejściowy, czy nie.

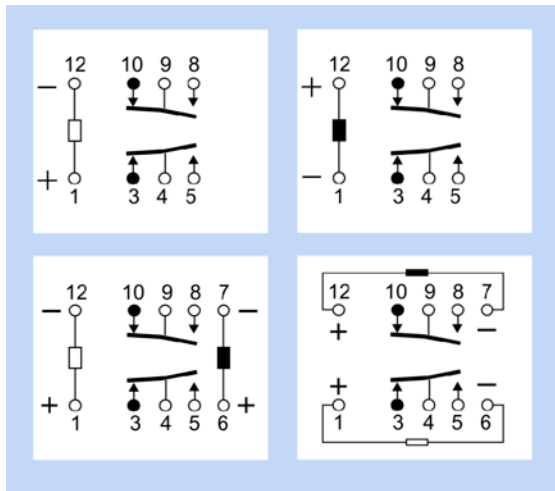
Wszystkie przekaźniki mogą przełączać prąd przemienny, ale tylko *przekaźniki AC* są przystosowane do pracy z prądem przemiennym w obwodzie wejściowym.

### Wyprowadzenia

Rozkład wyprowadzeń i ich funkcji nie doczekał się standaryzacji i każdy producent stosuje własne reguły. Często można spotkać przekaźniki z nadrukowanymi oznaczeniami funkcji poszczególnych pinów, ale mimo to zawsze warto skonfrontować te informacje z tym, co jest podane w karcie produktu wydanej przez producenta, lub z wynikami samodzielnie przeprowadzonych testów.

Na rysunku 9.6 pokazano cztery przykładowe konfiguracje wyprowadzeń przekaźnika zamieszczone w kartach produktu. Pod względem funkcjonalnym są zupełnie różne, chociaż wszystkie odnoszą się do przekaźników typu DPDT. W każdym z tych schematów cewka jest przedstawiana jako prostokąt, a wyprowadzenia są reprezentowane przez

kółeczka: czarne, jeśli są w stanie aktywnym, i białe, jeśli są nieaktywne. Wygięte linie pokazują możliwe połączenia biegunów z terminalami wewnątrz przekaźnika. Styki są pokazane jako strzałki. Jak widać, biegun oznaczony cyfrą 4 może się łączyć z terminalem o numerze 3 albo z terminalem o numerze 5, a biegun oznaczony cyfrą 9 może się łączyć z terminalem o numerze 8 albo z terminalem o numerze 10.



**Rysunek 9.6.** Układy pinów przekaźnika pokazane w sposób typowy dla kart produktu publikowanych przez producentów; u góry po lewej: przekaźnik niezatraskowy z jedną cewką; u góry po prawej: przekaźnik zatraskowy z jedną cewką; u dołu po lewej: przekaźnik zatraskowy z dwiema cewkami; u dołu po prawej: przekaźnik zatraskowy z dwiema cewkami podłączonymi do innych pinów (na podstawie kart produktu opublikowanych przez firmę Panasonic)

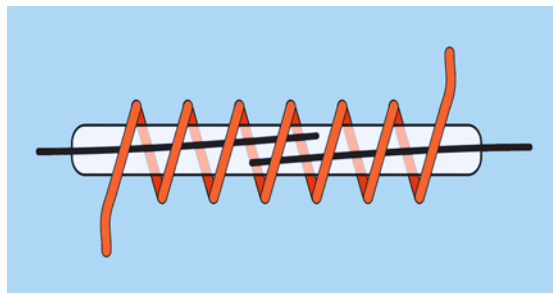
U góry po lewej: spolaryzowany przekaźnik niezatraskowy w stanie spoczynkowym, czyli bez podłączonego zasilania. U góry po prawej: przekaźnik zatraskowy z jedną cewką i zaznaczonymi stykami, które są aktywne (czarne kółeczka), gdy cewka jest zasilana zgodnie z pokazaną polaryzacją napięcia. Jeśli napięcie ma polaryzację przeciwną, aktywne stają się styki po przeciwnej stronie biegunów. Niektórzy producenci umieszczają obok znaku minus znak plus i obok znaku plus znak minus, aby zasygnalizować możliwość odwracania napięcia. U dołu po lewej i po prawej: spolaryzowane przekaźniki zatraskowe o dwóch cewkach z różnym rozkładem wyprowadzeń.

W powyższych schematach układ pinów jest pokazany w widoku z góry, ale w innych kartach produktu może być on

pokazany w widoku z dołu, a jeszcze w innych mogą to być oba widoki, z góry i z dołu. Niektórzy producenci stosują też inne symbole dla oznaczenia wewnętrznych elementów i ich funkcji. W razie wątpliwości należy dokonać odpowiednich pomiarów elektrycznych.

## Przekaźniki kontaktronowe

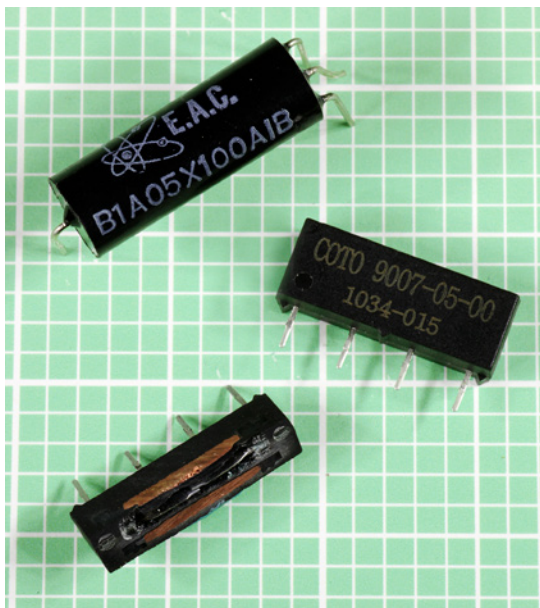
*Przekaźnik kontaktronowy* jest najmniejszym przekaźnikiem elektromagnetycznym przeznaczonym głównie do zastosowań w sprzęcie pomiarowym i telekomunikacji. Charakteryzuje się bardzo małym poborem mocy (rezystancja cewki wynosi od 500  $\Omega$  do 2000  $\Omega$ ). Jest zbudowany z *kontaktronu* otoczonego zwojami cewki. Konstrukcja ta jest pokazana w sposób schematyczny na rysunku 9.7. Dwa styki (czarne linie) są zamknięte w szklanej lub plastikowej obudowie i umieszczone wewnątrz cewki. Zwarcie styków następuje pod wpływem pola magnetycznego wytwarzanego podczas przepływu prądu przez cewkę. Gdy prąd nie płynie, pole magnetyczne znika i sprężyste styki rozłączają się.



**Rysunek 9.7.** Uproszczony schemat budowy przekaźnika kontaktronowego; styki kontaktronu są zwierane przez pole magnetyczne cewki, której zwoje otaczają kapsułę kontaktronu

Na rysunku 9.8 pokazano dwa przekaźniki kontaktronowe (u góry po lewej i w środku po prawej) oraz jeden z nich (ten ze środka po prawej) po przepołowieniu za pomocą szlifierki taśmowej — widać tu wyraźnie miedziane zwoje cewki, kapsułę kontaktronu i znajdujące się w jej wnętrzu styki.

Przekaźniki kontaktronowe przeznaczone do montażu powierzchniowego osiągają wymiary rzędu 1 cm  $\times$  0,5 cm. Wersje przeznaczone do montażu przewlekane są nieco większe (ok. 1,5 cm  $\times$  0,8 cm) i mają dwa rzędy wyprowadzeń, choć spotykane są także jednorzędowe (w obudowie SIP).



**Rysunek 9.8.** Trzy przekaźniki kontaktronowe, z których jeden ma usuniętą część obudowy, co pozwala dostrzec uzwojenia cewki i wewnętrzne styki kontaktronowe

Przekaźniki kontaktronowe nie są przystosowane do przełączania dużych prądów i nie nadają się do stosowania w obwodach z obciążeniem o charakterze indukcyjnym.

## Przekaźniki małosygnalowe

*Przekaźnik małosygnalowy* zwany też *niskosygnalowym* zajmuje mniej więcej tyle samo miejsca na płycie co przekaźnik kontaktronowy, ale jest nieco wyższy. Pobiera nieco większą moc i może przełączać trochę większe prądy i napięcia. Ma najczęściej dwa rzędy wyprowadzeń z rozstawem 5 mm lub 7,5 mm. Przekaźniki żółty i czerwony z rysunku 9.4 są przykładami tego typu urządzeń.

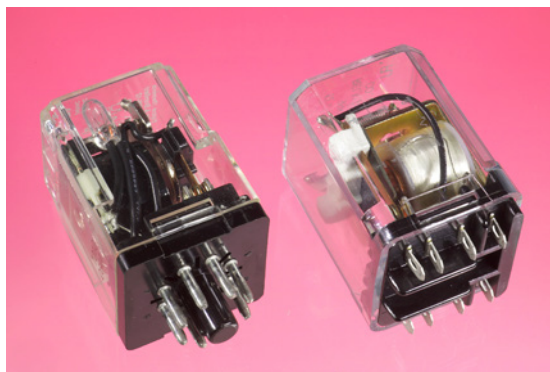
## Przekaźniki samochodowe

*Przekaźnik samochodowy* ma najczęściej obudowę w kształcie sześcianu wykonaną z czarnego tworzywa i umieszczone z dołu wyprowadzenia dostosowane do szybkozłączy. W samochodach są montowane w specjalnie do tego przeznaczonych gniazdach. Pod względem elektrycznym są oczywiście przystosowane do pracy w obwodach o napięciu 12 V DC.

## Przekaźniki ogólnego przeznaczenia (przemysłowe)

Tego typu przekaźniki znajdują zastosowanie w wielu rozmaitych urządzeniach, w których wymagania co do rozmiarów nie są najważniejsze, a istotniejsza jest raczej zdolność do przełączania większych prądów i napięć. Często są przystosowane do montażu w *podstawkach oktalowych* podobnych do tych, w których były kiedyś montowane **lampy elektronowe**. Z kolei podstawa ma wyprowadzenia w postaci uszek do lutowania przewodów, śrub lub szybkozłączy i jest przystosowana do mechanicznego montażu w chassis urządzenia. Taki system montażu przekaźnika umożliwia jego szybką wymianę bez używania lutownicy.

Dwa takie przekaźniki są pokazane na rysunku 9.9. Oba są typu DPDT z cewkami 12 V DC i mogą przełączać prąd przemienny o natężeniu do 10 A przy napięciu do 240 V. Ten po lewej ma cokół oktalowy, a podstawa oktalowa, w której można go zamontować, jest pokazana na rysunku 9.10.



**Rysunek 9.9.** Dwa przekaźniki przemysłowe przystosowane do zasilania prądem stałym przy napięciu 12 V i zdolne do przełączania prądu o natężeniu do 10 A przy napięciu do 240 V AC



**Rysunek 9.10.** Podstawka oktalowa ze złączami śrubowymi, w której można montować przekaźniki z cokołem oktalowym

## Przekaźniki czasowe

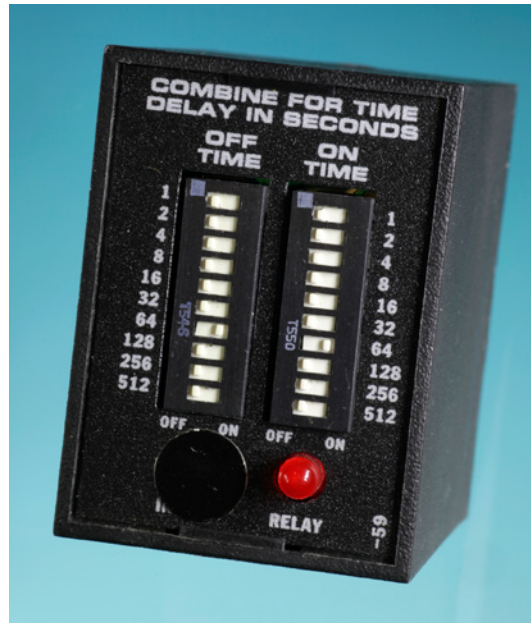
*Przekaźnik czasowy* ogólnie służy do realizacji rozmaitych funkcji czasowych, a najczęściej jest to opóźnianie włączania i wyłączenia obwodu wyjściowego o z góry zaprogramowany czas. Przykład takiego urządzenia jest pokazany na rysunku 9.11 i jest to przekaźnik zasilany napięciem 12 V DC, zdolny do włączania i wyłączenia obwodu z prądem o natężeniu do 10 A przy napięciu 240 V AC. Nie ma cokołu oktalowego.

## Styczniki

Stycznik działa podobnie jak przekaźnik, ale jest przystosowany do przełączania dużych prądów (nawet tysiące amperów) przy wysokich napięciach (liczonych w kV). Wymiary styczników zawierają się w przedziale od kilku cm do ok. 0,5 m. Stosuje się je do sterowania urządzeniami o dużej mocy, takimi jak silniki elektryczne, zestawy oświetleniowe czy zasilacze wysokoprądowe.

## Wartości

W kartach produktu zazwyczaj podawane są wartości napięcia i natężenia prądu dopuszczalne dla styków oraz wartości nominalne napięcia i natężenia prądu dla cewki, chociaż



**Rysunek 9.11.** Przelączniki zamontowane na obudowie przekaźnika czasowego umożliwiają odrębne ustawienie opóźnień załączania i wyłączenia obwodu wyjściowego

w niektórych przypadkach zamiast nominalnego natężenia prądu podawana jest rezystancja cewki. W takiej sytuacji wartość natężenia można po prostu obliczyć za pomocą prawa Ohma. Minimalna wartość napięcia, przy której przekaźnik zaczyna działać, jest nazywana *napięciem zadziałania*, a *napięcie spoczynkowe* to maksymalna wartość, przy której przekaźnik na pewno pozostaje wciąż w stanie spoczynku. Wartości nominalne są wyznaczane przy założeniu, że cewka przewodzi prąd przez długi czas, chyba że w danych katalogowych są podane inne warunki.

Jeśli wartości znamionowe dla styków wskazują, że przekaźnik może włączać i wyłączać obwody o dużym obciążeniu, to wcale tak nie musi być, gdyż trzeba jeszcze uwzględnić indukcyjność tego obciążenia i związaną z tym siłę elektromotoryczną indukcyjności.

### *Przekaźniki kontaktronowe*

Zazwyczaj mają napięcie cewki na poziomie 5 V DC i obciążalność prądową styków wynoszącą 0,25 A przy 100 V. Wersje PCB (do montażu przewlekane) mogą mieć napięcie cewki 5 V DC, 6 V DC,

12 V DC lub 24 V DC, a prąd przełączany może się zawierać w przedziale od 0,5 A do 1 A przy napięciu maksymalnie 100 V i obciążeniu nieindukcyjnym.

#### Przekaźniki małosygnałowe (niskosygnałowe)

Napięcie cewki najczęściej wynosi tu od 5 V DC do 24 V DC, a prąd raczej nie przekracza 20 mA. Maksymalna wartość prądu przełączanego zawiera się w przedziale od 1 A do 3 A przy obciążeniu nieindukcyjnym.

#### Przekaźniki ogólnego przeznaczenia (przemysłowe)

Szeroki zakres dopuszczalnych wartości, począwszy od 48 V DC lub 125 V AC do 250 V AC dla napięcia cewki i od 5 A do 30 A dla prądu przełączanego.

#### Przekaźniki samochodowe

Napięcie cewki wynosi 12 V DC, a prąd przełączany zazwyczaj wynosi 5 A przy maksymalnie 24 V DC.

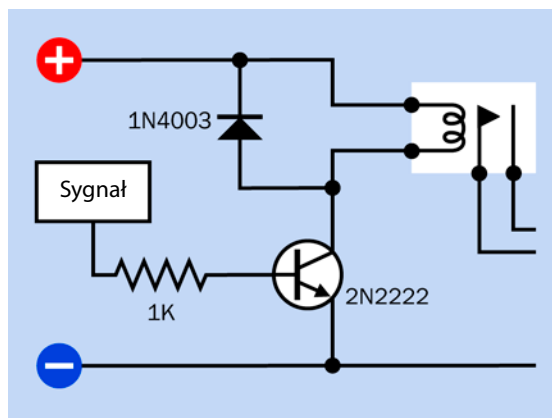
#### Przekaźniki czasowe

Najczęściej mają napięcie znamionowe cewki na poziomie 2 V DC, 24 V DC, 24 V AC, 125 V AC lub 230 V AC. Czas opóźnienia może wynosić od 0,1 sekundy do 9999 godzin. Wytrzymałość prądowa styków wynosi najczęściej od 5 A do 20 A przy napięciu stałym bądź przemiennym od 125 V do 250 V.

## Stosowanie

Przekaźniki są powszechnie stosowane w sprzęcie AGD, takim jak zmywarki, pralki, lodówki, klimatyzatory, a także w kserokopiarkach i innych urządzeniach, w których silnik, sprężarkę lub inną maszynę trzeba włączać i wyłączać w zależności od działań użytkownika i stanu rozmaitych czujników.

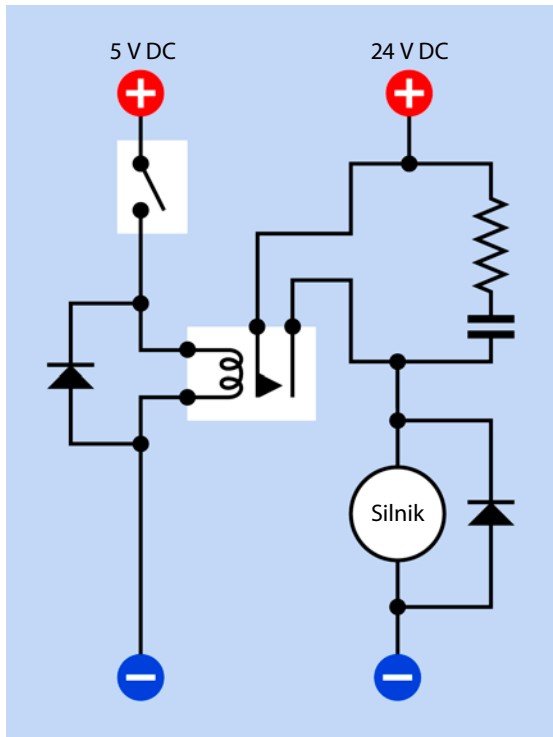
Na rysunku 9.12 pokazano schemat typowego układu elektronicznego, w którym sygnał z mikrokontrolera (kilka mA przy 5 V DC) jest podawany na bazę tranzystora sterującego pracą przekaźnika. W reakcji na ten sygnał w obwodzie wyjściowym następuje załączanie lub wyłączenie urządzenia, które może pobierać nawet 10 A przy 125 V AC. Warto zwrócić uwagę na diodę tłumiącą połączoną równolegle z cewką przekaźnika.



**Rysunek 9.12.** Sygnał pochodzący ze źródła cyfrowego, na przykład z mikrokontrolera, może przełączać prąd o niebagatelnym natężeniu i napięciu, jeśli się go poda na bazę tranzystora sterującego przekaźnikiem

Przekaźnik zatraskowy przydaje się, gdy połączenie powinno trwać mimo wyłączonego zasilania lub jego chwilowego zaniku, a także wtedy, gdy trzeba zminimalizować zużycie energii. Jednym z powszechnych zastosowań są urządzenia zabezpieczające. Oczywiście w wielu przypadkach obwód z takim przekaźnikiem wymaga zastosowania także elementu resetującego, czyli wymuszającego powrót przekaźnika do stanu domyślnego.

Na rysunku 9.13 pokazano układ sterowania silnikiem ze wszystkimi możliwymi zabezpieczeniami przeciw nagłym wzrostom napięcia, włącznie z tłumikiem chroniącym styki przekaźnika i diodami tłumiącymi przepięcia indukcyjne na uzwojeniach silnika i cewce przekaźnika powstające w chwilach wyłączenia i włączania tych urządzeń. Tłumik oporowo-pojemnościowy można pominąć, jeśli silnik pobiera stosunkowo niewielki prąd (poniżej 5 A) lub gdy jest on obciążeniem nieindukcyjnym. Diodę bocznikującą cewkę przekaźnika można pominąć, jeśli w obwodzie wejściowym nie ma elementów półprzewodnikowych lub innych, które mogłyby ulec uszkodzeniu wskutek powstających przepięć. Trzeba jednak pamiętać, że silne przepięcia mogą być groźne również dla elementów, które wydają się elektrycznie odizolowane od cewki. Duży wzrost napięcia może przeniknąć nawet do domowej sieci zasilającej. Więcej informacji na temat zapobiegania takim sytuacjom znajduje się w punkcie „Tłumik”, w rozdziale 12. „Kondensator”.



**Rysunek 9.13.** Ten przykładowy układ zawiera trzy zabezpieczenia przeciw przepięciom wywołanym nagłymi zmianami prądu w obwodach z elementami indukcyjnymi (takimi jak uzwojenia silnika i przekaźnika)

## Możliwe błędy

### Nieprawidłowy układ wyprowadzeń

Brak jednolitych reguł ustalania wyprowadzeń może być przyczyną błędów popełnianych podczas wymiany uszkodzonego przekaźnika. Nowe urządzenie może z zewnątrz wyglądać identycznie jak stare, ale niekoniecznie musi mieć taką samą konfigurację połączeń wewnętrznych. Na przykład w przekaźniku pochodzącym od innego producenta do tych samych pinów mogą być podłączone styki normalnie otwarte zamiast normalnie zamkniętych.

Dodatkowe zamieszanie wprowadza brak standardu jednolitych zasad prezentowania układu wyprowadzeń w kartach produktu — jedni producenci pokazują widok z góry, inni — z dołu, a jeszcze inni — i z góry, i z dołu.

### Niewłaściwe ustawienie przy montażu

Małe przekaźniki przystosowane do montażu przewlekane go zwykle mają piny rozstawione symetrycznie w odstępach będących wielokrotnością 2,54 mm, a to dopuszcza możliwość zamontowania ich w odwrotnym kierunku. Niemal wszystkie przekaźniki mają na jednym końcu lub w jednym rogu obudowy znak pozwalający ustalić właściwą orientację przy montażu, z tym że tu też nie obowiązuje żaden standard. Na szczęście większość producentów podaje stosowne informacje w wydawanych przez siebie kartach produktu. Przed zastosowaniem jakiegoś przekaźnika po raz pierwszy warto mimo wszystko zachować daleko posuniętą ostrożność i przetestować go za pomocą miernika.

### Niewłaściwy typ

Przekaźnik zatraskowy może wyglądać dokładnie tak samo jak niezatraskowy (zwłaszcza jeśli oba pochodzą od tego samego producenta) i te same piny w obu egzemplarzach mogą służyć do uruchamiania przekaźnika. Jednakże w przekaźniku zatraskowym styki nie rozłączą się, gdy prąd w cewce przestanie płynąć, a to może skutkować trudnym do zdiagnozowania błędnym funkcjonowaniem obwodu wyjściowego. Numery katalogowe obu przekaźników nadrukowane na ich obudowach mogą się różnić zaledwie jedną literą lub cyfrą, więc trzeba zawsze dokładnie sprawdzać.

### Nieprawidłowa polaryzacja

Przekaźnik, który do zadziałania wymaga przepływu prądu stałego przez cewkę, może zmieniać swoje funkcjonowanie w zależności od polaryzacji przyłożonego napięcia.

### Prąd stały i przemienny

Przekaźnik przystosowany do zasilania prądem stałym nie zadziała w obwodzie prądu przemiennego i *vice versa*. Trzeba też zwracać uwagę na dopuszczalną wartość prądu przełączanego, gdyż ta może być inna dla prądu stałego niż dla przemiennego.

### Stukanie

Są to dźwięki generowane podczas niepewnego zwierania styków. Taki sposób zwierania może prowadzić do obniżenia trwałości tych elementów, więc trzeba dążyć do likwidacji

stukania. Niepewne zwieranie może generować także zakłócenia elektryczne mające niekorzystny wpływ na inne podzespoły. Jedną z przyczyn stosunkowo łatwych do usunięcia jest zbyt niskie lub zmieniające się napięcie zasilające.

### Przebiegi na cewce

Cewka przekaźnika jest elementem indukcyjnym. Zwykle włączenie lub wyłączenie prądu przepływającego przez cewkę dużego przekaźnika może skutkować wyindukowaniem dużej siły elektromotorycznej. Aby zminimalizować szkodliwe skutki takich przebiegów, należy zbocznikować cewkę diodą tłumiącą spolaryzowaną przeciwnie do biegunowości napięcia zasilającego.

### Powstawanie łuku elektrycznego

Ten problem został opisany w punkcie „Powstawanie łuku elektrycznego”, w rozdziale 6. „Przełącznik”. Warto dodać, że na przykład styki *przekaźnika kontaktronowego* są niezwykle delikatne i jeśli będą zmuszane do przełączania prądów o zbyt dużym natężeniu, mogą ulegać nadtopieniom, a nawet mogą się zespawać.

### Pola magnetyczne

Przekaźniki podczas działania generują zakłócenia elektromagnetyczne i z tego powodu należy unikać umieszczania ich blisko podzespołów lub urządzeń podatnych na wpływ pól elektrycznych i magnetycznych.

Z kolei przekaźniki kontaktronowe mogą być niespodziewanie pobudzone do działania przez zewnętrzne pola magnetyczne. Aby się przed tym zabezpieczyć, należy takie przekaźniki umieszczać w osłonie metalowej. Skuteczność zabezpieczenia należy przetestować w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

### Czynniki środowiskowe

Brud, zjawisko utleniania i wilgoć są dużym zagrożeniem dla styków. Większość przekaźników jest hermetycznie zamknięta i nie należy tego zmieniać.

Przekaźniki są podatne na wibracje, które mogą mieć wpływ na zachowanie się styków i przyczyniać się do ich szybszego zużycia. Mocne drgania mogą nawet trwale uszkodzić przekaźnik. Tam, gdzie drgania mogą być groźne, należy zastosować **przekaźnik półprzewodnikowy** (opisany w tomie 2.).



# Rezystor

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **potencjometr** (rozdział 11.).

## Funkcja

Rezystor jest jednym z podstawowych elementów elektronicznych. Jego zadaniem jest hamowanie przepływu prądu i obniżanie napięcia w obwodzie elektrycznym. Jego zasadniczą część jest zbudowana z materiału o małej przewodności elektrycznej, a z obwodem zewnętrznym łączy się za pośrednictwem dwóch dobrze przewodzących wyprowadzeń. Rezystancja, czyli opór stawiany prądowi, jest wyrażana w omach, oznaczanych w skrócie grecką literą omega ( $\Omega$ ).

Symbole rezystora stosowane w schematach ideowych są pokazane na rysunku 10.1 (po lewej: tradycyjny symbol amerykański; po prawej: nowsza wersja europejska). Symbol amerykański jest jeszcze niekiedy stosowany w Europie, podobnie jak europejski bywa czasami stosowany w USA. Litery K lub M oznaczają, że podaną wartość należy pomnożyć przez, odpowiednio, 1000 lub 1 000 000. W Europie, a niekiedy także w USA, litery te zastępują przecinek dziesiętny, a zatem wartość 4,7 k $\Omega$  może być zapisana jako 4,7K lub 4K7, a wartość 3,3 M $\Omega$  jako 3,3M lub 3M3 itd. (Wartość liczbową przytoczoną na rysunku 10.1 została wybrana zupełnie przypadkowo).



**Rysunek 10.1.** Symbole rezystora; po lewej: symbol popularny w USA; po prawej: symbol rozpowszechniony w Europie; wartość 4,7 k $\Omega$  wybrano przypadkowo

Najczęstsze zastosowania rezystora to: ograniczenie szybkości ładowania **kondensatora**; ustalanie warunków pracy

elementów półprzewodnikowych, na przykład  **tranzystora bipolarnego**; zabezpieczanie **LED-ów** przed zbyt dużym prądem; ustalanie lub ograniczanie częstotliwości w obwodach fonii (w połączeniu z innymi elementami); podciąganie lub ściąganie napięcia na wejściu cyfrowego układu scalonego; ustalanie napięcia w określonym punkcie obwodu. W ostatnim z wymienionych zastosowań często występują dwa rezystory tworzące tzw. *dzielnik napięcia*.

Tam, gdzie wymagana jest zmienność rezystancji, można zastosować **potencjometr**.

Przykłady rezystorów o różnych wartościach są pokazane na rysunku 10.2. W kolejności od góry do dołu są to rezystory o następujących mocach znamionowych: 3 W; 1 W; 0,5 W; 0,25 W; 0,25 W; 0,25 W i 0,125 W. Dokładność (tolerancja) wartości rezystancji wynosi, odpowiednio (od góry do dołu):  $\pm 5\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 5\%$ ,  $\pm 1\%$ ,  $\pm 1\%$ ,  $\pm 5\%$  i  $\pm 1\%$ . Beżowy kolor korpusu rezystora często oznacza, że jego tolerancja wynosi  $\pm 5\%$ , a kolor niebieski zwykle wskazuje na tolerancję  $\pm 1\%$  lub  $\pm 2\%$ . Rezystory niebieskie i ciemnobrązowe mają warstwę oporową wykonaną z tlenków metali, a zielone i beżowe mają warstwę węglową. Więcej informacji na temat parametrów rezystora zawarto w punkcie „Wartości”.



**Rysunek 10.2.** Przykłady rezystorów; szczegółowy opis znajduje się w tekście

## Działanie

Hamowanie przepływu prądu i obniżanie napięcia przez rezystor wiąże się ze zamianą energii elektrycznej na ciepłą. W nowoczesnych układach elektronicznych przemiana jednej energii w drugą zachodzi z mocą rzadko przekraczającą 1 W.

Jeśli przez  $R$  oznaczmy rezystancję wyrażoną w omach ( $\Omega$ ), przez  $I$  — natężenie prądu w amperach (A), a przez  $U$  — napięcie na rezystorze (różnicę potencjału między końcówkami rezystora) w woltach (V), to zgodnie z prawem Ohma:

$$R = U / I$$

Innymi słowy, jeśli przez rezystor o wartości  $1 \Omega$  popłynie prąd o natężeniu 1 A, to napięcie między jego końcówkami wyniesie 1 V.

Jeśli przez  $P$  oznaczmy moc w watach (W), z jaką energia elektryczna zamienia się w rezystorze na energię ciepłą, to dla prądu stałego możemy zapisać następującą zależność:

$$P = U * I$$

Po podstawieniu prawa Ohma otrzymujemy zależność między mocą a prądem i rezystancją:

$$P = I^2 * R$$

Można też uzależnić moc od napięcia i rezystancji:

$$P = U^2 / R$$

Te dwa alternatywne wzory przydają się, gdy trzeba obliczyć moc, a nieznane jest napięcie na rezystorze lub natężenie płynącego przez niego prądu.

Te same zależności obowiązują dla prądu przemiennego, choć ich interpretacja jest nieco bardziej subtelna.

## Rodzaje

*Rezystory osiowe* mają wyprowadzenia po przeciwnych stronach zazwyczaj cylindrycznego korpusu. *Rezystory radialne* mają wyprowadzenia po jednej stronie korpusu. Te drugie są rzadko spotykane.

*Rezystory precyzyjne* charakteryzują się tolerancją nieprzekraczającą  $\pm 1\%$ .

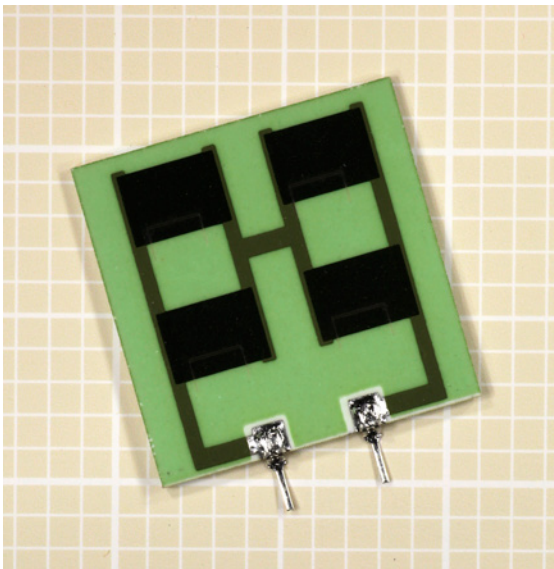
*Rezystory ogólnego przeznaczenia* są mniej precyzyjne i niezbyt stabilne.

*Rezystory mocy* są stosowane głównie w zasilaczach i wzmacniaczach, a ich moc znamionowa wynosi co najmniej 1 W. Są stosunkowo duże i często wymagają zamontowania *radiatora* lub wentylatora.

*Rezystory drutowe* są stosowane w układach wydzielających dużo ciepła. Najczęściej są zbudowane z dielektrycznego korpusu (rdzenia), który może być cylindryczny lub płaski, i nawiniętego na nim drutu oporowego. Drut jest zazwyczaj wykonany ze stopu niklowo-chromowego (zwanego *nichromem*) i ma powłokę ochronną.

Ciepło, które wydziela prąd płynący przez drut oporowy, może być problemem w przypadku obwodów elektronicznych, z reguły źle tolerujących wysokie temperatury. Są jednak urządzenia, takie jak suszarka do włosów, toster czy grzejnik elektryczny, w których elementy nichromowe są stosowane właśnie po to, by wydzielały ciepło. Rezystory drutowe są też stosowane w drukarkach 3D do roztopiania tworzyw sztucznych lub innych materiałów, z których powstają drukowane przedmioty.

*Rezystory grubowarstwowe* mają postać płytek lub prostopadłościennych kostek. Przykład takiego rezystora w formie płytki i mającego moc 10 W jest pokazany na rysunku 10.3. Jego rezystancja wynosi 1 K.



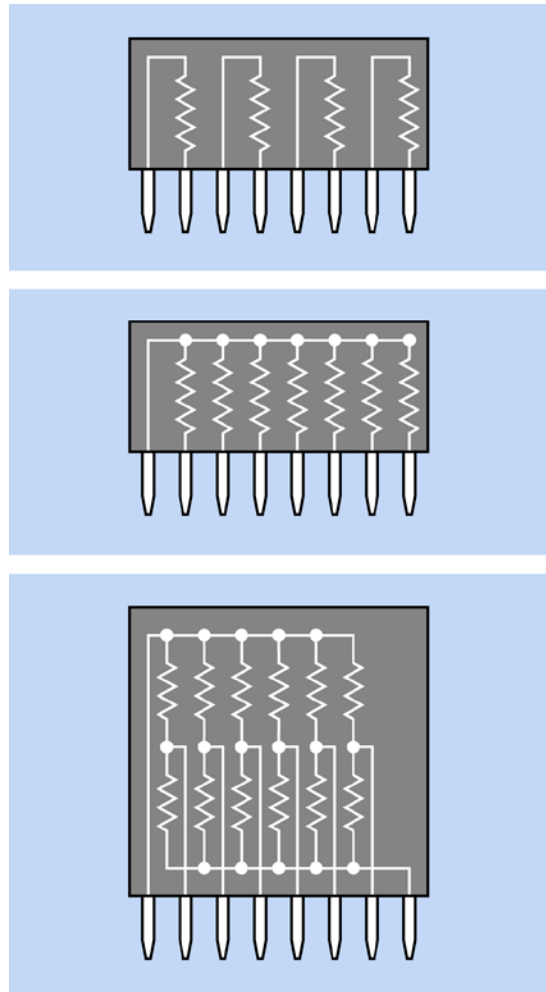
**Rysunek 10.3.** Rezystor grubowarstwowy w postaci kwadratowej płytki o boku 2,5 cm i grubości 0,8 mm

*Rezystory montowane powierzchniowo (SMD)* zazwyczaj składają się z nadruku oporowego naniesionego na płytkę ceramiczną o dużej zawartości tlenku aluminium. Często ich długość wynosi 6 mm (seria rozmiarowa o numerze 2512). Każdy rezystor SMD ma dwa niklowane zakończenia pokryte lutem roztopianym podczas montażu rezystora na płytce drukowanej. Górna powierzchnia jest zabezpieczana cienką warstwą żywicy epoksydowej.

## Matryca rezystorowa

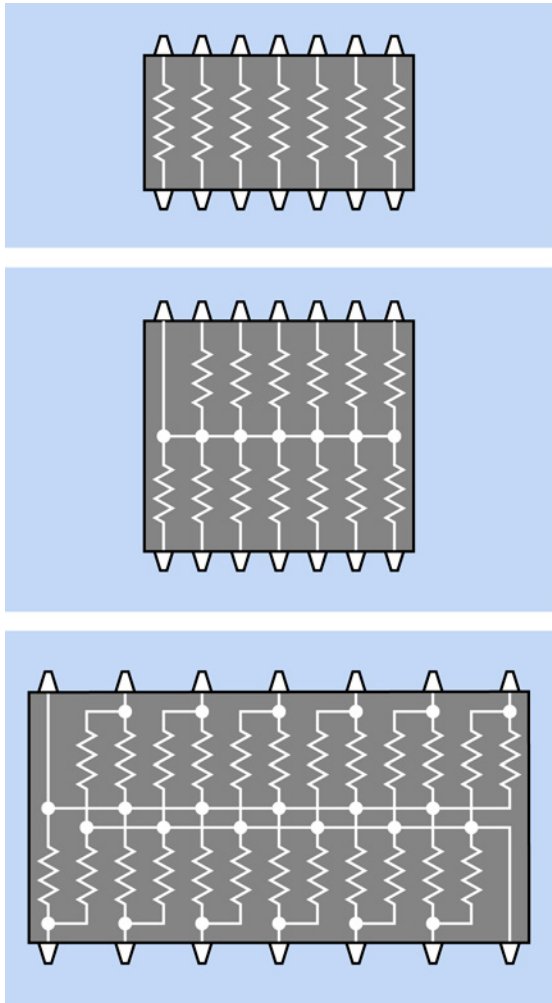
Układ jednakowych rezystorów traktowany jako jeden element elektroniczny. Inne nazwy to: *siatka rezystorowa* lub *drabinka rezystorowa*.

Matryca rezystorowa w wersji jednorzędowej (SIP) może mieć jedną z trzech wewnętrznych konfiguracji: izolowaną, z jedną wspólną szyną lub z dwiema szynami. Konfiguracje te są pokazane na rysunku 10.4. Wersja izolowana jest najczęściej dostępna w obudowie SIP z 6, 8, lub 10 pinami. Pozostałe dwie konfiguracje mają zazwyczaj 8, 9, 10 lub 11 pinów.



**Rysunek 10.4.** W jednej obudowie typu SIP/SIL można umieścić kilka rezystorów w różnych konfiguracjach; szczegółowy opis znajduje się w tekście

W układzie izolowanym każdy rezystor jest elektrycznie niezależny od pozostałych i ma własne wyprowadzenia zewnętrzne. W układzie z jedną szyną każdy rezystor ma jedną końcówkę podłączoną do wspólnej szyny połączonej z jednym pinem zewnętrznym. Druga końcówka każdego rezystora jest wyprowadzona na zewnątrz jako odrębny pin. Konfiguracja z dwiema szynami jest nieco bardziej złożona, gdyż składa się z par rezystorów włączonych szeregowo pomiędzy dwie szyny, przy czym punkt środkowy każdej pary jest wyprowadzony na zewnątrz jako odrębny pin. Takie pary rezystorów funkcjonują jak dzielniki napięcia i są

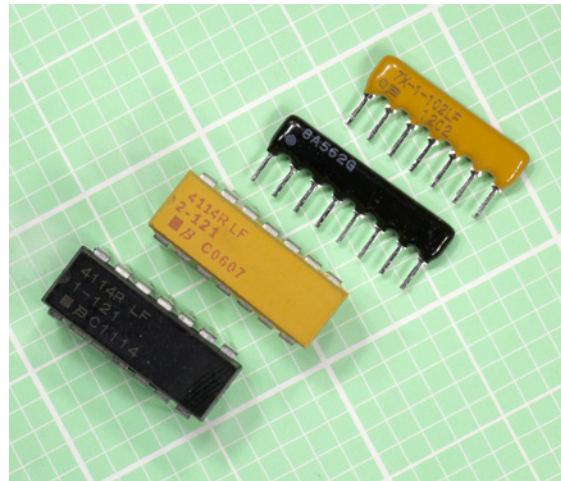


**Rysunek 10.5.** Drabinki rezystorowe mogą mieć również obudowy dwurzędowe (DIP/DIL); szczegółowy opis znajduje się w tekście

często stosowane w obwodach logicznych ze sprzężeniem emiterowym (ECL) wymagających napięcia  $-2\text{ V}$ .

Podobne konfiguracje są możliwe w wersji dwurzędowej (DIP), co pokazano na rysunku 10.5. U góry widać układ izolowany, który w wersji DIP jest dostępny z 8, 14, 16, 18 lub 20 pinami. W środku znajduje się układ z jedną szyną dostępny w obudowach z 8, 14, 16, 18 lub 20 pinami. Widoczna u dołu konfiguracja z dwiema szynami bywa montowana w obudowach z 8, 14, 16, 18 lub 20 pinami.

Wygląd zewnętrzny drabinek typu SIP/SIL i DIP/DIL jest pokazany na rysunku 10.6. W kolejności od lewej do prawej są to następujące konfiguracje: 7 rezystorów  $120\ \Omega$  izolowanych, 13 rezystorów  $120\ \Omega$  z jedną wspólną szyną, 7 rezystorów  $5,6\ \text{k}\Omega$  z jedną wspólną szyną oraz 6 rezystorów  $1\ \text{k}\Omega$  z jedną wspólną szyną.



**Rysunek 10.6.** Drabinki rezystorowe w obudowach SIP/SIL i DIP/DIL; więcej danych szczegółowych znajduje się w tekście

Matryce rezystorowe z układami izolowanymi lub jednoszynowymi umożliwiają zmniejszenie liczby elementów w konstrukcjach wymagających zastosowania licznych rezystorów podciągających, ściągających czy obciążeniowych. Matryce z jedną wspólną szyną są często stosowane także w połączeniu z 7-segmentowymi **wyświetlaczami LED-owymi**, których każdy segment musi być łączony szeregowo z rezystorem, a wszystkie te rezystory łączą się potem wspólnie z masą lub źródłem zasilania.

Istnieją też matryce rezystorowe przystosowane do montażu powierzchniowego i zawierające pojedynczą parę rezystorów w układzie dzielnika napięcia.

Niezbyt powszechne, ale jednak dostępne, są *scalone pakiety RC* zawierające pary rezystorów i kondensatorów połączonych ze sobą szeregowo. Pakiet zawierający tylko jedną parę RC może służyć jako *tłumik przepięć* chroniący styki **przełącznika** lub **przełącznika** pracującego z obciążeniem indukcyjnym. Więcej informacji na temat obwodów tłumiących znajduje się w punkcie „Tłumik”, w rozdziale 12., „Kondensator”.

## Wartości

1 *kiloom*, w skrócie 1 k $\Omega$ , 1 k lub 1 K, to inaczej 1000  $\Omega$ . 1 *megaom*, w skrócie 1 M $\Omega$  lub 1 M, to inaczej 1000 k $\Omega$ . 1 *gigaom*, w skrócie 1 G $\Omega$ , to inaczej 1000 M $\Omega$ , ale ta jednostka jest rzadko używana. Wartości mniejsze niż 1  $\Omega$  są rzadko używane, a zapisuje się je jako ułamek dziesiętny z następującym po nim symbolem  $\Omega$ . Nazwy *miliom* (tysięczna część oma) używa się tylko w wyjątkowych sytuacjach. Na rysunku 10.7 pokazano tabelę ułatwiającą przeliczanie tych jednostek.

Omy	Kiloomy	Megaomy
1	0,001	0,000001
10	0,01	0,00001
100	0,1	0,0001
1000	1	0,001
10 000	10	0,01
100 000	100	0,1
1 000 000	1000	1

**Rysunek 10.7.** Równoważne wartości w omach, kiloomach i megaomach

Wartość rezystora nie zmienia się zarówno w obwodzie prądu stałego, jak i zmiennego, chyba że częstotliwość tego drugiego jest niezwykle duża.

W większości układów elektronicznych stosowane są rezystancje z zakresu od 100  $\Omega$  do 10 M $\Omega$ . Moc znamionowa rezystorów waha się od 0,0625 W do 1000 W, ale w praktyce

zakres ten jest ograniczony i w większości przypadków nie wykracza poza przedział od 0,125 W do 0,5 W, zwłaszcza jeśli są to układy montowane powierzchniowo.

## Tolerancja

Tolerancja, czyli dokładność, rezystora przyjmuje wartości od  $\pm 0,001\%$  do  $\pm 20\%$ , z tym że najczęściej spotyka się  $\pm 1\%$ ,  $\pm 2\%$ ,  $\pm 5\%$  i  $\pm 10\%$ .

W czasach, gdy normą była tolerancja o wartości  $\pm 20\%$ , ustanowiono dla rezystorów szereg wartości, których stosowanie miało zminimalizować ryzyko pokrywania się rzeczywistych wartości rezystorów o różnych rezystancjach znamionowych. Ten szereg obejmował następujące wartości: 10, 15, 22, 33, 47, 68 i 100. Na rysunku 10.8 niebieskie romby reprezentują częstość występowania wartości rzeczywistych, a białe linie biegnące przez środek każdego rombu wyznaczają wartości teoretyczne zgodne ze wspomnianym wyżej szeregiem.

Wartości tworzące szereg są mnożnikami kolejnych potęg liczby dziesięć, i tak w zakresie zaczynającym się od 100 dostępne są wartości 100  $\Omega$ , 150  $\Omega$ , 220  $\Omega$ , 330  $\Omega$ , 470  $\Omega$  i 680  $\Omega$ , a w zakresie zaczynającym się od 1 szereg zawiera wartości 1  $\Omega$ , 1,5  $\Omega$ , 2,2  $\Omega$ , 3,3  $\Omega$ , 4,7  $\Omega$  i 6,8  $\Omega$ .

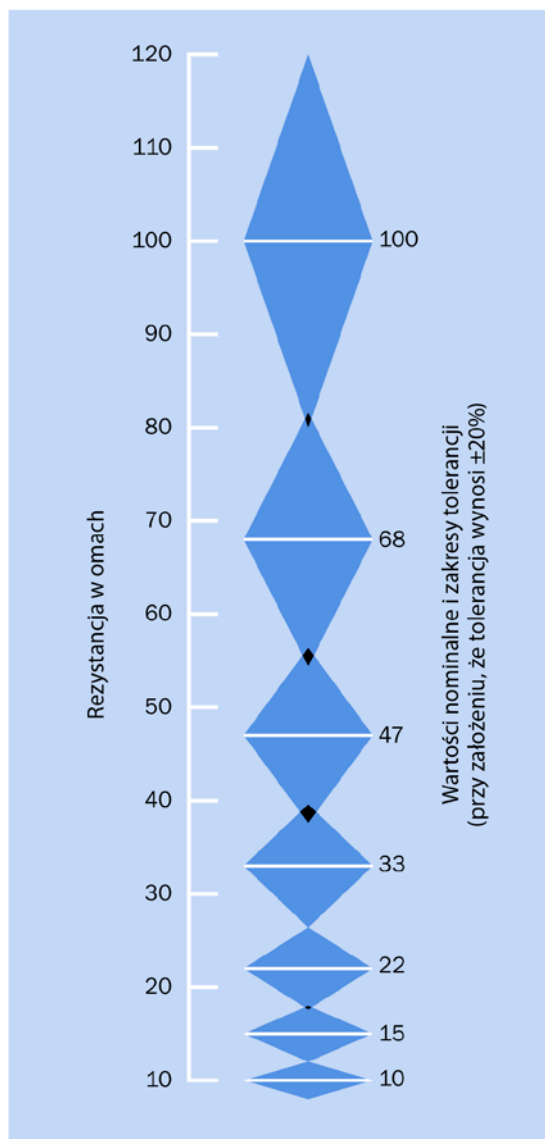
Obecnie obowiązują mnożniki wyznaczone przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną (IEC) w ramach normy 60063. Wraz z poprawą dokładności rezystorów uzupełniano ciąg mnożników wartościami pośrednimi. Na rysunku 10.9 pokazano tabelę z szeregami mnożników odpowiadającymi tolerancjom  $\pm 20\%$ ,  $\pm 10\%$  i  $\pm 5\%$ .

Dla tolerancji  $\pm 0,5\%$  wyznaczono szereg złożony z mnożników trzycyfrowych.

Wiele kondensatorów jest wciąż produkowanych z tolerancją zaledwie  $\pm 20\%$ , więc ich wartości nominalne są dopasowane do starego szeregu mnożników rezystancji, tyle że niemal zawsze są to niewielkie części farada. Więcej informacji na ten temat zawiera rozdział 12., „Kondensator”.

## Kodowanie wartości

Rezystory z końcówkami osiowymi przystosowanymi do montażu przewlekane mają wartość rezystancji zakodowaną w formie trzech kolorowych pasków, z których dwa



**Rysunek 10.8.** Graficzna prezentacja nominalnych wartości rezystancji (białe linie) wyznaczonych przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną; ciemnoniebieskie romby pokazują przedziały rzeczywistych wartości przy tolerancji wynoszącej  $\pm 20\%$ ; czarnym kolorem zaznaczone są miejsca, w których sąsiednie zakresy nakładają się

pierwsze reprezentują cyfry od 0 do 9, a trzeci określa mnożnik dziesiątynny (liczbę zer, od 0 do 9, które należy dodać do dwóch poprzednich cyfr). Jeśli jest czwarty pasek, to jego

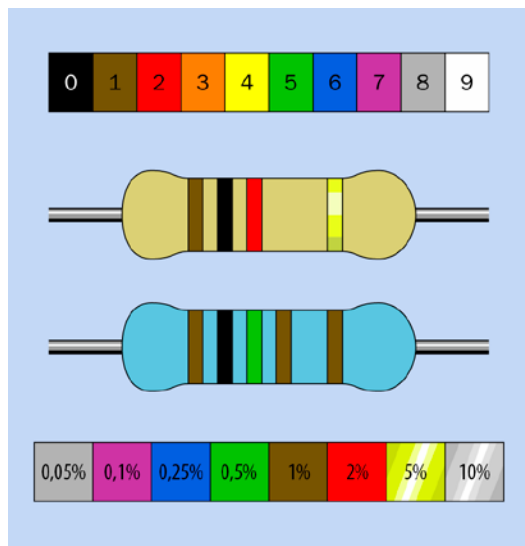
Standard Resistor Values	Resistor Tolerances (plus or minus)		
	20%	10%	5%
100	100	100	100
			91
		82	82
		75	75
68	68	68	68
			62
		56	56
		51	51
47	47	47	47
			43
		39	39
		36	36
33	33	33	33
			30
		27	27
		24	24
22	22	22	22
			20
		18	18
		16	16
15	15	15	15
			13
		12	12
		11	11
10	10	10	10

**Rysunek 10.9.** Wartości nominalne rezystorów przy różnych wartościach tolerancji; aby uzyskać wartość nominalną spoza widocznego tu zakresu, należy zastosować mnożenie przez odpowiednią wielokrotność liczby 10

kolor, złoty lub srebrny, informuje o tolerancji, przy czym złoty oznacza  $\pm 10\%$ , a srebrny  $\pm 5\%$ . Brak czwartego paska oznacza tolerancję  $\pm 20\%$ , ale teraz takie rezystory są raczej rzadkością.

Obecnie wiele rezystorów ma nawet pięć pasków, które pozwalają zakodować wartości pośrednie lub ułamkowe. W takim przypadku pierwsze trzy paski określają cyfrową część wartości rezystancji (przy użyciu tego samego kodu kolorowego co poprzednio), a czwarty jest mnożnikiem. Piąty, namalowany wokół przeciwległego końca rezystora, reprezentuje wartość tolerancji.

Na rysunku 10.10 kolorowe odpowiedniki cyfr i mnożnika są pokazane w górnej części, a znaczenie kolorów paska tolerancji jako wartości procentowej jest pokazane u dołu.



**Rysunek 10.10.** Kolorowy kod paskowy rezystorów przeznaczonych do montażu przewlekanego

Na rysunku widoczne są również dwa przykładowe rezystory z namalowanymi kolorowymi paskami. Ten górny ma wartość  $1\text{ k}\Omega$  (pierwszy pasek jest brązowy i reprezentuje cyfrę 1; drugi, czarny, reprezentuje cyfrę 0, a trzeci, czerwony, nakazuje dopisanie jeszcze dwóch zer). Żółty pasek po prawej stronie oznacza tolerancję na poziomie  $\pm 5\%$ . Dolny rezystor ma wartość  $1,05\text{ k}\Omega$ , co wynika z obecności pasków brązowego (1), czarnego (0), zielonego (5) i brązowego (dopisanie jednego zera). Brązowy pasek po prawej stronie oznacza, że tolerancja wynosi  $\pm 1\%$ .

W bardzo starych urządzeniach elektronicznych można spotkać rezystory kodowane według schematu korpus-końcówka-kropka, w którym kolor korpusu określał pierwszą cyfrę, kolor końcówki — drugą cyfrę, kolor kropki — mnożnik

dziesiątą. Znaczenie poszczególnych kolorów było takie samo jak w obecnym kodzie paskowym.

We współczesnych schematach kodowania — zarówno trzypaskowym, jak i czteropaskowym — paski określające wartość rezystancji są zgrupowane ze sobą i oddzielone większym odstępem od paska tolerancji. Podczas odczytywania wartości rezystancji należy tak trzymać rezystor, aby grupa pasków była po lewej stronie.

Pewne zamieszanie wprowadza, na szczęście mało popularny, schemat kodowania, w którym trzy pierwsze paski oznaczają wartość rezystancji, czwarty określa tolerancję, a piąty, umieszczony na przeciwległym końcu rezystora, wskazuje niezawodność.

W niektórych specjalistycznych zastosowaniach, na przykład militarnych, można spotkać jeszcze inne systemy kodowania.

W przypadku rezystorów przeznaczonych do montażu przewlekanego kolorami korpusu zwykle się oznaczać materiał warstwy przewodzącej, i tak kolor beżowy oznacza warstwę węglową, a niebieski — metaliczną. Kolor niebieski może także oznaczać, że rezystor ma charakter *bezpiecznikowy* (przeiążony przepala się w sposób nieszkodliwy dla otoczenia, podobnie jak bezpiecznik). Rezystory *niepalne* mają najczęściej korpus w kolorze białym. Podczas wymiany tego typu rezystorów należy zwracać uwagę także na ich kolory.

Niektóre rezystory produkowane współcześnie mają swoje parametry nadrukowane na korpusie. Liczby nadrukowane na korpusach rezystorów montowanych powierzchniowo reprezentują wartości rezystancji w sposób zakodowany, a nie bezpośredni. Ostatnia cyfra określa liczbę zer, które należy dopisać do wartości utworzonej z poprzedzających ją cyfr (dwóch lub trzech). W tym kodzie funkcję przecinka dziesiętnego pełni litera R. Tak więc rezystor z nadrukiem  $3R3$  ma wartość  $3,3\ \Omega$ . Nadruki 330 i 332 oznaczają, odpowiednio,  $33\ \Omega$  i  $3300\ \Omega$ . Nadruk czterocyfrowy 2152 należy zinterpretować jako  $21\ 500\ \Omega$ .

Rezystor SMD (do montażu powierzchniowego) z nadrukowaną tylko jedną cyfrą zero jest elementem *bezoporowym* (zero omów) i może pełnić funkcję **zwory**. Tego typu elementy są stosowane ze względów praktycznych, gdyż mogą być łatwo montowane przez zautomatyzowane systemy produkcyjne. Z reguły służą do mostkowania ścieżek na płytce drukowanej.

W schematach drukowanych na papierze i potem wielokrotnie kopiowanych może dojść do obniżenia jakości na tyle dużej, że znaki dziesiętne (kropka lub przecinek) mogą się po prostu stać niewidoczne, ale mogą też pojawić się plamki imitujące tego typu znaki. W Europie postanowiono rozwiązać problem ewentualnych pomyłek przez zastąpienie znaku dziesiętnego odpowiednią literą, na przykład wartość 5,6 K jest zapisywana jako 5K6, a 3,3 M jako 3M3. Coraz częściej praktyka ta jest stosowana również w USA.

## Stabilność

Ten parametr określa zdolność rezystora do utrzymania swojej wartości na stałym poziomie niezależnie od czynników zewnętrznych, takich jak temperatura, wilgotność, drgania, wielkość obciążenia, natężenie prądu i napięcie. *Temperaturowy współczynnik rezystancji* (najczęściej oznaczany skrótem TWR) jest wyrażany w milionowych częściach rezystancji znamionowej na każdy stopień odchyłki od temperatury pokojowej (zwykle przyjmuje się 25°C). TWR może przyjmować wartości dodatnie lub ujemne.

*Napięciowy współczynnik rezystancji* (najczęściej oznaczany skrótem NWR) opisuje zmiany rezystancji będące skutkiem zmian napięcia. Wartość tego współczynnika ma znaczenie tylko w przypadku rezystorów węglowych. Jeśli przez  $U_1$  oznaczymy napięcie znamionowe rezystora, przez  $R_1$  rezystancję przy napięciu  $U_1$ , przez  $U_2$  napięcie stanowiące 10% napięcia znamionowego i przez  $R_2$  rezystancję przy tym napięciu, to współczynnik NWR będzie można obliczyć według następującego wzoru:

$$NWR = (100 * (R_1 - R_2)) / (R_2 * (U_1 - U_2))$$

## Materiały

Rezystory są wykonywane z różnych materiałów.

*Kompozyt węglowy* — cząsteczki węgla zmieszane ze spoiwem. Gęstość cząsteczek węgla decyduje o wartości rezystancji, która może wynosić od 5  $\Omega$  do 10 M $\Omega$ . Wadą tego materiału jest mała dokładność rezystancji (tolerancja rezystorów wynosi najczęściej  $\pm 10\%$ ), stosunkowo duża wartość współczynnika napięciowego i wysoki poziom szumów. Do zalet należy zaliczyć niewielką indukcyjność i odporność na krótkotrwałe przeciążenia.

*Folia węglowa*. Na ceramiczne podłoże nakładana jest cienka warstwa kompozytu węglowego, która potem jest spiralnie nacinana w celu uzyskania odpowiedniej rezystancji. W ten sposób wykonywane są rezystory przeznaczone zarówno do montażu przewlekane, jaki powierzchniowego. Zakres wartości jest tu porównywalny z zakresem wartości rezystorów wykonanych w całości z kompozytu węglowego, ale dokładność jest nieco lepsza (zazwyczaj  $\pm 5\%$ ). Wady tego typu rezystorów są wciąż te same, z tym że ich nasilenie jest mniejsze. W obwodach wymagających dużej dokładności rezystancji należy stosować rezystory z folii metalowej, a nie węglowej.

*Folia metalowa*. Podobnie jak w przypadku folii węglowej, na ceramiczne podłoże nakładana jest cienka warstwa metalu, która potem jest spiralnie nacinana w celu uzyskania odpowiedniej rezystancji. Takie rezystory mają większą indukcyjność niż wykonane z kompozytu węglowego, ale za to generują mniej szumów. Dostępne są z tolerancjami  $\pm 5\%$ ,  $\pm 2\%$  i  $\pm 1\%$ . Początkowo były znacznie droższe od odpowiedników węglowych, ale obecnie są to różnice ułamkowe. Produkowane są z przeznaczeniem zarówno do montażu przewlekane, jak i powierzchniowego. Mają niewielką moc, najczęściej 0,125 W.

W przypadku rezystorów grubowarstwowych folia nichromowa jest wytwarzana metodą natryskową, a w cienkowarstwowych jest napyłana. Cienkie folie mają mniejszy współczynnik temperaturowy i dlatego są stosowane w urządzeniach przeznaczonych do pracy przy znacznych zmianach temperatury, na przykład w satelitach.

*Gruba folia metalowa*. Ten rodzaj folii metalowej jest nanoszony na płytkę ceramiczną, a następnie przez wytrawienie odpowiedniej ilości folii ustalana jest jej żądana rezystancja. Tak wykonane rezystory mają zazwyczaj wyprowadzenia osiowe, są bardzo dokładne i stabilne, ale ich rezystancja nie może być dowolnie duża.

*Precyzyjne zwoje drutowe*. Dawniej rezystory drutowe były stosowane w obwodach wymagających wielkiej dokładności, ale obecnie są wypierane przez folię metalową.

*Zwoje drutowe dużej mocy*. Są stosowane, gdy moc rozproszona ma przekraczać 1 lub 2 waty. Drut oporowy jest nawijany na korpusie, który zazwyczaj jest ceramiczny, i dlatego tego typu rezystory są niewłaściwie nazywane ceramicznymi. Korpus może być wykonany z włókna szklanego lub innego materiału dielektrycznego, który dobrze odprowadza

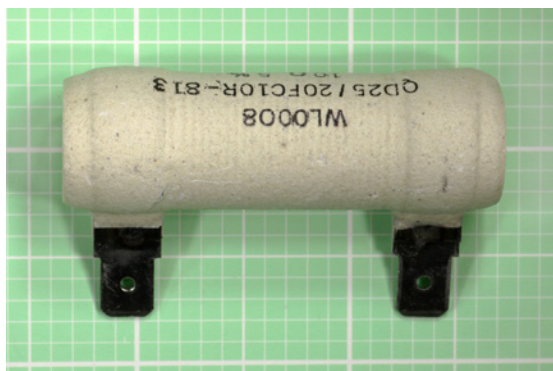
ciepło. Całość jest zalewana szkliwem lub masą cementową albo umieszczana w aluminiowej obudowie mocowanej do radiatora. Niemal zawsze tego typu rezystory mają wartość rezystancji nadrukowaną na swojej powierzchni (bez kodowania).

Dwa typowe rezystory drutowe są pokazane na rysunku 10.11. Górny ma rezystancję  $180\ \Omega$  i moc  $12\ \text{W}$ , a dolny ma, odpowiednio,  $15\ \text{k}\Omega$  i  $13\ \text{W}$ .



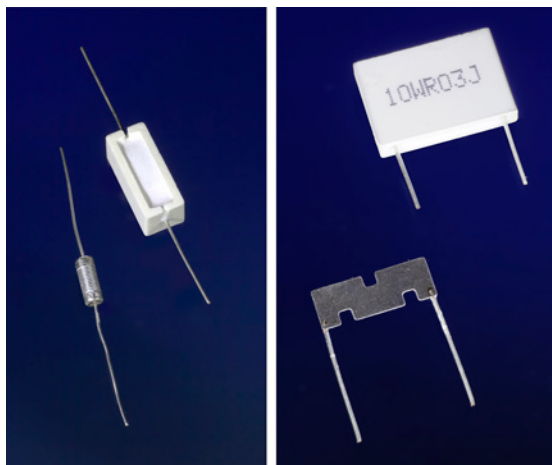
**Rysunek 10.11.** Dwa rezystory drutowe różniące się znacznie rezystancją, ale mające podobną moc

Większy gabarytowo rezystor drutowy jest pokazany na rysunku 10.12. Jest to rezystor o dużej mocy ( $25\ \text{W}$ ) i stosunkowo niewielkiej rezystancji ( $10\ \Omega$ ).



**Rysunek 10.12.** Duży rezystor drutowy o mocy znamionowej  $25\ \text{W}$

Na rysunku 10.13 pokazano dwa rezystory cementowe w całości oraz z usuniętą powłoką cementową. Rezystor widoczny po lewej ma w środku element drutowy o rezystancji  $1,5\ \Omega$  i mocy  $5\ \text{W}$ . Z kolei ten po prawej jest przykładem rezystora o bardzo małej wartości (zaledwie  $0,03\ \Omega$ ), ale za to dużej mocy ( $10\ \text{W}$ ).



**Rysunek 10.13.** Dwa rezystory o małej i bardzo małej rezystancji z ich elementami oporowymi skrywanymi pod osłoną cementową

Na rysunku 10.14 rezystor górny ma odsłonięty element oporowy, a dolny ma odprowadzającą ciepło osłonę aluminiową z nadrukiem informującym o jego najważniejszych parametrach: rezystancji  $6,5\ \Omega$  i mocy  $10\ \text{W}$ .



**Rysunek 10.14.** U góry: rezystor  $30\text{-omowy}$ ; u dołu: rezystor  $6,5\text{-omowy}$

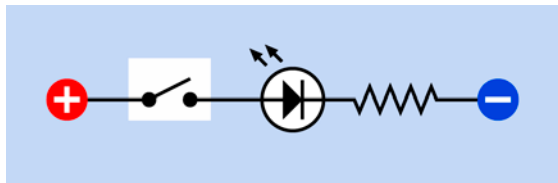
W rezystorach mocy odprowadzanie ciepła jest kwestią niezwykle istotną. Jeśli inne czynniki, w tym napięcie, są stałe, to rezystor o mniejszej wartości przewodzi większy prąd, a wydzielane przez niego ciepło jest proporcjonalne do kwadratu natężenia tego prądu. Dlatego tam, gdzie są potrzebne rezystory o małych rezystancjach, stosuje się przeważnie elementy drutowe. Jednakże ze względu na indukcyjność raczej nie nadają się one do przewodzenia impulsów i prądów zmiennych o dużych częstotliwościach.

## Stosowanie

Poniżej znajduje się omówienie kilku najczęstszych zastosowań rezystora.

### Ograniczanie prądu diody LED

Aby uchronić diodę świecącą przed uszkodzeniem w wyniku przepływu przez nią zbyt dużego prądu, łączy się ją z *rezystorem szeregowym*, którego zadaniem jest nie dopuścić do wzrostu natężenia prądu ponad dopuszczalną wartość. W przypadku pojedynczej diody (pełniącej często funkcję *wskaznika*) prąd przewodzenia z reguły nie powinien przekraczać 20 mA, a zatem wartość rezystora należy dobrać w zależności od napięcia zasilającego (patrz rysunek 10.15).

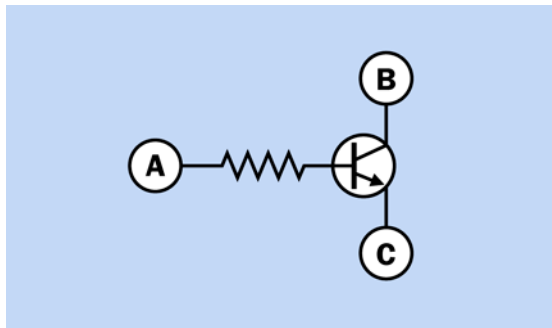


**Rysunek 10.15.** Rezystor szeregowy ogranicza natężenie prądu płynącego przez diodę LED

W przypadku elementów LED o dużej wydajności (zawierających w jednym 5- lub 10-milimetrowym pakiecie kilka diod) lub listew LED-owych stosowanych obecnie w domowych systemach oświetleniowych prąd dopuszczalny może być znacznie większy, a same elementy świecące mogą mieć już wbudowane własne układy zabezpieczające. Szczegółowych informacji należy szukać w karcie produktu.

### Ograniczanie prądów w tranzystorze

Na rysunku 10.16 pokazano tranzystor w układzie przełącznika lub wzmacniacza prądu płynącego od punktu B do punktu C. Rezystor ma tu ograniczać prąd bazy tranzystora (płynący od A do C). W rzeczywistych układach stosowane są także rezystory ograniczające prąd płynący od B do C.



**Rysunek 10.16.** Rezystor w obwodzie bazy tranzystora zabezpiecza złącze baza-emiter przed skutkami przepływu zbyt dużego prądu

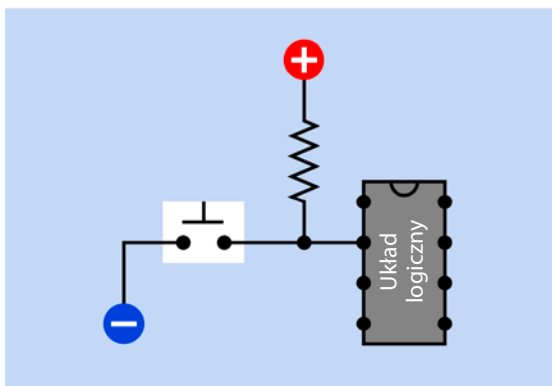
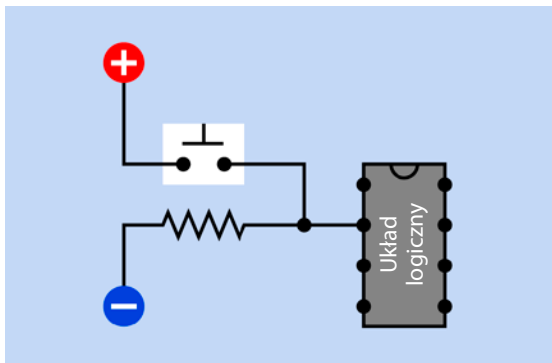
### Rezystory podciągające i ściągające

Jeśli wejście **mikrokontrolera** lub scalonego układu logicznego jest połączone z przełącznikiem lub przyciskiem, to, żeby uniknąć stanów nieustalonych na tym wejściu przy rozłączonym przełączniku, stosuje się rezystor *podciągający* lub *ściągający*, którego zadaniem jest połączenie pinu wejściowego z dodatnim biegunem zasilania lub masą. Oba przypadki są pokazane na rysunku 10.17, przy czym schemat górny przedstawia wariant z rezystorem ściągającym, a dolny — z podciągającym. Wartość tego rezystora wynosi najczęściej 10 kΩ. W chwili zwarcia styków to przełącznik (bądź przycisk) ustala stan wejścia, a nie rezystor, gdyż on łączy to wejście ze źródłem lub z masą w sposób bezpośredni, bez żadnych oporów dla przepływającego prądu. O tym, czy należy zastosować rezystor podciągający, czy ściągający, decyduje przede wszystkim typ układu scalonego.

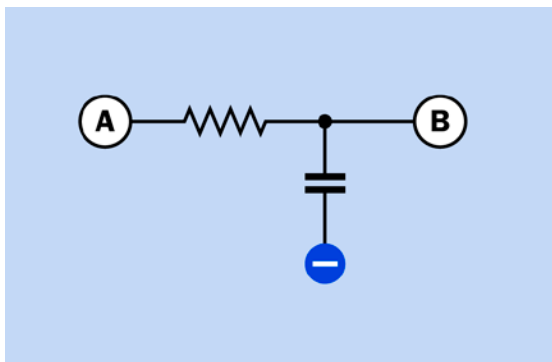
### Regulacja barwy dźwięku

Za pomocą układu złożonego z rezystora i kondensatora można w prosty sposób ograniczyć obecność wysokich tonów w przetwarzanym elektronicznie dźwięku. Schemat takiego układu jest pokazany na rysunku 10.18. Kondensator przepuszcza sygnały o wysokich częstotliwościach do masy,

a rezystor decyduje, jakie to mają być częstotliwości. Układ jest znany pod nazwą filtra dolnoprzepustowego.



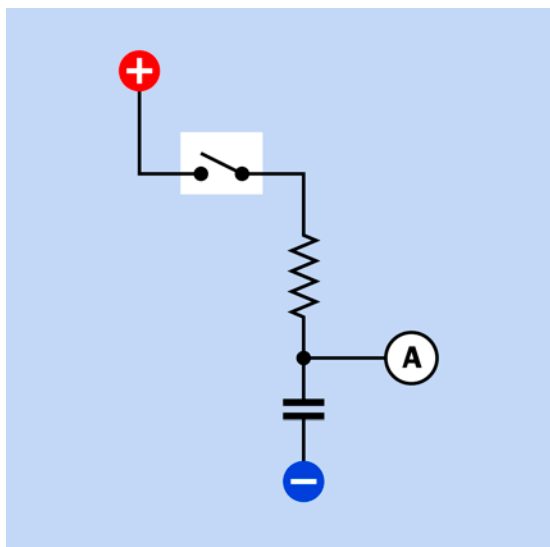
**Rysunek 10.17.** Rezystor ściągnięty (u góry) lub podciągnięty (u dołu) zapobiega występowaniu stanów nieustalonych na wejściu układu logicznego, gdy przycisk nie jest wciśnięty



**Rysunek 10.18.** Taki układ może służyć do usuwania wysokich częstotliwości z sygnału dźwiękowego; układ jest nazywany filtrem dolnoprzepustowym, ponieważ sygnały o niskich częstotliwościach przechodzą bez większych strat z punktu A do punktu B

## Układ RC

Rezystor połączony szeregowo z kondensatorem, tak jak na rysunku 10.19, wpływa na szybkość ładowania i rozładowywania kondensatora. Gdy zewrą się styki przełącznika, kondensator zacznie się ładować prądem płynącym ze źródła, a rezystor, jako ogranicznik natężenia prądu, będzie wpływał na szybkość tego procesu. Napięcie mierzone w punkcie A będzie rosło aż do osiągnięcia wartości bliskiej napięciu na źródle zasilania. Taka sytuacja nastąpi po całkowitym naładowaniu kondensatora. Zaprezentowany obwód jest często nazywany *układem RC (rezystancja-pojemność)*, a jego dokładniejsze omówienie znajduje się w rozdziale 12., „Kondensator”.



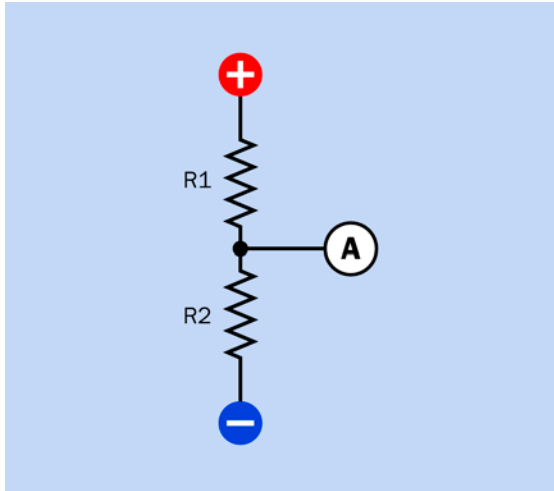
**Rysunek 10.19.** W układzie RC (rezystancja-pojemność) rezystor ogranicza tempo wzrostu potencjału mierzonego w punkcie A po zwarciu styków przełącznika

## Dzielnik napięcia

Za pomocą dwóch rezystorów można utworzyć dzielnik napięcia przez połączenie ich w sposób pokazany na rysunku 10.20. Jeśli przez  $U_{we}$  oznaczmy napięcie wejściowe (w tym przypadku napięcie źródła zasilania), to napięcie wyjściowe  $U_{wy}$  mierzone w punkcie A da się wyrazić za pomocą następującego wzoru:

$$U_{wy} = U_{we} * (R2 / (R1 + R2))$$

W rzeczywistości napięcie to jest zależne również od rezystancji obciążenia przyłączonego w punkcie A.



**Rysunek 10.20.** W obwodzie prądu stałego dwa połączone szeregowo rezystory mogą funkcjonować jako dzielnik napięcia; napięcie mierzone w punkcie A będzie mniejsze od napięcia zasilającego, ale większe od potencjału masy

Jeśli obciążenie dzielnika ma dużą impedancję, jak na przykład wejście układu logicznego lub komparatora, to jest bardziej wrażliwe na szum elektryczny i wtedy trzeba dzielnik napięcia utworzyć z rezystorów o mniejszych wartościach, aby utrzymać większe natężenie prądu i w ten sposób zapewnić większą stabilność napięcia wyjściowego.

## Szeregowe połączenie rezystorów

Jeśli rezystory o wartościach  $R_1, R_2, R_3 \dots$  zostaną połączone szeregowo, to ich całkowita rezystancja będzie równa sumie poszczególnych rezystancji:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \dots$$

Przez każdy z tych rezystorów popłynie prąd o takim samym natężeniu, ale napięcia na nich będą proporcjonalne do ich wartości. Jeśli przez  $U_S$  oznaczymy napięcie zasilania, a przez  $R_S$  sumę wszystkich rezystancji, to napięcie  $U_1$  na rezystorze  $R_1$  wyrazi się wzorem:

$$U_1 = U_S \cdot (R_1 / R_S)$$

## Równoległe połączenie rezystorów

Jeśli rezystory o wartościach  $R_1, R_2, R_3 \dots$  zostaną połączone równolegle, to ich całkowita rezystancja będzie spełniała następującą zależność:

$$1/R = (1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3) \dots$$

Przy założeniu, że wszystkie rezystory mają jednakową wartość  $R_I$  i że tych rezystorów jest  $N$ , rezystancja całkowita połączenia równoległego będzie miała wartość:

$$R = R_I / N$$

Jeśli wszystkie rezystory mają taką samą wartość i taką samą moc znamionową  $W_I$ , to ich łączna moc  $W$  będzie równa:

$$W = W_I \cdot N$$

Dlatego, jeśli układ wymaga zastosowania rezystora o dużej mocy, to przy braku takiego elementu można go zastąpić odpowiednią liczbą rezystorów o mniejszej mocy i większej rezystancji połączonych równolegle. Takie rozwiązanie może być nawet tańsze niż jeden rezystor drutowy dużej mocy. Na przykład zamiast jednego rezystora o wartości  $50 \Omega$  i mocy  $5 \text{ W}$  można zamontować 10 połączonych równolegle rezystorów o wartości  $500 \Omega$  i mocy  $0,5 \text{ W}$ . Trzeba tylko pamiętać, że upchanie ich wszystkich w małej objętości może utrudnić odprowadzanie wydzielanej energii.

## Możliwe błędy

### Ciepło

Rezystory są chyba najsolidniejszymi elementami elektronicznymi — są po prostu niezawodne i trwałe. Trudno je na przykład uszkodzić przez przegrzanie podczas lutowania.

Moc znamionowa rezystora niekoniecznie musi oznaczać, że taka, a nie inna ilość energii musi być przez niego rozpraszana w sposób ciągły. Małe rezystory ( $0,25 \text{ W}$  lub mniej) mogą tak samo ulec przegrzaniu jak duże. Ogólnie rzecz biorąc, bezpiecznie jest nie narażać rezystora na ciągle obciążenie powyżej 75% jego znamionowej mocy.

Jak łatwo się domyślić, problem przegrzania wiąże się raczej z rezystorami o dużej mocy, którym trzeba zapewnić dostatecznie wydajny sposób odprowadzania energii cieplnej. Przy projektowaniu urządzenia z takimi rezystorami trzeba odpowiednio rozmieścić inne elementy, aby dało się zastosować dostatecznie duży radiator i ewentualnie wentylator.

Niektóre rezystory mocy mogą prawidłowo funkcjonować nawet w temperaturze 250°C, ale inne elementy rozlokowane w pobliżu mogą mieć mniejszą odporność termiczną, nie mówiąc o elementach lub obudowach wykonanych z tworzyw sztucznych.

## Szum

*Szum elektryczny* wnoszony do obwodu przez rezystor jest w duże mierze zależny od materiałów, z jakich ten element jest wykonany, ale zależy też od natężenia prądu i napięcia. W obwodach niskoszumowych, jakimi powinny być wejścia wszelkiego rodzaju wzmacniaczy, należy stosować rezystory o małej mocy i możliwie wysokie napięcia.

## Indukcyjność

Cewka, jaką tworzy uzwojenie rezystora drutowego, może znacząco zwiększyć swoją indukcyjność przy wyższych częstotliwościach prądu. Jest to tzw. *indukcyjność pasożytnicza*. Ma ona nawet określoną częstotliwość rezonansową. Tego typu rezystory raczej nie nadają się do obwodów, w których częstotliwość przekracza 50 kHz.

## Niedokładność

Rozbieżność wartości rezystorów z tolerancją  $\pm 10\%$  może w jednych obwodach powodować większe problemy, a w innych mniejsze. Na przykład, jeśli w dzielniku napięcia jeden rezystor będzie miał wartość z górnego zakresu tolerancji, a drugi z dolnego, to napięcie uzyskane w punkcie ich połączenia może się znacznie różnić od oczekiwanego. Zgodnie ze schematem z rysunku 10.20, jeśli wartości znamionowe rezystorów R1 i R2 są równe, odpowiednio, 1 k $\Omega$  i 5 k $\Omega$ , a napięcie zasilające wynosi 12 V, to napięcie w punkcie powinno mieć wartość:

$$U = 12 * (( 5 / (5 + 1))) = 10$$

Jednakże, jeśli wartości rzeczywiste rezystorów R1 i R2 będą równe, odpowiednio, 1,1 k $\Omega$  i 4,5 k $\Omega$ , to napięcie w punkcie A wyniesie:

$$U = 12 * (( 4.5 / (4.5 + 1.1))) = 9.6$$

A jeśli rezystory będą mieć wartości z przeciwnego końca przedziału tolerancji, czyli R1 będzie równe 0,9 k $\Omega$ , a R2 przyjmie wartość 5,5 k $\Omega$ , to napięcie w punkcie A wyniesie:

$$U = 12 * (( 5.5 / (5.5 + 0.9))) = 10.3$$

Sytuacja pogarsza się, gdy oba rezystory powinny mieć równe wartości, aby napięcie w punkcie A było połową napięcia zasilającego (czyli w tym przypadku powinno wynosić 6 V). Gdyby zastosowano dwa rezystory o znamionowej wartości 5 k $\Omega$ , a w rzeczywistości górny miał 4,5 k $\Omega$ , a dolny 5,5 k $\Omega$ , to napięcie wyjściowe miałyby wartość:

$$U = 12 * (( 5.5 / (4.5 + 5.5))) = 6.6$$

Czy taka rozbieżność ma znaczenie, zależy od obwodu, w którym dzielnik został zastosowany.

Tanie rezystory do montażu przewlekanego mogą niekiedy mieć wartość spoza zakresu tolerancji. Najczęściej jest to wynik niedbałego procesu produkcyjnego. Dobrym nawykiem jest sprawdzanie każdego rezystora omomierzem, zanim się go zamontuje.

Podczas pomiarów napięcia występującego na rezystorze miernik, mający określoną rezystancję wewnętrzną, przejmując na siebie pewną część prądu, przez co sztucznie zaniża istniejące napięcie. Niektórzy nazywają to *bocznikującym działaniem miernika*. Problem nabiera rzeczywistego znaczenia dopiero przy pomiarach napięcia na rezystorach o wartości porównywalnej z rezystancją wewnętrzną miernika, która rzadko bywa mniejsza niż 10 M $\Omega$ .

## Niewłaściwa wartość rezystora

Podczas sortowania rezystorów i umieszczania ich w odrębnych pojemnikach może dojść do pomyłkowego pomieszania ich wartości. I to jest kolejny powód, dla którego warto zawsze zmierzyć rezystor przed zamontowaniem. Późniejsze wykrycie błędu może być bardzo trudne — rezystor 1 M $\Omega$  różni się od rezystora 100 k $\Omega$  tylko jednym kolorowym paskiem.





# Potencjometr

Zwany również *rezystorem zmiennym*; w niektórych zastosowaniach można go zastąpić *reostatem*.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **enkoder obrotowy** (rozdział 8.),
- **rezystor** (rozdział 10.).

## Funkcja

Napięcie podawane za pośrednictwem potencjometru może być przez niego dowolnie obniżane. Dlatego urządzenie to jest często stosowane jako regulator czułości układów wejściowych i zrównoważenia kanałów na wyjściu układów wzmacniających, a także w układach regulujących działanie rozmaitych czujników, na przykład detektorów ruchu.

Potencjometr można zastosować również tam, gdzie potrzebna jest możliwość zmiany rezystancji, chociaż w tej roli należałoby go nazwać raczej *rezystorem zmiennym*, ale większość ludzi i w tej sytuacji używa nazwy potencjometr<sup>1</sup>.

Gdy potencjometr jest używany jako rezystor zmienny do regulacji mocy dostarczanej ze źródła, powinno się go nazywać *reostatem* lub *opornicą*, ale ta nazwa też jest rzadko używana i powoli odchodzi w zapomnienie. Dawniej potężne reostaty służyły do przyciemniania oświetlenia w teatrze, ale obecnie funkcję tę przejęły nowoczesne urządzenia półprzewodnikowe.

Typowy, pełnowymiarowy potencjometr jest pokazany na rysunku 11.1.

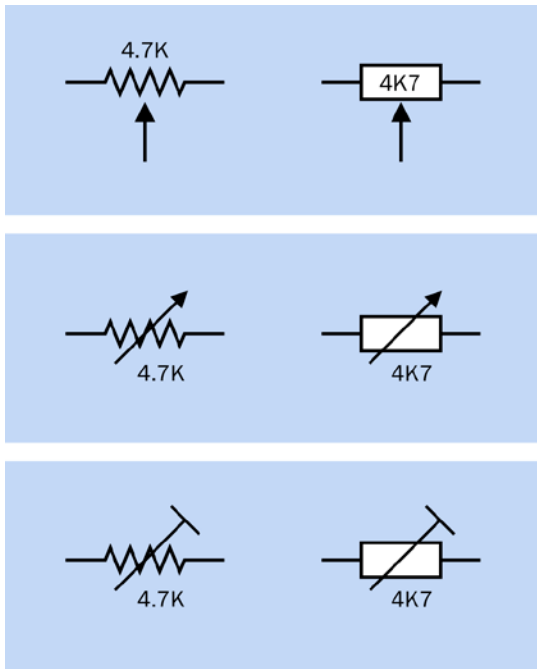


**Rysunek 11.1.** Średnica typowego potencjometru wynosi ok. 2,5 cm

Schematyczne symbole potencjometru i innych podobnych mu elementów są pokazane na rysunku 11.2. Po lewej stronie są pokazane symbole w wersji amerykańskiej, a po prawej — w wersji europejskiej. U góry są symbole potencjometru, w środku — rezystora zmiennego, czyli reostatu (często ten symbol jest zastępowany symbolem potencjometru), a na dole — rezystora nastawnego zwanego też *potencjometrem*

<sup>1</sup> Zasadnicza różnica między potencjometrem a rezystorem zmiennym (aerostatem, opornicą) polega na tym, że ten pierwszy ma trzy wyprowadzenia i może pełnić funkcję regulowanego dzielnika napięcia, a drugi ma tylko dwa wyprowadzenia i sam nie może być dzielnikiem napięcia — *przyp. tłum.*

**montażowym.** Podana przy tych symbolach wartość nominalna 4,7 kΩ została wybrana zupełnie przypadkowo. Warto zwrócić uwagę na zapis europejski, w którym znakiem dziesiętnym jest litera K.



**Rysunek 11.2.** Symbole amerykańskie (po lewej) i europejskie (po prawej) potencjometru (u góry), rezystora zmiennego (w środku) i rezystora nastawnego (u dołu); wartość 4,7 kΩ została wybrana przypadkowo

## Działanie

Potencjometr ma trzy wyprowadzenia. Dwa skrajne łączą się z końcami wewnętrznego elementu oporowego, którym najczęściej jest pasek przewodzącego tworzywa, zwany popularnie *ścieżką*. Trzecie wyprowadzenie, środkowe, łączy się ze stykiem ruchomym zwanym *ślizgaczem* (lub rzadziej *zbierakiem*), który styka się ze ścieżką i może być po niej przesuwany przez pokręcanie ośką lub przeciągnięcie suwaka.

Jeśli do skrajnych wyprowadzeń zostanie podłączone napięcie zasilające, to napięcie „zbierane” przez ślizgacz będzie się zmieniało w zależności od położenia ślizgacza na ścieżce. W takim trybie potencjometr działa jak rezystorowy dzielnik napięcia. Na przykład w potencjometrze o charakterystyce

liniowej (patrz punkt „Rodzaje”), którego skrajne wyprowadzenia zostaną podłączone do biegunów akumulatora 12-woltowego, tak jak na rysunku 11.3, na ślizgaczu ustawionym w jednej trzeciej od dodatniego końca ścieżki pojawi się napięcie równe 8 V. Na wspomnianym rysunku ośka potencjometru (w kolorze czarnym) jest sprzężona z ramieniem ślizgacza (kolor zielony), na którego końcu znajduje się ślizgacz (kolor pomarańczowy). Obracanie ośką powoduje przemieszczanie ślizgacza wzdłuż ścieżki (kolor brązowy). Zależność napięcia od położenia ślizgacza zależy głównie od charakterystyki ścieżki oporowej (czy jest liniowa, czy nie), ale także od rezystancji połączeń i kilku innych czynników.

Podczas przepływu prądu przez potencjometr wydzielana jest energia cieplna, którą trzeba efektywnie odprowadzać. W obwodach sterowania sygnałami audio prądy i napięcia są tak małe, że ilość wydzielanej energii jest do pominięcia. W układach o większych mocach trzeba już zwracać uwagę na moc znamionową potencjometru i dbać o należytą wentylację tego elementu.

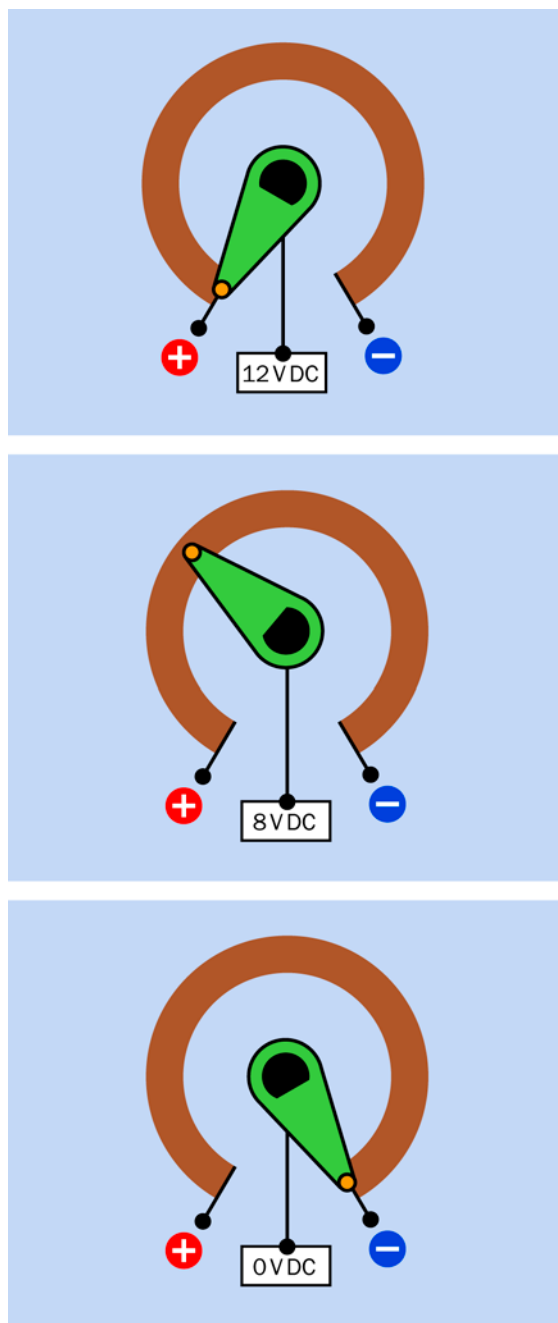
Potencjometr może także pełnić funkcję *rezystora zmiennego*, czyli *reostatu* — wystarczy jedno ze skrajnych wyprowadzeń zewrzeć z wyprowadzeniem środkowym. Można też jedno skrajne wyprowadzenie pozostawić niewykorzystane, ale wtedy układ staje się bardziej podatny na szum elektryczny i rozmaite zakłócenia zewnętrzne. Na rysunku 11.4 pokazano schemat pokazowego układu z potencjometrem jako regulowanym rezystorem połączonym w szereg z diodą świecącą. W praktyce zamiast potencjometru zastosowano by raczej rezystor nastawny, gdyż jest mało prawdopodobne, aby użytkownik chciał często regulować siłę światła diody sygnalizacyjnej.

## Rodzaje

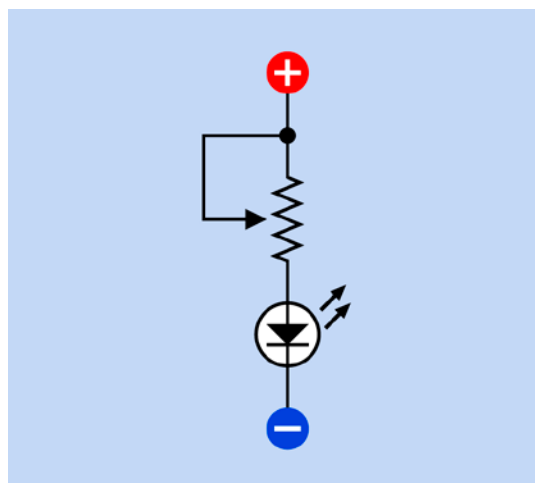
### Potencjometry liniowe i logarytmiczne

Jeśli element oporowy potencjometru ma na całej długości stałą szerokość i grubość, to potencjał zbierany przez ślizgacz zmienia się proporcjonalnie do kąta obrotu ośki (lub przemieszczenia suwaka). O takim potencjometrze mówi się, że ma charakterystykę liniową, lub krócej — że jest liniowy.

Gdyby taki potencjometr zastosowano w sprzęcie nagłaśniającym jako regulator siły głosu, użytkownik miałby wrażenie, że regulacja nie działa liniowo — na jednym końcu skali



Rysunek 11.3. Wnętrze potencjometru; opis znajduje się w tekście



Rysunek 11.4. Potencjometr może służyć do regulacji prądu płynącego przez diodę świecącą; połączenie ślizgacza z wyprowadzeniem skrajnym zmniejsza ryzyko wyłapywania zakłóceń

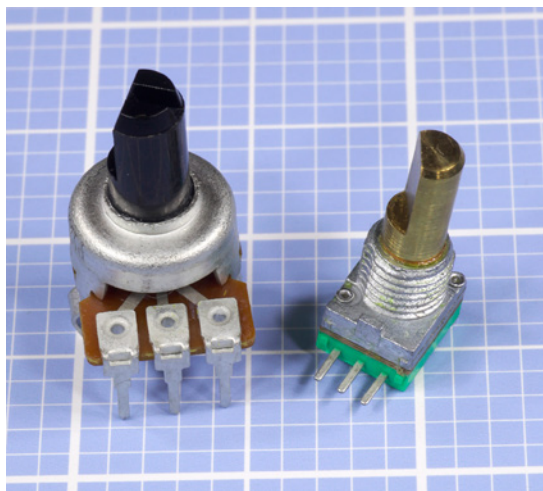
działa bardzo powoli, a na drugim bardzo szybko. Powodem tego jest nieliniowa reakcja ludzkiego ucha na bodźce dźwiękowe. Dawniej problem ten rozwiązywano przez odpowiednie profilowanie elementu oporowego, aby uczynić go nieliniowym. Później zaczęto stosować tańsze rozwiązanie w postaci kombinacji różnych elementów oporowych. O potencjometrach, które w układach fonii zachowują się liniowo, mówi się, że mają charakterystykę logarytmiczną (rezystancja funkcją logarytmiczną kąta obrotu). Oczywiście istnieją też potencjometry o charakterystyce odwrotnej do logarytmicznej, czyli wykładniczej, ale ich popularność jest niewielka.

### Potencjometr klasyczny

W wersji klasycznej potencjometr ma uszczelnioną metalową obudowę w kształcie cylindra o średnicy od 15 mm do 30 mm, w której mieści się ścieżka oporowa w formie wycinka okręgu. Przykładowy egzemplarz jest pokazany na rysunku 11.1. Od pewnego czasu popularne stały się także potencjometry w wersjach zminiaturyzowanych. Ośka zamocowana w obudowie obraca wewnętrznym ślizgaczem, który przesuwają się po oporowej ścieżce. Do mocowania w płycie panelu sterującego służy nagwintowana tuleja przepustowa, przez którą przechodzi ośka. Tuleję tę przekłada się przez otwór w płycie, a następnie unieruchamia za pomocą nakrętki.

Dodatkowym zabezpieczeniem przed ewentualnym obrotem całego potencjometru jest pin wystający z obudowy po stronie tulei, który należy wprowadzić w specjalnie do tego przeznaczony otwór w płycie panelu sterującego.

Współczesne potencjometry są w większości zminiaturyzowane i zamiast w cylindrycznych puszkach metalowych są zamknięte w prostopadłościennych kostkach z tworzywa sztucznego. Mają mniejszą moc znamionową, ale działają na tej samej zasadzie co ich większe odpowiedniki. Przykłady dwóch takich urządzeń są pokazane na rysunku 11.5.



**Rysunek 11.5.** Dwa współczesne potencjometry zminiaturyzowane o wartościach  $5\text{ k}\Omega$  (po lewej) i  $10\text{ k}\Omega$  (po prawej); oba mają moc znamionową  $50\text{ mW}$

Zewnętrzne wyprowadzenia potencjometru mogą mieć formę końcówek lutowniczych, zacisków śrubowych lub pinów do bezpośredniego montażu na płycie drukowanej. Piny mogą być proste lub zagięte pod kątem prostym.

Ścieżka oporowa może być wykonana z materiałów węglowych, tworzyw sztucznych, cermetu (spieku materiałów ceramicznych i metalowych) lub drutu oporowego nawiniętego na izolatorze. Najtańsze są potencjometry ze ścieżką węglową, a najdroższe — z drutową.

Potencjometry drutowe mają większą moc znamionową niż pozostałe typy, ale mają też wadę w postaci skokowych zmian rezystancji przy przesuwaniu się ślizgacza z jednego zwoju na drugi — w innych odmianach zmiany są płynniejsze.

W potencjometrze z systemem zapadkowym — złożonym najczęściej ze sprężynującej dźwigni i koła zębatego — ośka obraca się skokowo i takie też są zmiany rezystancji, mimo że ścieżka oporowa ma charakter ciągły.

Ośka może być wykonana z metalu lub tworzywa sztucznego i może mieć różną długość oraz średnicę. Na końcu ośki zwykle jest montowane pokrętło. Niektóre są tylko wciskane, a inne są mocowane dodatkowo wkrętem. Zakończenie ośki może być rowkowane i rozcięte, okrągłe i gładkie lub okrągłe z płaskim ścięciem pasującym do podobnie ukształtowanego gniazda w pokrętle, co zapobiega ewentualnym poślizgom pokrętła na ośce. Niektóre ośki mają na końcu wąskie nacięcie umożliwiające ustawianie ślizgacza za pomocą wkrętaka.

Trzy przykłady potencjometrów z różnymi ośkami pokazano na rysunku 11.6.



**Rysunek 11.6.** Trzy potencjometry różniące się konstrukcją ośki

## Potencjometr wieloobrotowy

W celu uzyskania większej dokładności zmian rezystancji wykonuje się potencjometry wieloobrotowe, w których ścieżka ma kształt linii śrubowej, a ślizgacz wykonuje nie tylko ruch obrotowy, ale także posuwisty. Aby pokonać drogę od

jednego końca ścieżki do drugiego, musi wykonać zwykle 3, 5 lub 10 obrotów. Są też potencjometry precyzyjne, w których wieloobrotowość uzyskuje się przez przemieszczanie ślizgacza wzdłuż kolistej lub prostoliniowej ścieżki oporowej za pomocą przekładni ślimakowej, takiej samej jaką stosuje się w precyzyjnych rezystorach nastawczych, gdzie obroty wkrętaka przenoszą się za pośrednictwem ślimaka na ślizgacz i przemieszczają go wzdłuż pierścieniowej ścieżki.

## Potencjometr wielosekcyjny

Dwa potencjometry można sprząc mechanicznie w sposób umożliwiający obracanie obydwoma ślizgaczami za pomocą jednej, wspólnej ośki. Każdy z tych potencjometrów tworzy odrębną *sekcję* i może mieć odmienną charakterystykę, a nawet pracować w zupełnie innym obwodzie. Takich sekcji może być więcej niż dwie, ale są to raczej rzadkie przypadki.

Potencjometry *zespolone* łączą dwa elementy oporowe w jednej obudowie. Niektóre potencjometry dwusekcyjne są *współosiowe*, co oznacza, że ich ślizgacze są obracane niezależnie przez dwie ośki, z którymi jedna znajduje się wewnątrz drugiej. Takie potencjometry wymagają zastosowania podwójnych, również współosiowych, pokręteł. Kupienie takich potencjometrów raczej nie będzie łatwe.

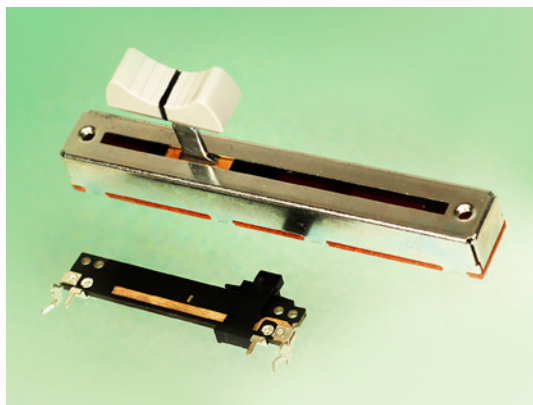
## Potencjometr z przełącznikiem

W tego rodzaju potencjometrze obrócenie ośki w prawo z jej lewego skrajnego położenia powoduje zwarcie wewnętrznych styków połączonych z zewnętrznymi wyprowadzeniami. Można to wykorzystać do załączania urządzenia, w którym potencjometr jest zamontowany (na przykład wzmacniacza audio). Uruchamianie przełącznika zintegrowanego z potencjometrem może się odbywać także przez pociąganie lub naciskanie ośki.

## Potencjometr suwakowy

Potocznie zwany *suwakiem* zawiera prostoliniowy element oporowy, po którym przemieszcza się tam i z powrotem ślizgacz. Ślizgacz jest sztywno połączony z wodzikiem, którego końcówka wystaje poza obudowę urządzenia i jest zakończona gałką. Tego typu potencjometry są nadal stosowane w sprzęcie nagłaśniającym. Pod względem zasady działania i liczby wyprowadzeń nie różnią się od potencjometrów klasycznych. Wyprowadzenia mogą być przystosowane do

przylutowania przewodów lub zamontowania na płytce drukowanej. Większy z dwóch potencjometrów pokazanych na rysunku 11.7 ma ok. 9 cm długości i jest przystosowany do montażu pod płytą panelu sterującego, w której wykonano podłużny otwór dla wodzika. Nagwintowane otwory widoczne przy obu końcach potencjometru służą do wkręcenia śrub mocujących. Na wodzik nałożono zdejmowany uchwyt wykonany z tworzywa sztucznego (uchwyty są sprzedawane oddzielnie i mogą mieć różne kształty i kolory). Wyprowadzenia tego potencjometru (na zdjęciu niewidoczne) są dostosowane do lutowania przewodów. Drugi, mniejszy, potencjometr jest przystosowany do montażu przewlekanego na płytce drukowanej.

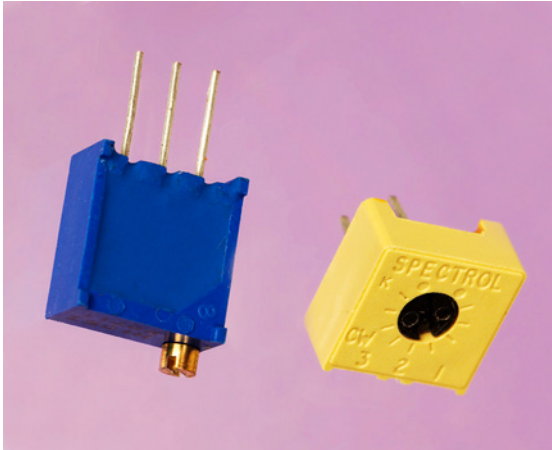


Rysunek 11.7. Potencjometry suwakowe

## Potencjometr montażowy

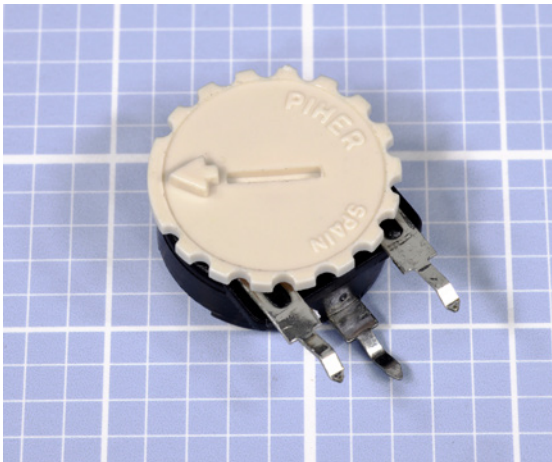
Potencjometr montażowy, zwany też *dostrójczym*, jest zazwyczaj montowany bezpośrednio na płytce drukowanej i służy do dostrajania obwodu na etapie produkcji i testowania. Jego dostępność pozwala na kompensowanie niedokładności parametrów innych komponentów. Może być jednoobrotowy lub wieloobrotowy z przekładnią ślimakową. Potencjometry montażowe mają zawsze charakterystykę liniową. Niektóre z nich mają krótką żłobkowaną ośkę, pokrętło lub gałkę, a w innych, żeby zmienić położenie ślizgacza, trzeba użyć wkrętaka. Na ogół nie są dostępne dla użytkownika i po ostatecznym zestrojeniu urządzenia są zabezpieczane przed przypadkowym przemieszczeniem ślizgacza pod wpływem wstrząsów lub innych czynników zewnętrznych. Na rysunku 11.8 pokazano dwa przykłady potencjometrów montażowych, przy czym żółty, marki

Spectrol, jest jednoobrotowy, a drugi, niebieski, należy do kategorii wieloobrotowych. Ten drugi ma wewnątrz obudowy przekładnię ślimakową, której ślimak jest połączony z wystającym na zewnątrz pokrętle, a ślimacznica wprawia w ruch obrotowy ślizgacz.



**Rysunek 11.8.** Jak większość potencjometrów montażowych te również są przystosowane do montażu przewlekanego

Potencjometr montażowy pokazany na rysunku 11.9 ma przymocowane do osi ząbkowane pokrętło, które umożliwia ustawienie właściwej wartości bez używania dodatkowych narzędzi, choć na wszelki wypadek pokrętło ma również rowek pozwalający na użycie płaskiego wkrętaka.

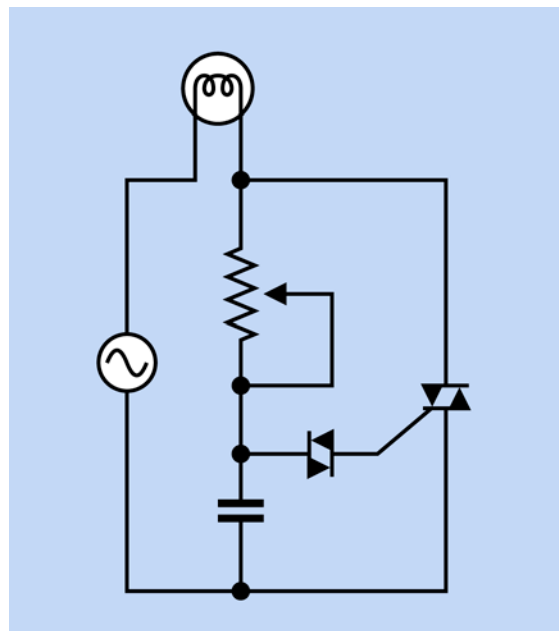


**Rysunek 11.9.** Potencjometr montażowy z ząbkowanym pokrętle umożliwiającym obracanie ślizgacza za pomocą palca

## Stosowanie

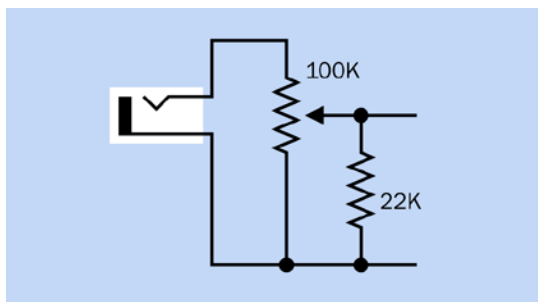
Potencjometry klasyczne były powszechnie stosowane do sterowania siłą i barwą dźwięku w urządzeniach audio, ale obecnie są wypierane przez układy cyfrowe współpracujące z **mikroprzyciskami** (opisanymi w punkcie „Mikroprzycisk (tact switch)”, w rozdziale 5., „Przycisk”) lub **enkoderami obrotowymi** (opisanymi w rozdziale 8.). Nowe rozwiązania są nie dość, że tańsze, to jeszcze mniej zawodne.

Potencjometry są nadal stosowane w ściemniaczach lamp i piecach elektrycznych (patrz rysunek 11.10). Rzeczywistym zmniejszaniem mocy dostarczonej do lampy lub pieca zajmuje się tu element półprzewodnikowy zwany **triakiem** (jest opisany w tomie 2.), który z dużą częstotliwością otwiera i zamyka obwód. Potencjometr tylko reguluje długość przedziałów czasowych, w których obwód jest zamknięty. Takie rozwiązanie jest znacznie oszczędniejsze — marnuje się mniej energii — w porównaniu z bezpośrednią regulacją natężenia prądu przez potencjometr działający jako reostat. Potencjometr sterujący pracą triaka nie musi mieć dużej mocy, więc może być mały i tani.



**Rysunek 11.10.** Typowe zastosowanie potencjometru w połączeniu z diakiem, triakiem i kondensatorem w ramach układu sterowania jasnością żarówki zasilanej prądem przemiennym; diaki i triaki są opisane w tomie 2

Potencjometry logarytmiczne stają się coraz mniej popularne, a w ich miejsce stosowane są układy złożone z potencjometru liniowego i rezystora stałego połączonych zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 11.11.



**Rysunek 11.11.** W tym obwodzie układ złożony z potencjometru liniowego 100 k $\Omega$  i rezystora stałego 22 k $\Omega$  umożliwia w przybliżeniu logarytmiczną regulację sygnału odbieranego z monofonicznego gniazda typu jack

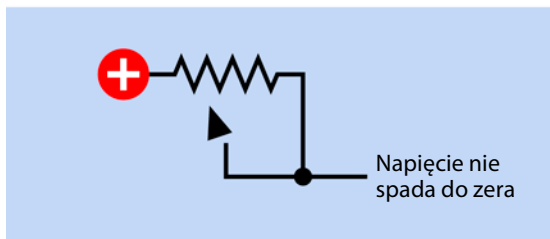
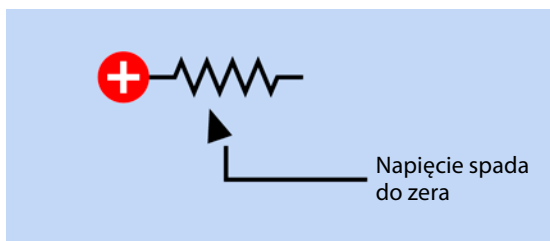
Potencjometr może służyć do dopasowywania sygnału pochodzącego z czujnika lub innego urządzenia analogowego do poziomu wymaganego na wejściu konwertera analogowo-cyfrowego. Może też służyć do kalibrowania przyrządów takich jak elektroniczny termometr czy detektor ruchu.

## Możliwe błędy

### Zużycie

Potencjometr jako urządzenie mechaniczne z czasem ulega zużyciu w wyniku tarcia jednych elementów o drugie. Długa niezasłonięta szpara w obudowie potencjometru suwakowego sprawia, że jest on szczególnie narażony na zabrudzenie i zawilgocenie. Wszelkiego rodzaju spraye do czyszczenia i smarowania styków elektrycznych mogą nieco przedłużyć życie tego typu urządzeń. Najmniej trwałe są potencjometry ze ścieżką węglową i to one najczęściej są przyczyną trzasków słyszanych z głośników podczas regulowania siły głosu.

Jeśli potencjometr z wytartą ścieżką pełni funkcję rezystora zmiennego, to w chwili gdy ślizgacz nagle utraci kontakt ze ścieżką, może dojść do jednej z dwóch sytuacji pokazanych na rysunku 11.12. Z oczywistych względów układ dolny jest korzystniejszy. Dlatego zawsze należy łączyć ślizgacz z nieużywanym końcem ścieżki.



**Rysunek 11.12.** Jeśli potencjometr pełni funkcję rezystora zmiennego, to w chwili gdy ślizgacz nagle utraci kontakt z wytartą ścieżką (co symbolizuje oderwana strzałka), napięcie na nim spada do zera (przypadek górny), chyba że jest połączony z wolnym końcem ścieżki (przypadek dolny)

W przypadku obwodów montowanych metodą lutowania na fali i potem zmywanych w celu usunięcia resztek topnika potencjometry, zwłaszcza suwakowe, mogłyby ulec uszkodzeniu. Dlatego zalecane jest ich ręczne montowanie po zakończeniu procesu zautomatyzowanego.

### Niedopasowane gałki

Gałki do potencjometrów są odrębnym towarem i najczęściej trzeba je kupować niezależnie od urządzeń, do których mają pasować. Dlatego zawsze należy się upewnić, że kupowana gałka pasuje do oski potencjometru, która może być gładka, jednostronnie ścięta lub rowkowana. Ważna jest też średnica oski (może być wyrażona w milimetrach lub calach).

### Zagubione nakrętki

Do potencjometrów montowanych w panelu sterującym niemal zawsze dodawane są nakrętki pasujące do nagwinutowanej tulei przepustowej. Nierzadko dołączane są również dodatkowe nakrętki i podkładki blokujące. Gwinty potencjometrów nie są objęte żadnym standardem, więc zgubienie nakrętki może oznaczać trudności ze znalezieniem zamiennika.

## Zbyt krótka ośka

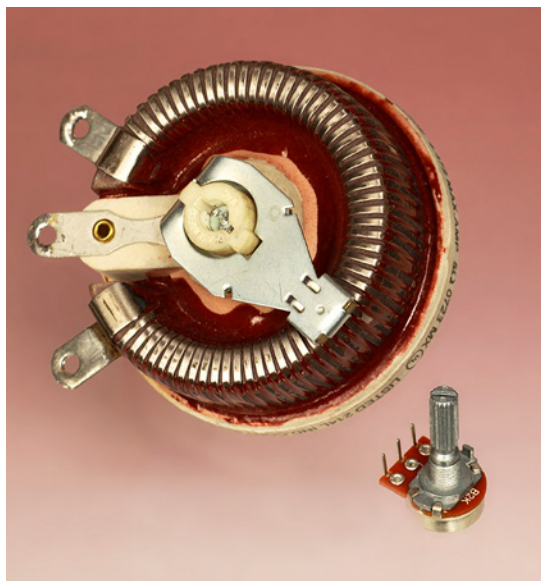
W przypadku wątpliwości co do wymaganej długości ośki należy kupić potencjometr z dłuższą ośką i ewentualnie ją dociąć.

## Suwaki bez uchwytu

Potencjometry suwakowe są często sprzedawane bez żadnych uchwytów nakładanych na wodzik i te trzeba kupować oddzielnie. Montaż polega zazwyczaj na wciśnięciu końcówki wodzika w odpowiednie gniazdo uchwytu.

## Niewłaściwe wymiary potencjometru

Dokładne wymiary potencjometru są zawsze podawane w karcie produktu. Na podstawie samego zdjęcia nie da się ocenić, czy potencjometr jest duży, czy mały, gdyż ten o średnicy 1 cm może wyglądać tak samo jak ten, którego średnica wynosi 3 cm. Szczególnie duże rozmiary (od 5 cm do 8 cm) mają potencjometry o dużej mocy (patrz rysunek 11.13).



**Rysunek 11.13.** Ten większy potencjometr ma średnicę 7,5 cm, rezystancję 5  $\Omega$  i może przewodzić prąd o natężeniu do 4 A; mniejszy ma średnicę 1,5 cm, rezystancję 2 k $\Omega$  i moc znamionową 0,25 W; ma też piny przystosowane do montażu przewlekane i ośkę rowkowaną dostosowaną do nakładanych gałek i pokręteł; pomimo znacznej różnicy w wielkości oba urządzenia działają na tej samej zasadzie i pełni takie same funkcje

## Przegrzanie

Wokół potencjometru o dużej mocy należy zostawić dostatecznie dużo wolnej przestrzeni, aby wydzielana w nim energia cieplna mogła być skutecznie odprowadzana. Na etapie projektowania obwodu należy precyzyjnie obliczyć maksymalne wartości napięcia i natężenia prądu, z jakimi potencjometr może mieć do czynienia, a następnie wybrać model o odpowiednio dużej mocy znamionowej. Warto pamiętać, że gdy potencjometr pełni funkcję reostatu, to w miarę zmniejszania jego rezystancji rośnie natężenie prądu przepływającego przez ślizgacz. Na przykład jeśli do zasilacza DC o stałym napięciu wyjściowym 12 V zostanie podłączone obciążenie o rezystancji 20  $\Omega$  za pośrednictwem reostatu o wartości 10  $\Omega$ , to prąd płynący w takim obwodzie może mieć wartość od 0,4 A do 0,6 A w zależności od położenia ślizgacza reostatu. W położeniu odpowiadającym największej rezystancji napięcie na reostacie będzie wynosiło 4 V, a więc energia będzie rozpraszana z mocą 1,6 W na całej długości elementu oporowego. Gdy reostat zmniejszy swoją wartość do 4  $\Omega$ , prąd wzrośnie do 0,5 A, napięcie zmaleje do 2 V, a moc wyniesie 1 W i będzie przypadła na 4/10 długości elementu oporowego. Z wydzielaniem dużej ilości energii na małym odcinku lepiej sobie poradzi potencjometr drutowy niż jakikolwiek inny. Aby ograniczyć maksymalną wartość prądu płynącego przez reostat, zawsze należy włączać szeregowo z nim dodatkowy stały rezystor o odpowiednio dobranej wartości.

W przypadku potencjometrów montażowych wartość prądu płynącego przez ślizgacz nigdy nie powinna przekraczać 100 mA.

## Niewłaściwa charakterystyka

Przy zakupie potencjometru należy pamiętać o sprawdzeniu jego charakterystyki — czy jest liniowa, czy logarytmiczna. W razie konieczności można to sprawdzić za pomocą ommierza — wystarczy zmierzyć rezystancję przy środkowym ustawieniu ślizgacza. Jeśli zmierzona wartość znacznie odbiega od połowy wartości nominalnej, to znaczy, że potencjometr nie jest liniowy, a żeby stwierdzić, czy jest logarytmiczny, czy wykładniczy, trzeba zaobserwować zmiany rezystancji podczas przemieszczania ślizgacza.

# Kondensator

Pierwowzorem urządzenia zwanego dziś kondensatorem jest *butelka lejdejska* skonstruowana po raz pierwszy mniej więcej w połowie XVIII wieku.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **kondensator zmienny** (rozdział 13.),
- **bateria** (rozdział 2.).

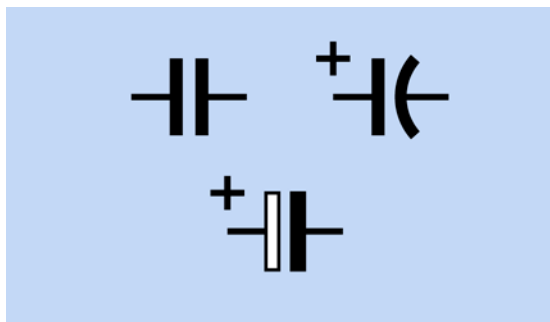
## Funkcja

Kondensator podłączony do źródła prądu stałego zgromadzi w sobie ładunek elektryczny i zachowa go również po odłączeniu od źródła. Może więc pełnić funkcję „pojemnika” dla energii elektrycznej, podobnie jak akumulator lub bateria wielokrotnego użytku. Proces ładowania i rozładowania jest tu bardzo szybki i ogranicza go tylko rezystancja elementów połączonych szeregowo z kondensatorem, co też zostało wykorzystane w układach odmierzających czas.

Kondensator ma także zdolność oddzielania prądu stałego od impulsów, szumu elektrycznego i różnego rodzaju sygnałów zmiennoprądowych. Dzięki tej właściwości znalazł zastosowanie jako element wygładzający napięcie dostarczane przez **zasilacz**. Służy też do usuwania z sygnałów ostrych pików, które mogłyby w sposób niekontrolowany wyzwać układy cyfrowe, do regulowania częstotliwości sygnałów dźwiękowych oraz do łączenia obwodów zmiennoprądowych, między którymi nie mogą przepływać prądy stałe.

Symbole schematyczne kondensatorów są pokazane na rysunku 12.1. U góry po lewej jest symbol kondensatora niespolaryzowanego, a dwa pozostałe oznaczają kondensator spolaryzowany, który należy włączać do obwodu z zachowaniem wskazanej na schemacie biegunowości wyprowadzeń. Symbol widoczny u dołu rysunku jest stosowany głównie w Europie. Niekiedy na schematach można spotkać symbol kondensatora niespolaryzowanego z dodanym znakiem plus i wtedy należy go traktować jako symbol kondensatora

spolaryzowanego. Zdarzają się też sytuacje odwrotne — symbole kondensatorów spolaryzowanych są pozbawiane znaku plus, ale to wcale nie oznacza, że polaryzacja tych elementów przestaje obowiązywać.



**Rysunek 12.1.** Symbole kondensatorów spolaryzowanych i niespolaryzowanych; szczegółowy opis znajduje się w tekście

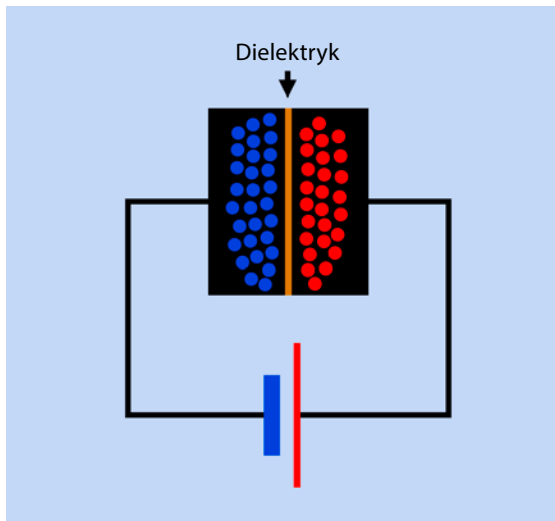
## Działanie

W najprostszej postaci kondensator składa się z dwóch płytek (zwanych *okładzinami*) z dołączonymi do nich przewodami, które można podłączyć do źródła napięcia stałego. Płytki są oddzielone cienką warstwą *dielektryka* (inaczej izolatora), który zazwyczaj ma postać ciała stałego lub gęstej pasty, ale może też być cieczą, żelem, gazem lub próżnią.

W większości kondensatorów okładziny są wykonane z cienkiej folii metalowej lub z metalizowanej folii syntetycznej.

W celu zminimalizowania rozmiarów kondensatora folie są zwijane w rulon lub składane w stos naprzemiennie połączonych warstw.

Elektrony dopływają do płytki połączonej z ujemnym biegunem baterii i odpychają od siebie elektrony należące do drugiej płytki. To prowadzi do powstawania w drugiej płytce tzw. *dziur elektronowych*, które można traktować jak *ładunki dodatnie* (patrz rysunek 12.2). Po odłączeniu kondensatora od baterii przeciwnie ładunki na obu płytkach będą pozostawać w równowadze, gdyż jako różnoimienne będą się wzajemnie przyciągać. Oczywiście w miarę upływu czasu różnica potencjału pomiędzy płytkami będzie maleć ze względu na *upływność*, czyli bardzo powolny przepływ ładunków z jednej płytki do drugiej, który jest możliwy z powodu niedoskonałości dielektryka i innych substancji otaczających płytki.



**Rysunek 12.2.** Okładziny kondensatora jako dobre przewodniki wypełniają się szybko ładunkami elektrycznymi dodatnimi i ujemnymi, gdy tylko są połączone z biegunami źródła prądu stałego; ponieważ ładunki różnoimienne przyciągają się, a jednoimienne odpychają, po obu stronach dielektryka zgromadzą się ładunki o przeciwnych znakach; dla większej przejrzystości rysunku dodatni biegun baterii ma kolor czerwony

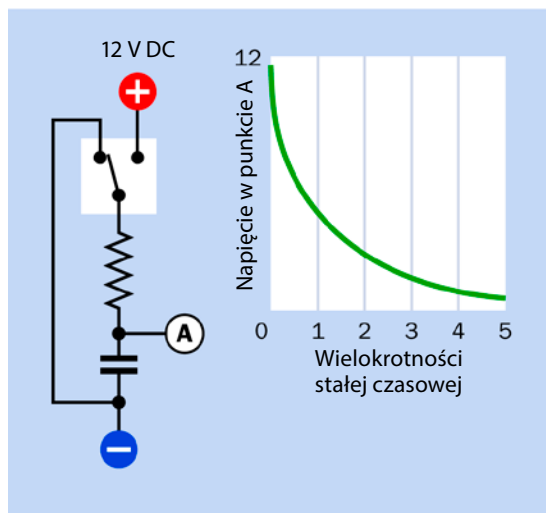
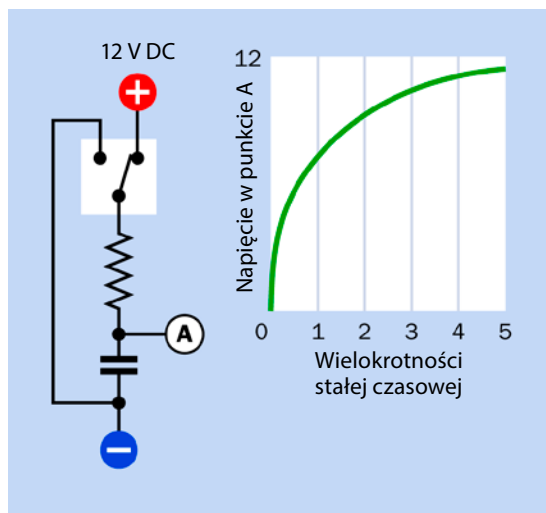
Gdy do końcówek naładowanego kondensatora zostanie podłączony **rezystor**, kondensator rozładuje się, a szybkość tego procesu będzie zależała od wartości rezystora. Podobnie jest podczas ładowania kondensatora za

pośrednictwem rezystora — o szybkości ładowania decyduje wartość rezystora.

Połączenie szeregowe kondensatora i rezystora jest nazywane *obwodem RC* (rezystancja-pojemność). Na rysunku 12.3 pokazano obwód RC z przełącznikiem SPDT, który umożliwi przełączanie obwodu z trybu ładowania do trybu rozładowywania. Napięcie w punkcie A mierzone w stosunku do ujemnego bieguna baterii rośnie nieliniowo, gdy kondensator jest ładowany, i maleje nieliniowo podczas rozładowywania kondensatora, zgodnie z widocznymi obok wykresami. Zarówno podczas ładowania, jak i rozładowywania prawdziwa jest zależność mówiąca, że czas, po jakim napięcie zmieni się o 63% różnicy między wartością bieżącą a docelową (równą napięciu baterii przy ładowaniu i zerową przy rozładowywaniu), jest zawsze jednakowy i nosi nazwę *stałej czasowej*. Więcej informacji na ten temat znajduje się w punkcie „Stała czasowa”.

Gdy kondensator jest połączony ze źródłem prądu przemiennego, każdy przyptyk elektronów do jednej okładziny wywołuje równoważne nagromadzenie się ładunków dodatnich na drugiej okładzinie, a gdy zmienia się polaryzacja biegunów źródła, ładunki w kondensatorze też zamieniają się miejscami. Te ruchy ładunków mogą sprawiać wrażenie, że prąd przemienny przepływa przez kondensator mimo obecności dielektryka między okładzinami (patrz rysunek 12.4). Często też mówi się, że kondensator „przewodzi” (przepuszcza) prąd zmienny, mimo że w rzeczywistości tak nie jest. Ze względów praktycznych i z uwagi na powszechność tego stwierdzenia w *Encyklopedii* też będziemy się nim posługiwać.

W zależności od wielkości kondensatora prądy zmienne o różnych częstotliwościach przepływają przez niego z większą lub mniejszą swobodą. Ogólnie rzecz ujmując, im mniejszy kondensator, tym łatwiej przepływają przez niego prądy o wyższych częstotliwościach, ponieważ małe okładziny są w stanie szybciej wypełnić się ładunkami. Sytuację komplikuje jednak *reaktancja indukcyjna* kondensatora (odpowiedzialna za wytwarzanie oporu zwanego *zastępczą rezystancją szeregową*) opisana w punkcie „Prąd przemienny i reaktancja pojemnościowa”.



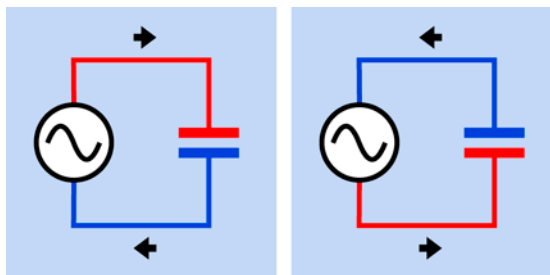
**Rysunek 12.3.** Obwód RC (rezystancja i pojemność) z przełącznikiem sterującym ładowaniem i rozładowywaniem kondensatora; wykres na rysunku górnym przedstawia przebieg procesu ładowania, a na dolnym — procesu rozładowywania

## Rodzaje

### Kształt

Najpopularniejsze kształty obudów kondensatora to: walec, płaski krążek i prostopadłościenna kostka.

Kondensator w kształcie walca może mieć wyprowadzenia *osiowe* (po obu stronach walca) lub *radialne* (oba po jednej

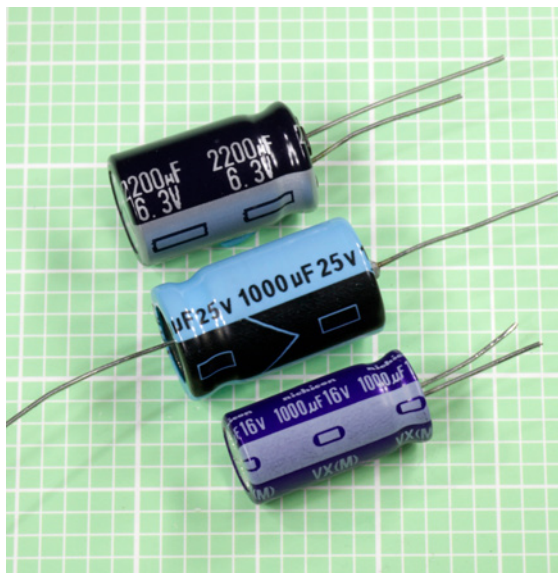


**Rysunek 12.4.** Po lewej: źródło prądu przemiennego przekazuje ładunki dodatnie do górnej okładziny kondensatora, a ujemne do dolnej, co oznacza przepływ prądu w kierunku wskazywanym przez strzałki; po prawej: zmiana biegunowości źródła wymusza przepływ ładunków, a więc i prądu w kierunku przeciwnym; rezultat tych przepływów jest taki, jakby to prąd przemienny swobodnie przepływał przez kondensator

stronie). Wersje radialne są częściej stosowane, ponieważ łatwiej się je montuje w płytkach drukowanych. Obudową kondensatora jest zazwyczaj mała aluminiowa puszka z denkiem po jednej stronie i hermetycznym zamknięciem po drugiej. Całość jest owinięta syntetyczną koszulką izolacyjną. Przykłady takich kondensatorów są pokazane na rysunkach 12.5 i 12.6.

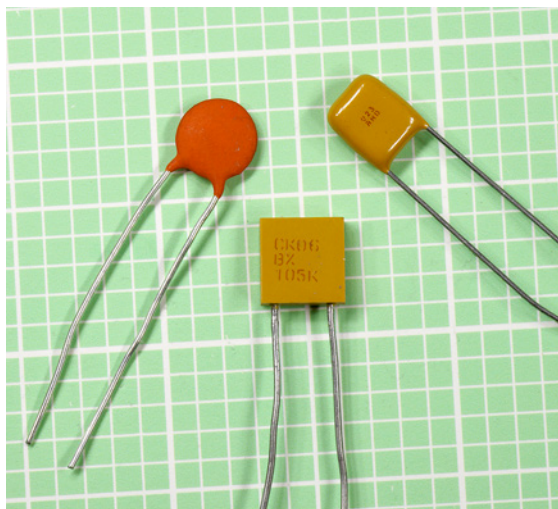


**Rysunek 12.5.** Kondensatory walcowe z radialnymi wyprowadzeniami; wszystkie są elektrolityczne



**Rysunek 12.6.** Kondensatory walcowe z wyprowadzeniami radialnymi (u góry i u dołu) oraz osiowymi (w środku); wszystkie są elektrolityczne

**Kondensatory płaskie** mają zazwyczaj obudowę ceramiczną i wyprowadzenia radialne. Współczesne kondensatory ceramiczne o małych pojemnościach są zatapiane w żywicy epoksydowej, a niektórym nadawany jest kształt kanciastej kostki. Kilka przykładów pokazano na rysunku 12.7.



**Rysunek 12.7.** popularne kondensatory ceramiczne; po lewej: 0,1  $\mu\text{F}$  50 V, w środku: 1  $\mu\text{F}$  50 V, po prawej: 1  $\mu\text{F}$  50 V

**Kondensatory montowane powierzchniowo** są kwadratowe lub prostokątne, a ich wymiary nie przekraczają kilku milimetrów. Po przeciwnych stronach obudowy znajdują się wyprowadzenia w postaci pól lutowniczych. Wyglądają bardzo podobnie do rezystorów montowanych powierzchniowo. Kondensatory o większych pojemnościach są oczywiście większe, ale też mogą być przystosowane do montażu powierzchniowego, co widać na przykładzie egzemplarza pokazanego na rysunku 12.8.

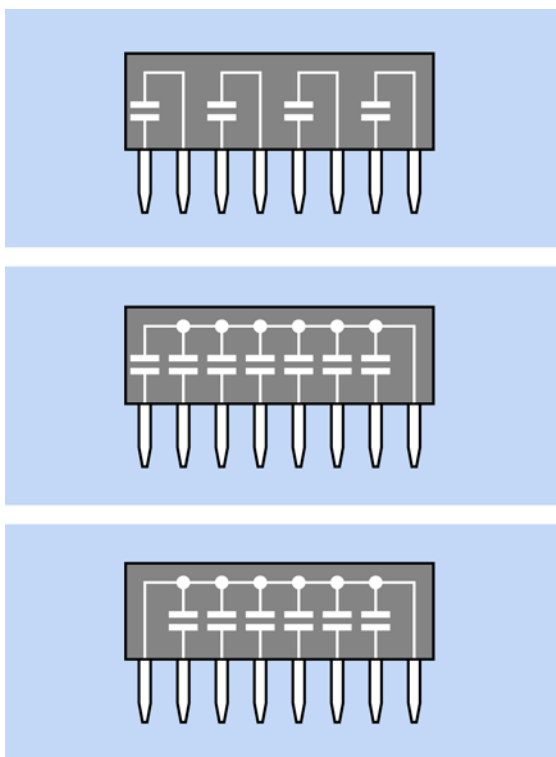


**Rysunek 12.8.** Większość kondensatorów przeznaczonych do montażu powierzchniowego ma wymiary porównywalne z innymi elementami montowanymi tą metodą, ale ten kondensator elektrolityczny o pojemności 4700  $\mu\text{F}$  i napięciu znamionowym 10 V ma kwadratową podstawę o boku długim na 1,5 cm. Na środku bliższego boku widać końcówkę lutowniczą

Dużo kondensatorów jest niespolaryzowanych, co oznacza, że są obojętne na polaryzację przyłożonego do nich napięcia. Nie dotyczy to kondensatorów elektrolitycznych i tantalowych, które muszą być włączane do obwodu w odpowiedni sposób względem napięcia zasilającego. Jeśli jedno wyprowadzenie jest dłuższe od drugiego, to powinno być ono po stronie wyższego potencjału. Znak minus lub pasek po jednej stronie obudowy wskazuje wyprowadzenie, które powinno być „bardziej ujemne”, czyli zawsze powinno mieć niższy potencjał niż drugie. W tantalowych kondensatorach zwykle oznaczane jest znakiem plus wyprowadzenie dodatnie (o wyższym potencjale).

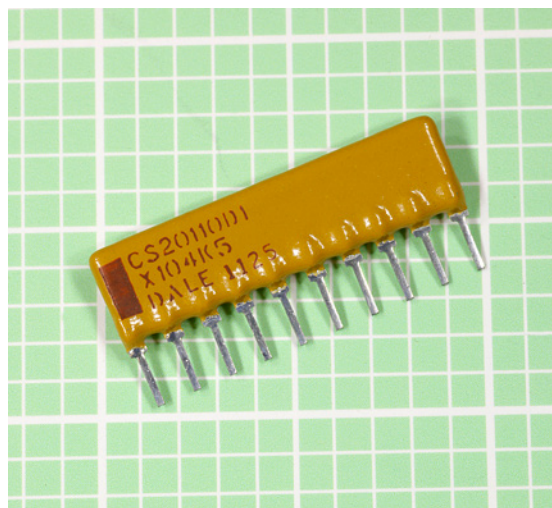
Strzałka nadrukowana na bocznej ścianie kondensatora zwykle wskazuje wyprowadzenie ujemne, czyli o niższym potencjale. W przypadku kondensatora zamkniętego w aluminiowej puszcze z wyprowadzeniami osiowymi, jedno z nich ma wokół izolacyjny krążek, a drugie jest połączone z denkiem puszki. Wyprowadzenie przechodzące przez krążek izolacyjny, powinno być zawsze po stronie ujemnej, a drugie — po stronie dodatniej.

**Matryca kondensatorów** składa się z co najmniej dwóch kondensatorów umieszczonych we wspólnej obudowie, ale wewnątrz odizolowanych od siebie. Matryce są sprzedawane w wersjach do montażu zarówno powierzchniowego, jak i przewlekłego jako chipy **dwurzędowe** (DIP) i **jednorzędowe** (SIP). Elementy wewnętrzne mogą mieć



**Rysunek 12.9.** Drabinka kondensatorowa często ma postać jednorzędowego (SIP) chipu zawierającego kilka kondensatorów w jednej z trzech pokazanych tu konfiguracji; u góry: niezależnie; w środku: ze wspólną szyną zakończoną jednym pinem; u dołu: ze wspólną szyną zakończoną dwoma pinami; poszczególne kondensatory mają najczęściej pojemności z zakresu od  $0,001 \mu\text{F}$  do  $0,1 \mu\text{F}$

wyprowadzenia połączone z zewnętrznymi pinami na trzy sposoby: niezależnie, ze wspólną szyną zakończoną jednym pinem i ze wspólną szyną zakończoną dwoma pinami. Z technicznego punktu widzenia konfiguracja z niezależnymi wyprowadzeniami powinna być rzeczywiście nazywana matrycą, ale w praktyce wszystkie trzy są zazwyczaj nazywane **drabinkami kondensatorowymi** (patrz rysunki 12.9 i 12.10).



**Rysunek 12.10.** Drabinka kondensatorowa w obudowie SIP przeznaczona do montażu przewlekłego

Zastosowanie drabinek kondensatorowych może przyczynić się do zmniejszenia liczby elementów, jeśli cyfrowe układy logiczne wymagają obecności kondensatorów bocznikujących. To samo można powiedzieć o **drabinkach rezystorowych**.

W sprzedaży dostępne są także **matryce RC** zawierające po kilka obwodów RC, ale nie są tak popularne jak matryce rezystorowe czy kondensatorowe.

## Rodzaje podstawowe

Kondensatory **elektrolityczne** są stosunkowo tanie, kompaktowe i mają duże pojemności. Dzięki tym atrybutom znalazły powszechne zastosowanie w urządzeniach konsumenckich, a szczególnie w układach zasilających te urządzenia. Pojemność elektryczna jest w nich regenerowana przez okresowe przykładanie napięcia. Wilgotna pasta wewnątrz kondensatora ma poprawiać właściwości dielektryka podczas pracy pod napięciem, ale z czasem może wysychać. Jeśli taki

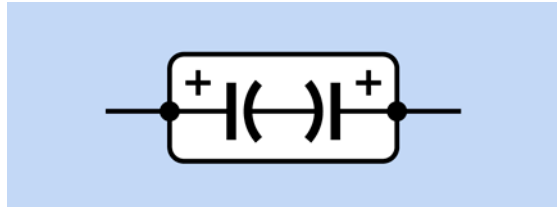
kondensator leży w magazynie przez powiedzmy 10 lat, to po podłączeniu go pod napięcie może przez chwilę przewodzić prąd. Typowe kondensatory elektrolityczne są pokazane na rysunkach 12.5 i 12.6, a na rysunku 12.11 pokazano jeden z największych reprezentantów tego rodzaju urządzeń.



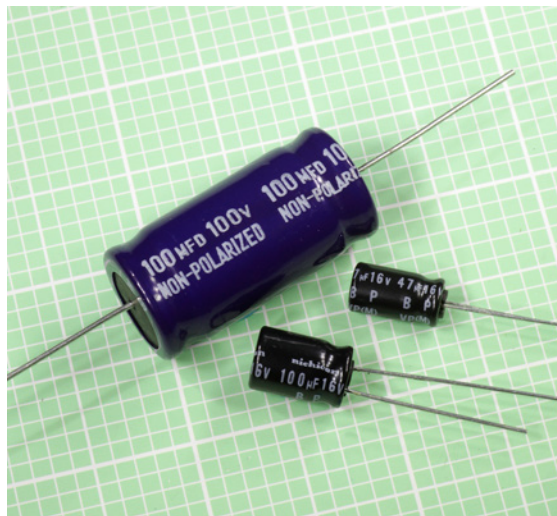
**Rysunek 12.11.** Ten kondensator elektrolityczny o pojemności 13 000  $\mu\text{F}$  raczej nie znajdzie zastosowania w zwykłych urządzeniach codziennego użytku

Kondensator *elektrolityczny bipolarny* zawiera w jednej obudowie dwa kondensatory elektrolityczne połączone szeregowo z przeciwnymi polaryzacjami. Można go używać w obwodach, w których napięcie przyjmuje wartości dodatnie i ujemne. Schemat wewnętrznych połączeń takiego kondensatora jest pokazany na rysunku 12.12, a wygląd zewnętrzny — na rysunku 12.13. Na jego obudowie zawsze znajduje się stosowny napis lub oznaczenie BP (bipolarny)

bądź NP (niespolaryzowany). Jest stosowany w obwodach audio, jeśli użycie kondensatora spolaryzowanego jest niemożliwe, a względy finansowe nie pozwalają na zastosowanie droższego kondensatora nieelektrolitycznego. Niestety nie jest wolny od wad typowych dla wszystkich kondensatorów elektrolitycznych.



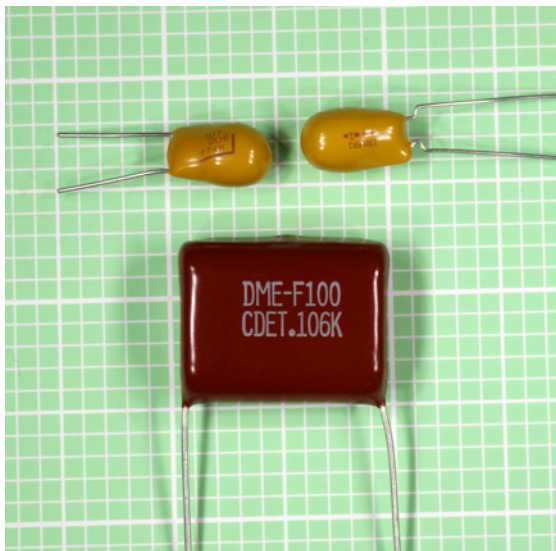
**Rysunek 12.12.** Schemat wewnętrznych połączeń kondensatora elektrolitycznego bipolarnego (zwanego też niespolaryzowanym); są to dwa połączone szeregowo kondensatory elektrolityczne o przeciwnych polaryzacjach



**Rysunek 12.13.** Kondensatory elektrolityczne bipolarne; duże wymiary tego po lewej stronie wynikają z dużej wartości napięcia znamionowego; widoczny na pozostałych skrót BP oznacza, że są bipolarnie, mimo że mają jedno wyprowadzenie dłuższe

Kondensator *tantalowy* jest niewielki, ale stosunkowo drogi, i nie jest odporny na przepięcia. Jest także wrażliwy na podłączanie z niewłaściwą polaryzacją. W odróżnieniu od klasycznego kondensatora elektrolitycznego ma obudowę z żywicy epoksydowej, a nie w formie puszkii aluminiowej, dzięki czemu jest mniej podatny na wysychanie elektrolitu. Na rysunku 12.14 są pokazane dwa kondensatory tantalowe

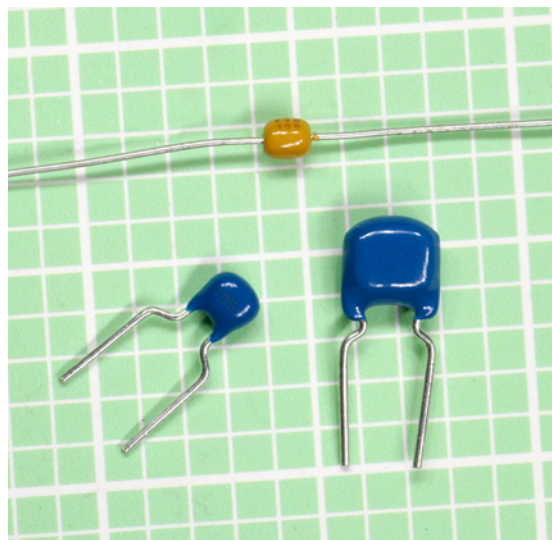
(po lewej: 330  $\mu\text{F}$  6,3 V; po prawej: 100  $\mu\text{F}$  20 V), a pod nimi widoczny jest kondensator poliestrowy (10  $\mu\text{F}$  100 V). Wersje przeznaczone do montażu powierzchniowego tracą na popularności, ponieważ dostępne stały się kondensatory ceramiczne o dużych pojemnościach, jeszcze mniejszych rozmiarach i mniejszych wartościach szeregowej rezystancji zastępczej.



**Rysunek 12.14.** U góry: dwa kondensatory tantalowe; u dołu: kondensator poliestrowy; polaryzacja kondensatorów tantalowych jest oznaczona znakiem plus nadrukowanym na obudowie w pobliżu jednego z wyprowadzeń; kondensator poliestrowy jest niespolaryzowany

Kondensatory *foliowe* są opisane w następnym punkcie.

Jednowarstwowe kondensatory *ceramiczne* są często stosowane w układach bocznikujących i nadają się do pracy w obwodach średniej i dużej częstotliwości. Ich pojemność elektryczna dość mocno zmienia się w zależności od temperatury, choć odmiany z oznaczeniem NPO są pod tym względem całkiem stabilne. Odmiany wielowarstwowe są mniejsze od jednowarstwowych i bardziej od nich popularne. Trzy przykłady takich wielowarstwowych kondensatorów ceramicznych są pokazane na rysunku 12.15. Największy z nich (47  $\mu\text{F}$  16 V) ma zaledwie 0,5 cm.



**Rysunek 12.15.** Wielowarstwowe kondensatory ceramiczne są małe i niespolaryzowane; u góry: 1 nF 100 V; u dołu po lewej: 1  $\mu\text{F}$  25 V; u dołu po prawej: 47  $\mu\text{F}$  16 V

## Dielektryki

Dielektrykiem w kondensatorze jest najczęściej warstwa elektrolitu, mieszanka ceramiczna, folia syntetyczna (poliwęglan, polipropylen lub polistyren) bądź papier.

*Warstwa elektrolityczna* to zazwyczaj papier nasączony elektrolitem. Papier ten jest nakładany na cienką folię aluminium z warstwą tlenku aluminium. Wszystko to jest zwijane w rulon i umieszczane w puszcze aluminiowej. Elektrolit nabiera właściwości dielektrycznych dopiero po przyłożeniu napięcia do końcówek kondensatora.

### Poliester

Najpopularniejsza folia syntetyczna o dużej stałej dielektrycznej umożliwiającą konstruowanie małych kondensatorów o dużej pojemności. Nadaje się do pracy w układach prądu stałego. W układach prądu zmiennego zwinięte w rulon warstwy tworzą pasożytniczą indukcyjność. Kondensatory tego typu są często używane do odsprężania i sprężania obwodów, a także w układach bocznikujących. Nie zaleca się stosowania ich w miejscach wymagających stabilności i małych prądów upływu. Nie nadają się do pracy w układach wysokoprądowych.

## Poliwęglan

Termicznie bardzo stabilny, przez co znajduje zastosowanie w układach filtrujących i czasowych wymagających dużej stałości częstotliwości przebiegów elektrycznych. Kondensatory z takim dielektrykiem charakteryzują się wysoką jakością i dlatego są stosowane w sprzęcie wojskowym, ale ich cena nie jest niska.

Kondensatory z foliami syntetycznymi — mylarowymi, poliestrowymi i innymi — są często stosowane w obwodach audio, gdzie ograniczenia napięciowe (do 100 V) nie są problemem, a brak spolaryzowania jest wielką zaletą.

## Polipropylen

Wrażliwy na ciepło (zazwyczaj wytrzymuje maksymalnie 85°C) i mniej stabilny termicznie niż poliwęglan. Wykazuje bardzo małe straty mocy przy dużych częstotliwościach. Umożliwia produkowanie kondensatorów z tolerancją nieprzekraczającą  $\pm 1\%$ . Kondensatory polipropylenowe są powszechnie stosowane w zwrotnicach głośnikowych i przełącznikach zasilania. Mają jednak większe rozmiary niż inne kondensatory foliowe.

## Wartości

### Pojemność

Pojemność elektryczna kondensatora jest wyrażana w *faradach* oznaczanych literą F. Kondensator ma pojemność 1 F, jeśli w ciągu 1 sekundy prąd o natężeniu 1 ampera jest w stanie naładować go do napięcia o wartości 1 volt.

Farad jest jednostką bardzo dużą i w praktyce nieużywaną. Pojemności kondensatorów stosowanych w układach elektronicznych są znacznie mniejsze i do ich określania używa się ułamków farada, takich jak *mikrofarad* ( $\mu\text{F}$ ), *nanofarad* (nF) i *pikofarad* (pF). W oznaczeniu mikrofarada powinna być stosowana grecka litera  $\mu$  (mi), ale często jest zastępowana literą u, a więc zapis 10 uF należy traktować tak samo jak 10  $\mu\text{F}$ .

1F = 1 000 000  $\mu\text{F}$  i 1 $\mu\text{F}$  = 1 000 000 pF. A zatem 1 farad jest równoważny bilionowi pikofaradów — zakres wartości niezwykle duży. Na rysunkach 12.16 i 12.17 pokazane są tabele z przelicznikami opisanych tu jednostek.

pF	nF	$\mu\text{F}$
1	0,001	0,000001
10	0,01	0,00001
100	0,1	0,0001
1000	1	0,001
10 000	10	0,01
100 000	100	0,1
1 000 000	1000	1

**Rysunek 12.16.** Przeliczanie pikofaradów na nanofarady i mikrofarady; w Europie stosowane są głównie nanofarady

$\mu\text{F}$	F
1	0,000001
10	0,00001
100	0,0001
1000	0,001
10 000	0,01
100 000	0,1
1 000 000	1

**Rysunek 12.17.** Przeliczanie mikrofaradów na farady; dla zastosowań elektronicznych farad jest jednostką bardzo dużą i dlatego w praktyce stosuje się jednostki znacznie mniejsze

Jednostka nF jest popularniejsza w Europie niż w USA, gdzie zamiast 1 nF pisze się zazwyczaj 0,001  $\mu\text{F}$  lub 1000 pF. Podobnie zamiast 10 nF pisze się niemal zawsze 0,01  $\mu\text{F}$ , a zamiast 0,1 nF pisze się 100 pF.

Na schematach europejskich można spotkać zapisy pojemności z symbolem jednostki zamiast znaku dziesiętnego. Na przykład kondensator o pojemności 4,7 pF może być opisany jako 4p7, kondensator 6,8 nF jako 6n8, a kondensator 3,3  $\mu\text{F}$  jako 3 $\mu$ 3.

## Wartości najczęściej stosowane

Tradycyjny zakres wartości pojemności został ustalony podobnie jak zakres wartości rezystancji, czyli przy założeniu,

że tolerancja wynosi  $\pm 20\%$ , i wyborze takich mnożników, przy których nakładanie się sąsiednich zakresów tolerancyjnych jest minimalne. Wymaganie to spełniają mnożniki 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7 i 6,8. Więcej informacji na ten temat znajduje się w rozdziale 10., włącznie z graficzną reprezentacją zakresów tolerancji (rysunek 10.8). Większość rezystorów jest obecnie produkowana z tolerancją mniejszą niż  $\pm 20\%$ , ale wśród kondensatorów elektrolitycznych taka dokładność jest całkiem powszechna. Pozostałe typy kondensatorów są dostępne z tolerancjami  $\pm 10\%$  i  $\pm 5\%$ , ale ich cena jest odpowiednio wyższa.

Na dużych kondensatorach wartość pojemności jest nadrukowana, a na małych jest w różny sposób kodowana. Różni producenci stosują różne kody oparte na kolorach i rozmaitych skrótach. Najszybszą i najpewniejszą metodą ustalenia pojemności konkretnego kondensatora jest więc użycie miernika.

Na obudowie dużego kondensatora podawana jest też wartość napięcia roboczego. Przekroczenie tej wartości grozi uszkodzeniem dielektryka. W przypadku kondensatorów elektrolitycznych należy unikać także stosowania egzemplarzy o zbyt dużym napięciu roboczym, ponieważ ten typ kondensatorów potrzebuje odpowiedniego napięcia, aby móc poprawnie działać.

W typowych zastosowaniach elektronicznych raczej nie używa się pojemności większych niż  $4700 \mu\text{F}$  ani mniejszych niż  $10 \text{ pF}$ .

Kondensatory elektrolityczne dostępne w umiarkowanych cenach pokrywają zakres pojemności większy niż inne powszechnie stosowane kondensatory. Zakres ten obejmuje pojemności od  $1 \mu\text{F}$  do  $4700 \mu\text{F}$ , a nawet więcej. Napięcie robocze najczęściej mieści się w zakresie od  $6,3 \text{ V DC}$  do  $100 \text{ V DC}$ , ale może też sięgać nawet  $450 \text{ V DC}$ .

Kondensatory tantalowe raczej osiągają pojemność większą niż  $150 \mu\text{F}$  lub napięcie robocze powyżej  $35 \text{ V DC}$ .

Kondensatory ceramiczne jednowarstwowe mają z reguły małe pojemności z przedziału od  $10 \text{ nF}$  do  $220 \text{ nF}$  i napięcie robocze nieprzekraczające  $50 \text{ V DC}$ , choć egzemplarze o bardzo małych pojemnościach przeznaczone do specjalnych zastosowań mogą mieć napięcie pracy znacznie wyższe. Nierzadko wartość tolerancji tych kondensatorów rozciąga się od  $+80\%$  do  $-20\%$ .

Niektóre odmiany kondensatorów ceramicznych wielowarstwowych osiągają pojemność  $47 \mu\text{F}$ , ale powszechnie przyjętą górną granicą ich pojemności jest  $10 \mu\text{F}$ . Napięcie znamionowe rzadko przekracza tu  $100 \text{ V DC}$ , a najbardziej dokładne sztuki mają tolerancję  $\pm 5\%$ .

## Stała dielektryczna

Jeśli przez A oznaczymy powierzchnię jednej płytki kondensatora (w  $\text{cm}^2$ ), przez T grubość dielektryka (w  $\text{cm}$ ) i przez K bezwymiarową *stałą dielektryczną*<sup>1</sup>, to pojemność kondensatora C (w F) będzie można wyrazić następującym wzorem:

$$C = (0.0885 * K * A) / T$$

Stała dielektryczna powietrza wynosi 1. Inne dielektryki mają różne wartości, na przykład polietylen ma stałą o wartości 2,3. A zatem kondensator złożony z płytek o powierzchni  $1 \text{ cm}^2$  przedzielonych warstwą polietylenu o grubości  $0,01 \text{ cm}$  miałby pojemność około  $20 \text{ pF}$ . Kondensator tantalowy o takich samych gabarytach miałby pojemność bliższą  $100 \text{ pF}$ , ponieważ wartość stałej dielektrycznej tlenku tantalum jest znacznie większa w przypadku polietylenu.

## Stała czasowa

Gdy kondensator jest ładowany poprzez szeregowy rezystor (takie połączenie jest nazywane układem RC) i na początku nie ma na swoich okładzinach żadnego ładunku, to po czasie nazywanym *stałą czasową* i mierzonym w sekundach napięcie między okładzinami wyniesie 63% wartości napięcia docelowego (czyli zasilającego). Po upływie drugiego, takiego samego odcinka czasu, napięcie wzrośnie o 63% różnicy pomiędzy wartością docelową a już osiągniętą. Teoretycznie napięcie na kondensatorze będzie się ciągle zbliżało do napięcia zasilającego, ale nigdy się z nim nie zrówna. W praktyce przyjmuje się, że pełne naładowanie następuje po upływie pięciu stałych czasowych — napięcie na kondensatorze osiąga wtedy 99% napięcia zasilającego.

Schemat układu RC jest pokazany na rysunku 12.3.

Stała czasowa jest funkcją pojemności kondensatora i rezystancji rezystora. Jeśli przez R oznaczymy rezystancję (w omach), przez C — pojemność (w faradach), to stała czasowa TC wyrazi się następującą zależnością:

1 Inną nazwą tej stałej, lepiej oddającą jej sens fizyczny, jest *względna przenikalność elektryczna* — *przyp. tłum.*

$$TC = R * C$$

Jeśli rezystancja wzrośnie 1000 razy, a pojemność zmaleje 1000 razy, to stała czasowa pozostanie taka sama. A zatem nic się w tych obliczeniach nie zmienia, jeśli zamiast omów użyjemy kiloomów i zamiast faradów — milifaradów. Innymi słowy, układ złożony z rezystora 1 kΩ i kondensatora 1000 μF ma stałą czasową równą 1 s.

Z powyższej zależności wynika, że gdy R zmaleje do zera, kondensator naładuje się natychmiast. W rzeczywistości będzie to czas krótki, ale jednak skończony, gdyż zawsze istnieje jakaś rezystancja przewodów i połączeń oraz rezystancja wewnętrzna źródła.

## Łączenie kondensatorów

Całkowita pojemność kondensatorów połączonych równolegle jest równa sumie ich pojemności. Przy połączeniu szeregowym związek między pojemnością całości (C) a pojemnościami poszczególnych kondensatorów (C1, C2, C3...) jest następujący:

$$1 / C = (1/C1) + (1/C2) + (1/C3) . . .$$

Wzór na obliczanie pojemności przy połączeniu szeregowym kondensatorów jest podobny do wzoru na obliczanie rezystancji przy połączeniu równoległym rezystorów (patrz rozdział 10.).

## Prąd zmienny i reaktancja pojemnościowa

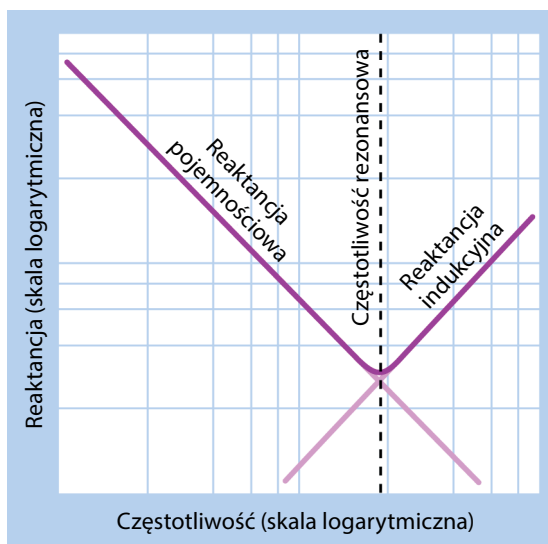
Opór, jaki stawia kondensator prądowi zmiennemu, jest nazywany *reaktancją pojemnościową*. Z poniższego wzoru wynika, że reaktancja pojemnościowa ( $X_c$ , w omach) jest funkcją pojemności kondensatora (C, w faradach) i częstotliwości prądu (f, w hercach):

$$X_c = 1 / (2 * \pi * f * C)$$

Jak widać, gdy częstotliwość prądu maleje do zera (prąd zmienny zamienia się w stały), reaktancja pojemnościowa rośnie do nieskończoności. Innymi słowy, opór kondensatora dla prądu stałego jest teoretycznie nieskończenie duży. W rzeczywistości dielektryk nie jest idealnym izolatorem i ma dużą, ale skończoną, rezystancję, więc zawsze istnieje jakiś, mniejszy lub większy, prąd upływu.

Ze wzoru wynika też, że reaktancja pojemnościowa maleje wraz ze wzrostem pojemności kondensatora i (lub)

częstotliwości prądu. To oznacza, że kondensator będzie słabiej tłumił sygnały o dużych częstotliwościach, zwłaszcza gdy jego pojemność nie będzie zbyt wielka. Trzeba jednak pamiętać, że rzeczywiste kondensatory wykazują także niewielką *reaktancję indukcyjną*. Wartość tej reaktancji jest zależna od budowy kondensatora (czy jest zwojowy, czy płytkowy), jego wymiarów, materiałów, z których jest wykonany, długości wyprowadzeń i wielu innych czynników. Zależy ona również od częstotliwości prądu, ale odwrotnie niż reaktancja pojemnościowa — rośnie i maleje wraz z częstotliwością. A zatem, gdy z powodu zmiany częstotliwości reaktancja indukcyjna *rośnie*, to reaktancja pojemnościowa *maleje*. Przy pewnej częstotliwości, zwanej *rezonansową*, obie reaktancje stają się jednakowe (patrz rysunek 12.18).



**Rysunek 12.18.** Gdy rośnie częstotliwość prądu zmiennego płynącego przez kondensator, reaktancja pojemnościowa kondensatora maleje, a reaktancja indukcyjna wzrasta; przy częstotliwości rezonansowej obie reaktancje osiągają jednakowe wartości

## Szeregowa rezystancja zastępcza (ESR)

Kondensator idealny miałby tylko reaktancję i żadnej rezystancji. Kondensator rzeczywisty ma również tzw. *szeregową rezystancję zastępczą (ESR)*. Jest to wartość rezystora, jaki należałoby połączyć szeregowo z kondensatorem idealnym, aby uzyskać kondensator rzeczywisty.

Jeśli  $X_c$  jest reaktancją kondensatora, to jego *dobroć* (oznaczana przez  $Q$ ) wyraża się wzorem:

$$Q = X_c / ESR$$

A zatem, im mniejsza szeregowo rezystancja zastępcza, tym większa dobroć kondensatora. Oczywiście wszystko tu jest mocno uzależnione od częstotliwości i wnioski płynące z powyższego wzoru należy traktować jako ogólną wskazówkę co do istniejących prawidłowości.

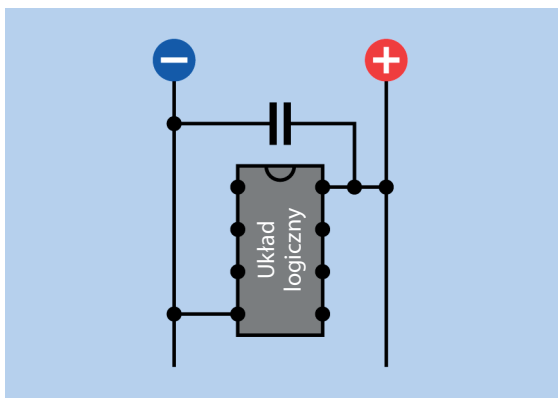
Dobroć jest również właściwością cewki indukcyjnej, ale jest obliczana nieco inaczej.

## Stosowanie

Prezentowane niżej rysunki przedstawiają uproszczone schematy popularnych zastosowań kondensatora.

### Kondensator bocznikujący

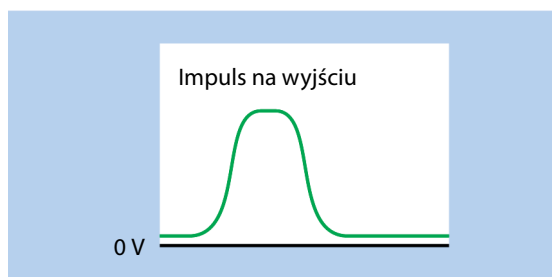
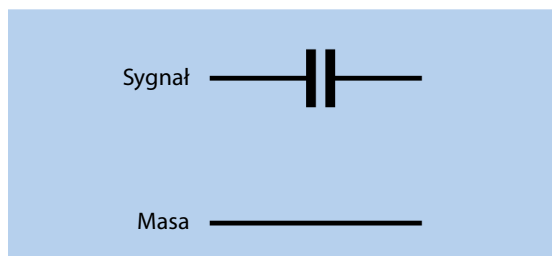
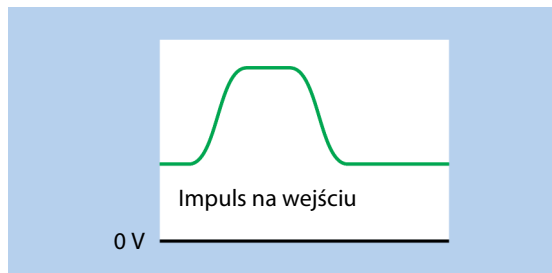
Widoczny na schemacie z rysunku 12.19 kondensator łączący pin zasilania układu scalonego z masą ma za zadanie kierowanie przepięć impulsowych lub szumu o dużej częstotliwości do masy połączonej z ujemnym biegunem zasilania. Zazwyczaj pojemność tego kondensatora jest niewielka (bardzo często jest to 100 nF). Ze względu na swoją funkcję jest nazywany *kondensatorem bocznikującym* lub *odsprężającym*.



**Rysunek 12.19.** Kondensator bocznikujący (najczęściej o pojemności 100 nF) chroni logiczny układ scalony przed pikami napięciowymi i szumami docierającymi od strony zasilania

### Kondensator sprzęgający

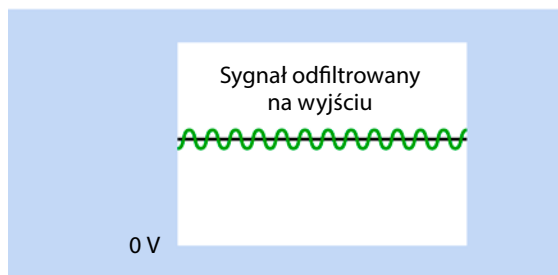
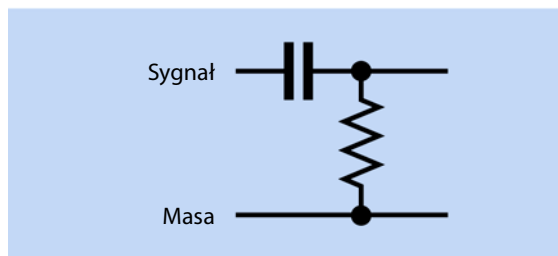
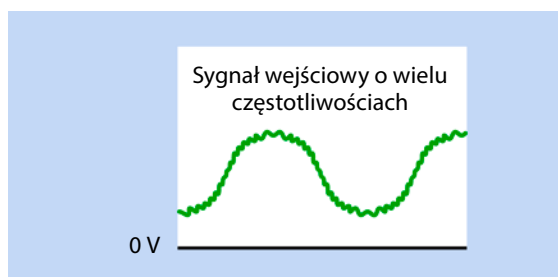
Na rysunku 12.20 pokazano *kondensator sprzęgający* o pojemności 1  $\mu$ F, który przepuszcza sygnał impulsowy z jednej części obwodu do drugiej, blokując jednocześnie przepływ prądu stałego. Po przejściu przez taki kondensator impuls może nieco zmienić swój kształt.



**Rysunek 12.20.** Kondensator sprzęgający (najczęściej 1  $\mu$ F) stanowi przerwę dla prądu stałego, ale przepuszcza impulsy

### Filtr górnoprzepustowy

W układzie pokazanym na rysunku 12.21 kondensator (100 nF) blokuje niskoczęstotliwościową składową sygnału, a przepuszcza składową o wysokiej częstotliwości.



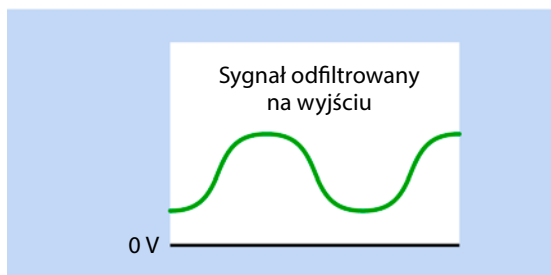
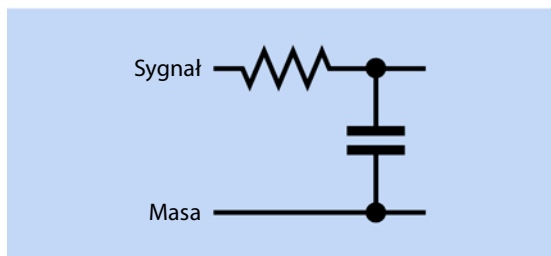
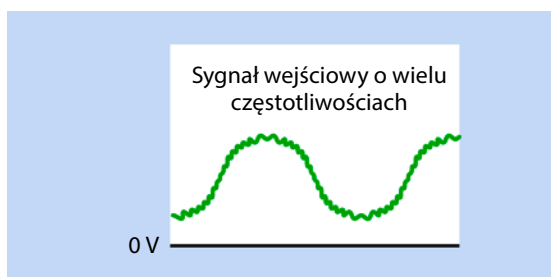
**Rysunek 12.21.** Kondensator o małej pojemności (zazwyczaj 100 nF) jako element filtra dolnoprzepustowego, czyli takiego, który zatrzymuje niskie częstotliwości i przepuszcza wysokie

## Filtr dolnoprzepustowy

W układzie pokazanym na rysunku 12.22 kondensator od-sprężający (zazwyczaj 100 nF) zwiera wysokoczęstotliwościową składową sygnału do masy, a nie ingeruje w przepływ składowej o niskiej częstotliwości. Kondensator o jeszcze mniejszej pojemności (np. 1 nF) usunie w radiodbiorniku wysokoczęstotliwościowy szum z sygnału fonii bez wpły-wania na częstotliwości akustyczne.

## Kondensator wygładzający

W układzie z rysunku 12.23 kondensator o pojemności 100  $\mu$ F na przemian ładuje się i rozładowuje, wygładzając w ten

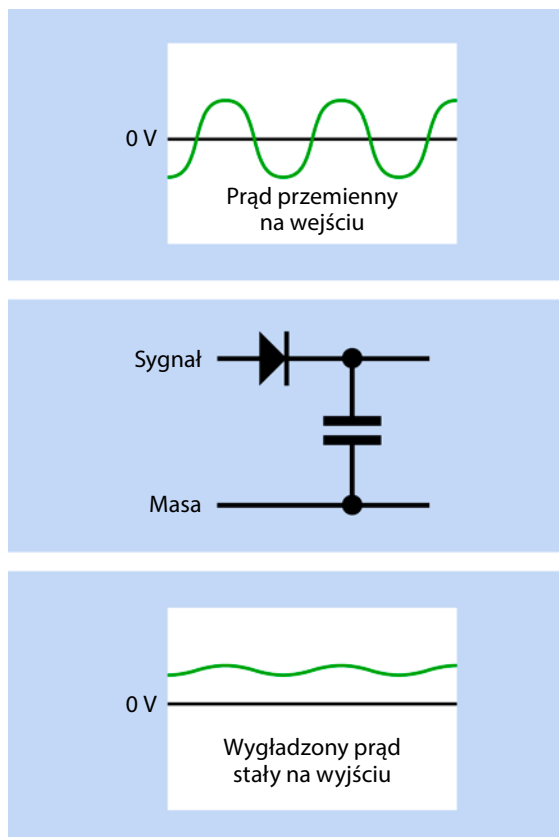


**Rysunek 12.22.** Kondensator o małej pojemności (zazwyczaj 100 nF) w tej konfiguracji oddziela wysokie częstotliwości od niskich i kieruje je do masy

sposób zmiany napięcia powstałe w wyniku usunięcia ujemnej połówki sinusoidalnego prądu przemiennego.

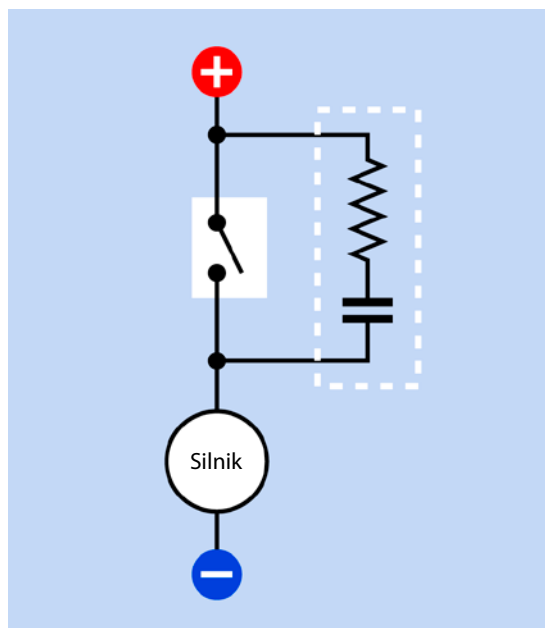
## Tłumik

Pokazany na rysunku 12.24 układ RC (otoczony białą linią przerywaną) jest nazywany *tłumikiem*, jeśli służy zapobieganiu powstawania *łuku elektrycznego* — ciągłego wyładowania iskrowego, które może szybko zniszczyć styki przełącznika. Łuk elektryczny może powstawać w przełącznikach, przyciskach i przekaźnikach włączających i wyłączających prąd w obwodach o charakterze indukcyjnym. Problem nabiera znaczenia, gdy w grę wchodzi duże prądy stałe (powyżej 10 A) lub stosunkowo wysokie napięcia stałe bądź zmienne (powyżej 100 V).



**Rysunek 12.23.** Kondensator o pojemności 100  $\mu\text{F}$  lub większej wygładza górną połówkę prądu przemiennego przepuszczaną przez diodę prostowniczą; kondensator ładuje się podczas połówek dodatnich i rozładowuje się podczas brakujących połówek ujemnych, wypełniając powstałe po nich luki

W chwili rozwarcia styków przełącznika pole magnetyczne wytwarzane przez obciążenie indukcyjne zaczyna zanikać, a to powoduje indukowanie się *siły elektromotorycznej (SEM)* dążącej do podtrzymania przepływu prądu. Kondensator stanowiący część tłumika przejmuje na siebie przepływ ładunków wywołany gwałtownym wzrostem napięcia (napięcie zasilające + SEM) i tym samym zapobiega przepływowi tych ładunków przez przerwę pomiędzy stykami. Gdy styki ponownie się zwierają, kondensator rozładowuje się, a rezystor (drugi element tłumika) spowalnia ten proces, nie dopuszczając do nagłego wzrostu natężenia prądu, co też byłoby niekorzystne dla styków.



**Rysunek 12.24.** Układ RC (otoczony białą linią przerywaną) ochronia przełącznik sterujący pracą urządzenia stanowiącego obciążenie o charakterze indukcyjnym; użyty z takim przeznaczeniem nosi nazwę tłumika

Tłumiki stosowane w obwodach prądu stałego zazwyczaj składają się z kondensatora o pojemności 100 nF (polipropylenowego lub poliestrowego) i napięciu znamionowym 125 V AC lub 250 V DC oraz rezystora węglowego o wartości 100  $\Omega$  i mocy 0,5 W lub większej. Niektórzy producenci części elektronicznych oferują takie tłumiki jako pojedyncze elementy — kondensator i rezystor są już połączone i zamknięte we wspólnej obudowie.

W obwodzie prądu przemiennego tłumik może być montowany równolegle do obciążenia indukcyjnego. W obwodach prądu stałego w ten sposób montowana jest zazwyczaj **dioda** gasząca, ale w obwodach prądu przemiennego nie można jej zastosować.

Półprzewodnikowe urządzenia przełączające, takie jak **przełącznik półprzewodnikowy**, wprowadzie nie zawierają styków mechanicznych, ale i tak mogą ulec uszkodzeniu w wyniku przepięcia wywołanego przez siłę elektromotoryczną samoindukcji. Dlatego w obwodach, w których prąd przekracza 10 A, a napięcie jest większe od 100 V, urządzenia te również trzeba chronić za pomocą tłumika.

## Kondensator w roli akumulatora

W pewnych sytuacjach kondensator może pełnić funkcję źródła zasilania, chociaż w porównaniu z baterią lub akumulatorem ma mniejszą gęstość energii i wyższe koszty produkcji. Kondensator ładuje się i rozładowuje znacznie szybciej niż chemiczne źródła zasilania, w których wszystko dzieje się zgodnie z tempem zachodzących reakcji. Istotną różnicą jest też to, że w czasie rozładowywania źródło chemiczne znacznie dłużej utrzymuje stały poziom napięcia.

Kondensatory zdolne do gromadzenia bardzo dużych ilości energii są często określane mianem *superkondensatorów*.

## Możliwe błędy

Częstym problemem związanym z kondensatorami jest pogarszanie się ich parametrów w miarę upływu czasu (szczególnie dotyczy to kondensatorów elektrolitycznych). Źródłem kłopotów mogą być też niepożądane cechy tych urządzeń, takie jak reaktancja indukcyjna (zwłaszcza w konstrukcjach zwojowych), nieliniowość, rezystancja szeregową, upływność (rezystancja równoległa) i absorpcja dielektryczna. Niektóre z tych problemów są opisane poniżej. Przed wybraniem określonego typu kondensatora do zastosowania w konkretnym układzie należy uważnie przestudiować dane techniczne publikowane przez producenta.

### Niewłaściwa biegunowość

Kondensator spolaryzowany włączony do obwodu w niewłaściwy sposób (z nieprawidłową biegunowością wyprowadzeń) może się zachować praktycznie jak zwora, a to może spowodować przepływ prądu o dużym natężeniu, co z kolei może skutkować uszkodzeniem nie tylko samego kondensatora, ale również innych elementów obwodu. W przypadku niektórych kondensatorów (na przykład tantalowych) niezachowanie właściwej biegunowości może doprowadzić nawet do wybuchu.

### Przeciążenie napięciowe

Jeśli napięcie na kondensatorze przekroczy wartość napięcia roboczego, może dojść do przebicia warstwy dielektrycznej i przepływu ładunków w formie iskry wyładowczej lub łuku elektrycznego, co jest równoznaczne z powstaniem zwarcia. Należy przy tym pamiętać, że wartość napięcia roboczego

określona dla prądu stałego niekoniecznie musi obowiązywać również dla prądu przemiennego. Ogólnie przyjmuje się, że napięcie przemiennie nie powinno przekraczać 70% wartości roboczej określonej dla prądu stałego. Wynika to z faktu, że w prądzie przemiennym występują wartości chwilowe przewyższające wartość skuteczną będącą odpowiednikiem prądu stałego.

Przy łączeniu kondensatorów szeregowo lub równolegle najlepiej jest wybierać egzemplarze o takich samych napięciach roboczych i, oczywiście, nie mniejszych niż napięcie zasilające.

Kondensatory tantalowe łatwo ulegają zniszczeniu nawet przez krótkotrwałe przepięcia impulsowe przekraczające dopuszczalną wartość napięcia roboczego. Ich wadą jest też stosunkowo duża reaktancja indukcyjna, przez co nie nadają się do sprzęgania obwodów o dużych częstotliwościach.

### Upływność

Problem upływności dotyczy głównie kondensatorów elektrolitycznych i dlatego nie nadają się one do przechowywania ładunków elektrycznych przez dłuższy czas. Pod tym względem lepiej spisują się kondensatory polipropylenowe i poliestrowe.

### Absorpcja dielektryczna

*Absorpcja elektryczna* jest zjawiskiem polegającym na „zapamiętywaniu” przez kondensator pewnego napięcia również po rozładowaniu i odłączeniu od układu. Problem ten jest szczególnie zauważalny w kondensatorach ceramicznych jednowarstwowych.

### Problemy typowe dla kondensatorów elektrolitycznych

Kondensatory elektrolityczne mają dużą reaktancję indukcyjną, są produkowane z dużymi tolerancjami i stosunkowo szybko pogarszają się ich właściwości w miarę upływu czasu. Podczas gdy inne elementy elektroniczne mogą być magazynowane przez długi czas, zanim zostaną użyte, kondensatory elektrolityczne powinny być raczej traktowane jak produkty o krótkim terminie ważności.

Plaga „kondensatorowa”, która objęła mnóstwo urządzeń wyprodukowanych po 1999 roku, dobitnie obnażyła słabość

kondensatorów elektrolitycznych. Niewłaściwy skład chemiczny warstwy dielektrycznej powodował uwalnianie się wodoru, którego nagromadzenie się doprowadzało do pęcznienia aluminiowej obudowy, a nawet jej rozerwania. Ponieważ niekorzystne zjawiska zaczęły się ujawniać dopiero po mniej więcej dwóch latach, wyprodukowano i sprzedano dosłownie miliony urządzeń z takimi kondensatorami, zanim zidentyfikowano problem i skorygowano błędy.

Niestety zamiana kondensatorów elektrolitycznych na inne w urządzeniach takich jak zasilacze nie jest łatwa, ponieważ zamienniki miałyby większe gabaryty i byłyby znacząco droższe.

## Ciepło

Istnienie szeregowej rezystancji zastępczej (ESR) o niezerowej wartości oznacza jednoznacznie, że kondensator podczas pracy będzie rozpraszał energię przez wydzielanie ciepła. Tętnienia prądu też mogą się przyczyniać do wydzielania

ciepła. Z kolei wraz ze wzrostem temperatury zmieniają się wartości rozmaitych parametrów kondensatora. Powszechnie przyjęta górna wartość temperatury dopuszczalnej dla kondensatorów elektrolitycznych wynosi 85°C.

## Wibracje

W warunkach narażenia na silne drgania kondensatory elektrolityczne należy zabezpieczać za pomocą specjalnych uchwytych zwanych *klipsami montażowymi*.

## Mylna nomenklatura

W Stanach Zjednoczonych można niekiedy (raczej rzadko) spotkać zapis „mF” jako alternatywną formę zapisu jednostki mikrofarad ( $\mu\text{F}$ ). Może to prowadzić do poważnych nieporozumień, gdyż mF jest poprawnym zapisem jednostki milifarad (inna sprawa, że jest ona rzadko używana). Najlepszym rozwiązaniem jest unikanie tego zapisu.



# Kondensator zmienny

Inna nazwa to *kondensator strojeniowy*. Jego odmianą jest *trymer*, czyli *kondensator nastawny* (montażowy).

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **kondensator** (rozdział 12.).

## Funkcja

Kondensator zmienny pozwala regulować pojemność elektryczną w taki sam sposób, jak **potencjometr** steruje rezystancją.

Duże kondensatory zmienne opracowano początkowo z myślą o strojeniu radioodbiorników i nawet nazywano je *kondensatorami strojeniowymi*. Z początkiem lat 70. ubiegłego wieku zaczęły je wypierać znacznie tańsze, mniejsze i bardziej niezawodne zamienniki. Obecnie nadal stosuje się je w produkcji półprzewodników, urządzeniach do spawania oporowego tworzyw sztucznych, przyrządach chirurgicznych i dentystrycznych oraz w urządzeniach krótkofalarskich.

Powszechnie dostępne są niewielkie *kondensatory nastawne*, tzw. *trymery*, których używa się głównie w obwodach wysokiej częstotliwości. Wiele takich podzespołów wygląda niemal identycznie jak *potencjometry nastawne*.

Symbole schematyczne stosowane powszechnie do oznaczania kondensatorów zmiennego i nastawnego są pokazane na rysunku 13.1.

*Waraktor* to rodzaj diody o zmiennej reaktancji pojemnościowej, którą steruje się za pomocą napięcia przyłożonego w kierunku zaporowym. Szczegółowy opis tego komponentu znajduje się w punkcie „Dioda pojemnościowa”, w rozdziale 26., „Dioda”.

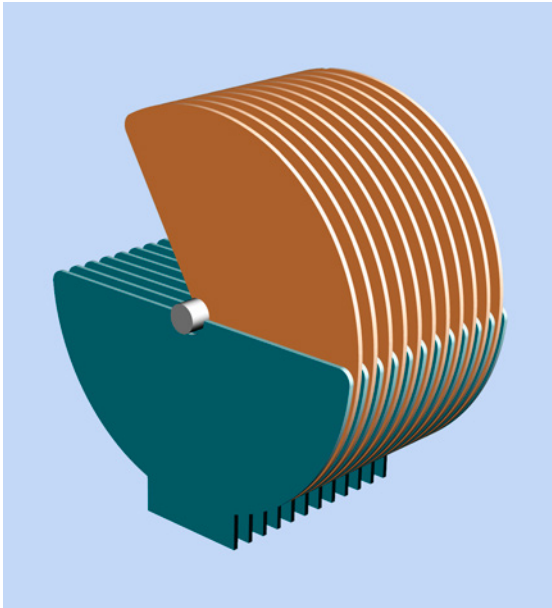


**Rysunek 13.1.** Typowe symbole elektryczne kondensatora zmiennego (po lewej) i nastawnego (po prawej)

## Działanie

Tradycyjny kondensator zmienny składa się z dwóch sztywnych półokrągłych płytek oddzielonych szczeliną powietrzną o grubości od 1 do 2 mm. Aby zwiększyć pojemność, stosuje się dodatkowe płytki, które wchodzą między tamte, tworząc swoisty stos. Jeden zestaw takich płytek nazywa się *rotorem*. Jest on zamontowany na wałku, którym można obracać zwykle za pomocą dostępnego z zewnątrz pokrętła. Drugi zestaw, nazywany *statorem*, jest zamontowany na obudowie za pomocą izolatorów ceramicznych. Gdy oba zestawy płytek całkowicie się pokryją, pojemność całego układu uzyskuje maksymalną wartość. Wraz z obracaniem rotora jego płytki zaczynają się stopniowo wysuwać, przez co pojemność maleje do wartości bliskiej zeru. Patrz rysunek 13.2.

Szczeliny powietrzne między zestawami płytek pełnią funkcję *dielektryka*. Stała dielektryczna powietrza wynosi w przybliżeniu 1 i nie zależy w istotnym stopniu od temperatury.

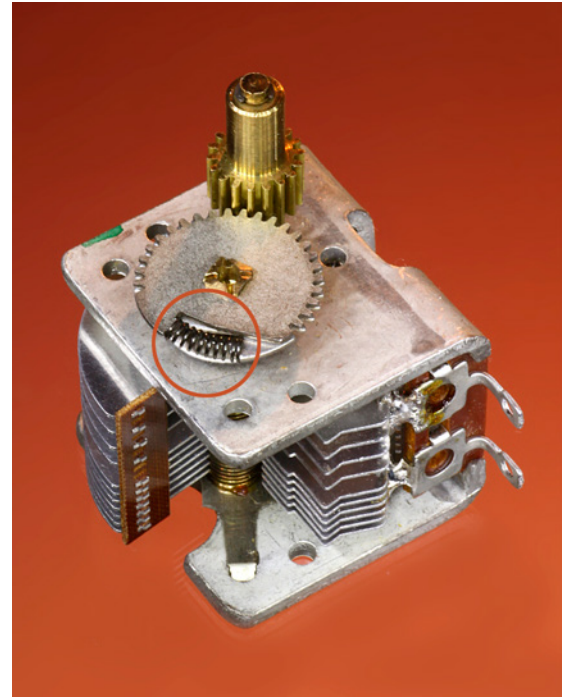


**Rysunek 13.2.** Na tym uproszczonym rysunku kondensatora zmiennego brązowe płytki stanowią rotor, który jest przymocowany do wałka, natomiast płytki niebieskie są elementami statora; kolory nie mają tutaj żadnego znaczenia w kontekście elektrycznym — użyto ich jedynie w celu zwiększenia przejrzystości; pojemność takiego układu zależy od stopnia pokrywania się płytek rotora i statora

Najpowszechniej używanym kształtem płytek jest półkole, które zapewnia liniową zależność między pojemnością a kątem obrotu. Aby uzyskać zależność o charakterze nieliniowym, można zastosować inne kształty płytek.

Do precyzyjnego ustawiania pojemności kondensatora zmiennego stosuje się rozmaite przekładnie. Kilka obrotów pokręteł może wtedy powodować nieznaczne zmiany pojemności. W szczytowym momencie rozwoju kondensatorów zmiennych były one konstruowane z wysoką precyzją mechaniczną i zawierały *przekładnie z kompensacją luzów*. Składały się z pary kół zębatach o jednakowych rozmiarach zamontowanych równolegle względem siebie. Między nimi znajdowała się sprężyna, która wywierała siłę próbującą obracać oba koła w przeciwnych kierunkach. Oba koła były zazębione z jednym wałkiem zębatym — taki układ pozwalał eliminować luzy, które zwykle towarzyszą zazębieniu się elementów przekładni. Taki właśnie kondensator ze sprężyną tworzącą układ kompensacji luzów (zaznaczony czerwonym okręgiem) pokazano na rysunku 13.3. Jest to

kondensator dwusekcyjny — pojemność elektryczna jednej sekcji zmienia się w zakresie od 0 pF do 35 pF, a drugiej od 0 pF do 160 pF.



**Rysunek 13.3.** „Tradycyjny” kondensator zmienny przeznaczony do dostrajania częstotliwości radiowych; zaznaczona okręgiem sprężyna stanowi element układu kompensacji luzów

## Rodzaje

Tradycyjny kondensator zmienny — z odsłoniętymi, oddzielnymi powietrzem płytkami — jest modelem, który coraz trudniej spotkać w użyciu. Nowoczesne kondensatory są niewielkie i całkowicie zabudowane, przez co ich płytki (lub łopatki) są niewidoczne. W niektórych kondensatorach zamiast płytek wykorzystuje się parę współosiowych wałców z zewnętrzną śrubą radełkowaną, która służy do podnoszenia lub opuszczania jednego wałca względem drugiego. Stopień nachodzenia na siebie wałców wyznacza wartość pojemności takiego kondensatora.

W kondensatorach nastawnych stosuje się różne rodzaje materiałów dielektrycznych, takie jak mika lub cienkie warstwy materiałów ceramicznych bądź tworzyw sztucznych.

## Wartości

Duże tradycyjne kondensatory można regulować w zakresie od niemal zera do poziomu nieprzekraczającego 500 pF. Poziom ten jest ograniczony czynnikami mechanicznymi. (Więcej informacji na temat jednostek pojemności elektrycznej zawiera rozdział 12.).

Maksymalna pojemność kondensatora nastawnego rzadko przekracza 150 pF. Wartości znamionowe mogą być nadrukowane na kondensatorze lub mogą być oznaczone kolorami. Nie istnieje jednak uniwersalny zestaw kolorów kodujących. W zależności od producenta kolor brązowy może na przykład oznaczać wartość maksymalną wynoszącą około 2 pF lub 40 pF. Konkretnie szczegółowe informacje należy sprawdzić w karcie produktu.

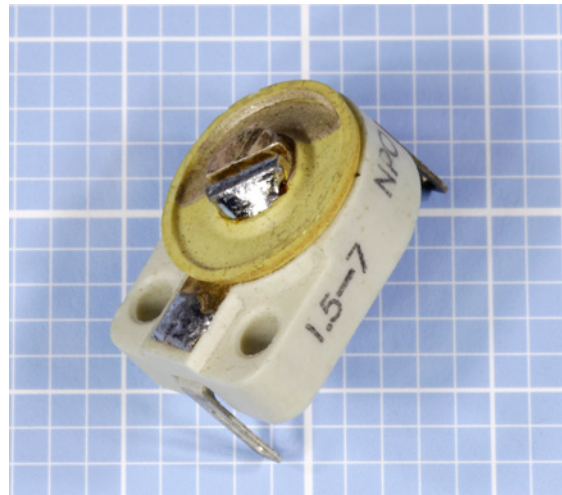
Górna granica pojemności trymera zwykle jest nie mniejsza niż wartość znamionowa, ale często może być większa o 50%.

## Formaty

Wszystkie kondensatory nastawne są przeznaczone do montażu na płytkach drukowanych. Większość montuje się powierzchniowo, a jedynie niewielka część jest przystosowana do montażu przewlekane. Kondensatory montowane powierzchniowo mają rozmiary 4 mm × 4 mm lub mniejsze, natomiast wersje przewlekane — 5 mm × 5 mm lub większe. Z wyglądu kondensatory stroikowe przypominają jednoobrotowe potencjometry nastawne z łbem śruby na środku kwadratowej obudowy. Przykład kondensatora montowanego metodą przewlekania pokazano na rysunku 13.4.

## Stosowanie

Kondensatory zmienne często wykorzystuje się do strojenia *obwodów LC*, będących połączeniem równoległym cewki (jej indukcyjność zwyczajowo oznacza się literą L) i kondensatora zmiennego (którego pojemność reprezentuje litera C). Schemat pokazany na rysunku 13.5 przedstawia przykładowy obwód ilustrujący zasadę działania takiego obwodu. Po przesunięciu przełącznika do góry następuje ładowanie dużego kondensatora o stałej wartości prądem z zasilacza DC. Po przestawieniu przełącznika w dół kondensator próbuje przepuścić prąd przez cewkę, ale jej *reaktancja* hamuje przepływ i przekształca energię prądu w pole energii pola



Rysunek 13.4. Trymer o wartości znamionowej od 1,5 pF do 7,0 pF

magnetycznego. Po rozładowaniu kondensatora pole magnetyczne zanika, a jego energia jest z powrotem przekształcana w energię elektryczną. Ta powraca do kondensatora, który ponownie się ładuje, ale z odwrotną niż poprzednio polaryzacją. Następuje powtórzenie cyklu, przy czym prąd przepływa tym razem w przeciwnym kierunku. Dioda niskoprądowa znajdująca się w obwodzie będzie migać, sygnalizując oscylacje napięcia, aż do całkowitego wyczerpania energii pobranej na początku ze źródła.

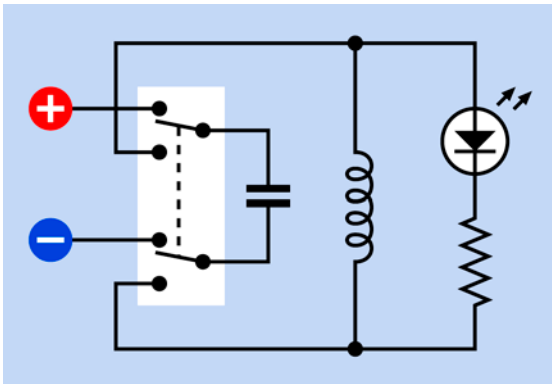
Ponieważ taka oscylacja przypomina drganie ciężarka zawieszonoego na sprężynie, obwód LC jest często nazywany *obwodem drgającym*.

W rzeczywistości do takiego działania układu potrzebne byłoby ogromnie duże wartości parametrów. Można to stwierdzić na podstawie poniższego wzoru, w którym  $f$  oznacza częstotliwość wyrażoną w hercach,  $L$  jest indukcyjnością wyrażoną w henrach, a  $C$  jest pojemnością elektryczną w faradach:

$$f = 1 / (2\pi * \sqrt{L * C})$$

W przypadku częstotliwości 1 Hz wymagana byłaby ogromna cewka znajdująca się naprzeciw bardzo dużego kondensatora o pojemności co najmniej 0,1 F.

Obwód LC doskonale nadaje się do stosowania przy bardzo dużych częstotliwościach (do 1000 MHz) — wystarczy wtedy mała cewka i mały kondensator zmienny. Na rysunku 13.6



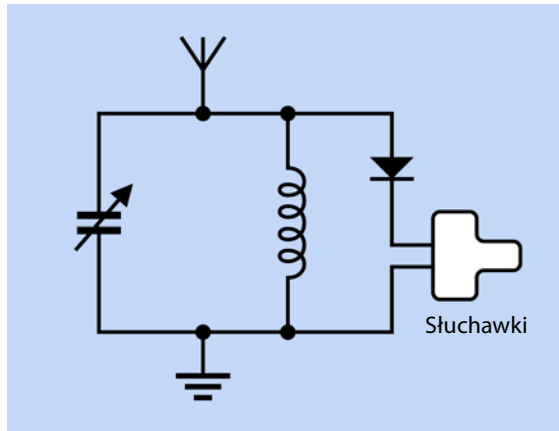
**Rysunek 13.5.** W tym obwodzie kondensator jest ładowany po ustawieniu przełącznika dwubiegunowego w jego górnym położeniu; po przestawieniu przełącznika w dolne położenie kondensator tworzy wraz z cewką obwód LC (indukcyjno-pojemnościowy) wykonujący drgania z częstotliwością określoną parametrami obu podzespołów. W rzeczywistości, aby zobaczyć miganie diody, należałoby użyć skrajnie wysokich wartości znamionowych indukcyjności i pojemności

pokazano znany już schemat z obwodem LC, tyle, że diodę LED i rezystor zastąpiły zwykła dioda i słuchawka wysokoimpedancyjna (po prawej stronie), a zamiast kondensatora stałego jest teraz kondensator zmienny. Po dodaniu anteny (na górze) oraz przewodu uziemienia (na dole) taki obwód LC może odbierać sygnał radiowy, który będzie także źródłem zasilania. Częstotliwość rezonansową takiego układu można regulować za pomocą kondensatora zmiennego. Przy częstotliwości rezonansowej impedancja przyjmuje wartość szczytową, więc przepływ sygnału o tej częstotliwości do ziemi jest utrudniony, a pozostałe częstotliwości napotykające znacznie mniejszy opór bez przeszkód przepływają wprost do ziemi. Taka jest zasada działania układu LC w radiodiodnikach i nadajnikach AM.

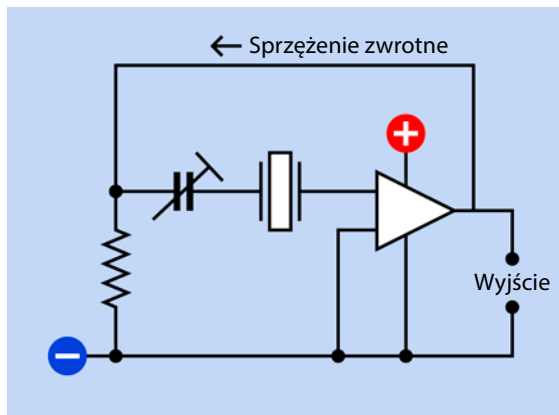
Ze względu na bardzo ograniczone rozmiary kondensatorów zmiennych nie nadają się one do stosowania w większości obwodów czasowych.

Kondensatory nastawne zwykle znajdują zastosowanie w nadajnikach o wysokiej mocy, transponderach telewizji kablowej, stacjach bazowych komunikacji bezprzewodowej oraz podobnych układach przemysłowych.

Można ich używać do precyzyjnego dostrajania częstotliwości rezonansowej w obwodach oscylacyjnych, jak pokazano na rysunku 13.7.



**Rysunek 13.6.** Obwód LC wykorzystano tutaj w prymitywnym układzie dostrajania do stacji radiowej i generowania ledwo słyszalnego dźwięku wydobywającego się ze słuchawki po prawej stronie, przy czym do zasilania używany jest jedynie sygnał nadawczy: kondensator zmienny reguluje częstotliwość w obwodzie, aby uzyskać rezonans dla częstotliwości fali nośnej sygnału radiowego



**Rysunek 13.7.** Trymer połączony szeregowo z kryształkiem dostraja częstotliwość tego prostego obwodu wykorzystującego wzmacniacz operacyjny

Oprócz dostrajania częstotliwości obwodu trymer może również kompensować zmiany pojemności i indukcyjności w obwodzie wywoływane zmianą położenia przewodów lub ścieżek w wyniku przeprojektowania układu. Regulacja trymera jest bowiem o wiele prostsza niż podstawianie kondensatorów o stałej pojemności. Trymer stosuje się również do kompensowania odchyłań pojemności obwodu, która zmienia się wraz z upływem czasu.

## Możliwe błędy

---

### Brak uziemienia trymera podczas jego regulacji

Choć kondensatory stroikowe, czyli trymery, nie są biegunowe, producent może oznaczyć jeden zacisk znakiem plus, a drugi znakiem minus. Podczas regulacji kondensatora, gdy jego zacisk ujemny będzie niepodłączony lub nieuziemiony, metalowa końcówka śrubokręta będzie powodować nieprawidłowe odczyty. Przed precyzyjnym strojeniem trymera należy zawsze uziemić jego odpowiednie wyprowadzenie. Poza tym regulację lepiej jest wykonywać śrubokrętem z tworzywa sztucznego.

### Nanoszenie materiału wierzchniego lub powłoki zabezpieczającej

*Materiał wierzchni* jest kauczukową warstwą klejącą, którą można nanosić na zmontowane komponenty w celu

zabezpieczenia ich przed wilgocią lub drganiami. *Powłoka zabezpieczająca* to niewielka ilość farby, którą nanosi się po ustawieniu kondensatora w celu zapobiegnięcia samoistnemu obracaniu się śruby regulacyjnej. Większość producentów nie zaleca nanoszenia tego rodzaju materiałów na trymery, ponieważ ich przedostanie się do wnętrza może uszkodzić kondensator.

### Brak ekranowania

Kondensatory zmienne powinny być podczas eksploatacji zabezpieczone ekranem, aby uchronić je przed wpływem zewnętrznych elementów pojemnościowych. Nawet zbliżenie dłoni do kondensatora zmiennego może zmienić jego pojemność.



# Cewka indukcyjna

Pojęcie **cewka indukcyjna** w znaczeniu używanym w niniejszej *Encyklopedii* odnosi się do zwojnicy służącej do generowania *indukcyjności własnej (samoindukcji)* w obwodzie elektronicznym. Często jest ona stosowana wraz z rezystorami i/lub kondensatorami do przewodzenia prądu przemiennego. Rodzajem cewki indukcyjnej jest *dławik*. Porównując poszczególne opisywane tutaj podzespoły, warto zaznaczyć, że **elektromagnes** odnosi się do uzwojenia zawierającego element centralny wykonany z materiału ferromagnetycznego, który nie przesuwają się względem uzwojenia. Taki elektromagnes powoduje przyciąganie lub odpychanie innych części reagujących na działanie pola magnetycznego. Uzwojenie z ferromagnetycznym elementem środkowym, który przesuwają się w wyniku działania prądu przepływającego przez zwoje cewki, nazywa się tutaj **solenoidem**, choć to pojęcie może mieć czasem znacznie szersze znaczenie.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

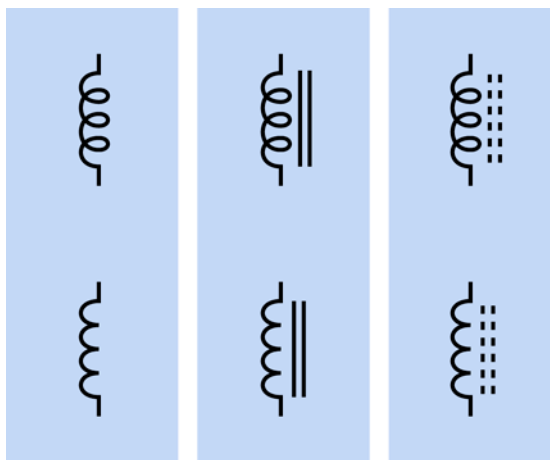
- **solenoid** (rozdział 21.),
- **elektromagnes** (rozdział 20.).

## Funkcja

Cewka indukcyjna to uzwojenie indukujące w sobie lub w *rdzeniu* pole magnetyczne jako skutek przepływu prądu elektrycznego przez zwoje. Może być stosowana w obwodach do blokowania lub kształtowania przebiegu prądu przemiennego bądź modyfikowania jego częstotliwości. Pełniąc taką funkcję, może „dostrajać” proste radioodbiorniki lub różnego typu oscylatory. Może również służyć do ochrony czułych urządzeń przed groźnymi dla nich skokami napięcia.

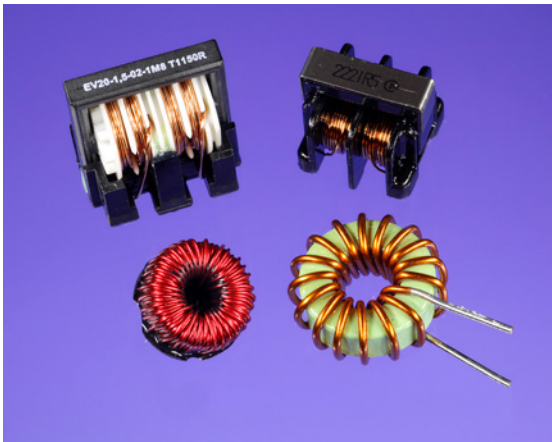
Symbol schematyczny cewki indukcyjnej przedstawia uzwojenie, które może przyjmować dwie podstawowe postacie pokazane u góry i na dole rysunku 14.1. Częściej stosowany jest symbol przedstawiony na dole. Znaczenie symboli pokazanych w każdym z pionowych prostokątów jest jednakowe.

Jedna lub dwie linie równoległe obok cewki oznaczają, że zwoje są nawinięte na lity rdzeń z materiału magnetycznego, natomiast linie przerywane informują, że rdzeń jest wykonany z cząstek o własnościach magnetycznych, na przykład opiłków żelaza. Brak wskazania rdzenia oznacza cewkę bezrdzeniową, czyli powietrzną.



**Rysunek 14.1.** Symbol uzwojenia cewki elektrycznej może mieć dwie postaci, których znaczenie jest identyczne; linie ciągłe obok cewki oznaczają rdzeń magnetyczny z litego metalu; linie przerywane oznaczają rdzeń zawierający cząstki metalu

Na rysunku 14.2 pokazano kilka cewek indukcyjnych przystosowanych do montażu przewlekanego.



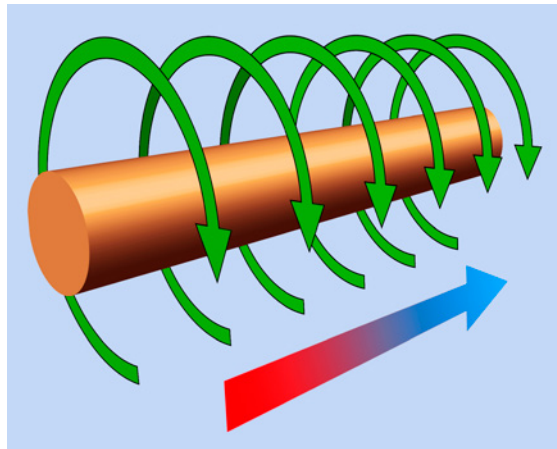
**Rysunek 14.2.** Cztery cewki indukcyjne przeznaczone do montażu przewlekane na płytkach drukowanych

## Działanie

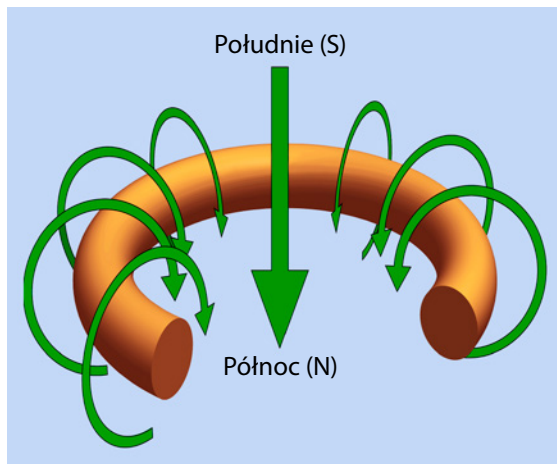
Prąd stały przepływający przez przewodnik elektryczny, na przykład drut, wytwarza pole magnetyczne wokół tego przewodnika. Na rysunku 14.3 pokazano *konwencjonalny kierunek przepływu prądu* (tzn. płynący od bieguna dodatniego do ujemnego) przez prosty drut w kierunku od strony lewej do prawej — kierunek ten oznaczono czerwono-niebieską strzałką. Powstałe w rezultacie pole magnetyczne przedstawiono strzałkami zielonymi. Jeśli drut zostanie zakrzywiony, jak pokazano na rysunku 14.4, pole magnetyczne wewnątrz zwoju będzie skierowane w dół. Zgodnie z konwencją przyjmuje się, że pole magnetyczne wewnątrz uzwojenia przebiega od bieguna *południowego (S)* do *północnego (N)*.

Gdyby w przewodzie o kształcie zamkniętego okręgu został wywołany przepływ prądu stałego, wówczas pole magnetyczne wytworzyłoby siłę skierowaną we wnętrzu okręgu w sposób pokazany na rysunku 14.5, przy założeniu, że przepływ prądu odbywa się w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara (pokazanym strzałkami czerwono-niebieskimi).

I na odwrót, jeśli przez środek okręgu zostałyby przeciągnięty magnes, spowodowałoby to wyindukowanie impulsu prądu elektrycznego przepływającego przez okrągły obwód. Można więc stwierdzić, że prąd elektryczny przepływający przez przewód może indukować pole magnetyczne i odwrotnie



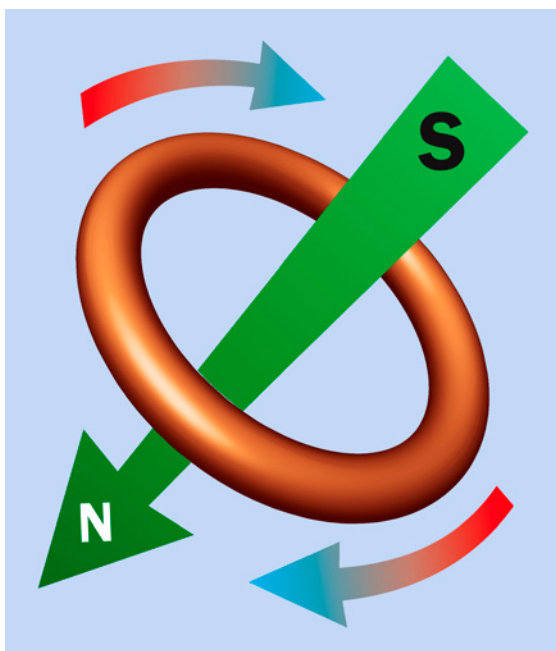
**Rysunek 14.3.** Konwencjonalny prąd płynący od lewej do prawej (jak pokazuje strzałka czerwono-niebieska) wywołuje wokół przewodu pole magnetyczne (symbolizowane przez strzałki zielone)



**Rysunek 14.4.** Po zakrzywieniu przewodu pole magnetyczne wewnątrz zwoju będzie skierowane zgodnie z dużą zieloną strzałką

— magnes poruszający się w pobliżu przewodu może indukować w nim prąd elektryczny. Zasada ta jest wykorzystywana w *generatorach* elektrycznych, a także **transformatorach**, gdzie prąd przemienny w uzwojeniu pierwotnym generuje zmienne pole magnetyczne w rdzeniu, które to pole następnie wywołuje przepływ prądu przemiennego w uzwojeniu wtórnym.

Należy tutaj zauważyć, że statyczne, czyli niezmiennie pole magnetyczne nie wywołuje przepływu prądu.

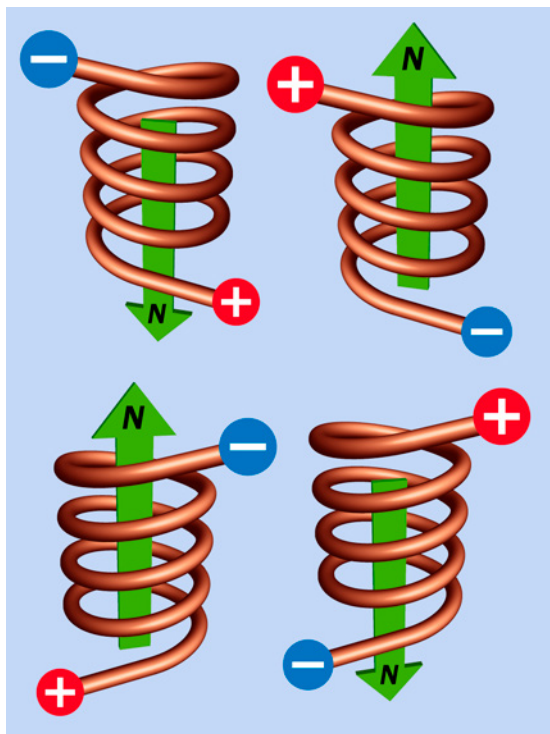


**Rysunek 14.5.** Jeśli prąd będzie przepływał przez okrągły przewodnik (w kierunku pokazanym strzałkami czerwono-niebieskimi), wytworzy pole magnetyczne o kierunku wskazanym przez zieloną strzałkę

## Przepływ prądu stałego przez cewkę

Jeśli przez drut mający kształt linii śrubowej (szereg kształtów zbliżonych do okręgu), pokazanej na rysunku 14.6, popłynie prąd stały, wynikowe pole magnetyczne może wytworzyć siłę działającą w kierunkach wskazanych zielonymi strzałkami. Zwroty tych sił zależą od kierunku nawinięcia zwojów (zgodnie lub przeciwnie do ruchu wskazówek zegara) oraz od kierunku przepływu prądu. Tak ukształtowany przewód zwykle nazywa się *cewką* lub *zwojnicą*.

W rzeczywistości linie pola magnetycznego nie biegną w nieskończoność, lecz po zatoczeniu okręgu na zewnątrz cewki wracają, aby zamknąć *obwód magnetyczny*. Takie domknięcie pola można zaobserwować, wykonując typowe doświadczenie ze szkoły średniej polegające na umieszczeniu w różnych punktach kompasu lub rozrzuceniu opiłków żelaza na kartce papieru znajdującej się nad magnesem. Uproszczony rozkład linii sił pola magnetycznego wytwarzanego przez cewkę indukcyjną pokazano na rysunku 14.7. Warto zapamiętać, że w niniejszej *Encyklopedii* zastosowano

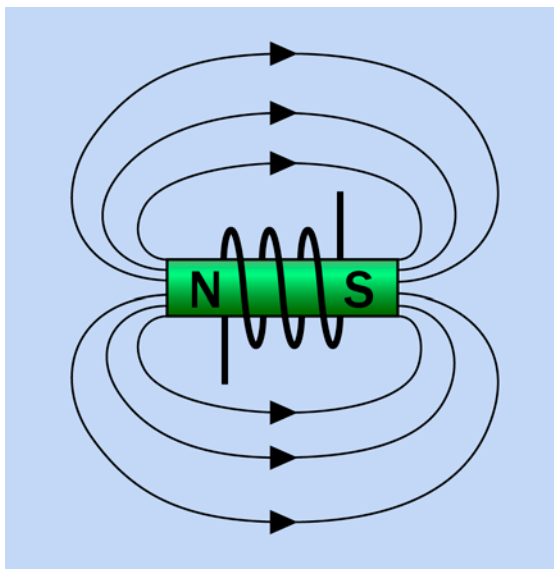


**Rysunek 14.6.** Przepływ prądu stałego przez zwojnicę wywołuje powstanie pola magnetycznego, którego zwrot zależy od kierunku przepływu prądu oraz kierunku nawinięcia zwojów; we wszystkich przypadkach kierunek oznaczono zieloną strzałką

konwencję, zgodnie z którą zielony kolor oznacza występowanie pola magnetycznego.

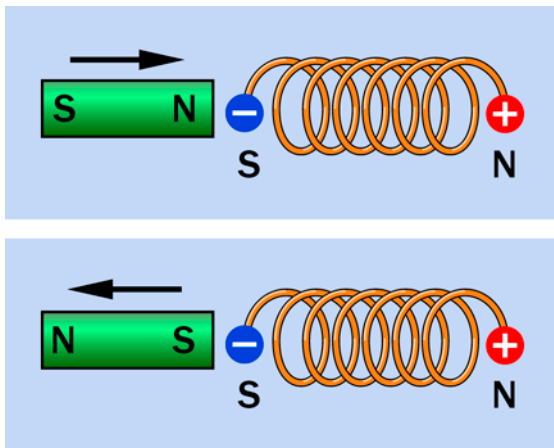
Domknięcie pola magnetycznego nie wiąże się z podstawową funkcją cewki indukcyjnej. W rzeczywistości zewnętrzne części pola są przyczyną wielu problemów w instalacjach elektrycznych, ponieważ zakłócają działanie innych podzespołów i wymagają stosowania ekranów magnetycznych. Dodatkowo domknięcie krzywych w powietrzu powoduje osłabienie pola, ponieważ powietrze cechuje się znacznie większą *reluktancją* (magnetycznym odpowiednikiem oporu) niż rdzeń elektromagnesu.

Biegunowość pola magnetycznego generowanego przez cewkę można ustalić, wsuwając do niej stały magnes. Pokazano to na rysunku 14.8. Jeśli magnes ma przeciwną biegunowość niż cewka, wówczas będzie odpychany, ponieważ takie same bieguny się odpychają. Jeśli biegunowości będą jednakowe, wówczas magnes będzie przyciągany, gdyż



**Rysunek 14.7.** W rzeczywistości linie magnetyczne nie są nieskończone, a każda z nich tworzy zamkniętą pętlę wokół magnesu lub elektromagnesu; w celu zachowania przejrzystości na pozostałych rysunkach domknięcie linii nie jest pokazywane

zbliżyć się będą do siebie bieguny przeciwne. Taką zasadę wykorzystuje się w **solenoidach**.



**Rysunek 14.8.** W zależności od układu biegunów obu pól magnetycznych magnes stały (po lewej stronie) będzie albo przyciągany przez cewkę, albo od niej odpychany

## Rdzeń magnetyczny

Stosując *rdzeń magnetyczny*, można zwiększyć indukcyjność cewki i jednocześnie zredukować wpływ zjawiska nasycenia pola magnetycznego w rdzeniu. Określenie „magnetyczny” w odniesieniu do rdzenia nie oznacza, że jest on magnesem stałym, a raczej informuje o tym, że rdzeń może zostać szybko namagnesowany przejściowym impulsem prądu elektrycznego przepływającym przez otaczającą ten rdzeń cewkę.

Użycie rdzenia zwiększa skuteczność cewki indukcyjnej, ponieważ jego opór magnetyczny jest niższy niż w przypadku powietrza. Innymi słowy, strumień magnetyczny będzie swobodniej przepływał przez rdzeń niż przez powietrze.

Uogólniając, *przenikalność* obwodu magnetycznego jest przeciwieństwem reluktancji; jest miarą tego, jak łatwo można wywołać pole magnetyczne, i zwykle wyraża się ją względem przenikalności powietrza, która wynosi w przybliżeniu 1. Przenikalności różnych rodzajów rdzeni omówiono w punkcie „Wartości”.

W rdzeniu cewki można wyróżnić *domeny magnetyczne*, które zachowują się jak małe magnesy z biegunami północnym i południowym. Gdy polaryzujące pole magnetyczne nie występuje, domeny są ułożone losowo. Po umieszczeniu ich w polu magnetycznym o rosnącej sile domeny zaczynają się do niego dopasowywać, zwiększając całkowite pole magnetyczne. Gdy niemal wszystkie domeny zostaną jednorodnie ułożone, rdzeń osiągnie punkt *nasycenia magnetycznego* i jego wkład w zwiększanie siły magnetycznej się zakończy. Prąd płynący w tym momencie przez cewkę jest nazywany *prądem nasycenia*.

Po odłączeniu zasilania od cewki następuje częściowy powrót domen do ich początkowych losowych ustawień. Rdzeń staje się wtedy słabym magnesem stałym. Zjawisko to nosi nazwę *histerezy magnetycznej*, natomiast słabe pole magnetyczne określa się mianem *namagnesowania szczątkowego* lub *remanencji*.

## Siły elektromotoryczna i przeciwelektromotoryczna

Powstanie pola magnetycznego po doprowadzeniu prądu stałego do cewki indukcyjnej zajmuje krótki, ale mierzalny okres. Pole indukuje *siłę elektromotoryczną (EMF)*

w przewodzie. Ponieważ siła ta działa w kierunku przeciwnym do przepływu dostarczanego prądu, nazywa się ją siłą *przeciwelektromotoryczną* (*BEMF*). Jej działanie trwa tylko tyle, ile potrzeba do uzyskania przez pole maksymalnej wartości. Po ustabilizowaniu się pola prąd przepływa przez cewkę w normalny sposób.

Takie przejściowe zjawisko oporu jest wywołane *indukcyjnością własną* cewki. Ma ono efekt przeciwny do działania kondensatora, który wręcz wymusza początkowy nagły wzrost prądu do momentu pełnego naładowania, a następnie blokuje dalszy przepływ.

Gdy przez cewkę próbuje przepłynąć prąd przemienny o wysokiej częstotliwości, a każdy impuls jest zbyt krótki, aby przezwyciężyć siłę przeciwelektromotoryczną, cewka będzie utrudniać przepływ prądu. Można zatem zbudować taką cewkę, która będzie blokowała pewne częstotliwości, ale nie wszystkie.

Nawet prosty obwód elektryczny, który nie zawiera cewki, ma pewną indukcyjność własną związaną z wchodzącymi w jego skład przewodami. Należy bowiem pamiętać, że nawet prosty odcinek drutu indukuje pole magnetyczne, gdy płynie przez niego prąd. Takie efekty indukcyjne są jednak na tyle słabe, że w praktycznych zastosowaniach można je pominąć.

Przejściowy opór elektryczny względem prądu przemiennego wywołany przez cewkę indukcyjną lub przez kondensator nosi nazwę *oporu biernego* (*reaktancji*), chociaż występuje w zupełnie innych warunkach elektrycznych. Cewka hamuje bowiem początkowy impuls prądu stałego, a następnie stopniowo go przewodzi, natomiast kondensator najpierw przepuszcza prąd stały, a następnie go blokuje.

Po wyłączeniu przepływu prądu stałego przez cewkę pole magnetyczne indukowane wokół uzwojenia słabnie i uwalnia zgromadzoną w sobie energię. W rezultacie powstaje impuls siły elektromotorycznej skierowanej do przodu (zgodnie z biegunowością odłączonego źródła), który podobnie jak impuls siły przeciwelektromotorycznej może zakłócać działanie innych podzespołów obwodu. Urządzenia, takie jak silniki i duże przekładniki, które zawierają ogromne cewki, mogą generować szkodliwe skoki siły elektromotorycznej i przeciwelektromotorycznej. Problem związany z siłą EMF występującą po przerwaniu dopływu prądu do cewki zwykle rozwiązuje się przez zbocznikowanie cewki diodą, przez

którą może przepływać prąd wymuszony siłą elektromotoryczną. Takie działanie nazywa się *stabilizowaniem* stanów nieustalonych napięcia. Powszechnie stosuje się również układ diody i kondensatora nazywany *tlumikiem*. Schematy i dodatkowe informacje na ten temat zamieszczono w punkcie „Tłumik”, w rozdziale 12., „Kondensator”.

Schemat ilustrujący działanie sił elektromotorycznej i przeciwelektromotorycznej pokazano na rysunku 14.9. Cewka może być wykonana z drutu montażowego lub nawojowego o średnicy ok. 0,4 mm (lub mniejszej) i długości ok. 30 metrów. Taka zwojnica będzie działać skuteczniej po wsunięciu do niej kawałka żelaza lub stali, na przykład półcalowej rury cynkowanej. Po naciśnięciu przycisku przepływ prądu jest krótko hamowany przez siłę przeciwelektromotoryczną wywołaną w cewce i płynie przez diodę D<sub>1</sub>, która na chwilę zaświeci. Reaktancja cewki zacznie wtedy spadać, umożliwiając przepływ prądu przez zwoje. Dioda zostanie ominięta. Po zwolnieniu przycisku pole magnetyczne cewki zniknie, a powstała w rezultacie siła elektromotoryczna spowoduje błysnięcie diody D<sub>2</sub>. Należy zauważyć, że zwroty sił elektromotorycznej i przeciwelektromotorycznej są przeciwne, dlatego diody znajdujące się w obwodzie także są ustawione w przeciwnych kierunkach.

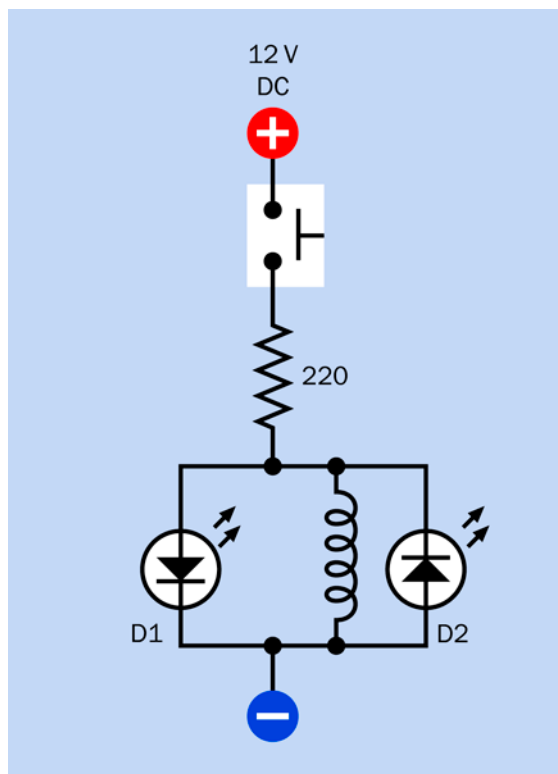
Rezystor o wartości 220 Ω powinien mieć moc znamionową równą co najmniej 0,25 W i nie należy zbyt długo trzymać naciśniętego przycisku, ponieważ opór elektryczny cewki jest stosunkowo niewielki. Diody mogą mieć prąd przewodzenia o wartości rzędu 5 mA.

## Biegunowości elektryczna i magnetyczna

Istnieje wiele reguł oraz obrazków ułatwiających zapamiętanie biegunów lub kierunków pola magnetycznego powstającego w wyniku przepływu prądu elektrycznego. *Reguła prawej dłoni* mówi, że po chwyceniu cewki prawą dłonią i ułożeniu palców w kierunku zgodnym z kierunkiem przepływu prądu wyciągnięty kciuk będzie wskazywał kierunek siły magnetycznej.

Zgodnie z konwencją pole magnetyczne jest skierowane od bieguna *południowego* do *północnego*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Taki kierunek ma pole magnetyczne tylko wewnątrz cewki, poza nią jest na odwrót — *przyp. tłum.*



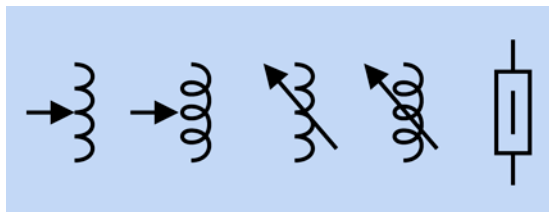
**Rysunek 14.9.** Obwód testowy służący do demonstracji działania sił elektromotorycznej i przeciw elektromotorycznej powstających, gdy przez cewkę zaczyna przepływać prąd stały i gdy ten przepływ ustaje; szczególne informacje są zawarte w tekście

Istnieje też reguła śruby prawoskrętnej (albo reguła korkociągu). Wyobraźmy sobie, że prąd stały płynie w kierunku od uchwytu korkociągu, przepływa przez jego metalową część i dociera do końcówki. Jeśli obrócimy korkociąg w tym samym kierunku, w którym prąd opływa cewkę, jego ruch posuwisty (wkręcanie się w korek lub wykręcanie) wskaże kierunek pola magnetycznego w cewce.

## Rodzaje

Cewki klasyfikuje się według materiałów rdzenia, kształtów rdzenia, sposobu montażu (montaż przewlekany lub powierzchniowy na płytkach drukowanych) oraz wykończenia zewnętrznego (niektóre cewki są pokrywane materiałem izolacyjnym, natomiast w innych miedziany drut nawojowy jest odsłonięty).

Dodatkowo wyróżnia się dwa rodzaje funkcjonalne: cewki o regulowanej indukcyjności oraz filtry (koraliki) ferrytowe. Na rysunku 14.10 pokazano symbole elektryczne tych elementów.



**Rysunek 14.10.** Symbole elektryczne oznaczające filtr ferrytowy (pierwszy od prawej) oraz cewki o regulowanej indukcyjności (pozostałe symbole — ich znaczenie jest identyczne)

## Rdzeń magnetyczny

Rdzeń magnetyczny może być wykonany z litego żelaza, płytek z żelaza lub stali oddzielonych cienką warstwą izolacji, sproszkowanego żelaza zmieszanego ze spoiwem lub związku ferrytowego na bazie niklu, cynku, manganu bądź ich kombinacji. Przenikalność magnetyczna rdzenia żelaznego jest co najmniej 1000-krotnie większa niż przenikalność powietrza, a w przypadku niektórych materiałów ferrytowych jest nawet 10 000 razy większa.

Jedną z podstawowych wad rdzenia magnetycznego jest zjawisko *histerezy*, które w tym kontekście dotyczy skłonności rdzenia do pewnego „zapamiętywania” stanu namagnesowania, gdy prąd przemienny zmienia kierunek z dodatniego na ujemny. Następny impuls musi więc przewyciężyć siły tego magnetyzmu szczątkowego. Taka skłonność rdzenia do zachowywania polaryzacji magnetycznej nosi nazwę *remanencji*. Szczególnie wysoką remanencją charakteryzują się właśnie rdzenie żelazne.

Kolejną wadą niektórych rdzeni magnetycznych jest to, że mogą w nich występować prądy wirowe wywoływane polem magnetycznym cewki. Takie prądy wirują wewnątrz rdzenia, zmniejszając skuteczność cewki. Powodują bowiem straty w postaci ciepła, które są szczególnie duże w przypadku prądów o wysokich natężeniach. Utworzenie rdzenia z żelaznych lub stalowych płytek oddzielonych cienkimi warstwami izolacji pozwala uniknąć takiego zjawiska. Użycie sproszkowanego żelaza również tłumi prądy wirowe, ponieważ w takim materiale cząsteczki mają ograniczony

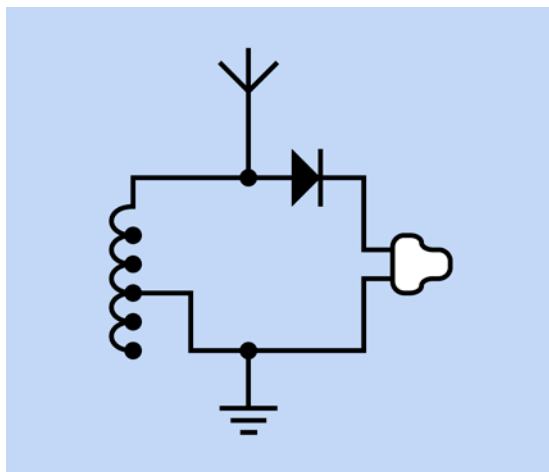
kontakt między sobą i nie tworzą obwodów zamkniętych. Materiały ferrytowe nie są przewodnikami, dlatego są odporne na występowanie prądów wirowych. W związku z tym są stosowane najczęściej.

Histeresa i prądy wirowe wywołują straty energii podczas każdego cyklu zmiany kierunku prądu przemiennego. W rezultacie straty rosną liniowo wraz ze wzrostem częstotliwości. Rdzenie cewek indukcyjnych, w których występuje którykolwiek z powyższych problemów, nie nadają się więc do wysokich częstotliwości.

## Rdzeń niemagnetyczny

Problemy związanych z rdzeniami magnetycznymi można uniknąć, nawijając cewkę na rdzeń niemagnetyczny, który może być wydrążony, może być materiałem ceramicznym lub tworzywem sztucznym. W przypadku rdzenia drążonego uzwojenie nosi nazwę *cewki powietrznej*. Przenikalność rdzeni ceramicznych i wykonanych z tworzyw jest zbliżona do przenikalności powietrza.

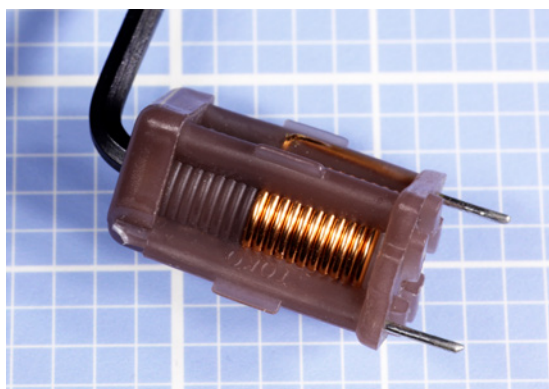
Cewka indukcyjna z rdzeniem niemagnetycznym będzie odporna na występowanie prądów wirowych i remanencji, ale jej rozmiary będą znacznie większe niż cewek z rdzeniami magnetycznymi o zbliżonej indukcyjności. W przypadku prymitywnego radiodbiornika, na przykład kryształkowego, cewka powietrzna filtrująca częstotliwość radiową może mieć średnicę wynoszącą kilka lub kilkanaście centymetrów. Prosty schemat obwodu odbiornika kryształkowego (nazywanego tak ze względu na diodę zawierającą kryształ germanu) pokazano na rysunku 14.11. Znajdująca się u góry antena odbiera sygnały nadawane przez stacje radiowe. Cewka może zawierać odczepy (pokazane czarnymi kropkami), pozwalając w prosty sposób na wybór odpowiedniej indukcyjności i blokowanie całego zakresu częstotliwości poza wybranym wąskim pasmem. Biały komponent w kształcie litery T to słuchawka o wysokiej impedancji. Dioda blokuje dolny zakres prądu przemiennego w sygnale radiowym, a ponieważ sygnał ten jest *modulowany amplitudowo*, słuchawka reaguje na zmiany intensywności sygnału, odtwarzając dźwięk w nim zakodowany.



**Rysunek 14.11.** Jednym z najstarszych i najbardziej podstawowych zastosowań cewki indukcyjnej jest wybór częstotliwości stacji radiowych — taki właśnie układ pokazano na tym schemacie odbiornika kryształkowego; szczegółowe informacje są podane w tekście

## Cewka regulowana

*Cewki regulowane*, nazywane także *cewkami strojeniowymi*, są stosunkowo rzadko stosowane. Mają postać rdzenia magnetycznego, który wprowadza się do środka cewki za pomocą śruby regulacyjnej. Indukcyjność takiego zestawu będzie tym większa, im większa część rdzenia magnetycznego zostanie wsunięta do otwartego wnętrza cewki. Przykład takiej cewki regulowanej pokazano na rysunku 14.12.



**Rysunek 14.12.** Cewka regulowana; indukcyjność jest zmieniana za pomocą śruby, która ustala poziom wsunięcia rdzenia do cewki; jak pokazano na rysunku, do wkręcania rdzenia służy klucz imbusowy; indukcyjność tej cewki można zmieniać w zakresie od 0,09  $\mu\text{H}$  do 0,12  $\mu\text{H}$

## Filtr (koralik) ferrytowy

Budowa *filtra ferrytowego* jest przeciwieństwem konstrukcji typowej cewki indukcyjnej. Przewodnik zamiast otaczać rdzeń ferrytowy, po prostu przechodzi przez jego środek. Na rysunku 14.13 pokazano dwa takie filtry. Górny podzielono na dwie części zamontowane w połówkach pokrywy z tworzywa, którą zaciska się na przewodzie. Dolny filtr należy po prostu nawlec na przewód. Zadaniem takich filtrów jest ograniczanie emisji fal radiowych z przewodu drogą absorpcji przez filtr (gdzie następuje przekształcenie energii w ciepło) lub ochrona przewodu przed promieniowaniem o częstotliwości radiowej generowanym przez źródła zewnętrzne. Takimi źródłami mogą być na przykład kable łączące komputer z urządzeniami peryferyjnymi, ściemniacze oświetlenia i niektóre rodzaje silników.



**Rysunek 14.13.** Dwa przykłady filtrów ferrytowych; służą do blokowania promieniowania radiowego generowanego przez przewód lub do ochrony przewodu przed podobnymi zakłóceniami

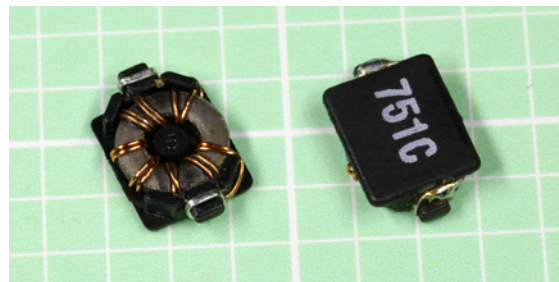
## Rdzeń toroidalny

Obwód magnetyczny utworzony na bazie rdzenia prętowego musi zostać domknięty liniami sił łączącymi oba końce pręta. Linie te przebiegają w powietrzu, które ma niewielką przenikalność. Jest to główną przyczyną niskiej skuteczności.

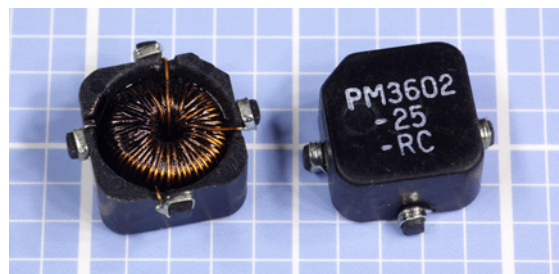
Dla porównania w przypadku torusa (bryły geometrycznej przypominającej pączek z dziurką) cały obwód magnetyczny jest zamknięty wewnątrz rdzenia. Pozwala to na istotny wzrost skuteczności. Poza tym pole magnetyczne jest tu bardziej skupione, więc cewka toroidalna wymaga mniejszego ekranowania (lub nie wymaga go wcale) w celu ochrony pozostałych komponentów.

Na rysunku 14.2 pokazano dwie cewki toroidalne do montażu przewlekane. Cewka widoczna u dołu po lewej ma indukcyjność znamionową równą  $345 \mu\text{H}$ . Cewka po prawej stronie ma indukcyjność znamionową równą  $15 \mu\text{H}$ . Ta druga ma piny umożliwiające montaż w płytce obwodu drukowanego.

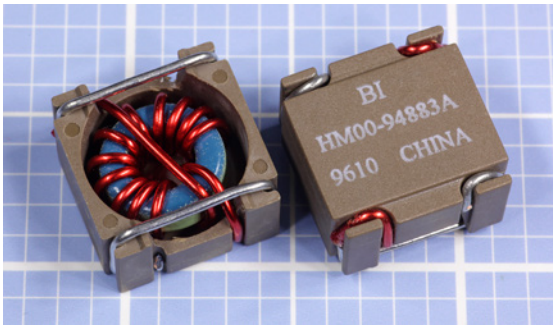
Cewki indukcyjne do montażu powierzchniowego często mają kształt toroidalny, aby zmaksymalizować wydajność elementu, który ma zajmować niewiele miejsca. Przykłady takich urządzeń przedstawiono na rysunkach 14.14, 14.15 i 14.16.



**Rysunek 14.14.** W typowej cewce toroidalnej uzwojenie jest nawinięte na rdzeniu magnetycznym w kształcie torusa; ten komponent przeznaczony do montażu powierzchniowego (pokazany tutaj od dołu — po lewej i od góry — po prawej) mieści się w dolnej strefie rozmiarowej; jego indukcyjność znamionowa wynosi  $750 \text{ nH}$



**Rysunek 14.15.** Średnich rozmiarów toroidalna cewka indukcyjna do montażu powierzchniowego (widok od dołu — po lewej i widok od góry — po prawej); jej indukcyjność znamionowa wynosi  $25 \mu\text{H}$



**Rysunek 14.16.** Większa toroidalna cewka indukcyjna do montażu powierzchniowego (widok od dołu — po lewej i widok od góry — po prawej); jej indukcyjność znamionowa wynosi  $3,8 \mu\text{H}$

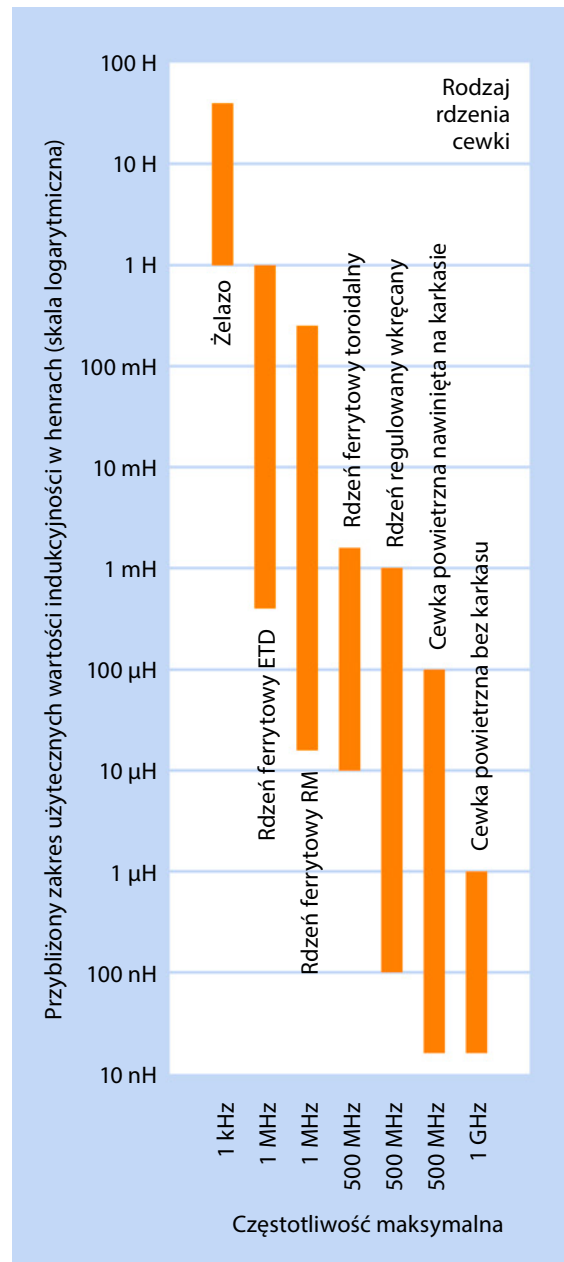
Na rysunku 14.17 zestawiono zakresy stosowanych indukcyjności i częstotliwości dla kilku popularnych rodzajów rdzeni cewek indukcyjnych.

## Żyrator

**Żyrator** to niewielki obwód, czasami zamknięty w mikroukładzie krzemowym, składający się z **rezystorów**, półprzewodnika oraz **kondensatora**. Służy do symulowania pewnych (ale nie wszystkich) funkcji cewki indukcyjnej. W zależności od specyfiki obwodu półprzewodnikiem może być tranzystor lub wzmacniacz operacyjny. Przykładowy schemat pokazano na rysunku 14.18. Ponieważ taki układ nie wywołuje żadnych efektów magnetycznych, żyrator nie powoduje problemów związanych z nasyceniem i histerezą, które dotyczą cewek z rdzeniami, a także nie generuje siły przeciwelektromotorycznej. Jego działanie polega jedynie na początkowym tłumieniu impulsu, a następnie stopniowym obniżaniu impedancji, w czym przypomina działanie cewki indukcyjnej.

Żyrator można stosować w sytuacjach, gdy użycie cewki jest niemożliwe ze względu na jej duże rozmiary (na przykład w telefonach komórkowych) lub wtedy, gdy szczególne znaczenie ma uzyskanie wysokiej jakości sygnału — przykładem są tutaj korektory graficzne lub inne urządzenia audio przetwarzające sygnały wejściowe, takie jak przedwzmacniacze.

Zastosowanie żyratora nakłada pewne wymagania względem budowy obwodu. Podczas gdy żadna ze stron „prawdziwej” cewki indukcyjnej nie wymaga połączenia z potencjałem masy, żyrator takiego połączenia wymaga. Korzyści płynące ze stosowania żyratorów są jednak



**Rysunek 14.17.** Wybrane popularne rdzenie cewek indukcyjnych wraz z ich parametrami; zestawienie wykonano na podstawie danych zamieszczonych w publikacji [Producing wound components](#) autorstwa R.Clark@surrey.ac.uk



## Obliczanie reaktancji

**Reaktancja** cewki indukcyjnej (czyli *opór bierny* względem prądu przemiennego) zmienia się w zależności od częstotliwości prądu. Jeśli  $f$  oznacza częstotliwość (w hercach), a  $L$  — indukcyjność (w henrach), wówczas reaktancję  $X_L$  wyrażoną w omach można obliczyć na podstawie następującego wzoru:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

Na podstawie tego równania można stwierdzić, że gdy częstotliwość maleje do zera (przypadek prądu stałego) lub do zera maleje indukcyjność (krótki odcinek prostego drutu), wówczas reaktancja także maleje do zera. I przeciwnie — cewka indukcyjna będzie coraz mocniej tłumić przepływ prądu wraz ze wzrostem indukcyjności  $L$  (lub) częstotliwości.

## Obliczanie reluktancji

**Reluktancję** (czyli *opór magnetyczny*) obwodu magnetycznego często oznacza się literą  $S$ , natomiast do oznaczenia przenikalności magnetycznej zwyczajowo stosuje się grecką literę  $\mu$  (tę samą co do oznaczenia mnożnika 1/1 000 000, jak na przykład w jednostce  $\mu\text{F}$ , czyli mikrofaradzie). Jeżeli przez  $A$  oznaczymy pole przekroju obwodu magnetycznego, a przez  $L$  — jego długość, wówczas:

$$S = L / \mu \cdot A$$

## Terminologia używana w kartach produktu

Typowa karta produktu cewki indukcyjnej opracowana przez producenta powinna zawierać *wskaznik indukcyjności* wyrażony w  $\mu\text{H}$  na 100 zwojów (przy założeniu, że przewód jest ułożony w jednej warstwie) w przypadku cewek z rdzeniem żelaznym bądź w  $\text{mH}$  na 1000 zwojów w przypadku cewek z rdzeniami ferrytowymi.

Parametr **DCR** oznacza rezystancję dla prądu stałego obliczoną na podstawie średnicy oraz długości przewodu.

Wartość **SRF** to *częstotliwość rezonansu własnego*. Cewkę indukcyjną należy dobrać w taki sposób, aby częstotliwość przepływającego przez nią prądu przemiennego nigdy nie zbliżała się do tej wartości.

**ISAT** (lub  $I_{\text{sat}}$ ) oznacza *prąd nasycenia*, przy którym rdzeń magnetyczny przestaje pełnić swoją funkcję w wyniku nasycenia

magnetycznego. W takiej sytuacji indukcyjność zaczyna maleć, a prąd zaczyna rosnąć, gdyż napotyka mniejszy opór.

## Układy szeregowe i równoległe

Ze względu na to, że napięcie na cewce przewodzącej prąd zmienny jest proporcjonalne do płynącego przez nią prądu, obliczenia całkowitej indukcyjności zwojnic połączonych szeregowo lub równoległe wykonuje się analogicznie jak dla rezystorów.

W przypadku połączeń szeregowych cewki będą więc przewodzić prąd o tym samym natężeniu, a indukcyjność całkowita będzie sumą poszczególnych indukcyjności. Dla cewek połączonych równoległe prąd całkowity dzieli się między poszczególne cewki w zależności od ich indukcyjności, dlatego przy założeniu, że  $L_1$  oznacza indukcyjność pierwszej cewki,  $L_2$  jest indukcyjnością drugiej cewki itd., całkowitą indukcyjność obwodu można wyznaczyć na podstawie wzoru:

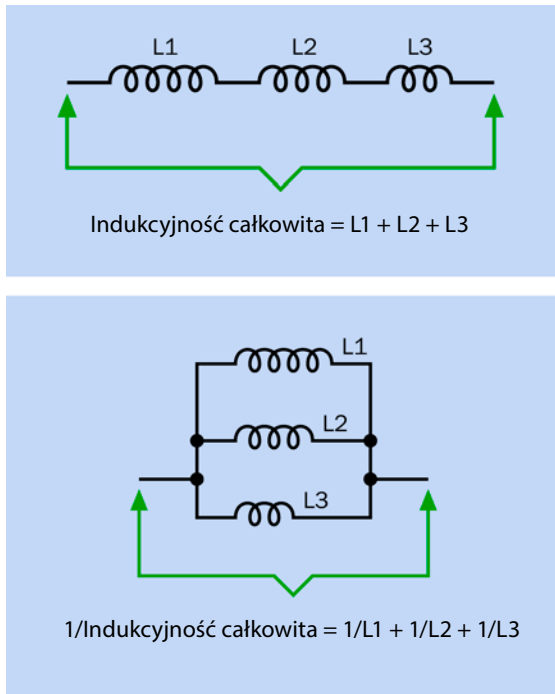
$$1/L = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 \dots$$

Obie konfiguracje pokazano na rysunku 14.21. W rzeczywistości takie proste zależności komplikują się na skutek różnic między cewkami (na przykład między ich rezystancjami), a także wzajemnego oddziaływania magnetycznego między nimi.

## Stała czasowa

Podobnie jak *stała czasowa* kondensatora definiuje tempo gromadzenia w nim energii po przyłożeniu napięcia poprzez rezystor, tak stała czasowa cewki indukcyjnej wyznacza tempo stopniowego wzrostu natężenia prądu przepływającego przez cewkę i pokonującego generowaną przez nią siłę elektromotoryczną. W obu przypadkach stała czasowa określa czas (wyrażony liczbą sekund), który dany komponent potrzebuje do osiągnięcia wartości wynoszącej około 63% różnicy między wartościami bieżącą i maksymalną. Rozpatrując przypadek cewki indukcyjnej, założmy zerową rezystancję wewnętrzną źródła zasilania, zerową rezystancję uzwojeń cewki oraz zerowy prąd początkowy. Jeżeli przez  $L$  oznaczymy indukcyjność cewki, a przez  $R$  wartość połączonego szeregowo rezystora, to stała czasowa  $TC$  wyrażona w sekundach wyniesie:

$$TC = L / R$$



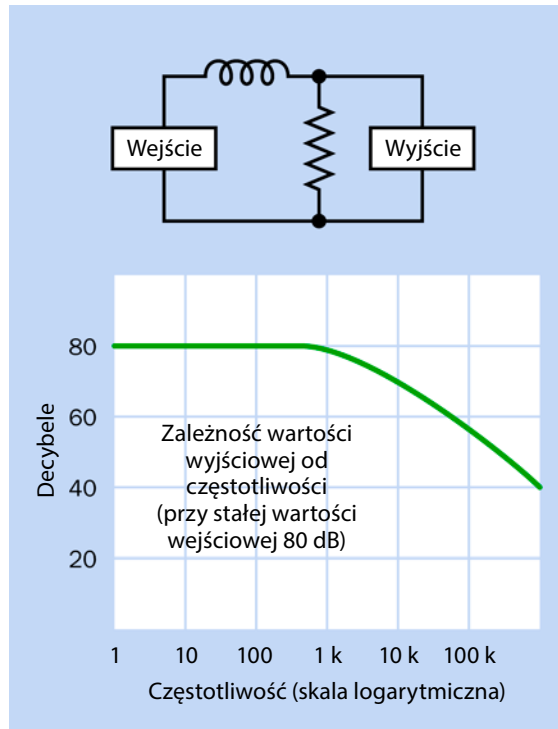
**Rysunek 14.21.** Obliczanie całkowitej indukcyjności dla cewek połączonych równolegle (u góry) i szeregowo (u dołu)

Można więc stwierdzić, że cewka o indukcyjności 10 milihenrów (0,01 henra) połączona szeregowo ze 100-omowym rezystorem przepuści prąd o natężeniu równym 63% maksymalnej wartości w czasie 0,0001 sekundy (lub 0,1 milisekundy); aby natężenie wzrosło o kolejne 63% pozostałej różnicy między wartością bieżącą a maksymalną, będzie musiał upłynąć taki sam odstęp czasu. Teoretycznie napięcie na cewce nigdy nie zmaleje do zera, ale w praktyce przyjmuje się, że osiąga tę wartość po upływie czasu odpowiadającego pięciu stałym czasowym.

## Stosowanie

Ponieważ reakcja cewki rośnie wraz z narastaniem natężenia prądu, a następnie stopniowo maleje, taką cewkę można stosować do blokowania lub tłumienia wysokich częstotliwości. Obwód realizujący takie zadanie często nazywa się *filtrem dolnoprzepustowym*. Schemat takiego filtra oraz wykres ilustrujący jego działanie pokazano na rysunku 14.22. Jednym z podstawowych zastosowań filtra

dolnoprzepustowego może być *zwrotnica głośnikowa*, która blokuje sygnały o wysokiej częstotliwości na wyjściu głośnika niskotonowego i kieruje je do głośnika wysokotonowego.

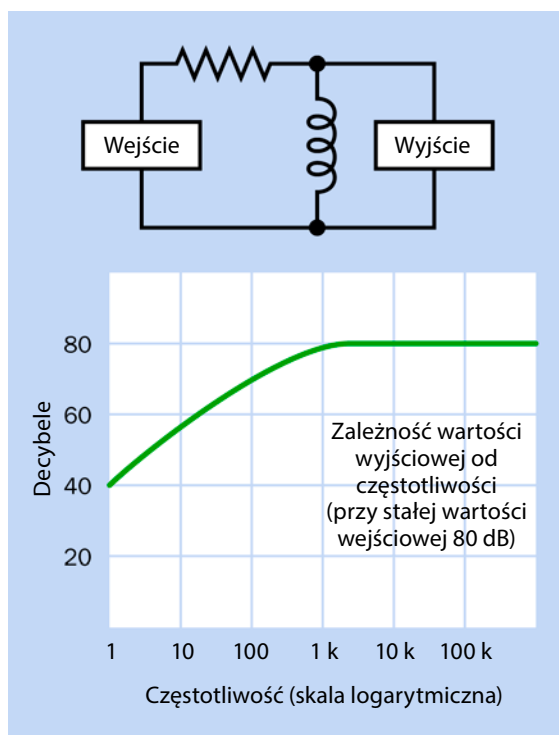


**Rysunek 14.22.** W filtrach dolnoprzepustowych wykorzystuje się zdolność cewki do stawiania oporu sygnałom o dużych częstotliwościach

Jeśli położenie cewki indukcyjnej zostanie zmienione i będzie ona bocznikować wyjście sygnału, wówczas rezultat będzie odwrotny, a obwód stanie się *filtrem górnoprzepustowym*. Schemat takiego układu oraz wykres ilustrujący jego działanie pokazano na rysunku 14.23.

Warto zauważyć, że w filtrach częstotliwości można stosować także **kondensatory**, ale ze względu na to, że ich działanie jest zasadniczo odwrotne do działania cewek indukcyjnych, należy je umieszczać w obwodzie odwrotnie niż cewki. Przykłady obwodów filtrujących na bazie kondensatorów opisano w rozdziale poświęconym tym komponentom.

Łącząc cewkę indukcyjną z kondensatorem, można uzyskać *filtr pasmowoprzepustowy*. Taki obwód pokazano na rysunku 14.24. W takiej konfiguracji cewka blokuje wysokie



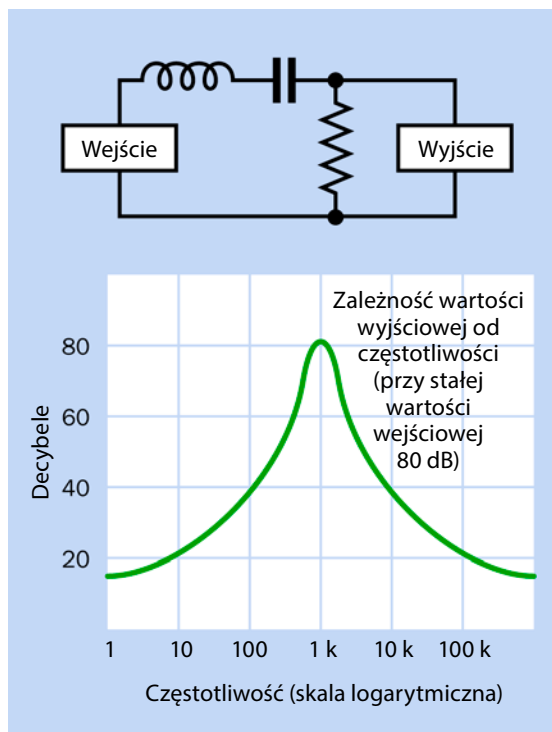
**Rysunek 14.23.** W tym obwodzie cewka indukcyjna przekierowuje niskie częstotliwości poza wyjście, przepuszczając jedynie sygnały o wysokiej częstotliwości

częstotliwości, natomiast kondensator — niskie. Przepuszczone jest więc jedynie ograniczone pasmo częstotliwości.

Podobnie jak powyżej, jeśli zamienimy położenie obu komponentów, aby bocznikowały wyjście, skutek będzie odwrotny, co pokazano na rysunku 14.25. Takie rozwiązanie nosi nazwę *filtra pasmowozaporowego*.

Działanie tych filtrów zależy od parametrów poszczególnych podzespołów, a w większości sytuacji konieczne jest zastosowanie dodatkowych elementów w obwodzie. Zaawansowane obwody filtrujące nie należą jednak do zakresu zagadnień opisywanych w niniejszej *Encyklopedii*.

Cewki indukcyjne są ważnymi elementami **przetwornic DC-DC** i **zasilaczy sieciowych**, w których szybkie przełączanie wywołuje zmiany napięcia. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w stosownych rozdziałach niniejszej *Encyklopedii*.

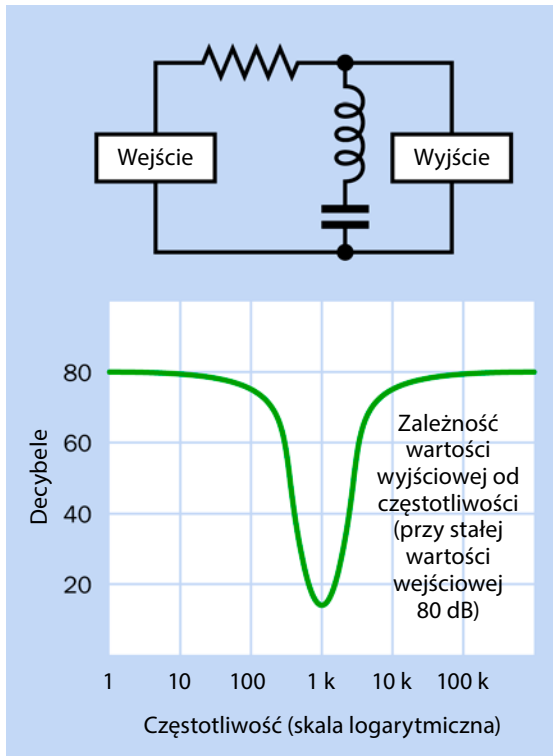


**Rysunek 14.24.** Po prawidłowym dobraniu parametrów kondensatora i cewki indukcyjnej oraz połączeniu tych elementów szeregowo cewka będzie blokować wysokie częstotliwości, a kondensator nie będzie przepuszczać niskich częstotliwości; w ten sposób powstaje filtr pasmowprzepustowy, który przepuszcza sygnały o częstotliwościach ze stosunkowo wąskiego zakresu

Wraz z coraz większą miniaturyzacją urządzeń elektronicznych duże rozmiary cewek indukcyjnych sprawiły, że zasadniczo ich zastosowanie stało się mocno ograniczone. Nadal jednak stosuje się je do strojenia oscylatorów, blokowania gwałtownych skoków zasilania oraz ochrony urządzeń przed nagłymi skokami napięcia (wykorzystuje się je na przykład w listwach przepięciowych, do których podłączone są komputery).

## Możliwe rdzenie

Cewki powietrzne (bezdzeniowe) charakteryzują się stosunkowo niską indukcyjnością wynikającą z małej przenikalności magnetycznej powietrza. Mogą jednak pracować przy bardzo wysokich częstotliwościach (nawet w zakresach



**Rysunek 14.25.** W tym przykładzie kondensator i cewka indukcyjna zawierają na wyjściu sygnały z wąskiego pasma częstotliwości; w ten sposób powstaje filtr pasmowozaporowy

gigahercowych) i tolerują wysokie natężenia szczytowe impulsów prądowych.

Cewki indukcyjne z rdzeniem żelaznym generują wysokie straty energii na skutek histerezy i prądów wirowych, zwłaszcza gdy rośnie częstotliwość prądu przemiennego przepływającego przez cewkę. W rezultacie cewki o takim rdzeniu nie nadają się do zastosowań, w których częstotliwości znacznie przekraczają 10 kHz.

## Miniaturyzacja

W sytuacjach, gdy istotne są jak najmniejsze rozmiary, cewkę o niskiej indukcyjności można uzyskać przez wytrawienie spirali na płytce drukowanej. Małe cewki mogą być również zintegrowane w układach scalonych. W niewielkich urządzeniach takich jak telefony komórkowe częściej stosuje się zamienniki cewek, na przykład opisane powyżej żyratory.

## Możliwe błędy

### Usterki w rzeczywistych zastosowaniach

Teoretycznie idealna cewka indukcyjna nie ma żadnej rezystancji ani reaktancji pojemnościowej, jak również nie generuje strat energii. W rzeczywistości jednak cewka nie tylko charakteryzuje się rezystancją i reaktancją pojemnościową, ale również wytwarza szum elektryczny i reaguje na niego. W rezultacie powstają rozproszone pola magnetyczne, a korzystanie z takich cewek sprawia o wiele więcej problemów niż w przypadku pokrewnych komponentów — **rezystorów i kondensatorów**.

*Pojemność pasożytnicza* to zjawisko występujące między sąsiednimi zwojami przewodu. Ma ono istotny wpływ zwłaszcza przy wyższych częstotliwościach, kiedy to może dojść nawet do *rezonansu własnego* cewki.

Rozwiązanie tego problemu może polegać na stosowaniu specjalnych geometrii cewek oraz różnych materiałów rdzenia. Zagadnienia te nie należą jednak do zakresu niniejszej *Encyklopedii*.

W przypadkach, gdy używanie cewek indukcyjnych może sprawiać problemy lub będzie zbyt kosztowne, warto rozważyć użycie *żyratorów*.

## Nasycenie

Indukcja magnetyczna wzrasta wraz z natężeniem przepływającego przez cewkę prądu, ale w przypadku rdzenia magnetycznego zależność ta nagle przestaje obowiązywać, gdy dochodzi do magnetycznego *nasycenia* rdzenia. Innymi słowy, gdy wszystkie losowo ułożone *domeny magnetyczne* w rdzeniu dopasują się do siebie pod wpływem pola magnetycznego, dalsza magnetyzacja nie będzie możliwa, przez co zakończy się zwiększanie indukcji. Należy przy tym pamiętać, że wraz ze zbliżaniem się do poziomu nasycenia zwiększa się histereza rdzenia. Cofnięcie jego namagnesowania wymaga bowiem coraz większej energii. Rozwiązaniem problemów dotyczących nasycenia może być stosowanie większych rdzeni, mniejszych prądów, mniejszej liczby zwojów, a także używanie rdzeni o niższej przenikalności (na przykład rdzeni powietrznych).

## Problemy związane z częstotliwością radiową

*Częstotliwości radiowe (RF)* wywołują szereg różnych problemów wpływających na skuteczność cewek indukcyjnych. Przykładem jest zjawisko *naskórkowości*. Jest to skłonność prądu przemiennego o wysokiej częstotliwości do przepływania głównie w obszarach powierzchniowych przewodu. *Efekt bliskości* polega natomiast na skłonności pól magnetycznych generowanych przez znajdujące się w pobliżu przewody do wywoływania prądów wirowych w cewce.

Oba te zjawiska przyczyniają się do wzrostu rezystancji cewki. W celu zredukowania ich znaczenia opracowano wiele różnych geometrii cewek, ale ten temat nie wchodzi w zakres zagadnień opisywanych w niniejszej *Encyklopedii*. Najważniejszym wnioskiem, który należy zapamiętać, jest fakt, że w przypadku fal radiowych należy stosować tylko te cewki, które zaprojektowano specjalnie z myślą o takich częstotliwościach.



# Transformator

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **zasilacz sieciowy** (rozdział 16.),
- **przetwornica DC-DC** (rozdział 17.),
- **falownik** (rozdział 18.).

## Funkcja

Transformator wymaga doprowadzenia *prądu przemiennego* (AC). Przekształca napięcie wejściowe na co najmniej jedno napięcie wyjściowe o wartości obniżonej lub podwyższonej.

Transformatory mogą mieć różne rozmiary, począwszy od małych modułów dopasowujących impedancję w urządzeniach audio takich jak mikrofony, a na wielotonowych kolosach przesyłających wysokie napięcie w krajowych sieciach energetycznych kończąc. Niemal wszystkie urządzenia elektryczne w domach i lokalach użytkowych zasilane z sieci elektrycznych wymagają zastosowania transformatora.

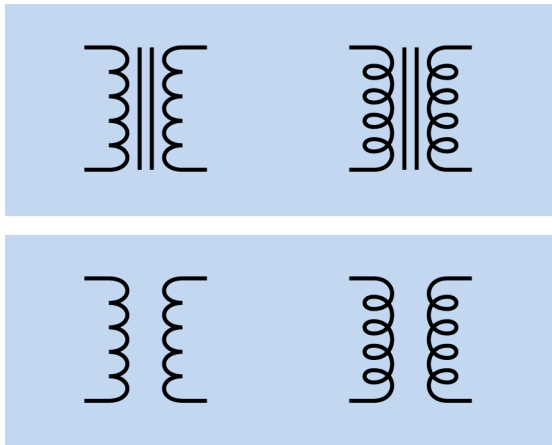
Na rysunku 15.1 pokazano dwa niewielkie transformatory. Urządzenie widoczne na drugim planie zapewnia napięcie 36 V AC przy natężeniu 0,8 A po podłączeniu do źródła o napięciu 125 V AC. Znajdujący się z przodu miniaturowy transformator jest produktem firmy RadioShack dostarczającym napięcie 12 V AC przy natężeniu 300 mA, z tym że bez obciążenia jego napięcie wyjściowe będzie wynosiło 16 V AC.

Na rysunku 15.2 przedstawiono symbole schematyczne transformatora. Różne postacie cewek pokazane po stronach lewej i prawej są funkcjonalnie takie same. Symbole górne: transformator z rdzeniem magnetycznym, czyli rdzeniem, który można namagnesować. Symbole dolne: transformator powietrzny (ten rodzaj jest używany stosunkowo rzadko ze względu na mniejszą efektywność). Niemal zawsze przyjmuje się, że na schemacie napięcie wejściowe jest doprowadzane do transformatora po lewej stronie (przez *uzwojenie pierwotne*), natomiast wyjście znajduje się po stronie prawej (*uzwojenie wtórne*). Często na uzwojeniach podawane są



**Rysunek 15.1.** Dwa niewielkie transformatory mocy; ten z tyłu ma wymiary 2,5 cm × 5 cm × 5 cm i odznacza się napięciem znamionowym 36 V AC przy natężeniu 0,8 A; napis „SEC” na mniejszym transformatorze jest skrótem od angielskiego słowa „secondary” oznaczającego „wtórne” i odnosi się do wartości znamionowych uzwojenia wtórnego

liczby ich zwojów, informujące o tym, czy transformator generuje niższe napięcie (wtedy uzwojenie wtórne będzie miało mniej zwojów) lub podwyższone napięcie (wtedy mniejsza liczba zwojów będzie na uzwojeniu pierwotnym).



**Rysunek 15.2.** Różne symbole schematyczne transformatorów z rdzeniem ferromagnetycznym (u góry) i powietrznym (u dołu); różne symbole uzwojeń pokazane po stronach lewej i prawej mają to samo znaczenie

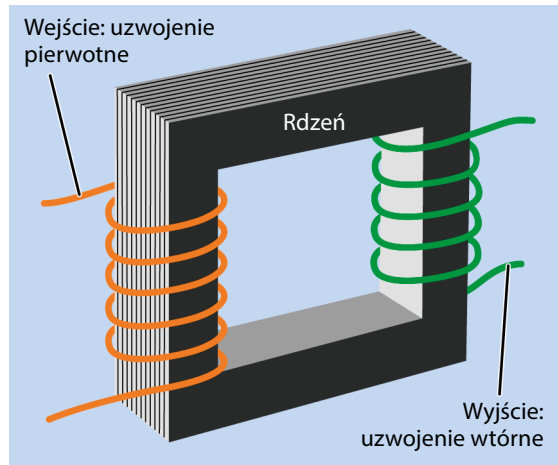
## Działanie

Na rysunku 15.3 przedstawiono uproszczony widok transformatora. Prąd przemienny przepływający przez uzwojenie pierwotne (pomarańczowe) indukuje strumień magnetyczny w rdzeniu utworzonym przez wiele płytek stalowych. Zmienny strumień wywołuje przepływ prądu w uzwojeniu wtórnym (zielonym), które generuje napięcie wyjściowe transformatora (w rzeczywistości uzwojenia zwykle składają się z tysięcy zwojów cienkiego drutu pokrytego warstwą emalii izolacyjnej; stosuje się też wiele rozmaitych konfiguracji rdzenia).

Zjawisko to nosi nazwę *indukcji wzajemnej*. Po przyłożeniu obciążenia do uzwojenia wtórnego będzie ono pobierać prąd z uzwojenia pierwotnego, nawet mimo tego, że między obydwooma uzwojeniami nie istnieje połączenie elektryczne.

Rozpatrując idealny, bezstratny transformator, stosunek zwojów między dwoma uzwojeniami wyznacza, czy napięcie wyjściowe będzie większe, mniejsze lub takie samo jak napięcie wejściowe. Zakładając, że wartości  $U_p$  i  $U_s$  oznaczają napięcia na uzwojeniach, odpowiednio: pierwotnym i wtórnym, a wartości  $N_p$  i  $N_s$  są liczbami zwojów tych uzwojeń, można sformułować następującą zależność:

$$U_p / U_s = N_p / N_s$$



**Rysunek 15.3.** Trzy podstawowe elementy transformatora pokazane w uproszczeniu

Warto zapamiętać prostą zasadę: mniejsza liczba zwojów to niższe napięcie, większa liczba zwojów to wyższe napięcie.

W transformatorze *podwyższającym* napięcie wyjściowe jest większe niż wejściowe, natomiast w transformatorze *obniżającym* jest na odwrót — napięcie na wejściu jest większe niż na wyjściu. Patrz rysunek 15.4.

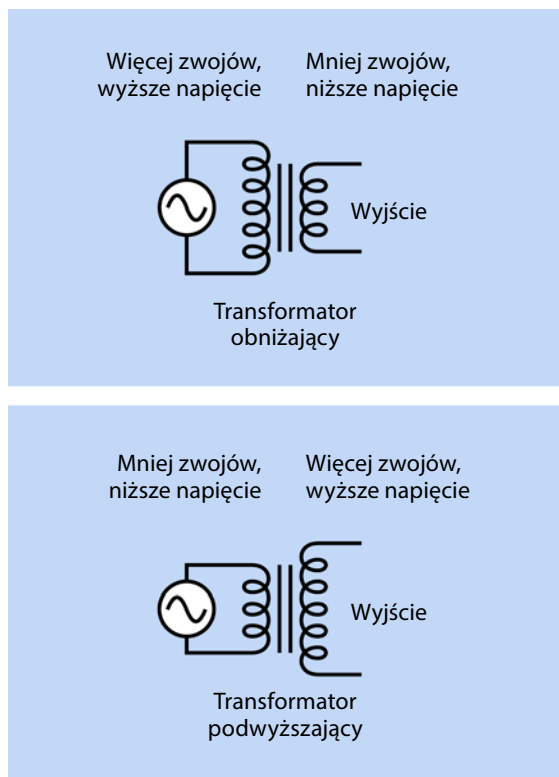
W idealnym, bezstratnym transformatorze moc wejściowa byłaby równa mocy wyjściowej. Przyjmując, że wartości  $U_{we}$  i  $U_{wy}$  oznaczają odpowiednio napięcia wejściowe i wyjściowe, a wartości  $I_{we}$  oraz  $I_{wy}$  są natężeniami prądu wejściowego i wyjściowego, zależności między nimi można określić poniższym wzorem:

$$U_{we} * I_{we} = U_{wy} * I_{wy}$$

Zgodnie z powyższym, jeśli transformator dwukrotnie podwyższa napięcie, z uzwojenia wtórnego można pobrać dwa razy mniej prądu, natomiast jeśli napięcie na transformatorze zostanie dwukrotnie obniżone, dostępny będzie prąd o dwukrotnie większym natężeniu.

Rzeczywiste transformatory nie mają sprawności 100%, ale mogą osiągać wartości powyżej 98%. W związku z tym podane zależności między napięciem, natężeniem oraz liczbą zwojów są w dużej mierze miarodajne.

Gdy transformator nie jest obciążony, uzwojenie pierwotne działa jak zwykła cewka o reaktancji utrudniającej przepływ prądu. W rezultacie transformator mocy podłączony



**Rysunek 15.4.** Stosunek napięcia wejściowego do wyjściowego jest równy stosunkowi liczby zwojów uzwojenia pierwotnego do liczby zwojów uzwojenia wtórnego (w transformatorze o sprawności 100%)

do gniazdka elektrycznego, ale bez żadnego obciążenia na wyjściu, będzie pobierać stosunkowo niewielką ilość energii elektrycznej. Pobierana przez niego energia będzie przekształcana na ciepło.

## Rdzeń

Często słyszy się stwierdzenie, że rdzeń ferromagnetyczny jest wykonany z żelaza, ale w rzeczywistości najczęściej wykonuje się go ze stali krzemowej o wysokiej przenikalności magnetycznej. Aby ograniczyć straty powodowane przez prądy wirowe, rdzeń ma zwykle strukturę warstwową — składa się ze stosu płytek oddzielonych od siebie cienkimi warstwami lakieru lub podobnego izolatora. Pozwala to w znacznym stopniu ograniczyć występowanie prądów wirowych do obszaru nieprzekraczającego grubości pojedynczej płytki.

Ponieważ napięcie stałe powodowałoby nasycenie magnetyczne rdzenia, wszystkie transformatory wymagają prądu przemiennego lub impulsów prądowych. Uzwojenia i geometria transformatora są zoptymalizowane pod kątem zakresu częstotliwości, napięcia i natężenia, przy których układ ma pracować. Zbyteńne odbieganie od tych wartości znamionowych może spowodować uszkodzenie transformatora.

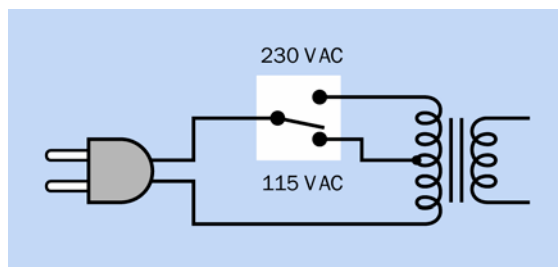
## Odczepy

**Odczep** transformatora jest wyprowadzeniem części uzwojenia pierwotnego lub (część) uzwojenia wtórnego. W przypadku strony pierwotnej: przyłożenie napięcia między początkiem cewki a odczepem znajdującym się w pewnym miejscu pośrednim spowoduje zmniejszenie liczby zwojów, do których przykładane jest napięcie, a tym samym zwiększenie stosunku liczby zwojów wyjściowych do wejściowych. W rezultacie wzrośnie napięcie wyjściowe. W przypadku strony wtórnej: pobranie napięcia z wyprowadzeń na początku cewki i gdzieś pośrodku spowoduje zmniejszenie liczby zwojów, z których pobierane jest napięcie, a tym samym zmniejszenie stosunku liczby zwojów wyjściowych do wejściowych. W rezultacie zmniejszy się napięcie wyjściowe. Powyższe zależności można podsumować następująco:

- Odczep po stronie pierwotnej pozwala zwiększyć napięcie wyjściowe.
- Odczep po stronie wtórnej umożliwia zmniejszenie napięcia wyjściowego.

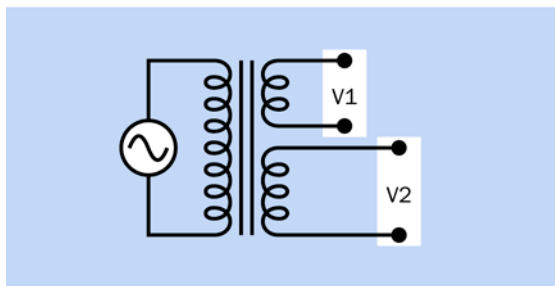
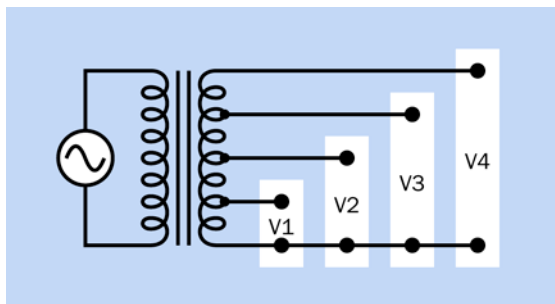
W uniwersalnych zasilaczach sieciowych można wybrać napięcie wejściowe przez odpowiednie ustawienie przełącznika dwupozycyjnego pozwalającego zastosować albo całe uzwojenie pierwotne, albo tylko część wydzieloną odczepem (patrz rysunek 15.5). Nowoczesne urządzenia elektroniczne zazwyczaj nie wymagają stosowania konwertera mocy, ponieważ **regulator napięcia** lub **przetwornica DC-DC** znajdująca się w takim urządzeniu toleruje szeroki zakres napięć wejściowych, zapewniając jednocześnie stosunkowo stałe napięcie wyjściowe.

W uzwojeniu wtórnym transformatora często tworzy się odczepy, aby zapewnić możliwość wyboru napięć wyjściowych. W istocie większość transformatorów mocy ma co najmniej dwa wyjścia, ponieważ koszt dodania odczepów do cewek wtórnych jest stosunkowo niewielki. Jako alternatywę dla wyjść odczepowych można stosować kilka oddzielnych



**Rysunek 15.5.** Dzięki przełącznikowi z podwójnym terminalem uniwersalny zasilacz może zapewniać stałe napięcie wyjściowe, przykładając napięcie 230 V AC (na całe uzwojenie pierwotne) lub 115 V AC (na połowę uzwojenia pierwotnego)

uzwojeń wtórnych. Takie rozwiązanie zapewnia izolację elektryczną poszczególnych wyjść (patrz rysunek 15.6).



**Rysunek 15.6.** Z transformatora można uzyskać kilka napięć wyjściowych, jeśli się wykorzysta odczepy na uzwojeniu wtórnym (u góry) lub zastosuje co najmniej dwa oddzielne uzwojenia wtórne (u dołu). W tym drugim przypadku wyjścia są odizolowane elektrycznie od siebie

Jeśli uzwojenie po stronie pierwotnej transformatora jest nawinięte w tym samym kierunku co uzwojenie wtórne, to napięcie wyjściowe jest przesunięte w fazie o  $180^\circ$  w stosunku do napięcia wejściowego. Na schematach elektrycznych często przy jednym z końców uzwojenia jest umieszczana

kropka, która wskazuje, gdzie to uzwojenie się zaczyna. Jeśli kropki po stronach pierwotnej i wtórnej będą przy tych samych końcach uzwojeń, to między napięciem wejściowym a wyjściowym będzie istnieć przesunięcie fazowe o  $180^\circ$ . W wielu sytuacjach (zwłaszcza wtedy, gdy prąd wyjściowy z transformatora jest przekształcany na prąd stały) nie ma to żadnego znaczenia.

Jeśli w uzwojeniu wtórnym znajduje się odczep środkowy połączony z masą, napięcia po obu stronach uzwojenia wtórnego, patrząc względem tego zaczepek, będą przesunięte w fazie. Patrz rysunek 15.7.

## Rodzaje

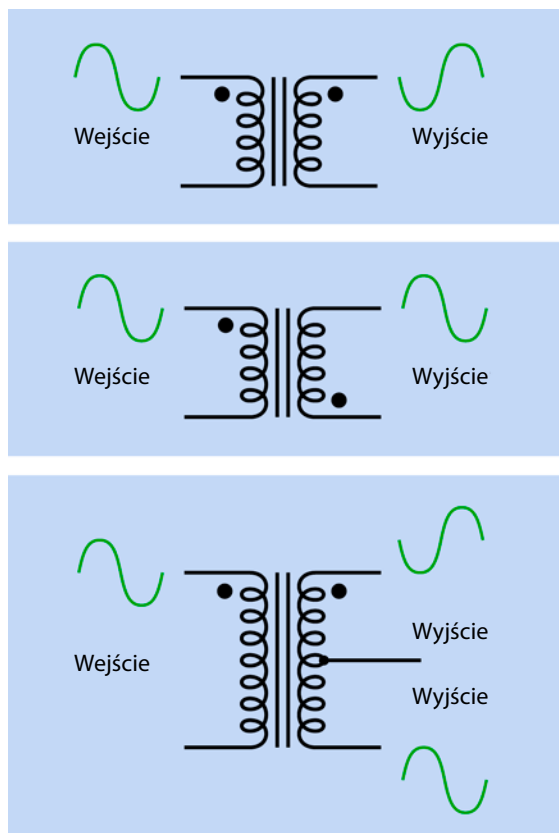
### Kształt rdzenia

*Transformator rdzeniowy* ma rdzeń w kształcie prostokąta, jak na rysunku 15.3. Charakteryzuje się on największą sprawnością, ale także najwyższymi kosztami produkcji. Inną opcją jest rdzeń C-kształtny (trzy boki prostokąta), a popularnym rozwiązaniem jest także rdzeń typu EI składający się ze stosu płytek w kształcie litery E, przy czym uzwojenia są nawinięte na ramiona górne i dolne tej litery lub koncentrycznie na ramię środkowe. Dodatkowy stos prostych płytek zamyka te ramiona, tworząc obwód magnetyczny.

Na rysunku 15.8 pokazano mniejszy transformator z rysunku 15.1, który przecięto piłą taśmową i wyszlifowano szlifierką w celu pokazania przekroju poprzecznego uzwojeń. Wyraźnie widać, że uzwojenia pierwotne i wtórne są nawinięte koncentrycznie. Widać również konfigurację rdzenia, który w tym przypadku jest typu EI. Elementy tej konstrukcji pokazano wyraźnie na rysunku 15.9.

### Transformator zasilający

Zwykle jest projektowany z myślą o przykręceniu do chassis lub montażu w obudowie bądź w szafce z urządzeniami elektrycznymi. Podłącza się go za pomocą wyprowadzeń lutowanych lub złączy umożliwiających przewodowe połączenie transformatora z jednej strony z kablem zasilającym, a z drugiej — z płytką obwodu drukowanego. Mniejsze transformatory mocy, takie jak pokazany na rysunku 15.1, są wyposażone w piny umożliwiające ich bezpośredni montaż na płytce drukowanej metodą przewlekania końcówek.



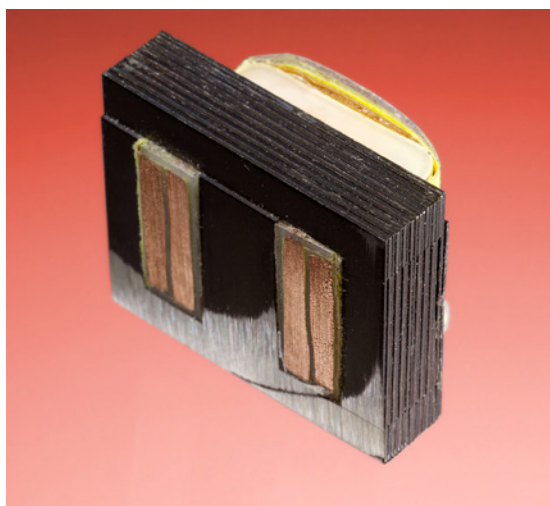
**Rysunek 15.7.** Kropka oznacza początek danego uzwojenia; gdy uzwojenia pierwotne i wtórne są nawinięte w tym samym kierunku, napięcie wyjściowe będzie przesunięte w fazie o  $180^\circ$  względem napięcia wejściowego; gdy kropki wskazują uzwojenia o różnych kierunkach, napięcia wejściowe i wyjściowe będą mieć tę samą fazę; jeśli zaczepek centralny na uzwojeniu wtórnym będzie pełnił funkcję wspólnej masy, napięcia na przeciwległych końcach tego uzwojenia będą mieć fazy przeciwne

## Transformator wtykowy

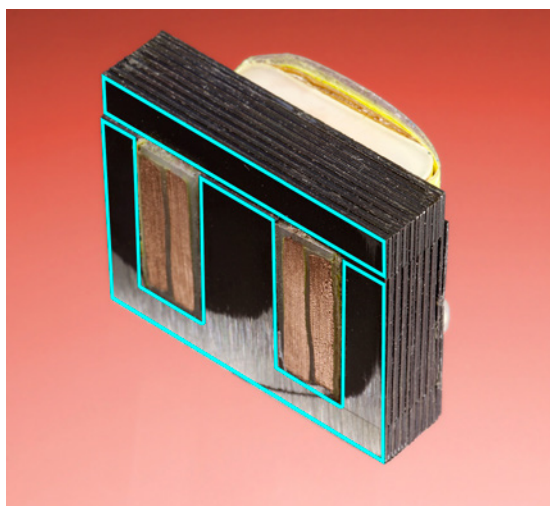
Zwykle jest zamknięty w obudowie z tworzywa sztucznego, którą można podłączyć bezpośrednio do gniazdka elektrycznego. Takie transformatory wyglądają tak samo jak **zasilacze sieciowe**, ale zamiast wyjściowego prądu stałego dają prąd przemienny.

## Transformator separacyjny

Nazywany także *transformatorem 1:1* ze względu na taką właśnie przekładnię między uzwojeniami pierwotnym



**Rysunek 15.8.** Mały transformator z pierwszego rysunku w tym rozdziale został „przecięty” w celu zilustrowania jego wewnętrznej budowy



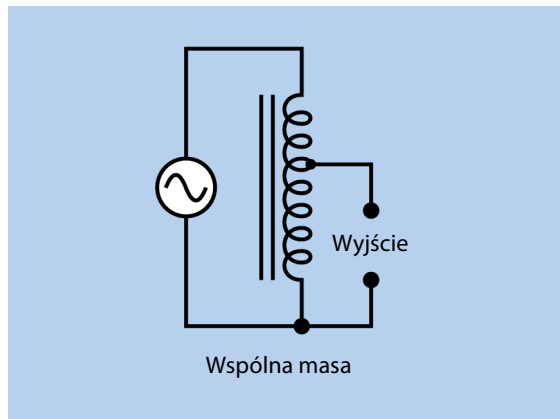
**Rysunek 15.9.** Przekrój transformatora z zaznaczonymi krawędziami płytek w kształcie „E” tworzących rdzeń

i wtórnym. Oba napięcia, wejściowe i wyjściowe, w takim transformatorze są równe. Po podłączeniu urządzenia elektrycznego do transformatora separacyjnego zostaje ono odizolowane od uziemienia elektrycznego okablowania sieci AC. Pozwala to zredukować ryzyko związane z pracami „pod napięciem”, ponieważ potencjał względem ziemi będzie

pomijalny. W rezultacie jednocześnie dotknięcie uziemionego obiektu i przewodu pod napięciem w urządzeniu nie doprowadzi do śmiertelnego porażenia prądem.

## Autotransformator

Ten rodzaj transformatora zawiera tylko jedną cewkę z odczepami do pobierania napięcia wyjściowego. Zjawisko indukcji wzajemnej zachodzi między poszczególnymi sekcjami cewki. W autotransformatorze wejście i wyjście mają jedno wspólne wyprowadzenie. Wygląda to inaczej niż w transformatorze dwucewkowym, w którym wyjście może być odseparowane elektrycznie od wejścia (patrz rysunek 15.10). Autotransformatory są często stosowane jako urządzenia dopasowujące impedancję w obwodach audio, a także w celu zapewnienia napięcia wyjściowego, które jedynie nieznacznie będzie się różnić od wejściowego.



**Rysunek 15.10.** Autotransformator zawiera tylko jedną cewkę i rdzeń; obniżenie napięcia wyjściowego uzyskuje się przez zastosowanie odczepu; wspólne wyprowadzenie uniemożliwia izolację elektryczną wejścia od wyjścia

## Transformator regulowany

Transformator regulowany, nazywany także *wariakiem*, przypomina **potencjometr** drutowy. Zawiera on tylko jedno uzwojenie. Za pomocą suwaka, który pełni funkcję ruchomego odczepu, można wybrać dowolny punkt na uzwojeniu. Podobnie jak w autotransformatorze, także w transformatorze regulowanym występuje wzajemne połączenie między wejściem a wyjściem.

## Transformator audio

Jeśli sygnał jest przesyłany między dwiema częściami obwodu o różnych impedancjach, to może on być częściowo odbijany lub tłumiony. (Impedancję wyraża się w omach, ale nie jest ona tożsama z rezystancją elektryczną, ponieważ uwzględnia reaktancję i pojemność, w związku z czym zależy od częstotliwości).

Urządzenie o niskiej impedancji wejściowej będzie próbować pobierać ze źródła prąd o znaczącym natężeniu, a jeśli źródło będzie mieć wysoką impedancję wyjściową, wówczas jego napięcie zostanie istotnie obniżone. Zasadniczo impedancja wejściowa urządzenia powinna być co najmniej 10 razy większa niż impedancja wyjściowa urządzenia źródłowego. W celu dopasowania impedancji można stosować komponenty pasywne (rezystory, kondensatory i cewki), ale w niektórych przypadkach korzystne jest użycie niewielkiego transformatora.

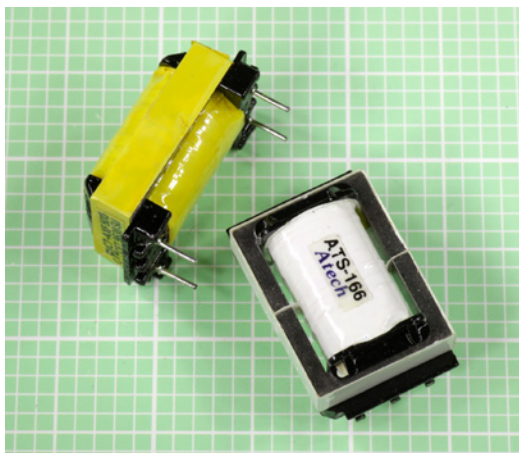
Jeśli przez  $N_p$  i  $N_w$  oznaczmy liczby zwojów w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym transformatora, przez  $Z_p$  impedancję urządzenia (na przykład wzmacniacza audio) podłączonego do strony pierwotnej transformatora, a przez  $Z_w$  impedancję urządzenia (na przykład głośnika) podłączonego do strony wtórnej, wówczas:

$$N_p / N_w = \sqrt{(Z_p / Z_w)}$$

Załóżmy, że do wzmacniacza o impedancji wyjściowej 640  $\Omega$  podłączony jest głośnik o impedancji 8  $\Omega$ . Dla takiego układu należy dobrać transformator dopasowujący o stosunku liczby zwojów pierwotnych do wtórnych określonym równaniem:

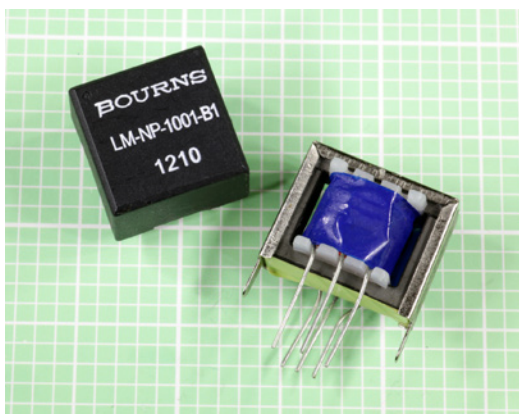
$$\sqrt{(640/8)} = \sqrt{80} = \text{w przybliżeniu } 9:1$$

Dwa transformatory pokazane na rysunku 15.11 są przeznaczone do montażu przewlekanego. Są stosowane w urządzeniach telekomunikacyjnych, ale mogą przenosić sygnały o małych częstotliwościach i być używane również w układach dopasowujących impedancję, takich jak przedwzmacniacze.



**Rysunek 15.11.** Transformatory do montażu przewlekane; więcej informacji można znaleźć w tekście

Na rysunku 15.12 pokazano transformatory do sprzęgania obwodów z sygnałami o częstotliwościach akustycznych. Urządzenie po prawej stronie ma impedancje równe  $500\ \Omega$  (pierwotna) i  $8\ \Omega$  (wtórna). Po lewej stronie pokazano całkowicie zabudowany transformator separujący o przekładni 1:1.



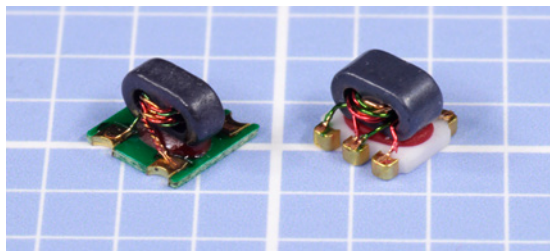
**Rysunek 15.12.** Transformatory do montażu przewlekane; szczegółowe informacje można znaleźć w tekście

## Transformator z dzielonym karkasem

W tego rodzaju transformatorze cewki uzwojeń pierwotnego i wtórnego są umieszczone obok siebie i oddzielone ekranem w celu maksymalnego ograniczenia sprzężenia pojemnościowego.

## Transformator do montażu powierzchniowego

Zajmuje powierzchnię mniejszą niż  $1\ \text{cm}^2$ . Służy do dopasowywania impedancji, sprzęgania linii i filtrowania. Na rysunku 15.13 pokazano dwa przykłady takich transformatorów.



**Rysunek 15.13.** Dwa transformatory do montażu powierzchniowego, każdy mniejszy niż  $1\ \text{cm}^2$ ; zwykle są stosowane w urządzeniach komunikacyjnych, przy czym można ich używać przy częstotliwościach większych niż  $5\ \text{MHz}$

## Wartości

Przy dobieraniu transformatora zasilającego najistotniejsze znaczenie ma jego moc wyrażana w woltoamperach (VA). Woltoamperów nie należy mylić z watami, ponieważ moc w watach uzyskuje się drogą pomiaru chwilowego w obwodzie prądu stałego, natomiast w obwodzie AC napięcie i natężenie stale się zmieniają. Woltoampery odnosi się więc do *mocy pozornej*, która uwzględnia reaktancję.

Związek między woltoamperami a watami zależy od stosowanego urządzenia. W najgorszym przypadku ma on postać:

$$W = 0,65\ \text{VA} \quad (\text{w przybliżeniu})$$

Innymi słowy, uśredniona moc użyteczna dostępna na transformatorze będzie nie mniejsza niż dwie trzecie wartości wyrażonej w woltoamperach.

W specyfikacjach transformatorów często podawane są wartości napięcia wejściowego, napięcia wyjściowego czy jego masy — parametry te nie wymagają wyjaśnienia. Dla transformatorów sprzęgających mogą być podawane także impedancja wejściowa i wyjściowa.

## Stosowanie

W przypadku większości obwodów elektronicznych za transformatorem będzie znajdować się *prostownik* przekształcający prąd przemienny na stały, a także **kondensatory** tłumiące wahania napięcia zasilającego. Zastosowanie gotowego **zasilacza sieciowego** lub *zasilacza zewnętrznego*, który zawiera wszystkie wymagane podzespoły, będzie o wiele szybsze i prawdopodobnie o wiele tańsze niż samodzielne zbudowanie takiego urządzenia od podstaw. Więcej informacji na ten temat zawiera rozdział 16.

## Możliwe błędy

### Odwroćenie wejścia i wyjścia

Załóżmy, że transformator podłączony do domowej sieci elektrycznej o napięciu 230 V ma dostarczać napięcie wyjściowe równe 10 V. Jeśli przez pomyłkę podłączymy go do sieci niewłaściwą stroną, napięcie na wyjściu wyniesie ponad 2000 V. Porażenie prądem o takim napięciu może doprowadzić do śmierci, nie wspominając o zniszczeniu zasilanych przez transformator urządzeń. Ponadto takie odwrócenie stron transformatora może skutkować jego uszkodzeniem. Podczas wykonywania połączeń z użyciem transformatorów zasilających należy więc zachować szczególną ostrożność. Warto też zawsze skontrolować napięcie wyjściowe za pomocą miernika. Wszystkie urządzenia zawierające transformatory należy zabezpieczyć bezpiecznikiem po stronie zasilania i uziemić.

### Ryzyko porażenia z powodu wspólnej masy

W urządzeniach korzystających z autotransformatora chassis jest podłączone poprzez transformator do jednej z żył przewodu łączącego urządzenie z gniazdkiem 230 V AC. Jeśli stosowana będzie wtyczka uniemożliwiająca odwrócenie biegunowości, chassis będzie „neutralne”. Jeśli jednak użyty zostanie nieodpowiedni przewód zasilający lub gniazdko elektryczne będzie nieprawidłowo podłączone, wówczas chassis będzie pod napięciem. Aby uniknąć takiego zagrożenia, przed rozpoczęciem pracy z urządzeniem zasilanym z sieci 230 V AC za pośrednictwem autotransformatora należy podłączyć urządzenie do transformatora separacyjnego i dopiero ten transformator podłączyć do gniazdka.

## Przypadkowe doprowadzenie prądu stałego

Jeśli do strony wejściowej transformatora doprowadzony zostanie prąd stały, stosunkowo niewielka rezystancja uzwojenia pierwotnego umożliwi przepływ prądu o wysokim natężeniu, które może spowodować uszkodzenie podzespołu. Transformatory można stosować jedynie w obwodach prądu przemiennego.

## Przeciążenie

W przypadku przeciążenia transformatora wydziela się ciepło, którego ilość może wystarczyć do zniszczenia cienkich warstw izolacji między zwojami cewek. W rezultacie po stronie wyjściowej może wystąpić napięcie wejściowe. Pod tym względem szczególnie groźne są transformatory o rdzeniu toroidalnym (okrągłym), ponieważ ich uzwojenia pierwotne i wtórne zazwyczaj na siebie nachodzą.

Niektóre (ale nie wszystkie) transformatory zasilające zawierają bezpiecznik termiczny, który ulega stopieniu po przekroczeniu temperatury progowej. Po przepaleniu takiego bezpiecznika transformator nie nadaje się do użytku i należy go wymienić.

Skutki niewielkich przeciążeń mogą być początkowo niewidoczne, ale z czasem mogą się kumulować. W związku z tym na etapie projektowania urządzenia należy uwzględnić instalację wentylacyjną lub odprowadzającą ciepło z transformatora i jego okolic.

## Nieprawidłowa częstotliwość prądu przemiennego

Napięcie w jednofazowej instalacji zasilającej AC w USA ma częstotliwość 60 Hz, natomiast w Wielkiej Brytanii i niektórych innych krajach<sup>1</sup> częstotliwość ta wynosi 50 Hz. Wiele transformatorów zasilających jest projektowanych z myślą o obu tych częstotliwościach, ale jeśli dany transformator będzie przeznaczony do użytku jedynie przy częstotliwości 60 Hz, wówczas podłączenie go do sieci o mniejszej częstotliwości może spowodować jego przegrzanie (natomiast transformator 50 Hz można bezpiecznie stosować w sieci 60 Hz).

<sup>1</sup> W tym w Polsce — *przyp. tłum.*

# Zasilacz

Nazywany także *przetwornikiem AC-DC*. Często jest zamknięty w obudowie z tworzywa sztucznego podłączanej bezpośrednio do gniazdka — przypomina wtedy nieco rozbudowaną *wtyczkę* elektryczną.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **transformator** (rozdział 15.),
- **przetwornica DC-DC** (rozdział 17.),
- **falownik** (rozdział 18.).

## Funkcja

Zasilacz przekształca *prąd przemienny (AC)* w *prąd stały (DC)* zwykle o niższym napięciu, którego wymaga większość urządzeń elektronicznych. Mimo że ma nazwę „zasilacz”, sam potrzebuje zasilania z zewnętrznego źródła.

Większe urządzenia, takie jak komputery lub sprzęt audio, zwykle mają zasilacz wbudowany, dlatego można je podłączyć bezpośrednio do gniazdka elektrycznego. W przypadku mniejszych urządzeń zasilanych akumulatorowo, takich jak telefony komórkowe lub odtwarzacze multimedialnych, zazwyczaj należy skorzystać z zewnętrznego zasilacza, który ma postać plastikowego pudełka. Taki zasilacz po podłączeniu do gniazdka doprowadza prąd stały za pośrednictwem przewodu zakończonego miniaturowym złączem. Taki rodzaj zewnętrznego zasilacza często nazywa się *zasilaczem sieciowym* lub wręcz *wtyczkowym*.

Choć zasilacz nie jest pojedynczym podzespołem, producenci sprzętu elektronicznego często oferują go jako gotowy moduł.

## Rodzaje

Wyróżnia się dwa główne rodzaje zasilaczy: *liniowy stabilizowany* oraz *impulsowy*.

## Zasilacz liniowy stabilizowany

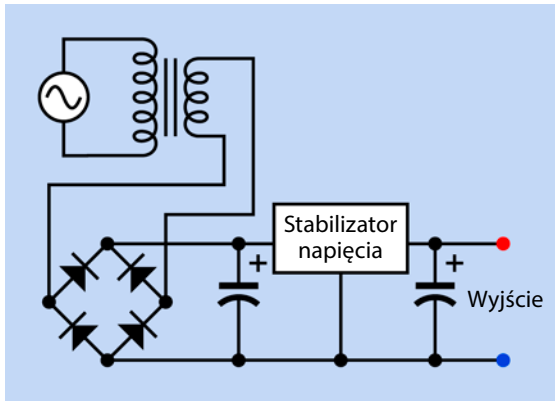
Taki zasilacz przekształca prąd AC w DC w trzech etapach:

1. **Transformator** zasilający redukuje napięcie wejściowe AC do niższej wartości.
2. **Prostownik** przekształca prąd przemienny na niewyglądzący prąd stały. Prostowniki są opisane w rozdziale poświęconym **diodom**.
3. **Stabilizator napięcia** wraz z co najmniej jednym **kondensatorem** sterują napięciem DC, wygładzają jego przebieg i ograniczają *stany nieustalone*. Pełna nazwa tego elementu to *liniowy stabilizator napięcia*, ponieważ zawiera on co najmniej jeden  **tranzystor** działający w trybie liniowym — liniowo reaguje na wahania prądu bazy, jeśli tylko nie przekracza poziomu nasycenia. Nazwa liniowego zasilacza stabilizowanego pochodzi właśnie od zawartego w nim liniowego stabilizatora napięcia.

Na rysunku 16.1 przedstawiono uproszczony schemat stabilizowanego zasilacza liniowego.

Ten rodzaj zasilacza można określić mianem *transformatorowego*, ponieważ zawiera transformator, który służy do obniżenia napięcia prądu przemiennego jeszcze przed wyprostowaniem.

Prostownik w zasilaczu zasadniczo przepuszcza wszystkie impulsy AC przez parę diod krzemowych. Wywołuje to



**Rysunek 16.1.** Prosty liniowy zasilacz stabilizowany

spadek napięcia o około 1,2 V przy szczytowym natężeniu prądu. Kondensator wygładzający, usuwając tętnienie napięcia, obniża jego wartość o około 3 V. Stabilizator zwykle wymaga, aby między jego wejściem i wyjściem istniała różnica wynosząca co najmniej 2 V. Biorąc pod uwagę również to, że napięcie wejściowe AC może okresowo spadać poniżej swojej wartości znamionowej, należy dobrać taki transformator, aby napięcie na jego wyjściu było co najmniej 8 V AC większe niż pożądane napięcie wyjściowe DC. Ta cała nadmiarowa energia jest rozpraszana w postaci ciepła.

Idea stosowania liniowych zasilaczy stabilizowanych narodziła się wraz z powstaniem urządzeń elektronicznych takich jak radioodbiorniki. Tranzystorowa wersja takiego rodzaju zasilacza była powszechnie stosowana do lat 90. ubiegłego wieku. Potem atrakcyjniejszym rozwiązaniem stały się zasilacze impulsowe ze względu na malejące koszty półprzewodników i montażu. Dodatkowo przyczyniła się do tego dostępność tranzystorów wysokonapięciowych, które umożliwiły projektowanie obwodów zasilanych bezpośrednio z układu prostowania napięcia sieciowego bez konieczności stosowania transformatorów obniżających napięcie.

Niektóre zewnętrzne zasilacze sieciowe nadal zawierają transformatory, ale takie rozwiązania stosuje się coraz rzadziej ze względu na stosunkowo duże rozmiary i masę transformatora. Przykład takiego zasilacza z transformatorem pokazano na rysunku 16.2.



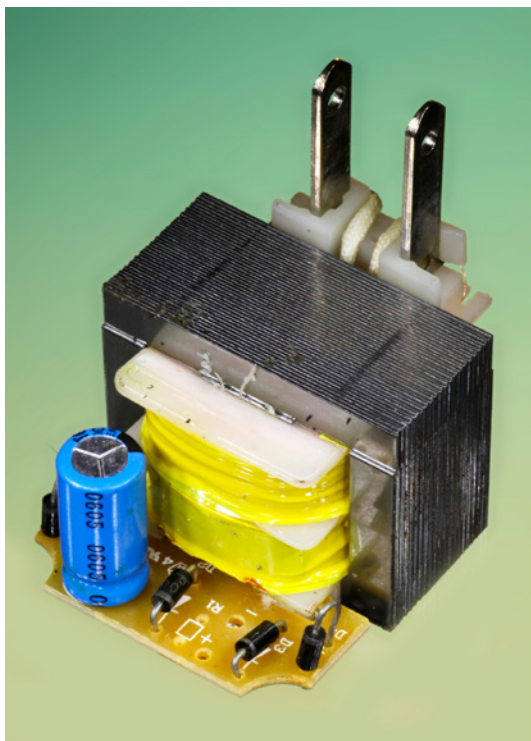
**Rysunek 16.2.** Prosty zasilacz transformatorowy zamknięty w obudowie z tworzywa sztucznego można podłączyć bezpośrednio do gniazdka elektrycznego; obecnie coraz częściej stosowane są zasilacze impulsowe, które zwykle są lżejsze, mniejsze i tańsze

Na rysunku 16.3 pokazano elementy składowe taniego, nieco przestarzałego zasilacza sieciowego. Wyjście z transformatora jest połączone bezpośrednio do czterech diod (niewielkie walce w kolorze czarnym) funkcjonujących jako prostownik pełnookresowy (dwupołówkowy). Wygładzanie jest w pewnym stopniu realizowane przez jeden kondensator elektrolityczny, ale ze względu na brak stabilizatora napięcia sygnał wyjściowy istotnie zależy od obciążenia. Taki rodzaj zasilacza nie nadaje się do zasilania urządzeń elektronicznych czułych na wahania napięcia.

## Zasilacz impulsowy

Nazywany także *zasilaczem SMPS*, przekształca prąd przemienny w stały dwuetapowo.

1. *Prostownik* zmienia wejściowy prąd przemienny na niewygładzony prąd stały bez użycia transformatora sieciowego.
2. *Przetwornica DC-DC* za pomocą *impulsów o modulowanej szerokości* włącza i wyłącza przepływ prądu stałego z bardzo dużą częstotliwością, obniżając wartość skuteczną napięcia. Stosowaną tutaj przetwornicą jest często przekształtnik typu *flyback* z transformatorem, ale dzięki dużej częstotliwości impulsów transformator może być znacznie mniejszy niż transformator sieciowy wykorzystywany w liniowym zasilaczu stabilizowanym. Zasadę działania **przetwornicy** DC-DC opisano w poświęconym jej rozdziale niniejszej *Encyklopedii* (rozdział 22.).

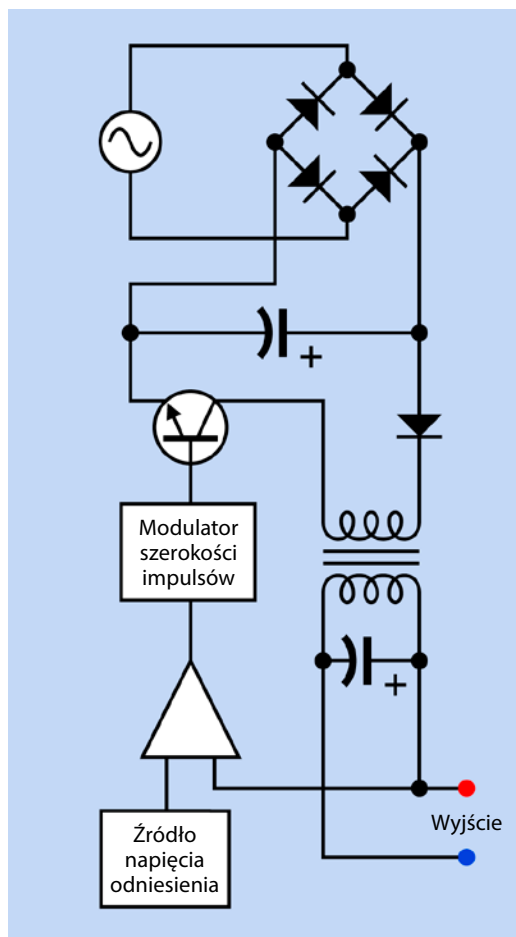


**Rysunek 16.3.** Starszy model taniego zasilacza sieciowego zawiera zestaw jedynie najbardziej podstawowych podzespołów, dlatego nie zapewnia odpowiednio wyregulowanego napięcia DC wymaganego do zasilania urządzeń elektronicznych

Na rysunku 16.4 pokazano uproszczony schemat zasilacza impulsowego.

Wnętrze jednego z pierwszych zasilaczy impulsowych, który zapewnia napięcie 12 V DC przy natężeniu 4 A, przedstawiono na rysunku 16.5. Taki model rozpraszał wiele ciepła, co wiązało się z koniecznością zachowania dużych odległości między komponentami oraz zapewnienia odpowiedniej wentylacji wnętrza obudowy.

Na rysunku 16.6 pokazano niewielki zasilacz impulsowy, który obecnie jest często stosowany do zasilania laptopów. Warto zwrócić uwagę na mniejszą obudowę i większą liczbę podzespołów wewnętrznych niż w przypadku starszego zasilacza z rysunku 16.5. Taki nowoczesny zasilacz zapewnia o wiele większą moc, ograniczając przy tym straty energii zamienianej w ciepło. Jego natężenie znamionowe wynosi 5 A, a mimo to transformator (owinięty żółtą folią na środku



**Rysunek 16.4.** Podstawowe podzespoły zasilacza impulsowego pokazane na mocno uproszczonym schemacie; warto zauważyć brak transformatora sieciowego 230 V AC; transformator zamontowany w obwodzie działa w połączeniu z układem przełączania o wysokiej częstotliwości, co pozwala znacznie zredukować jego rozmiary, masę i koszty

urządzenia) jest mniejszy niż transformator sieciowy, który znajdowałby się w starszym zasilaczu liniowym dostarczającym prąd o natężeniu jedynie 500 mA.

Nowoczesne zasilacze są szczelnie zamknięte, podczas gdy starsze modele wymagały wentylacji. Z drugiej strony obudowa zasilacza impulsowego musi być wyłożona warstwą metalu (usuniętą na pokazanej fotografii), aby ograniczyć poziom promieniowania elektromagnetycznego o wysokiej częstotliwości.



Rysunek 16.5. Wnętrze jednego z pierwszych zasilaczy impulsowych

## Zasilacz niestabilizowany

Zwykle składa się z transformatora i diod prostowniczych, które to elementy nie wygładzają ani nie kontrolują napięcia na wyjściu lub robią to w niewielkim stopniu.

## Zasilacz nastawny

Najczęściej jest to zasilacz liniowy z wbudowanym nastawnym **stabilizatorem napięcia**. Taki rodzaj zasilaczy znajduje zastosowanie w laboratoriach i wykorzystuje się go podczas projektowania urządzeń elektronicznych.

## Powielacz napięcia

Urządzenia takie jak fotokopiarki, drukarki laserowe, telewizory, kineskopy oraz kuchenki mikrofalowe wymagają napięcia o wartości znacznie większej niż dostępna w sieciowych gniazdkach elektrycznych. Powielacz napięcia zwykle zawiera transformator podwyższający, za którym zainstalowane



Rysunek 16.6. Wnętrze zasilacza impulsowego służącego do zasilania laptopa

są elementy do przekształcania prądu. Szczegółowy opis tego urządzenia nie wchodzi jednak w zakres niniejszej *Encyklopedii*.

## Forma zewnętrzna

Zasilacz *otwarty* składa się z komponentów zamontowanych na płytce drukowanej zwykle przymocowanej do metalowej podstawy montażowej. Nie ma obudowy ani wentylatora chłodzącego.

Zasilacz *zamknięty* jest zabudowany w perforowanej metalowej skrzynce ochronnej wyposażonej często w wentylator. Taką budowę mają zwykle zasilacze do komputerów stacjonarnych.

Zasilacze są również dostępne w wersjach montowanych na szelkach rackowych oraz szynach DIN.

## Stosowanie

Zasilacz impulsowy ze względu na to, że nie zawiera transformatora sieciowego, jest lżejszy i mniejszy, a często jest także tańszy niż zasilacz liniowy. Dodatkowo cechuje się większą sprawnością i generuje mniej strat cieplnych. Dzięki takim zaletom ten rodzaj zasilaczy stał się najpopularniejszym rozwiązaniem w zakresie doprowadzania prądu stałego do urządzeń elektronicznych. Przelączanie prądu z wysoką częstotliwością powoduje jednak powstawanie *zakłóceń elektromagnetycznych (EMI)*, których filtrowanie jest konieczne w celu ochrony wyjścia urządzenia oraz zminimalizowania ryzyka przekazania zakłóceń do sieci AC. Napięcie zasilające przelączane z wysoką częstotliwością może także generować składowe harmoniczne, które również wymagają tłumienia.

Wysokiej jakości liniowe zasilacze stabilizowane nadal znajdują zastosowanie w urządzeniach laboratoryjnych, niskoszumowych układach przetwarzania sygnałów oraz innych niszowych dziedzinach, w których wymaga się precyzyjnie wyregulowanego napięcia i wyeliminowania tętnienia. Takie zasilacze są stosunkowo ciężkie, duże i charakteryzują się niską sprawnością.

Na rysunku 16.7 przedstawiono tabelę, w której zebrano wady i zalety zasilaczy liniowych i impulsowych.

## Możliwe błędy

### Porażenie prądem o wysokim napięciu

Przez pewien czas po wyłączeniu urządzenia kondensatory znajdujące się w zasilaczu mogą pozostawać pod stosunkowo wysokim napięciem. Jeśli podczas kontroli lub naprawy zasilacza trzeba dotknąć jakiegoś elementu, należy to robić z zachowaniem szczególnej ostrożności.

### Usterka kondensatora

Jeśli w zasilaczu impulsowym dojdzie do uszkodzenia *kondensatorów elektrolitycznych* (na skutek wad produkcyjnych, nieprawidłowego użytkowania lub zużycia), przewodzony będzie prąd przemienny, co z kolei może spowodować usterkę półprzewodnika przelączającego z wysoką częstotliwością. W rezultacie na wyjście może się nieoczekiwanie przedostać napięcie wejściowe. Do uszkodzeń kondensatorów może dochodzić również w zasilaczach

	Switching power supply	Linear power supply
Component count	High	Medium
Load regulation	0.05% to 0.5%	0.005% to 0.2%
Line regulation	0.05% to 0.2%	0.005% to 0.05%
Ripple (RMS)	10mV to 25mV	0.25mV to 1.5mV
Efficiency	70% to 85%	40% to 60%
EMI	High	Very low
Leakage	High	Low
Physical size	Small	Large
Weight	Light	Heavy
Heat management	Usually fan-cooled	Usually cooled by convection

**Rysunek 16.7.** Porównanie parametrów liniowych zasilaczy stabilizowanych i zasilaczy impulsowych (na podstawie danych firmy Acopian Technical Company)

liniowych. Więcej informacji na temat takich usterek zawiera rozdział 12., „Kondensator”.

### Zakłócenia

W przypadku stosowania *kondensatorów elektrolitycznych* w zasilaczu impulsowym ich stopniowe zużycie występujące wraz z upływem czasu powoduje wzrost zakłóceń elektrycznych związanych z impulsami prądowymi o wysokiej częstotliwości.

### Udar prądowy

Po włączeniu zasilacza impulsowego mogą pojawić się udary prądowe, czyli nagłe skoki natężenia, wynikające z faktu gromadzenia się ładunku na kondensatorach. Zjawiska te mogą mieć wpływ na pozostałe podzespoły układu i wymuszają stosowanie zabezpieczeń wytrzymałych krótkotrwałe, ale duże odchylenia względem standardowego poboru energii.



# Przetwornica DC-DC

Nazywana także *konwerterem napięcia stałego* lub *stabilizatorem impulsowym* (nie mylić z *zasilaczem impulsowym*).

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **zasilacz** (rozdział 16.),
- **stabilizator** (rozdział 19.),
- **falownik** (rozdział 18.).

## Funkcja

Przetwornica DC-DC, powszechnie nazywana po prostu *przetwornicą*, odbiera wejściowe napięcie DC i przekształca je w stabilizowane wyjściowe napięcie DC. W zależności od rodzaju używanej przetwornicy napięcie wyjściowe może być większe lub mniejsze niż wejściowe, może być regulowane przez użytkownika w wyniku dodania zewnętrznego rezystora, a także może być całkowicie odseparowane elektrycznie od napięcia wejściowego. Różnica między napięciem wejściowym a wyjściowym nie wpływa istotnie na ogólną sprawność, która może przekraczać 90%, co oznacza, że straty w postaci ciepła są niewielkie, a cały moduł może mieć niezwykle kompaktowe rozmiary.

Przetwornica DC-DC jest zamknięta w obudowie układu scalonego i składa się z szybkiego urządzenia przełączającego (zwykle w technologii *MOSFET*), obwodu oscylatora, cewki indukcyjnej i diody. Dla porównania budowa **stabilizatora liniowego** zwykle opiera się na tranzystorach bipolarnych. Jego napięcie wejściowe musi być zawsze większe od wyjściowego, a sprawność jest odwrotnie proporcjonalna do wywoływanego spadku napięcia. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w rozdziale 19. niniejszej *Encyklopedii* poświęconym **stabilizatorowi**.

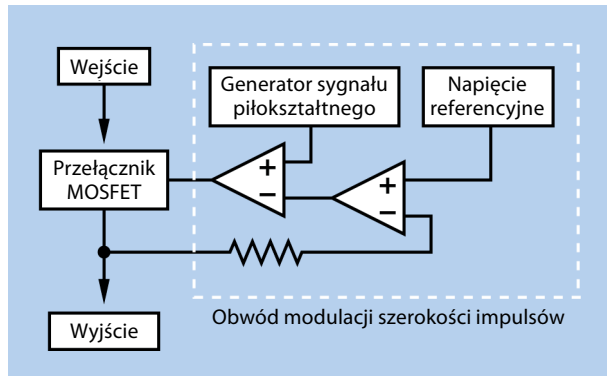
Nie istnieje jeden symbol oznaczający przetwornicę DC-DC. Niektóre uproszczone schematy ilustrujące zasady działania

powszechnie stosowanych przetwornic pokazano w podrozdziale „Rodzaje”.

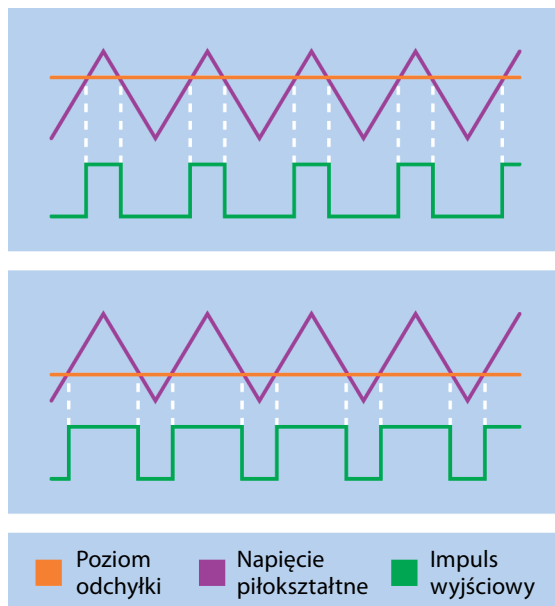
Przetwornicę DC-DC często montuje się w stopniu wyjściowym zasilacza impulsowego.

## Działanie

Wewnętrzny oscylator steruje półprzewodnikiem MOSFET, który z wysoką częstotliwością (zwykle od 50 kHz do 1 MHz) włącza i wyłącza wejściowy prąd stały. Napięcie wyjściowe jest regulowane przez zmianę *współczynnika wypełnienia* impulsu oscylatora, czyli przez modyfikowanie czasu trwania stanu „włączenia” w stosunku do czasu trwania stanu „wyłączenia”. Taki mechanizm nosi nazwę *modulacji szerokości impulsu (PWM)*. W celu ustalenia właściwego współczynnika wypełnienia należy pobrać próbkę napięcia z wyjścia przetwornicy i za pomocą komparatora porównać je z napięciem referencyjnym oraz określić wartość odchyłki. Ta z kolei jest przekazywana do innego komparatora, który porównuje ją z sygnałem piłokształtnym oscylatora. Jeśli odchyłka będzie się zwiększać, sygnał oscylatora będzie coraz bardziej obcinany, zmieniając tym samym stosunek długości czasów włączenia i wyłączenia. Uproszczony schemat obwodu PWM pokazano na rysunku 17.1, na którym, w celu zachowania przejrzystości, usunięto pozostałe podzespoły. Zasadę działania systemu porównywania odchyłki napięcia z sygnałem piłokształtnym oscylatora w celu uzyskania impulsów o modulowanej szerokości pokazano na rysunku 17.2.



**Rysunek 17.1.** Sercem przetwornicy DC-DC jest przełącznik MOSFET działający z wysoką częstotliwością, który wykorzystuje modulację szerokości impulsu do stabilizowania napięcia wyjściowego



**Rysunek 17.2.** Aby uzyskać modulację szerokości impulsu, określa się błąd napięcia wyjściowego przez porównanie go z napięciem referencyjnym; wartość błędu, pokazana linią pomarańczową, jest następnie porównywana z sygnałem wyjściowym oscylatora (piłokształtnym) i w zależności od wyniku tego porównania modyfikowana jest szerokość impulsu

Kluczowym elementem odpowiadającym za sprawność przetwornicy DC-DC jest cewka indukcyjna, która magazynuje energię w postaci pola magnetycznego podczas trwania impulsu włączającego i uwalnia ją w fazie wyłączenia.

Taka cewka pełni więc funkcję tymczasowego „magazynu energii” i obniża poziom tętnień prądu wyjściowego. We wszystkich rodzajach przetwornic stosuje się takie cewki, choć ich umieszczenie w stosunku do diody i kondensatora, które też wchodzi w skład podstawowego obwodu, może być różne.

## Rodzaje

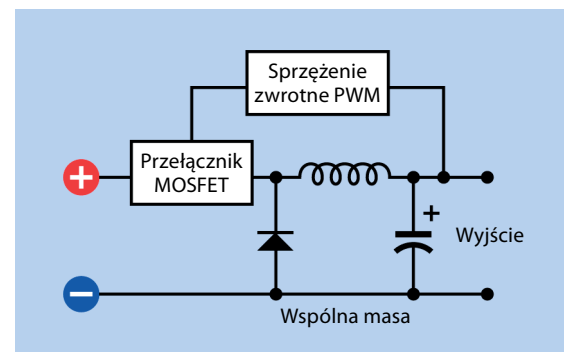
W poniższych punktach opisano cztery podstawowe obwody przełączające stosowane w przetwornicach DC-DC. Dla każdego przypadku określono również wzór pozwalający wyznaczyć stosunek między napięciem wejściowym ( $U_{we}$ ) a napięciem wyjściowym ( $U_{wy}$ ). Zmienna  $D$  występująca w tych wzorach oznacza współczynnik wypełnienia dla ciągu impulsów generowanych przez wewnętrzny przełącznik MOSFET-owy. Współczynnik wypełnienia określa stosunek czasu trwania impulsu włączającego do czasu trwania całego cyklu włączania i wyłączania. Innymi słowy, jeżeli  $T_{wł}$  oznacza czas trwania impulsu włączającego, a  $T_{wył}$  oznacza czas trwania impulsu wyłączającego, to:

$$D = T_{wł} / (T_{wł} + T_{wył})$$

### Przetwornica obniżająca (typu buck)

Patrz rysunek 17.3. Napięcie wyjściowe jest niższe niż wejściowe. Wejście i wyjście mają wspólną masę. Dla tego obwodu obowiązuje zależność:

$$U_{wy} = U_{we} * D$$

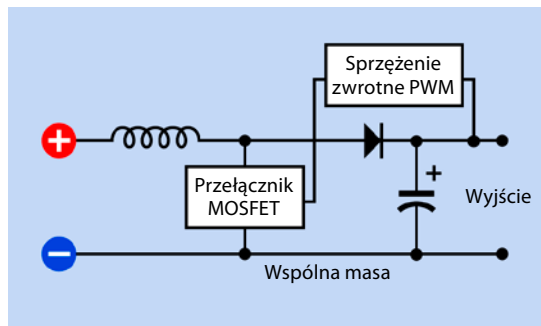


**Rysunek 17.3.** Podstawowa topologia przetwornicy DC-DC typu buck (obniżającej napięcie)

## Przetwornica podwyższająca (typu boost)

Patrz rysunek 17.4. Napięcie wyjściowe jest wyższe niż wejściowe. Wejście i wyjście mają wspólną masę. Dla tego obwodu obowiązuje zależność:

$$U_{wy} = U_{we} / (1 - D)$$

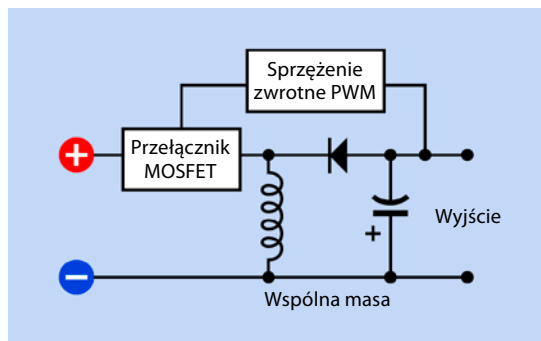


Rysunek 17.4. Podstawowa topologia przetwornicy DC-DC typu boost (podwyższającej napięcie)

## Przetwornica typu flyback z cewką indukcyjną

Często nazywana *przetwornicą typu buck-boost*. Patrz rysunek 17.5. Napięcie wyjściowe może być mniejsze lub większe niż wejściowe. Wejście i wyjście mają wspólną masę. Dla tego obwodu obowiązuje zależność:

$$U_{wy} = U_{we} * (D / (1 - D))$$

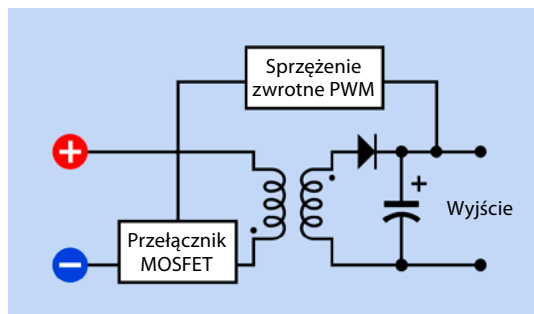


Rysunek 17.5. Podstawowa topologia przetwornicy DC-DC typu flyback

## Przetwornica typu flyback z transformatorem

Patrz rysunek 17.6. Napięcie wyjściowe może być mniejsze lub większe niż wejściowe. Wejście i wyjście są od siebie odizolowane. Dla tego obwodu obowiązuje zależność:

$$U_{wy} = U_{we} * (D / (1 - D))$$



Rysunek 17.6. Podstawowa topologia przetwornicy DC-DC typu flyback (topologie buck, boost i flyback opracowano na podstawie publikacji firmy Maxim Integrated Products)

Użycie transformatora w przetwornicy pozwala uzyskać kilka napięć wyjściowych o różnych wartościach generowanych przez odrębne uzwojenia transformatora.

## Forma zewnętrzna

Przetwornica może mieć postać zamkniętej prostokątnej skrzynki, która nie wymaga dodatkowego odprowadzania ciepła i jest wyposażona w piny służące do montażu przewlekane na płytce drukowanej. Jej maksymalne rozmiary zwykle nie przekraczają 5 cm × 5 cm. Dostarczana moc mieści się w zakresie od 5 W do 30 W. Przykłady takich przetwornic pokazano na rysunku 17.7. (U góry: przetwornica z zakresem napięcia wejściowego od 9 V DC do 18 V DC, stałym napięciem wyjściowym 5 V DC przy natężeniu 3 A całkowicie odizolowanym od napięcia wejściowego; typowa sprawność wynosi około 80%; obudowa jest wykonana z miedzi, przez co zapewnia odpowiednie rozpraszanie ciepła i ekranowanie elektryczne. Na środku: przetwornica z zakresem napięcia wejściowego od 9 V DC do 18 V DC, stałym napięciem wyjściowym 5 V DC przy natężeniu 500 mA całkowicie odizolowanym od napięcia wejściowego; typowa sprawność wynosi około 75%; według producenta zewnętrzne kondensatory są wymagane jedynie w instalacjach o wyjątkowym znaczeniu.

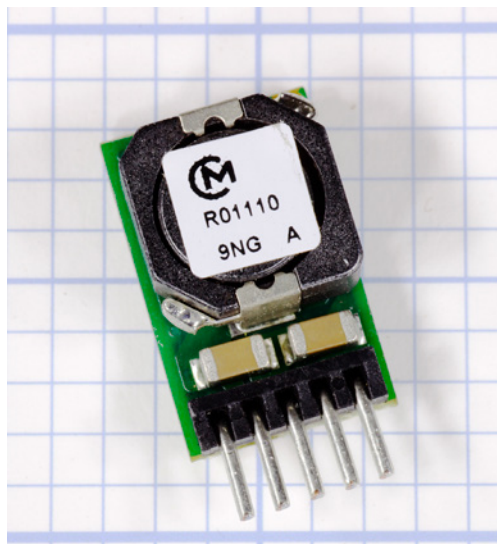
U dołu: format SIP, stałe napięcia wejściowe 12 V DC, stałe napięcie wyjściowe 5 V DC przy natężeniu 600 mA całkowicie odizolowane od napięcia wejściowego; typowa sprawność wynosi około 75%; wymagane jest użycie zewnętrznych kondensatorów tłumiących tętnienia).



**Rysunek 17.7.** Przykłady zamkniętych przetwornic DC-DC

Dostępne są również przetwornice o mniejszej mocy przeznaczone do montażu powierzchniowego.

Niektóre przetwornice z regulowanym napięciem wyjściowym mają postać podzespołów wstępnie zainstalowanych powierzchniowo na minipłytkę wyposażonej w piny do montażu przewlekane w obwodzie drukowanym. Dzięki wysokiej sprawności mogą dostarczać zaskakująco dużej mocy w stosunku do swoich rozmiarów. Przetwornica pokazana na rysunku 17.8 jest przystosowana do napięcia wejściowego od 4,5 V DC do 14 V DC i generuje napięcie regulowane w zakresie od 0,6 V DC do 6 V DC. Nominalnie wytrzymuje obciążenie 10 A lub 50 W i charakteryzuje się sprawnością przekraczającą 90%. W stanie nieobciążonym pobiera jednak prąd o natężeniu 80 mA, co powoduje wzrost temperatury układu. Jeśli przetwornica nie ma obsługiwać stałego obciążenia, można zastosować wyłącznik termiczny lub automatyczny.



**Rysunek 17.8.** Regulowana przetwornica DC-DC o parametrach znamionowych 10 A lub 50 W; napięcie wyjściowe można ustalić przez dodanie rezystora zewnętrznego lub potencjometru nastawnego; zgodnie ze specyfikacją techniczną podzespołu wymagane jest zastosowanie kondensatorów wygładzających

Minipłytkę pokazaną na rysunku 17.9 obsługuje napięcie wejściowe od 7 V DC do 36 V DC, a jej napięcie na wyjściu można regulować w zakresie od 2,5 V DC do 12,6 V DC przy prądzie do 6 A. Jej wejście i wyjście nie są odizolowane (mają wspólną szynę ujemną), a teoretyczna sprawność tej przetwornicy przy pełnym obciążeniu wynosi powyżej 95%.

Minipłytkę pokazaną na rysunku 17.10 obsługuje napięcie wejściowe od 4,5 V DC do 14 V DC, a jej napięcie na wyjściu można regulować w zakresie od 0,6 V DC do 6 V DC przy prądzie do 20 A. Jej wejście i wyjście nie są odizolowane (mają wspólną szynę ujemną), a teoretyczna sprawność tej przetwornicy przy pełnym obciążeniu wynosi powyżej 90%.

## Wartości

Do wartości właściwych dla przetwornic należą:

### Znamionowe napięcie wejściowe i częstotliwość znamionowa

Dzięki odpowiedniej modulacji szerokości impulsu przetwornice często obsługują szeroki zakres napięć wejściowych.



pobierać moc równą 3,6 W (3600 mW). Jeśli jej sprawność wynosi 80%, wówczas będzie generować ciepło z mocą wynoszącą ok. 20% obliczonej wartości, czyli ok. 720 mW.

## Poziom tętnienia i szumu

Czasami oznaczany skrótem R/N (z ang. *ripple/noise*). Zwykle wyraża się go w mV lub jako wartość procentową. Często wartości tętnień i szumów zmuszają do stosowania zewnętrznych kondensatorów wygładzających. Taki wymóg należy sprawdzić w specyfikacji dostarczonej przez producenta.

## Wersja izolowana lub nieizolowana

Ta niezwykle istotna informacja często znajduje się nie w szczegółowych danych technicznych, lecz u góry karty produktu.

## Stosowanie

Ze względu na to, że przetwornica generuje szum elektryczny, pozostałe elementy układu należy zabezpieczyć przed jego wpływem. W tym celu można dodać *kondensatory bocznikujące* o dużej pojemności, umieszczając je jak najbliżej wejścia i wyjścia przetwornicy. W przypadku większości modeli stosowanie zewnętrznych kondensatorów jest konieczne, przy czym ich *równoważna rezystancja szeregową* (ESR) powinna być jak najniższa (omówienie parametru ESR znajduje się w rozdziale 12. poświęconym **kondensatorowi**). Z tego względu korzystniejsze od elektrolitycznych są kondensatory tantalowe, które ponadto są bardziej trwałe. Niektórzy producenci zalecają połączenie kondensatora tantalowego równoległe z elektrolitycznym. Oprócz kondensatorów o większych pojemnościach często zaleca się zastosowanie na wyjściu niewielkiego kondensatora ceramicznego (zwykle o pojemności 0,1  $\mu\text{F}$ ).

Napięcie znamionowe każdego kondensatora powinno być dwukrotnie większe niż napięcie występujące w tym punkcie, do którego jest podłączany. Wartość pojemności elektrycznej zwykle będzie większa w przypadku przetwornic dostarczających prądy o większych natężeniach. Powszechnie występują pojemności na poziomie 100  $\mu\text{F}$ , ale w przypadku większych natężeń prądu wartość ta może wynosić nawet 1000  $\mu\text{F}$ .

Podczas gdy karty produktu niektórych rodzajów komponentów często są nieprecyzyjne, to karty przetwornic DC-DC zwykle zawierają szczegółowe instrukcje dotyczące kondensatorów bocznikujących. Stosowanie się do zawartych tam wytycznych jest niezwykle istotne. W stosunkowo rzadkich sytuacjach, gdy specyfikacja nie zawiera żadnych informacji o stosowaniu kondensatorów bocznikujących, niekoniecznie oznacza to, że takie kondensatory nie są wymagane. Producent może bowiem zakładać, że ich użycie jest czymś oczywistym.

Przetwornice wykorzystuje się w wielu różnych rodzajach urządzeń, które są zasilane prądem o natężeniu w zakresie od miliamperów do dziesiątek amperów. Na dolnym końcu tej skali znajdują się urządzenia takie jak telefony komórkowe, laptopy lub tablety, które zawierają dodatkowe obwody wymagające różnych napięć, przy czym niektóre są wyższe niż napięcie baterii lub akumulatora zasilającego urządzenie. W takiej sytuacji rozwiązaniem jest przetwornica. Ponieważ może ona utrzymywać stałe napięcie wyjściowe przy zmiennych napięciach wejściowych, może również kompensować stopniowy spadek napięcia baterii w wyniku ich eksploatacji.

Za pomocą przetwornicy typu boost można podwoić napięcie dostarczane przez jedną baterię 1,5 V w latarce, w której do zasilania diody LED wymagane jest napięcie 3 V. Podobnie za pomocą przetwornicy takiego typu można zapewnić zasilanie wymagane przez lampę fluorescencyjną z zimną katodą podświetlającą wyświetlacz LCD laptopa.

W przypadku płytki drukowanej, na której znajdują się głównie elementy wymagające napięcia 5 V DC i która jest zasilana jednym zasilaczem o takim właśnie napięciu, przetwornica może posłużyć do wytworzenia napięcia 12 V DC w jednym konkretnym celu, na przykład na użytek przetwarzania sygnału analogowego w cyfrowy lub szeregowy transmisji danych.

Jeśli przekaźniki elektromechaniczne lub inne obciążenia indukcyjne mają wspólne uziemienie z podzespołami takimi jak *układy logiczne* lub **mikrokontrolery**, ochrona takich wrażliwych komponentów przed skokami napięcia może być trudna. Przetwornica flyback z transformatorem izolującym wyjście od wejścia pozwala odseparować „szumiącą” część obwodu, pod warunkiem że sama nie generuje szumów. Ponieważ zakłócenia elektromagnetyczne (EMI) generowane przez przetwornice mogą się znacznie różnić w zależności

od konkretnego modelu, należy dokładnie zapoznać się z danymi podawanymi przez producenta.

Podzespoły o niskiej mocy są wrażliwe na zakłócenia EMI pochodzące z przewodów i ścieżek prowadzonych z przetwornicy i do niej. W tego typu obwodach należyte tłumienie szumów może być po prostu niemożliwe, a zatem użycie przetwornicy może być niewskazane.

## Możliwe błędy

### Zakłócenia elektryczne na wyjściu

Kondensatory elektrolityczne mogą nie nadawać się do wygładzania sygnałów o wysokich częstotliwościach. Konieczne może być więc użycie wielowarstwowych kondensatorów ceramicznych lub kondensatorów tantalowych. Stosowne wartości minimalne i maksymalne można znaleźć w kartach produktu. Trzeba tam również szukać informacji o prawidłowym rozmieszczeniu kondensatorów na wejściu oraz na wyjściu przetwornicy.

### Zbyt wysoka temperatura przy braku obciążenia

Niektóre przetwornice wydzielają znaczne ilości ciepła nawet wtedy, gdy pracują bez obciążenia. Karty produktu

mogą nie zawierać żadnych informacji o tym problemie lub może być on potraktowany zdawkowo. Należy więc sprawdzić znamionowe natężenie wejściowe, zwykle wyrażone w miliamperach, określone dla stanu bez obciążenia. Cały ten prąd będzie rozpraszany jako ciepło, a niewiele przetwornic jest w stanie prawidłowo funkcjonować przy wysokiej temperaturze, zwłaszcza że większość z nich nie potrafi odprowadzać ciepła z należytą skutecznością.

### Niewłaściwe napięcie wyjściowe przy małym obciążeniu

Budowa niektórych przetwornic wymusza, aby do ich wyjścia przez cały czas było podłączone obciążenie wynoszące co najmniej 10% pełnej wartości znamionowej. Poniżej tego progu napięcie może być wysoce nieprecyzyjne. Należy więc dokładnie przeczytać specyfikację, szukając podobnego stwierdzenia: „Obciążenie mniejsze niż 10% wartości znamionowej będzie skutkowało wzrostem napięcia wyjściowego, a w przypadku spadku obciążenia poniżej 5% może dojść nawet do podwojenia nominalnej wartości napięcia na wyjściu”. Przed montażem przetwornicy w obwodzie warto więc wykonać pomiary jej napięcia wyjściowego przy różnych obciążeniach.



# Falownik

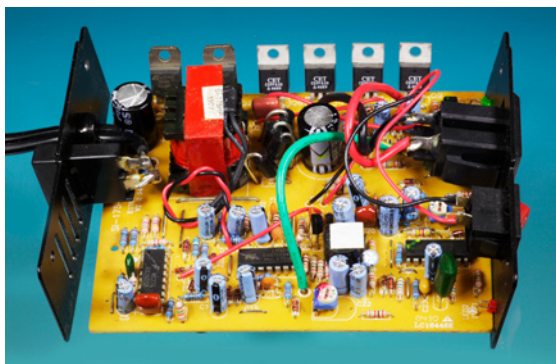
Nazywany także *inwerterem DC-AC* — nie mylić z *inwerterem logicznym* (*bramką logiczną NOT*), który w układach logicznych służy do zamiany stanów wysokich na niskie i niskich na wysokie. Takie inwertery są opisane w drugim tomie *Encyklopedii*.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **zasilacz** (rozdział 16.),
- **przetwornica DC-DC** (rozdział 17.).

## Funkcja

Falownik został opisany w niniejszej *Encyklopedii* jako przeciwieństwo **zasilacza**, ponieważ pełni on zupełnie odwrotną funkcję. Falownik przyjmuje na wejściu *prąd stały* (zwykle 12 V DC z akumulatora samochodowego) i przekształca go w *prąd przemienny* z zakresu od 110 V AC do 120 V AC lub 220 V AC do 240 V AC właściwego do zasilania wielu urządzeń o niskim poborze mocy. Na rysunku 18.1 pokazano wnętrze takiego falownika.



Rysunek 18.1. Elementy wewnętrzne falownika o mocy 175 W

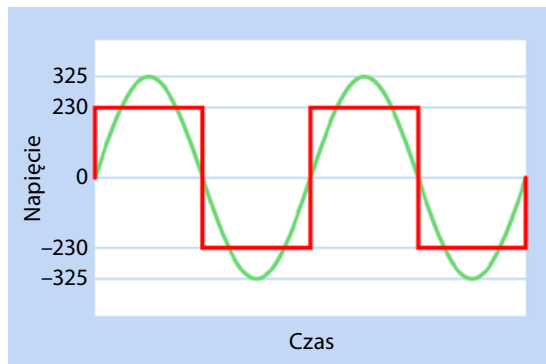
## Działanie

Falownik zwykle najpierw podnosi napięcie wejściowe 12 V DC do wyższego poziomu, wykorzystując do tego wewnętrzną **przetwornicę DC-DC**. Następnie za pomocą obwodu przełączającego generuje przybliżony przebieg sinusoidalny charakterystyczny dla prądu przemiennego.

Cyfrowe elementy przełączające z natury mają skłonność do generowania fal prostokątnych, które ze względu na swój kształt zawierają wyższe częstotliwości zwane *harmonicznymi*. Te są ignorowane przez niektóre urządzenia (zwłaszcza te, które przekształcają prąd elektryczny w ciepło), ale ogólnie mogą mieć niekorzystny wpływ na urządzenia elektroniczne. Podstawowym zadaniem falownika jest zmodyfikowanie fali prostokątnej w taki sposób, aby wystarczająco wiernie odtwarzała klasyczny przebieg sinusoidalny prądu przemiennego. Uogólniając, można stwierdzić, że im dokładniej falownik emuluje przebieg sinusoidalny, tym jest droższy.

Najprostszy falownik będzie generować zwykły przebieg prostokątny (pokazany na rysunku 18.2 w kolorze czerwonym), który dla porównania nałożono na przebieg sinusoidalny (w kolorze zielonym). Należy mieć świadomość, że prąd przemienny o napięciu znamionowym 230 V w rzeczywistości ma wartość szczytową napięcia wynoszącą około 325. Wartość 230 V jest bowiem przybliżoną *wartością skuteczną* (*RMS*), czyli *średnią kwadratową* wszystkich wartości napięcia występujących w ciągu jednego okresu. Innymi

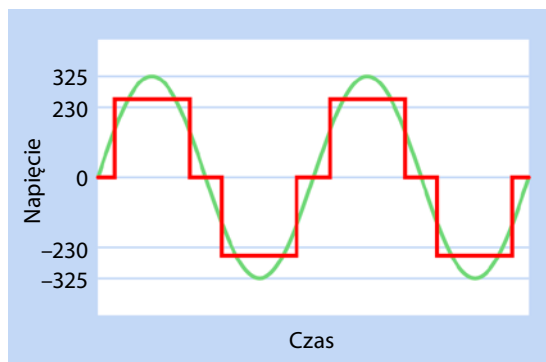
słowy, jeśli zmierzmy napięcie  $x$  razy podczas cyklu, wartość RMS uzyskamy, podnosząc do kwadratu każdy wynik pomiaru, dodając wszystkie uzyskane w ten sposób wyniki, dzieląc je przez  $x$  i wyciągając pierwiastek kwadratowy z otrzymanego wyniku. Wartość skuteczna, czyli RMS, jest o tyle istotna, że pozwala obliczyć moc czynną, gdyż wystarczy pomnożyć ją przez natężenie prądu, aby uzyskać przybliżoną wartość mocy wyrażoną w watach.



**Rysunek 18.2.** Porównanie fali sinusoidalnej napięcia przemiennego (zielona) oraz fali prostokątnej o tej samej częstotliwości (czerwona); oba przebiegi mają w przybliżeniu jednakową moc

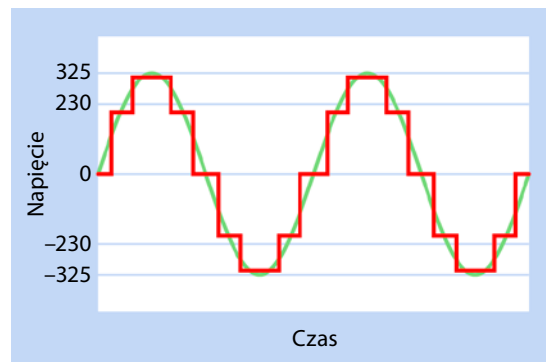
## Rodzaje

Jednym z podstawowych sposobów na lepsze odtworzenie przebiegu sinusoidalnego jest wstawienie przerw o wartości 0 V pomiędzy impulsy o kształcie prostokątnym. Taką falę prostokątną z „przerwami” pokazano na rysunku 18.3.



**Rysunek 18.3.** Wprowadzenie przerw lub poziomów zerowych między impulsy prostokątne może nieco poprawić odtwarzanie przebiegu sinusoidalnego

Dalszą poprawę można uzyskać poprzez dodanie krótszego impulsu o większym napięciu do każdego impulsu podstawowego — taki przebieg pokazano na rysunku 18.4. Przebiegi tego typu noszą nazwę *modyfikowanej sinusoidy*, choć w rzeczywistości są to fale prostokątne modyfikowane w celu emulacji przebiegu sinusoidalnego. Ich niedokładność wyraża się w postaci *współczynnika zawartości harmonicznych (THD)*. Niektórzy eksperci szacują, że współczynnik THD sygnału prostokątnego z przerwami wynosi około 25%, natomiast dodanie krótszych fal prostokątnych powoduje spadek tej wartości do około 6,5%. Nie wszyscy zgadzają się z tymi szacunkami, ale nie ma wątpliwości, że taka „schodkowa” sekwencja impulsów prostokątnych zapewnia lepsze przybliżenie kształtu sinusoidy.

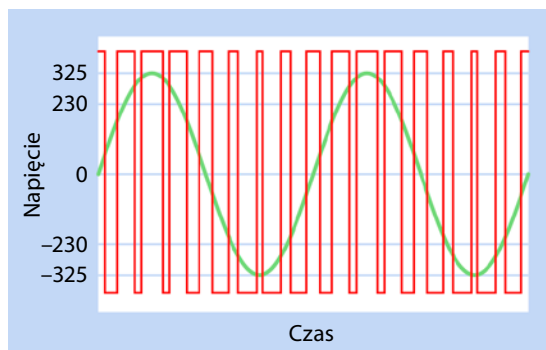


**Rysunek 18.4.** Dodatkowy strumień węższych impulsów prostokątnych może poprawić wierność sygnału wyjściowego z falownika

W falownikach „prawdziwie” sinusoidalnych wykorzystuje się modulację szerokości impulsu (PWM), uzyskując współczynnik THD na poziomie niższym niż 1%. Taki falownik generuje strumień impulsów o częstotliwości o wiele większej niż częstotliwość wyjściowego sygnału AC i dodatkowo modyfikuje ich szerokość w taki sposób, aby uśrednione napięcia w dużym przybliżeniu odpowiadały zmianom napięcia w przebiegu sinusoidalnym. Na rysunku 18.5 przedstawiono uproszczoną ilustrację tej zasady.

## Wartości

Niewielkie falowniki zwykle zapewniają moc do 100 W i mogą być wyposażone we wtyk 12 V DC, który można podłączyć do gniazda zapalniczki w samochodzie. Ponieważ sprawność taniego falownika może wynosić najwyżej 80%, uzyskanie



**Rysunek 18.5.** *Uśrednienie impulsów o modulowanej szerokości generowanych z dużą częstotliwością pozwala uzyskać dość dobre przybliżenie kształtu sinusoidalnego*

mocy 100 W przy napięciu 230 V AC będzie wymagać poboru prądu o natężeniu nawet 10 A przy napięciu 12 V DC. Gniazda zapalniczek są zazwyczaj chronione bezpiecznikami 15 lub 20 A, więc moc na poziomie 100 W wydaje się rozsądną wartością. Falowniki o mocy znamionowej przekraczającej 150 W zwykle są wyposażone w kable kończące się dużymi zaciskami krokodylkowymi, które można bezpośrednio podłączyć do akumulatora 12 V.

Choć znamionowy *prąd rozruchowy* akumulatora samochodowego może wynosić 100 A lub więcej, takie natężenie jest zapewniane jedynie przez okres maksymalnie 30 sekund. Falowniki o mocy znamionowej wyższej niż 500 W przekraczają standardową wydajność jednego akumulatora zamontowanego w pojeździe. Taki akumulator może być jednak wspomagany po uruchomieniu silnika, kiedy to część obciążenia przejmuje alternator. Niezależnie od tego falownik 500-watowy lepiej podłączyć do co najmniej dwóch akumulatorów 12 V połączonych ze sobą równolegle.

## Stosowanie

Niewielkie falowniki stosuje się zwykle w pojazdach do zasilania ładowarek telefonów komórkowych, odtwarzaczy muzyki lub laptopów. Falowniki większych rozmiarów stanowią integralną część niezależnych instalacji zasilanych energią słoneczną lub wiatrową, w których prąd z akumulatora wymaga dostosowania do domowej instalacji prądu przemianowego. Zasilacze awaryjne (UPS) zawierają akumulatory i falowniki, które zapewniają pracę komputera i jego urządzeń peryferyjnych przez krótki okres. Falowniki o wyjątkowo

wysokim natężeniu znamionowym stosuje się w samochodach elektrycznych z silnikami prądu przemiennego.

Nie istnieją jednoznaczne opinie dotyczące ewentualnego szkodliwego wpływu zasilania urządzeń elektronicznych przy użyciu budżetowego falownika generującego przebieg w postaci zmodyfikowanej sinusoidy. Rozsądny wydaje się argument mówiący, że jeśli urządzenie korzysta z własnego zasilacza impulsowego lub sieciowego (wbudowanego lub w postaci zewnętrznego modułu), układ filtrujący wchodzący w skład zasilacza zablokuje harmoniczne pochodzące z falownika.

Z drugiej strony wiadomo, że tanie falowniki mogą mieć niekorzystny wpływ na urządzenia zawierające silniki synchroniczne zasilane bezpośrednio prądem przemiennym. Dodatkowo pojawiają się informacje, że systemy oświetlenia fluorescencyjnego oraz elektroniczne lampy fotograficzne mogą nie działać właściwie, nawet jeśli zastosujemy falowniki generujące zmodyfikowany przebieg sinusoidalny. Różnorodność konstrukcji urządzeń i jakości podzespołów nie pozwala jednak na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków. Tani falownik może generować przebieg, który w dużym stopniu nie będzie zbliżony nawet do przebiegu prostokątnego — patrz rysunek 18.6.



**Rysunek 18.6.** *Tani falownik może generować zniekształcony przebieg, który będzie nawet bardziej zaszumiony niż zwykły przebieg prostokątny; ten przykładowy przebieg przedstawia rzeczywisty oscylogram*

## Możliwe błędy

Do zasilania dużego falownika potrzebne może być użycie kilku akumulatorów połączonych równolegle przewodami

o wystarczająco dużym przekroju. Oczywiście akumulatory muszą mieć takie same parametry i taki sam wiek, a ponadto muszą być naładowane w jednakowym stopniu, aby nie dopuścić do potencjalnie niebezpiecznego przepływu prądu o wysokim natężeniu pomiędzy nimi. Taki przepływ może wynikać z dążenia do równowagi napięciowej między wszystkimi akumulatorami. Przed podłączeniem akumulatorów należy oczyścić ich zaciski. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w rozdziale poświęconym **baterii**.

Problemy związane z falownikami mogą mieć bardzo prozaiczne przyczyny. Położenie ubrań lub pościeli na falowniku może skutkować przegrzaniem się okablowania

12 V; w przypadku falownika o dużej mocy chłodzonego wentylatorem niewłaściwe umieszczenie wentylatora lub nagromadzenie się na nim kurzu może doprowadzić do nadmiernego wzrostu temperatury; może dojść do poluzowania się krokodylków na zaciskach akumulatora; może także dojść do skoków poboru mocy przez obciążenia indukcyjne (np. silniki), co zwykle prowadzi do aktywacji [wyłącznika](#) obwodu falownika, zwłaszcza jeśli do jednego obwodu podłączonych jest wiele urządzeń.

Ze szczególną uwagą należy zawsze postępować z prądem o dużym natężeniu, nawet jeśli jest on dostarczany pod napięciem „jedynie 12 V”.

# Stabilizator napięcia

Jego prawidłowa nazwa to *liniowy stabilizator napięcia* — dzięki niej łatwiej go odróżnić od *stabilizatora impulsowego* lub **przetwornicy DC-DC**. Pełna nazwa jest jednak rzadko stosowana, dlatego pod pojęciem „stabilizatora napięcia” należy rozumieć właśnie „liniowy stabilizator napięcia”.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **zasilacz** (rozdział 16.),
- **przetwornica DC-DC** (rozdział 17.).

## Funkcja

Zadaniem liniowego stabilizatora napięcia jest ustabilizowanie niekoniecznie stabilnego napięcia stałego. Napięcie wyjściowe pozostaje stałe niezależnie od obciążenia stabilizatora (w określonych granicach). Jest to tani, prosty i niezwykle niezawodny element elektroniczny.

Nie istnieje jeden ogólny symbol elektryczny oznaczający liniowy stabilizator napięcia.

Wygląd powszechnie stosowanego rodzaju stabilizatorów o znamionowym prądzie wyjściowym około 1 A DC pokazano na rysunku 19.1. Modele LM7805, LM7806, LM7812 oraz podobne serie LM78xx są zamknięte w takiej właśnie obudowie z trzema pinami rozstawionymi co 2,54 mm — ich funkcje są podane na rysunku 19.1. Inne rodzaje stabilizatorów mogą się różnić kształtem lub wyglądać identycznie, ale mogą mieć piny o innych funkcjach. Ważne jest więc dokładne sprawdzenie karty produktu.

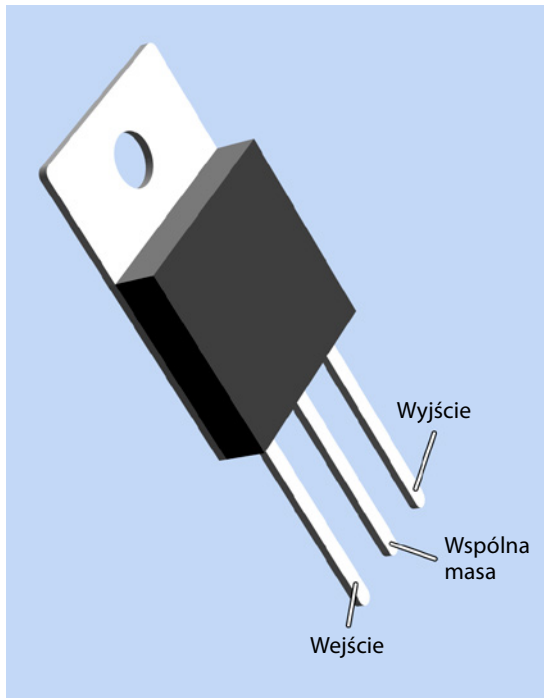
## Działanie

Stabilizatory liniowe pobierają informację zwrotną o napięciu wyjściowym i porównują ją z napięciem referencyjnym (w najprostszej wersji ustalonym przez diodę Zenera), aby uzyskać wartość błęd, która jest podstawą doysterowania bazy *tranzystora wykonawczego* podłączonego szeregowo między wejściem a wyjściem. Ze względu na to, że

tranzystor nie jest w stanie nasycenia, jego prąd wyjściowy zmienia się liniowo zgodnie z natężeniem prądu doprowadzanego do bazy tranzystora — stąd wzięty człon „liniowy” w nazwie stabilizatora. Na rysunku 19.2 pokazano te zależności w uproszczonej formie; rysunek 19.3 natomiast przedstawia bardziej zaawansowany schemat z układem Darlingtona pełniącym funkcję tranzystora wykonawczego. Baza takiego tranzystora jest sterowana przez dwa inne tranzystory oraz komparator dostarczający informacji o błędach napięcia wyjściowego. Stabilizator napięcia w takiej wersji nosi nazwę *standardowego*.

Wymagana różnica napięć między bazą a emitern tranzystora NPN wynosi minimum 0,6 V. Ponieważ w standardowym stabilizatorze napięcia stosowanych jest kilka tranzystorów, minimalna łączna różnica napięć między jego wejściem a wyjściem musi wynosić 2 V DC. Taka różnica napięć nazywana jest *minimalnym spadkiem napięcia*. Jeśli różnica napięć spadnie poniżej tego minimalnego progu, stabilizator przestanie podawać właściwe napięcie wyjściowe aż do momentu, gdy napięcie wejściowe ponownie wzrośnie. Stabilizatory typu LDO (z ang. *low dropout regulators*) dopuszczają mniejsze różnice napięć, ale są droższe i rzadziej używane. Dokładniej opisano je w punkcie „Rodzaje”.

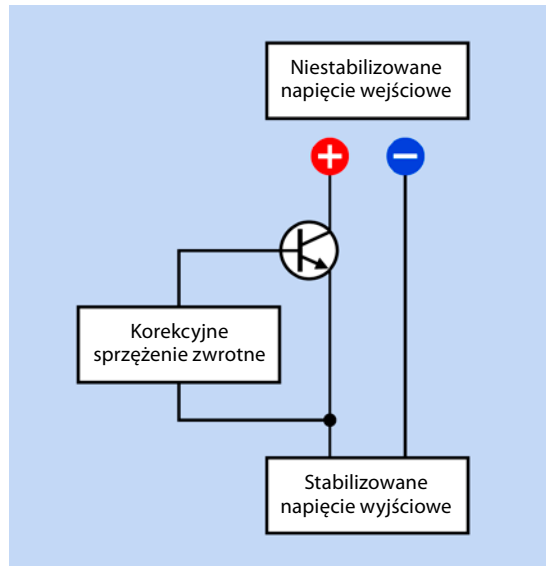
Teoretycznie stabilizator można zbudować z elementów dyskretnych, ale już kilka dekad temu uznano, że jest to zbyt kosztowne. Obecnie pod pojęciem stabilizatora rozumie się niewielki układ scalony zawierający podstawowy obwód



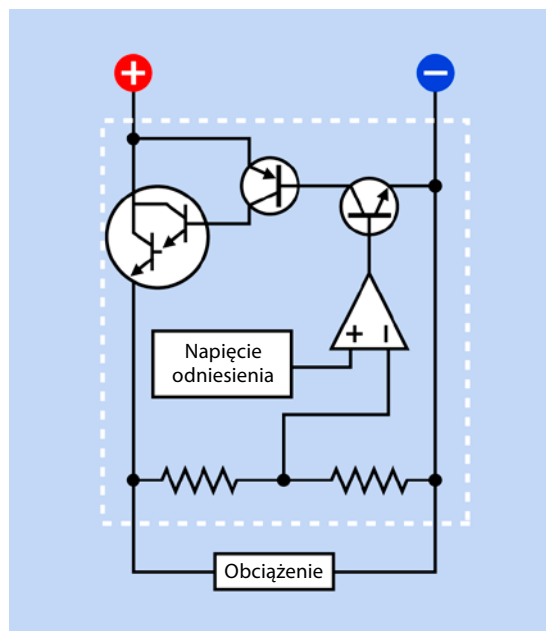
**Rysunek 19.1.** Obudowa powszechnie stosowanych stabilizatorów napięcia; inne konstrukcje mogą wyglądać zupełnie inaczej i piny mogą być inaczej rozmieszczone; szczegółowych informacji należy szukać w karcie produktu

uzupełniony o elementy spełniające dodatkowe funkcje, takie jak automatyczne zabezpieczenie przed przeciążeniem i nadmiernie wysoką temperaturą. Zamiast przepalenia się w wyniku przeciążenia taki komponent po prostu się wyłącza. Większość stabilizatorów jest też odporna na skutki odwrotnego podłączenia zasilania (na przykład niewłaściwego umieszczenia baterii) i odwrotnego podłączenia samego stabilizatora.

Redukcję napięcia zasilania zapewniają też inne podzespoły. Upraszczając, jeżeli do źródła prądu zostaną podłączone szeregowo dwa rezystory, powstanie *dzielnik napięcia* dostarczający napięcie pośrednie w punkcie połączenia obu rezystorów. Wartość tego napięcia będzie jednak zależać od wahań napięcia wejściowego i (lub) impedancji obciążenia. Zastosowanie stabilizatora napięcia to najprostszy sposób podawania zasilania, które będzie pozostawać stabilne niezależnie od zmian napięcia wejściowego lub wahań poboru energii przez obciążenie.



**Rysunek 19.2.** Liniowy stabilizator napięcia zasadniczo składa się z tranzystora, którego baza jest sterowana sygnałem korekcyjnego sprzężenia zwrotnego



**Rysunek 19.3.** Wewnątrz obszaru zaznaczonego białą linią przerywaną pokazano najważniejsze elementy standardowego stabilizatora napięcia: układ Darlingtona, dwa tranzystory sterujące, dzielnik napięcia, komparator i źródło napięcia odniesienia

Wadą standardowego stabilizatora napięcia jest jego niska sprawność, zwłaszcza w układach, w których do generowania stosunkowo niskiego napięcia na wyjściu używane jest stosunkowo wysokie napięcie wejściowe. Jeśli  $U_{we}$  jest napięciem wejściowym,  $U_{wy}$  — napięciem wyjściowym, a  $I_{wy}$  oznacza wyjściowe natężenie prądu, to wartość  $P$ , czyli średnią stratę mocy, można wyrazić wzorem:

$$P = I_{wy} * (U_{we} - U_{wy})$$

Na przykład, jeśli prąd wyjściowy ma natężenie 1 A, napięcie wejściowe wynosi 9 V DC, a wyjściowe 5 V DC, to 44% mocy wejściowej zostanie zmarnowane, a sprawność stabilizatora będzie wynosić jedynie 56%. Zmarnowana moc (w tym przypadku około 4 W) zostanie zużyta na wydzielanie ciepła. Nawet jeśli stabilizator standardowego typu będzie pracował przy minimalnym spadku napięcia, 2 V DC, to dostarczając prąd o natężeniu 0,5 A, zużyje 1 W mocy na wydzielanie ciepła.

## Rodzaje

### Obudowy

Obudowa stabilizatorów serii LM78xx pokazana na rysunku 19.1 zawiera aluminiową płytkę z wywierconym otworem, dzięki któremu można ją przykręcić do radiatora. Stabilizatory o mniejszej znamionowej wartości maksymalnego prądu wyjściowego (zazwyczaj 100 mA) nie wymagają aż takiego odprowadzania ciepła, dlatego mogą mieć postać przypominającą niewielki tranzystor.

Dostępne są również układy scalone zawierające w jednej obudowie dwa stabilizatory napięcia, które są elektrycznie odseparowane od siebie.

### Popularne odmiany

W oznaczeniach serii LM78xx dwie ostatnie cyfry wskazują napięcie wyjściowe, które jest wartością stałą. Model LM7805 zapewnia więc napięcie 5 V DC, LM7806 — napięcie 6 V DC itd. W przypadku stabilizatorów, których napięcie wyjściowe ma wartość ułamkową (często występuje napięcie 3,3 V DC), do numeru katalogowego wstawiona może być dodatkowa litera, jak na przykład w oznaczeniu 78M33.

Wiele stabilizatorów serii LM78xx jest oferowanych przez różnych producentów — komponenty te są identyczne pod

względem funkcjonalnym, choć ich numery katalogowe mogą zawierać dodatkowe litery wskazujące pochodzenie lub inne parametry.

Nominalna dokładność stabilizatorów LM78xx wynosi 4%, ale w rzeczywistości większość egzemplarzy zapewnia precyzję większą, niż sugeruje to wartość znamionowa.

## Stabilizatory regulowane

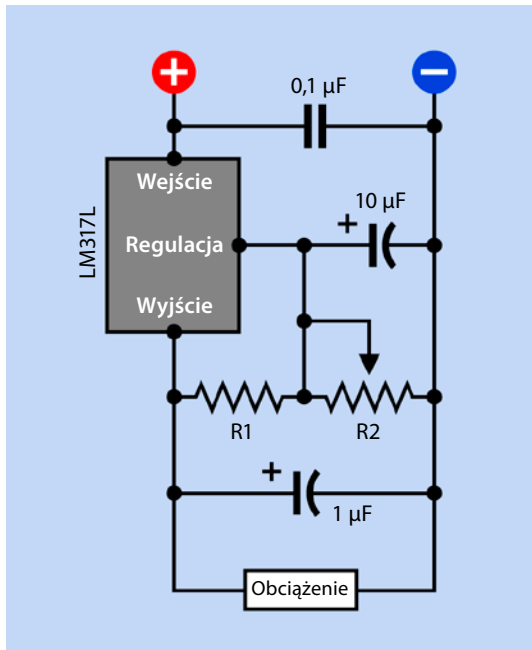
Większość stabilizatorów ma stałe napięcie wyjściowe, ale istnieje pewna grupa tych komponentów pozwalająca ustawić napięcie na wyjściu przez dodanie jednego lub kilku rezystorów. Popularnym przykładem takiego rozwiązania jest układ LM317. Jego napięcie wyjściowe można regulować w zakresie od 1,25 V DC do 37 V DC za pomocą rezystora i potencjometru nastawnego, co pokazano na rysunku 19.4. Przyjmując zgodnie ze schematem, że  $R1$  oznacza rezystor o stałej wartości, a  $R2$  jest potencjometrem nastawnym, napięcie wyjściowe  $U_{wy}$  można wyrazić wzorem:

$$U_{wy} = 1,25 * (1 + (R2 / R1))$$

Typowe wartości rezystancji  $R1$  i  $R2$  wynoszą, odpowiednio, 240  $\Omega$  i 5 k $\Omega$ . Po ustawieniu środkowego zakresu rezystancji potencjometru wartość  $U_{wy}$  będzie wynosić  $1,25 * (1 + (2500 / 240)) =$  około 15 V DC przy wymaganym napięciu wejściowym co najmniej 17 V DC. Jeśli jednak rezystancja potencjometru zostanie zmniejszona do 720  $\Omega$ , napięcie na wyjściu zmaleje do 5 V DC. W praktyce rezystancję potencjometru należy dobierać w taki sposób, aby w środkowym zakresie zapewniał w przybliżeniu żądany rezultat na wyjściu. W ten sposób zyskuje się możliwość precyzyjnego ustawienia napięcia wyjściowego.

Uniwersalność stabilizatora regulowanego jest jego dużą zaletą, ale ogólne straty mocy nadal pozostają proporcjonalne do różnicy między napięciami wejściowym i wyjściowym. Aby zminimalizować te straty, różnica ta nie powinna przekraczać wartości absolutnie koniecznej.

Stabilizator regulowany może wymagać użycia kondensatorów bocznikujących o większej pojemności niż w przypadku stabilizatorów o stałym napięciu wyjściowym. Na rysunku 19.4 pokazano wartości zalecane przez producenta układu LM317.



**Rysunek 19.4.** Schemat aplikacji regulowanego stabilizatora napięcia LM317L (według zaleceń firmy National Semiconductor) z kondensatorami bocznikującymi dodanymi w celu stłumienia tętnień

## Stabilizatory napięć dodatnich i ujemnych

Większość liniowych stabilizatorów napięcia jest zaprojektowana pod kątem dodatniego napięcia wejściowego (według konwencjonalnego kierunku przepływu prądu), ale istnieją też stabilizatory przystosowane do ujemnego napięcia wejściowego. W takiej wersji wspólny jest zacisk dodatni, a mierzone względem niego napięcia wejściowe i wyjściowe mają wartość ujemną.

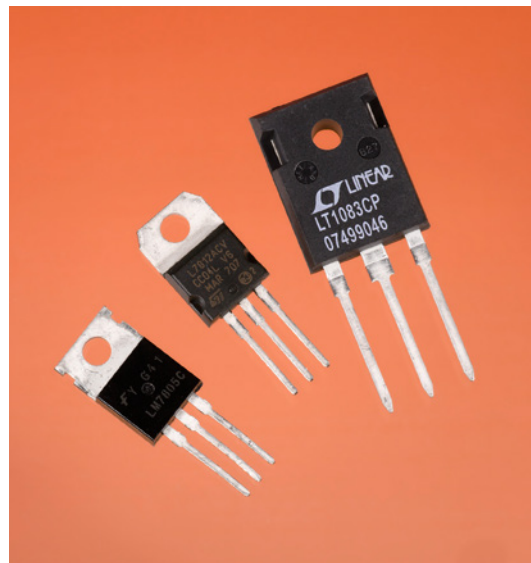
## Stabilizatory liniowe LDO

**Stabilizatory LDO** (z ang. *Low Drop Out*) dopuszczają o wiele niższe spadki napięcia między wejściem a wyjściem dzięki użyciu jednego tranzystora PNP lub MOSFET. Stabilizatory tego typu są często stosowane w urządzeniach zasilanych bateriami, w przypadku których istotna jest maksymalizacja sprawności i minimalizacja strat w postaci ciepła. Przykładem jest stabilizator LM330 o napięciu wyjściowym 5 V DC, który wprowadza spadek napięcia na poziomie 0,6 V, dzięki czemu można go używać wraz z czterema „paluszkami” AAA. W przypadku stabilizatora LDO spadek napięcia między

wejściem a wyjściem zależy w rzeczywistości od prądu obciążeniowego — gdy jego natężenie będzie minimalne, spadek napięcia może spaść nawet do jednej dziesiątej wartości nominalnej.

Zdecydowana większość stabilizatorów LDO (poza nielicznymi wyjątkami) jest oferowana w obudowach przystosowanych do montażu powierzchniowego, a ich maksymalny prąd mieści się w zakresie od 100 mA do 500 mA. Takie stabilizatory są trochę droższe niż modele o typowym spadku napięcia na poziomie 2 V.

Na rysunku 19.5 pokazano trzy stabilizatory napięcia. Ich parametry znamionowe, patrząc od lewej do prawej, wynoszą 5 V DC przy prądzie 1 A, 12 V DC przy prądzie 1 A oraz 5 V DC przy prądzie 7,5 A. Dwa mniejsze stabilizatory należą do serii LM78xx. Większy model charakteryzuje się niskim maksymalnym spadkiem napięcia równym 1,5 V DC, a jego napięcie wyjściowe można regulować za pomocą zewnętrznego dzielnika złożonego z potencjometru i rezystora.



**Rysunek 19.5.** Dwa stabilizatory napięcia z serii LM78xx oraz wysokoprądowy stabilizator regulowany LDO o napięciu znamionowym 5 V DC (z możliwością zwiększenia) przy natężeniu 7,5 A

## Stabilizatory liniowe quasi-LDO

Podczas gdy w standardowym stabilizatorze jako tranzystor wykonawczy wykorzystuje się układ Darlingtona,

a w stabilizatorze LDO stosuje się jeden tranzystor PNP, to w stabilizatorze quasi-LDO używana jest kombinacja tranzystorów NPN i PNP, a taki układ charakteryzuje się pośrednim spadkiem napięcia wynoszącym zwykle nie więcej niż 1,5 V DC. Nazwy LDO oraz quasi-LDO nie są jednak w branży stosowane w sposób jednoznaczny. Producent może na przykład oferować swoje stabilizatory quasi-LDO jako LDO, natomiast stabilizatory LDO sprzedawać jako modele *VLDO* (ang. *Very Low Drop Out*) o bardzo niskim spadku napięcia. Z tego względu, niezależnie od kategorii stabilizatora, zawsze warto sprawdzić jego dane techniczne.

## Funkcje dodatkowego pinu

Niektóre stabilizatory napięcia są wyposażone w dodatkowy pin, niekiedy nazywany *pinem aktywowującym*, który wyłącza urządzenie w odpowiedzi na sygnał z mikrokontrolera lub bramki logicznej.

W innych stabilizatorach dostępny może być dodatkowy *pin stanu*, który wysyła do mikrokontrolera informację o błędzie, jeśli napięcie na wyjściu stabilizatora spadnie znacznie poniżej wartości znamionowej.

W urządzeniach zasilanych bateriami warto stosować czujnik rozładowania baterii, ponieważ stabilizator może bez żadnego ostrzeżenia po prostu wyłączyć zasilanie, jeśli napięcie na wejściu będzie zbyt niskie. Kilka modeli stabilizatorów, na przykład LP2953, ma dodatkowy pin, który wysyła sygnał ostrzegawczy o niskim poziomie naładowania baterii.

## Wartości

Powszechnie stosowane liniowe stabilizatory napięcia o jednym, ustalonym wyjściu dostarczają napięcie wyjściowe DC na poziomach 3,3 V; 5 V; 6 V; 8 V; 9 V; 10 V; 12 V; 15 V; 18 V i 24 V. Dostępnych jest też kilka modeli oferujących napięcia o pośrednich wartościach ułamkowych. Najczęściej stosuje się napięcia o wartościach 5 V; 6 V; 9 V; 12 V i 15 V. Napięcie wyjściowe może wynosić nawet 35 V DC.

Maksymalny prąd wyjściowy stabilizatora w tradycyjnej, trzypinowej obudowie TP-220 do montażu przewlekanego wynosi zwykle 1 A lub 1,5 A. Dostępne są również wersje przeznaczone do montażu powierzchniowego. Niektóre z wersji montowanych powierzchniowo mają niższe zakresy mocy.

Dokładność napięcia może być wyrażona jako wartość procentowa lub jako obciążeniowy współczynnik stabilizacji w miliwoltach. Typowa wartość takiego współczynnika wynosi 50 mV, natomiast dokładność stabilizacji mieści się w zakresie od 1 do 4% w zależności od producenta i właściwości danego komponentu. Stabilizatory LDO zasadniczo są bardziej sprawne, ale z drugiej strony ich piny masy mogą być obciążone prądem o stosunkowo dużym natężeniu. Nie jest to jednak czynnik o istotnym znaczeniu.

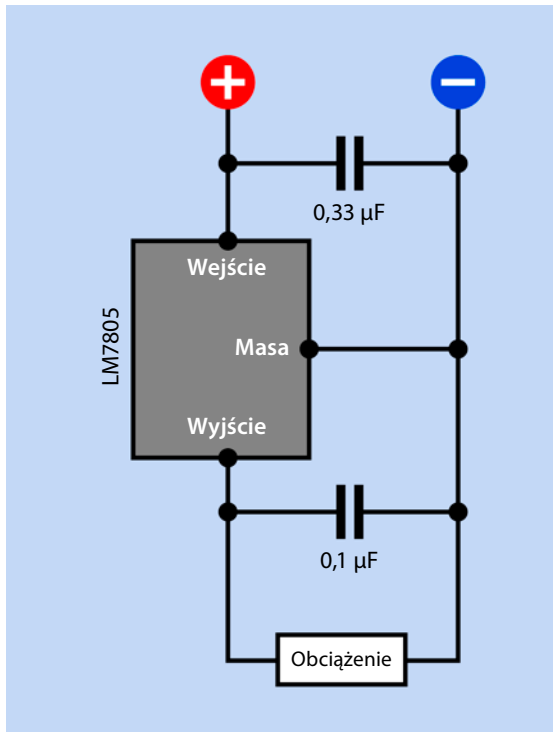
## Stosowanie

Niektóre podzespoły, na przykład wiele starszych układów CMOS lub tradycyjny timer 555 oparty na logice TTL, dopuszczają szeroki zakres napięć wejściowych, ale większość współczesnych chipów lub mikrokontrolerów musi być zasilana odpowiednio kontrolowanym napięciem. Do takich celów zazwyczaj stosuje się stabilizatory, takie jak LM7805, które są używane głównie w niewielkich i stosunkowo nieskomplikowanych urządzeniach pobierających prąd o średnich wartościach, mających niewiele podzespołów i zasilanych bateriami lub **zasilaczem sieciowym**. Zastosowanie pełnoprawnego zasilacza impulsowego byłoby przesadą.

Liniowy stabilizator napięcia nie jest zdolny do natychmiastowego reagowania na zmiany napięcia wejściowego. Jeśli więc sygnał zasilający zawiera skoki napięcia, są one przepuszczane przez stabilizator. Aby temu zapobiec, należy stosować kondensatory bocznikujące. Przykładowy schemat przedstawiający stabilizator LM7805 z kondensatorami bocznikującymi zalecanymi przez producenta pokazano na rysunku 19.6.

W przypadku urządzenia zasilanego bateriami pozostającego przez długie okresy w stanie czuwania, a jedynie czasami korzystającego z pełnej mocy, istotnym parametrem jest prąd spoczynkowy pobierany przez minimalnie obciążony stabilizator napięcia. Nowoczesne stabilizatory LDO mogą w stanie bardzo niskiego obciążenia pobierać zaledwie 100  $\mu$ A. Inne rodzaje stabilizatorów mogą pobierać znacznie więcej prądu. Należy więc sprawdzić dane techniczne poszczególnych modeli i wybrać rozwiązanie najbardziej odpowiednie do danego zastosowania.

Należy pamiętać, że **przetwornice DC-DC** mogą w stanie niskiego obciążenia pobierać dużo prądu i w rezultacie



**Rysunek 19.6.** Typowy schemat aplikacyjny stabilizatora LM7805 z kondensatorami dobranymi zgodnie z zaleceniami producenta

generować spore ilości ciepła. W takiej sytuacji korzystniejszym rozwiązaniem jest stabilizator LDO.

## Możliwe błędy

### Niewystarczająca kontrola ciepła

Możliwość ustawienia szerokiej gamy napięć w stabilizatorze regulowanym takim jak LM317 może kusić do korzystania z niego jako uniwersalnego, „pasującego do wszystkiego” rozwiązania, które będzie generować dowolne napięcie w zakresie od 5 V DC do 18 V DC, opierając się na stałym napięciu 24 V DC. Przy założeniu, że wartość prądu wyjściowego będzie na poziomie 1 A, w najgorszym przypadku strata mocy wyniesie 20 W. Aby uzyskać satysfakcjonującą sprawność i utrzymać straty cieplne na rozsądnym poziomie, napięcie wejściowe nie powinno przekraczać napięcia wyjściowego o wiele więcej, niż wynosi wartość minimalnego spadku napięcia.

Jeśli na etapie projektowania obwodu zostaną zmienione jego wymagania, stabilizator może generować więcej ciepła, niż jest to spodziewane, choć sam stabilizator zostanie użyty prawidłowo. Na początku wszystkie podzespoły obwodu mogą pobierać jedynie 100 mA, ale wraz z rozbudowywaniem funkcji układu i dodawaniem kolejnych podzespołów (zwłaszcza przełączników i wyświetlaczy LED) pobór energii może gwałtownie wzrosnąć, co w rezultacie wygeneruje niespodziewanie duże straty cieplne. To z kolei może zwiększać ryzyko nagłego (i „tajemniczego”) wyłączenia obwodu, jeśli stabilizator nie będzie miał zapewnionego odpowiedniego chłodzenia.

### Odpowiedź przejściowa

W sytuacjach, gdy zapotrzebowanie na moc ulega istotnym zmianom (na przykład po włączeniu urządzenia indukcyjnego w dowolnym punkcie obwodu), stabilizator napięcia wymaga skończonego czasu, aby wykonać autoregulację i ustabilizować napięcie wyjściowe na określonym poziomie. Takie opóźnienie nazywa się *odpowiedzią przejściową*. Jeśli prawdopodobne jest występowanie chwilowych wahań napięcia, a komponenty użyte w obwodzie mogą być wrażliwe na takie zmiany, wówczas między wyjściem stabilizatora a masą należy podłączyć większy kondensator.

Czas odpowiedzi przejściowej może być niewystarczający do blokowania nagłych, krótkotrwałych zmian napięcia wejściowego. Taka sytuacja może wystąpić na przykład w przypadku zastosowania taniego zasilacza sieciowego, który nie zapewnia odpowiedniego wygładzania napięcia wyjściowego. Na wejściu i wyjściu stabilizatora można wtedy zastosować dodatkowe kondensatory bocznikujące o pojemności 1 µF, które zapewnią lepsze filtrowanie wszelkich fluktuacji.

### Nieprawidłowa identyfikacja komponentu

Wiele rodzajów liniowych stabilizatorów napięcia wygląda identycznie. Trzeba więc uważać, aby odróżnić stabilizator o stałym napięciu wyjściowym od takiego, którego napięcie można regulować. W przypadku modeli z serii LM78xx warto dwukrotnie sprawdzić ostatnie dwie cyfry numeru katalogowego — stanowią one jedyną informację o napięciu wyjściowym. Użycie stabilizatora LM7808 zamiast LM7805 może wystarczyć do zniszczenia wszystkich mikroukładów 5-woltowych w obwodzie logicznym. Przed podłączeniem

zasilacza do obwodu zaleca się zmierzenie napięcia na jego wyjściu.

## Niewłaściwe rozpoznanie wyprowadzeń

W stabilizatorach napięcia z serii LM78xx zastosowano bardzo intuicyjny i spójny schemat rozmieszczenia pinów oraz przypisanych im funkcji — wejście po lewej stronie, masa na środku i wyjście po prawej, patrząc na podzespół od przodu z pinami skierowanymi w dół. Niestety takie oczywiste rozmieszczenie pinów w tym przypadku może przyczyniać się do pewnego rodzaju automatyzmu podczas wykonywania połączeń. W stabilizatorach napięcia ujemnego z serii LM79xx piny wejściowy i masowy są bowiem ze sobą zamienione, a stabilizatory regulowane mają jeszcze inny układ. Z tego względu zawsze warto przed podłączeniem sprawdzić na karcie produktu, jaki jest rzeczywisty układ wyprowadzeń.

## Spadek napięcia spowodowany rozładowaniem baterii

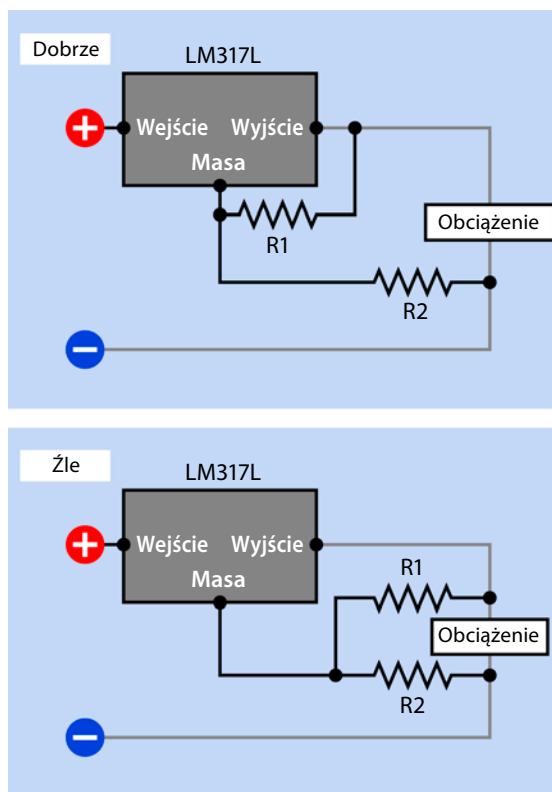
Jeśli stabilizator mający dawać napięcie 6 V DC charakteryzuje się spadkiem napięcia 2 V DC i jest zasilany baterią 9V, może dojść do tego, że napięcie baterii na skutek jej starości lub rozładowania spadnie poniżej wymaganego poziomu 8 V DC. W takiej sytuacji napięcie wyjściowe stabilizatora może zmaleć lub zacząć się wahać.

## Niedokładność dostarczanego napięcia

Stabilizator napięcia utrzymuje napięcie wyjściowe między pinem wyjściowym a pinem masy. Cienkie ścieżki na płytce drukowanej lub długie trasy kablowe wykonane z cienkiego drutu mogą wprowadzać pewną rezystancję obniżającą rzeczywiste napięcie, którym zasilany jest dany podzespół. Według prawa Ohma spadek napięcia wywołany rezystancją ścieżki (lub cienkiego drutu) będzie proporcjonalny do natężenia przepływającego przez nią (lub niego) prądu. Na przykład, jeśli rezystancja między pinem wyjściowym stabilizatora a komponentem wynosi  $0,5 \Omega$ , a natężenie prądu ma wartość  $0,1 \text{ A}$ , to spadek napięcia będzie równy jedynie  $0,05 \text{ V}$ . Jeśli jednak natężenie wzrośnie do  $1 \text{ A}$ , wówczas spadek napięcia wyniesie  $0,5 \text{ V}$ . Mając to na uwadze, stabilizator napięcia należy umieszczać w pobliżu komponentów wrażliwych na wartość napięcia zasilającego. Ścieżki

doprowadzające zasilanie w obwodach drukowanych nie powinny mieć istotnej rezystancji.

Podczas korzystania z liniowych stabilizatorów napięcia może pojawić się pokusa podłączenia rezystora regulacyjnego  $R_1$  do dodatniej końcówki obciążenia w celu uzyskania „dokładniejszego” napięcia na tymże obciążeniu. Taka konfiguracja nie przyniesie jednak oczekiwanego skutku. Rezystor  $R_1$  należy zawsze podłączać maksymalnie blisko pomiędzy pinem wyjściowym a pinem regulacyjnym stabilizatora, natomiast rezystor  $R_2$  powinien znajdować się między pinem regulacyjnym a ujemną końcówką obciążenia. Wszystko to pokazano na rysunku 19.7. Szary kolor przewodu oznacza, że ma on istotną rezystancję.



**Rysunek 19.7.** Jeżeli połączenie między stabilizatorem o regulowanym napięciu wyjściowym a elementami obciążającymi ma istotną rezystancję (takie połączenia rezystancyjne mają tu kolor szary), rezystor  $R_1$  należy podłączać maksymalnie blisko pinów stabilizatora, tak jak na górnym schemacie (opracowano na podstawie schematów przygotowanych przez National Semiconductor)



# Elektromagnes

Używane tutaj pojęcie **elektromagnes** odnosi się do cewki z rdzeniem wykonanym z materiału ferromagnetycznego i nieporuszającym się względem cewki. Rdzeń służy jedynie do wzmacniania pola magnetycznego, które przyciąga lub odpycha inne elementy o odpowiednich właściwościach magnetycznych. Jeśli element centralny przesuwa się na skutek siły magnetycznej wytwarzanej przez prąd płynący w cewce, wówczas mamy do czynienia z **solenoidem**<sup>1</sup>, który opisano w osobnym rozdziale. Dla porównania w rozdziale 14. o **cewce indukcyjnej** opisano zwojnicę, która może (ale nie musi) mieć rdzeń ferromagnetyczny i służy konkretnie do zapewnienia reakcji lub indukcyjności własnej w obwodzie elektrycznym, przy czym często używa się jej w instalacjach prądu przemiennego oraz w połączeniu z rezystorami i (lub) kondensatorami. Podstawowy opis oraz wyjaśnienie działania siły magnetycznej wytwarzanej przez prąd elektryczny można znaleźć w rozdziale poświęconym **cewce indukcyjnej**.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **solenoid** (rozdział 21.),
- **silnik prądu stałego** (rozdział 22.),
- **silnik prądu zmiennego** (rozdział 23.).

<sup>1</sup> W polskiej nomenklaturze terminu *solenoid* używa się raczej w odniesieniu do zwojnicy powietrznej, czyli pozbawionej rdzenia, a jeśli ma rdzeń ferromagnetyczny, określa się ją mianem *elektromagnesu*, aczkolwiek nie jest to reguła ściśle przestrzegana — *przyj. tłum.*

## Funkcja

Elektromagnes składa się z cewki, która wytwarza pole magnetyczne pod wpływem przepływającego przez nią prądu elektrycznego. Pole to jest skupiane i wzmacniane przez rdzeń wykonany z materiału magnetycznego (tzn. takiego, który można namagnesować). Elektromagnesy stosuje się w silnikach, prądnicach, głośnikach, mikrofonach oraz projektach wielkoskalowych takich jak kolej magnetyczna. Stanowią środek, dzięki któremu z wykorzystaniem prądu elektrycznego można utrzymywać, podnosić lub przesuwać obiekty zdolne do indukowania własnego pola magnetycznego.

Na rysunku 20.1 pokazano bardzo mały, prymitywny elektromagnes o średnicy około 2 cm. Nie istnieje specjalny symbol elektryczny oznaczający elektromagnes — często stosuje się po prostu symbol cewki indukcyjnej z rdzeniem



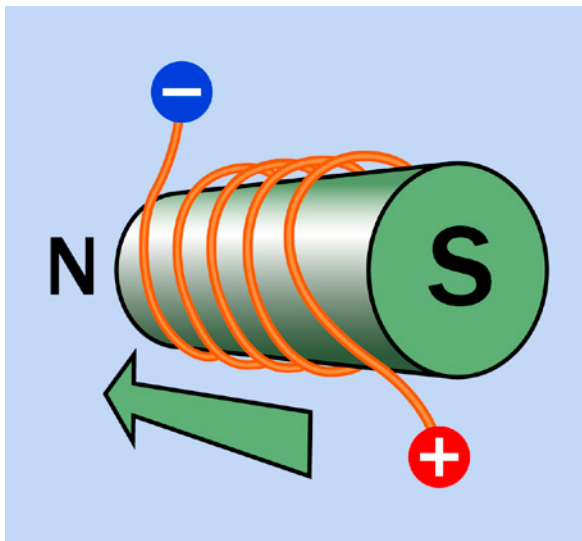
**Rysunek 20.1.** Elektromagnes o średnicy 2 cm pobierający prąd znamionowy 0,25 A przy napięciu 12 V DC

monolitycznym, który pokazano na rysunku 14.1 (środkowa wersja z trzech przykładów) znajdującym się w rozdziale 14. poświęconym cewce indukcyjnej.

## Działanie

Prąd elektryczny przepływający przez drut w kształcie okręgu (lub przez szereg pętli tworzących linię śrubową) indukuje pole magnetyczne wewnątrz takiej *zwojnicy*. Zjawisko to opisano w rozdziale dotyczącym **cewki indukcyjnej** i zilustrowano na rysunkach 14.3, 14.4, 14.5 oraz 14.6.

Jeśli kawałek materiału ferromagnetycznego umieścimy w środku zwojnicy lub okręgu, będzie on zwiększać siłę magnetyczną, ponieważ jego *reluktancja* (rezystancja magnetyczna) jest znacznie niższa niż reluktancja powietrza. Takim połączeniem zwojnicy i rdzenia jest właśnie elektromagnes. Pokazano to na rysunku 20.2. Więcej informacji na ten temat znajduje się w punkcie „Rdzeń magnetyczny”, w rozdziale 14. „Cewka indukcyjna”.



**Rysunek 20.2.** Prąd stały przepływający w konwencjonalnym kierunku przez drut nawinięty na pręt ferromagnetyczny indukuje w pręcie pole magnetyczne, które zgodnie z konwencją jest skierowane od bieguna południowego do północnego

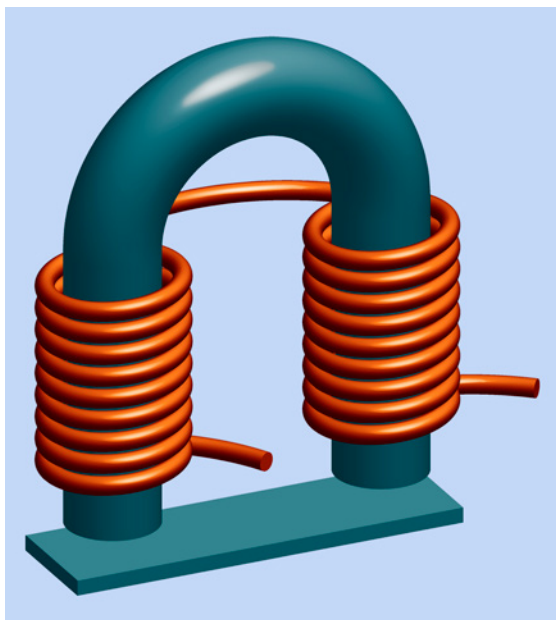
Przy założeniu, że użyte jest źródło prądu stałego, *gęstość strumienia* elektromagnetycznego będzie proporcjonalna do natężenia prądu przepływającego przez zwojnicę.

## Rodzaje

Budowa elektromagnesów zależy od ich zastosowania. Najprostszy układ składa się z jednej cewki nawiniętej na pręt, który może kończyć się płytą — takie elektromagnesy stosuje się na przykład do podnoszenia złomu. Tego typu konstrukcja charakteryzuje się jednak stosunkowo niską sprawnością, ponieważ obwód magnetyczny jest domykany poprzez powietrze otaczające elektromagnes.

Wydajniejsza jest tradycyjna konstrukcja składająca się z rdzenia w kształcie litery U, wokół którego nawinięta jest jedna cewka albo nawet dwie. Jeśli taki rdzeń ma łagodną krzywiznę, to swoim kształtem przypomina podkowę (patrz rysunek 20.3). Elektromagnes o takiej budowie stają się jednak coraz mniej popularne, ponieważ tańszym rozwiązaniem jest wykonanie uzwojeń na dwóch odrębnych prostych rdzeniach i połączenie ich zworą. Elektromagnes w kształcie podkowy są niezwykle wydajne, ponieważ cewki indukują bieguny magnetyczne na otwartych końcach rdzenia w kształcie litery U, a obwód magnetyczny jest domykany poprzez obiekt przyciągany do elektromagnesu i łączący oba końce rdzenia. Przyciąganym obiektem na rysunku 20.3 jest prostokątna płytka. Ponieważ obwód magnetyczny ma naturalną skłonność do ograniczania swojego zakresu, a cel ten staje się w pełni zrealizowany po domknięciu obwodu, siła przyciągania przez magnes U-kształtny jest maksymalna.

Elektromagnes zasilany prądem stałym w sposób naturalny generuje stabilne pole magnetyczne o ustalonej biegunowości. Po przyłożeniu prądu przemiennego elektromagnes nadal może służyć do wywoływania siły przyciągania względem obiektu, który nie jest namagnesowany, ale daje się namagnesować. Elektromagnes będzie zmieniać swoją biegunowość z taką samą częstotliwością, jaką ma prąd przemienny, a także będzie wywoływać namagnesowanie obiektu — z równymi wartościami, ale w przeciwnych kierunkach, powodując wzajemne przyciąganie. Rdzeń magnesu jest złożony z płytek oddzielonych cienkimi warstwami izolacyjnymi tłumiącymi prądy wirowe indukowane przez prąd przemienny, ale taki elektromagnes zasilany AC nadal będzie mniej wydajny niż porównywalny elektromagnes na prąd stały. Powodem jest histereza związana z poborem energii potrzebnej do cyklicznego odwracania biegunowości domen magnetycznych w rdzeniu.



**Rysunek 20.3.** Taka tradycyjna budowa elektromagnesu jest znana już od ponad stu lat; zapewnia maksymalną efektywność dzięki domykaniu obwodu magnetycznego przez dowolny przyciągany obiekt

Niektóre elektromagnesy opisywane jako przystosowane do prądu przemiennego w rzeczywistości mają wbudowane prostowniki przekształcające prąd AC na DC.

## Wartości

Elektromagnesy charakteryzują się zwykle parametrami dotyczącymi poboru mocy oraz siły trzymania (czyli ciężaru, który mogą utrzymać). Siłę trzymania zazwyczaj wyraża się w gramach lub kilogramach.

## Stosowanie

Elektromagnesy najczęściej stosuje się jako komponenty innych podzespołów, takich jak silniki, prądnice, przekazy, głośniki czy napędy dyskowe. Były również używane w magnetofonach (i magnetowidach) do magnetyzowania tlenku żelaza na taśmie — generowane pole magnetyczne o zmiennej sile pozwalało rejestrować sygnał. W tego rodzaju zastosowaniach używa się magnesu w kształcie podkowy o bardzo wąskiej szczelinie, której szerokość

decyduje o największej częstotliwości, jaką elektromagnes może zarejestrować na taśmie przesuwanej się przed nim z określoną prędkością.

Proces rejestracji na taśmie można odwrócić — elektromagnes „odczytuje” wtedy sygnał z taśmy i przekształca go na słaby prąd zmienny, który może być wzmacniany i odtwarzany przez głośniki.

Prostym zastosowaniem elektromagnesu jest również tradycyjny dzwonek do drzwi, w którym jedna lub dwie cewki przyciągają dźwignię sprężynową, na końcu której znajduje się gałka uderzająca w czaszę dzwonka. Gdy dźwignia jest przysuwana w kierunku czaszy, następuje zerwanie kontaktu zapewniającego zasilanie elektromagnesu. Dźwignia w wyniku działania sprężyny powraca do pierwotnego położenia, a wtedy następuje ponowne zamknięcie obwodu i cały proces jest powtarzany. Rozmiary i ciężar podzespołów stosowanych w takich dzwonekach sprawiają, że są one wypierane przez lżejsze i mniejsze urządzenia elektroniczne z niewielkimi głośniczkami. W dzwonekach jedno- lub dwutonowych nadal jednak stosowane są **solenoidy**.

W każdym urządzeniu *kineskopowym* stosuje się *cewki odchylające* nałożone na szyjkę kineskopu, które sterują wiązką elektronów pędzących w stronę ekranu. Podobną zasadę wykorzystuje się w mikroskopach elektronowych. W niektórych rozwiązaniach do tego samego celu stosuje się płytki naładowane elektrostatycznie.

Elektromagnes może służyć do aktywacji kontaktronu (rodzaju przełącznika pokazanego na rysunku 9.7). W przypadku takiego zastosowania kombinacja elektromagnesu z przełącznikiem pełni funkcję przekaźnika.

Gdy do elektromagnesu zostanie doprowadzony prąd przemienny, można go wykorzystać do rozmagnesowania (lub demagnetyzacji) innych przedmiotów. Wtedy albo jest obniżane stopniowo natężenie prądu, przez co siła zmieniających się naprzemiennie biegunów magnetycznych stopniowo maleje do zera, albo elektromagnes jest stopniowo odsuwany od obiektu, co podobnie zmniejsza wpływ siły magnetycznej do (niemal) zera. Tę drugą metodę wykorzystuje się do rozmagnesowywania głowic zapisujących i odtwarzających w magnetofonach, aby usunąć nagromadzoną pozostałość magnetyczną będącą źródłem szumu zakłócającego odtwarzany sygnał.

Tradycyjne wielkoskalowe zastosowania elektromagnesów polegają na podnoszeniu i przenoszeniu ciężkich obiektów lub złomu, na przykład starych lub rozbitych pojazdów. Nowocześniejszym przykładem użycia elektromagnesów jest obrazowanie metodą rezonansu elektromagnetycznego, które zrewolucjonizowało niektóre obszary medycyny.

Na jeszcze większą skalę elektromagnesów używa się w akceleratorach cząstek elementarnych, gdzie cewki wielu dużych elektromagnesów są zasilane sekwencyjnie, a także w instalacjach termojądrowych, gdzie pole magnetyczne służy do uwięzienia plazmy.

## Możliwe błędy

---

Ze względu na to, że elektromagnes wymaga stałego zasilania w celu podtrzymywania swojej siły magnetycznej, także wtedy, gdy nie wykonuje żadnej pracy — gdy obiekt przyciągany przez rdzeń pozostaje w bezruchu — energia prądu przepływającego przez cewkę musi być w całości rozpraszana w postaci ciepła. Bardziej szczegółowe omówienie tego problemu można znaleźć w punkcie „Ciepło” znajdującym się w rozdziale 21. poświęconym **solenoidowi**.

# Solenoid (elektromagnes z ruchomym rdzeniem)

Dawniej pod pojęciem **solenoidu** rozumiano dowolną cewkę bez rdzenia magnetycznego. Obecnie coraz powszechniej termin ten określa cewkę, wewnątrz której znajduje się trzpień cylindryczny poruszany przez pole magnetyczne. Pojęcie **elektromagnesu** (któremu poświęcono osobny rozdział w *Encyklopedii*) odnosi się do cewki z rdzeniem ferromagnetycznym, który jest względem niej nieruchomy<sup>1</sup>. Służy on jedynie do przyciągania lub odpychania innych elementów o odpowiednich właściwościach magnetycznych. Dla porównania w rozdziale o **cewce indukcyjnej** opisano zwojnicę, która służy do konkretnego celu polegającego na zapewnieniu reakcji lub indukcyjności własnej w obwodzie elektrycznym, przy czym częściej używa się jej w instalacjach prądu zmiennego w połączeniu z rezystorami i (lub) kondensatorami. Podstawowe informacje na temat siły magnetycznej wytwarzanej przez prąd elektryczny można znaleźć w rozdziale poświęconym **cewce indukcyjnej**.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **cewka indukcyjna** (rozdział 14.),
- **elektromagnes** (rozdział 20.).

<sup>1</sup> W polskim nazewnictwie pojęcie „solenoid” nadal częściej odnosi się do cewki powietrznej (bez rdzenia), a każda cewka z rdzeniem (ruchomym lub stałym), której przeznaczeniem jest oddziaływanie na inne przedmioty (magnetycznie lub mechanicznie za pośrednictwem ruchomego rdzenia), jest nazywana najczęściej elektromagnesem — *przyj. tłum.*

## Funkcja

Typowy solenoid składa się z cewki powietrznej umieszczonej w *korpusie*, który może mieć postać walca lub pudełka z otwartymi bokami. W przypadku walca jego przeciwne końce noszą nazwę *powierzchni biegunowych*.

Co najmniej jedna z powierzchni biegunowych ma otwór, przez który solenoid wsuwa lub wysuwa metalowy *trzpień* (zwany popularnie *bolcem*). Solenoid jest więc urządzeniem generującym liniową siłę mechaniczną pod wpływem przepływającego przez niego prądu. W większości solenoidów do podtrzymywania siły mechanicznej konieczne jest utrzymanie przepływu prądu.

Na rysunku 21.1 pokazano niewielki solenoid z otwartą obudową; górne zdjęcie przedstawia trzy podstawowe elementy

solenoidu: korpus, sprężynę i trzpień; na dolnym zdjęciu widać zmontowany zespół.

Rysunek 21.2 przedstawia większy, zamknięty solenoid cylindryczny ze zdemontowanymi trzpieniem i sprężyną.

Grafikę 3D przedstawiającą przekrój poprzeczny przez uproszczony, teoretyczny solenoid walcowy pokazano na rysunku 21.3. Na schematycznej ilustracji widać szarą cylindryczną osłonę, nazywaną korpusem, pomarańczową zwojnicę, trzpień, który jest wciągany do zwojnicy na skutek działania pola magnetycznego, a także trójkątny ogranicznik, który wyznacza górne skrajne położenie trzpienia. Obudowa solenoidu nie pełni jedynie funkcji ochronnej względem cewki, lecz jest także częścią obwodu magnetycznego domykane go przez trzpień.



**Rysunek 21.1.** *Niewielki solenoid (elektromagnes z ruchomym rdzeniem) o napięciu znamionowym 12 V DC*



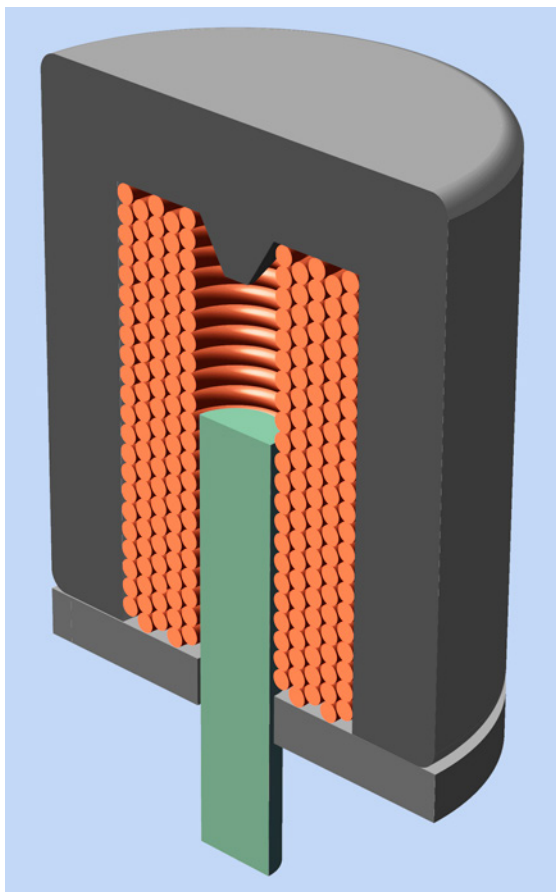
**Rysunek 21.2.** *Większy solenoid o napięciu znamionowym 24 V DC*

Na dolnym końcu trzpienia mogą być zamontowane dodatkowe elementy, takie jak niemagnetyczny uchwyt lub płytka perforowana, służące do połączenia z innymi podzespołami. Do tego celu często wykorzystuje się elementy ze stali nierdzewnej. Ogranicznik może być wyposażony w odbojnik (także wykonany ze stali nierdzewnej) — dotyczy to wersji, które są solenoidami (elektromagnesami) zarówno „ciągnącymi”, jak i „pchającymi”. Na grafice nie pokazano sprężyn, które regulują siłę działania trzpienia lub przywracają go do pierwotnego położenia po przerwaniu dopływu prądu do cewki.

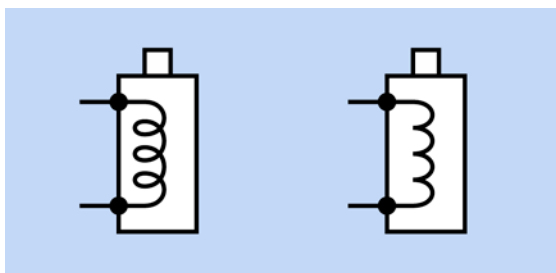
Ponieważ nie istnieje standardowy symbol solenoidu, a także ze względu na fakt, że tego rodzaju podzespoły są bardzo często stosowane wraz z zaworami, na schematach układów zawierających solenoidy umieszcza się przede wszystkim symbole ilustrujące przepływ gazów lub cieczy, a solenoid bywa pokazywany jako zwykły prostokąt. Czasami można jednak spotkać symbole pokazane na rysunku 21.4.

## Działanie

Prąd przepływający przez cewkę wytwarza pole magnetyczne. Zjawisko to opisano w rozdziale dotyczącym **cewki indukcyjnej**, a najważniejsze aspekty pokazano na rysunkach 14.3, 14.4, 14.5 i 14.6.



**Rysunek 21.3.** Uproszczony widok wnętrza solenoidu z uwzględnieniem jego podstawowych elementów



**Rysunek 21.4.** Standardowy symbol elektryczny solenoidu nie istnieje, ale niekiedy można spotkać takie oznaczenia

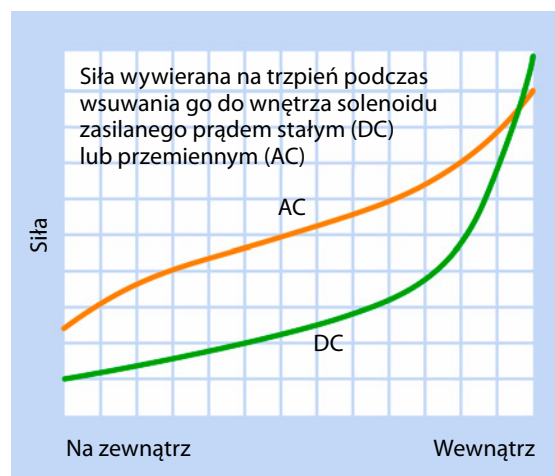
Jeśli trzpień jest wykonany z materiału takiego jak żelazo magnetycznie miękkie, cewka będzie w nim indukować przeciwne bieguny o równych siłach. W rezultacie taki

trzpień będzie miał skłonność do zajmowania takiego położenia wewnątrz cewki, w którym jego oba końce będą równo oddalone od końców zwojnicy. Zamontowanie kołnierza na swobodnym końcu trzpienia zwiększa siłę ciągnięcia trzpienia, gdy znajduje się on blisko wewnętrznego położenia skrajnego. Powstaje bowiem dodatkowa siła ciągnięcia wywierana przez korpus solenoidu na kołnierz.

W celu skompensowania wzrostu siły ciągnięcia występującego, gdy do cewki wsunięta zostanie większa część trzpienia, można zastosować sprężynę działającą z coraz większą siłą w kierunku przeciwnym. Sprężyna może służyć także do wysunięcia trzpienia (przynajmniej częściowo), gdy przepływ prądu przez cewkę zostanie przerwany.

Jeśli trzpień jest magnesem stałym, odwrócenie kierunku przepływu prądu stałego spowoduje odwrócenie działania trzpienia.

Solenoid z nienamagnesowanym trzpieniem można zasilac prądem przemiennym, ponieważ zmiany biegunowości pola magnetycznego generowanego przez cewkę będą powodować równe pod względem wartości, ale przeciwne kierunkowo zmiany biegunów w trzpieniu. Krzywa siły dla solenoidu zasilanego prądem przemiennym jest jednak inna niż krzywa dla solenoidu na prąd stały (patrz rysunek 21.5). Solenoid zasilany prądem przemiennym często wywołuje świszczenie, brzęczenie i drgania.



**Rysunek 21.5.** Porównanie sił działających na trzpień w zależności od jego położenia podczas wsuwania do wnętrza solenoidu; wykresy ilustrują te zależności w solenoidach AC i DC

Korpus solenoidu zwiększa siłę pola magnetycznego generowanego przez cewkę, ponieważ stanowi obwód magnetyczny o znacznie niższej *reluktancji* niż w przypadku obwodu powietrznego (reluktancja jest odpowiednikiem rezystancji elektrycznej). Bardziej szczegółowy opis tego zjawiska zamieszczono w punkcie „Rdzeń magnetyczny” znajdującym się w rozdziale 14. poświęconym **cewce indukcyjnej**. Jeśli natężenie prądu przepływającego przez cewkę wzrośnie do poziomu, przy którym korpus staje się nasycony magnetycznie, siła ciągnąca solenoidu przestanie się zmieniać.

Ciepło generowane przez solenoid pozostający pod napięciem można zmniejszyć przez dodanie szeregowego rezystora oraz *przełącznika bocznikującego*. Taki przełącznik jest normalnie zamknięty, ale zostaje mechanicznie otwarty, gdy trzpień osiągnie położenie skrajne, i tym samym zmusi prąd do przepływu przez rezystor szeregowy. Taki układ sam z siebie generuje pewną ilość ciepła w wyniku przepływającego przez niego prądu, ale na skutek zwiększenia łącznej rezystancji obwodu następuje spadek całkowitej ilości generowanego ciepła. Wartość rezystora dobiera się w taki sposób, aby zapewnić minimalną energię potrzebną do utrzymania trzpienia w jego skrajnym położeniu.

## Rodzaje

Najczęściej stosowaną wersją jest solenoid (elektromagnes) rurowy opcjonalnie dostępny z otwartym korpusem. Solenoid rurowy pokazano na rysunku 21.2.

Pozostałe rodzaje to:

### Solenoid kompaktowy

Krótszy, ale grubszy solenoid, który można stosować, jeśli nie jest wymagany długi skok trzpienia.

### Solenoid zatrzaskowy

Magnes stały utrzymuje trzpień, gdy ten dotrze do położenia skrajnego, i trzyma go w tym położeniu także po odłączeniu zasilania od solenoidu. Sam trzpień również jest stałym magnesem, dlatego jego wysunięcie następuje, gdy przez cewkę zaczyna płynąć prąd w kierunku przeciwnym.

### Solenoid obrotowy

Ten rodzaj przypomina pod względem działania bezszczotkowy silnik prądu stałego. Zamiast ruchu postępowego wywołuje obrót trzpienia o stały kąt (zazwyczaj w zakresie od 25° do 90°). Wykorzystuje się go jako wskaźnik mechaniczny w panelach sterowania, choć ostatnio jest wypierany przez wskaźniki w pełni elektroniczne.

### Solenoid kłapkowy

Gdy solenoid jest pod napięciem, zamiast trzpienia porusza się w nim niewielka uchylna płytką („klapka”), która po odłączeniu prądu powraca do pierwotnego położenia pod wpływem sprężyny.

## Wartości

Do najważniejszych wartości, które można znaleźć w danych technicznych solenoidów, należą długość skoku, względny czas pracy oraz siła trzymania.

Siły trzymania w przypadku solenoidów DC mieszczą się w zakresie od kilku gramów do setek kilogramów. Siła trzymania jest odwrotnie proporcjonalna do długości solenoidu, przy założeniu że wszystkie pozostałe parametry są stałe. Siła, którą solenoid może wywierać na znajdujący się w nim trzpień, zależy również od położenia, w którym znajduje się trzpień w ramach swojego skoku.

Szczególnie znaczenie ma względny czas pracy, ponieważ solenoid pobiera energię i generuje ciepło przez cały czas, gdy utrzymuje trzpień w jego skrajnym położeniu (wyjątkiem są solenoidy zatrzaskowe). Początkowy udar prądowy w solenoidzie AC powoduje wydzielenie dodatkowej ilości ciepła.

Względny czas pracy oblicza się dość łatwo. Jeśli T1 jest czasem aktywności solenoidu, a T2 czasem jego bierności, wówczas względny czas pracy D uzyskuje się jako wartość procentową na podstawie wzoru:

$$D = 100 * (T1 / (T1 + T2))$$

Niektóre solenoidy charakteryzują się względnym czasem pracy na poziomie 100%, ale są to wyjątki — w większości przypadków obowiązuje maksymalna wartość nie tylko dla parametru D, lecz także czasu przebywania w stanie załączenia niezależnie od przyjętego względnego czasu pracy. Załóżmy, że nominalny względny czas pracy solenoidu

kształtuje się na poziomie 25%. Jeśli zostanie on włączony na jedną sekundę i wyłączony na trzy sekundy, wówczas ciepło będzie mogło zostać odprowadzone, zanim dojdzie do przeciążenia układu. Jeśli jednak solenoid będzie włączany na minutę i wyłączany na trzy minuty, wówczas względny czas pracy nadal będzie na poziomie 25%, ale ciepło zgromadzone podczas jednonumutowego okresu aktywności będzie mogło spowodować przeciążenie, zanim nastąpi faza wyłączenia pozwalająca na rozproszenie ciepła.

## Rozmiar solenoidu a jego moc

Ze względu na to, że większa liczba uzwojeń cewki indukuje większą siłę magnetyczną, solenoidy o większych rozmiarach mogą być mocniejsze niż te mniejsze. Oznacza to jednak również, że jeśli solenoidy większy i mniejszy mają generować taką samą siłę, wówczas mniejszy z nich będzie prawdopodobnie pobierał większy prąd (a tym samym generować więcej ciepła) ze względu na to, że ma mniej uzwojeń.

## Stosowanie

Solenoidy stosuje się głównie jako elementy sterujące zaworami w obwodach cieczy i gazów. Tego typu obwody występują w laboratoryjnych i przemysłowych układach sterowania procesami, we wtryskiwaczach paliwa, systemach lotniczych, instalacjach wojskowych, urządzeniach medycznych oraz pojazdach kosmicznych. Solenoidy można również znaleźć w niektórych blokadach elektronicznych, flipperach i robotach.

## Możliwe błędy

### Ciepło

Podstawowym problemem związanym ze stosowaniem solenoidów jest ich przegrzewanie, do którego dochodzi najczęściej po przekroczeniu dopuszczalnego czasu aktywności lub znamionowego względnego czasu pracy. Kolejną

przyczyną przegrzania może być sytuacja, w której trzpień nie będzie mógł dotrzeć do swojego skrajnego położenia.

Ponieważ rezystancja cewki rośnie wraz ze wzrostem temperatury, rozgrzany solenoid będzie przewodził mniejszy prąd i tym samym generować mniejszą moc. Jest to bardziej odczuwalne w solenoidach DC niż AC. Krzywa siły publikowana przez producenta powinna przedstawiać pracę solenoidu przy jego maksymalnej temperaturze znamionowej, która zwykle wynosi około 75°C, i przy temperaturze otoczenia na poziomie 25°C. Przekroczenie tych wartości może skutkować nieprawidłowym działaniem solenoidu. Podobnie jak we wszystkich cewkach wykonanych z drutu nawojowego istnieje ryzyko, że nadmierna ilość ciepła spowoduje stopienie izolacji separującej uzwojenia, co będzie równoznaczne ze skróceniem cewki, która będzie wtedy przewodzić prąd o większym natężeniu i generować więcej ciepła.

### Udarowy prąd przemienny

Gdy w solenoidzie AC trzpień osiąga swoje skrajne położenie, jego nagłe zatrzymanie powoduje wyindukowanie *siły elektromotorycznej*, co z kolei skutkuje wygenerowaniem dodatkowego ciepła. Uogólniając, im dłuższy skok trzpienia, tym większy udar. Częste przełączanie solenoidu zwiększa więc poziom nagrzewania cewki.

### Niepożądana siła elektromotoryczna

Podobnie jak każde urządzenie zawierające cewkę, także solenoid wytwarza siłę przeciwelektromotoryczną po podłączeniu zasilania oraz siłę elektromotoryczną, gdy zasilanie jest odłączane. Aby tłumić skoki napięcia mogące mieć wpływ na pozostałe komponenty, konieczna może być instalacja diody zabezpieczającej.

### Luźny trzpień

Trzpienie znajdujące się w wielu solenoidach nie są w żaden sposób mocowane w korpusie i mogą wypadać w wyniku przechylenia solenoidu lub nadmiernych wibracji.



# Silnik prądu stałego

W tym rozdziale określenie „tradycyjny silnik prądu stałego” oznacza najprostszą i zarazem najstarszą konstrukcję złożoną z dwóch *szczotek*, które za pośrednictwem podzielonego na segmenty i obracającego się *komutatora* doprowadzają prąd do dwóch lub więcej cewek indukcyjnych zamontowanych razem z nim na wale silnika. Silniki *bezsztotkowe* również zostały tu opisane. Mimo że w gruncie rzeczy ich cewki są zasilane *impulsami prądowymi o modulowanej szerokości*, to jednak jako całość czerpią z zewnątrz energię w postaci prądu stałego.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **silnik prądu przemiennego** (rozdział 23.),
- **silnik krokowy** (rozdział 25.),
- **serwomotor** (rozdział 24.).

## Funkcja

Tradycyjny silnik prądu stałego zamienia energię elektryczną na energię pola magnetycznego, które wymusza obrót wału silnika. Gdy zmienia się biegunowość napięcia zasilającego, zmienia się także kierunek obrotów wału. Zazwyczaj moment obrotowy jest w obu przypadkach taki sam.

## Działanie

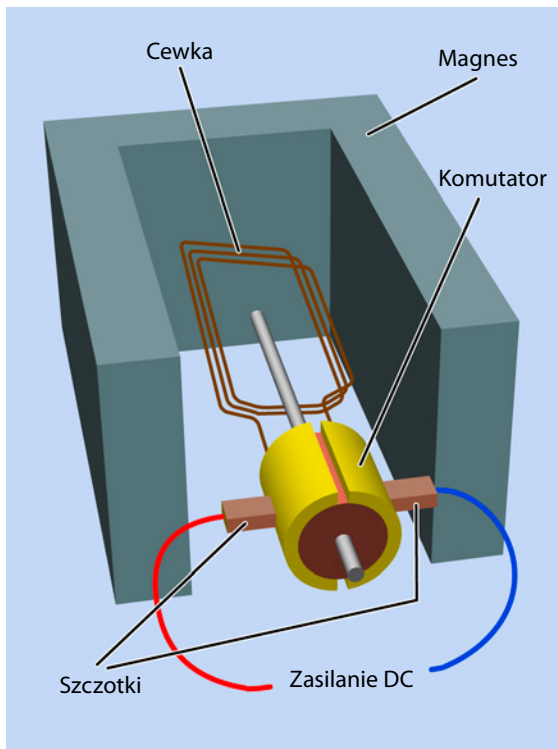
Prąd przepływa przez dwie lub więcej cewek zamontowanych na wale silnika i obracających się razem z nim. Cały ten zestaw nosi nazwę *wirnika* lub *rotora*. Pole magnetyczne wytwarzane przez cewki i skupione w rdzeniach z miękkiego żelaza lub stali wysokokrzemowej oddziałuje z polami magnetycznymi stałych magnesów rozmieszczonych wokół wirnika w nieruchomej konstrukcji zwanej *stojanem* lub *statorem*.

Prąd jest doprowadzany do cewek za pośrednictwem dwóch *szczotek* wykonanych najczęściej z preparatu grafitowego i dociskanych do komutatora przez sprężyny. *Komutator* jest przewodzącym pierścieniem podzielonym na sekcje połączone z cewkami. Podczas obrotów wirnika kolejne sekcje komutatora odbierają prąd ze szczotek i dostarczają go do

odpowiednich cewek. W taki mechaniczny sposób odbywa się przełączanie prądu pomiędzy poszczególnymi cewkami.

Najprostszy z możliwych układ silnika stałoprądowego jest pokazany na rysunku 22.1.

W rzeczywistości nawet małe silniki mają co najmniej trzy cewki, dzięki czemu ich obroty są równomierniejsze. Działanie silnika z trzema cewkami jest pokazane na rysunku 22.2. Widoczne tam grafiki należy traktować jak zdjęcia migawkowe silnika, którego wirnik obraca się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Kolory szczotek odpowiadają biegunowości źródła prądu — czerwony oznacza biegun dodatni, a niebieski wskazuje na biegun ujemny. Cewki są połączone szeregowo, a prąd jest dostarczany przez komutator do ich punktów wspólnych. Kierunek przepływu prądu przez cewkę decyduje o kierunku generowanego przez nią pola magnetycznego (na rysunku jest to oznaczone małymi i wielkimi literami S i N). Część prądu płynąca przez dwie cewki połączone szeregowo wytwarza w nich słabsze pola magnetyczne niż pozostała część płynąca przez pojedynczą cewkę. Na rysunku pole słabsze jest oznaczone małą białą literą s lub n, a pole silniejsze — literą dużą i czarną. Jeśli oba końce cewki mają ten sam potencjał (stykają się z tą samą

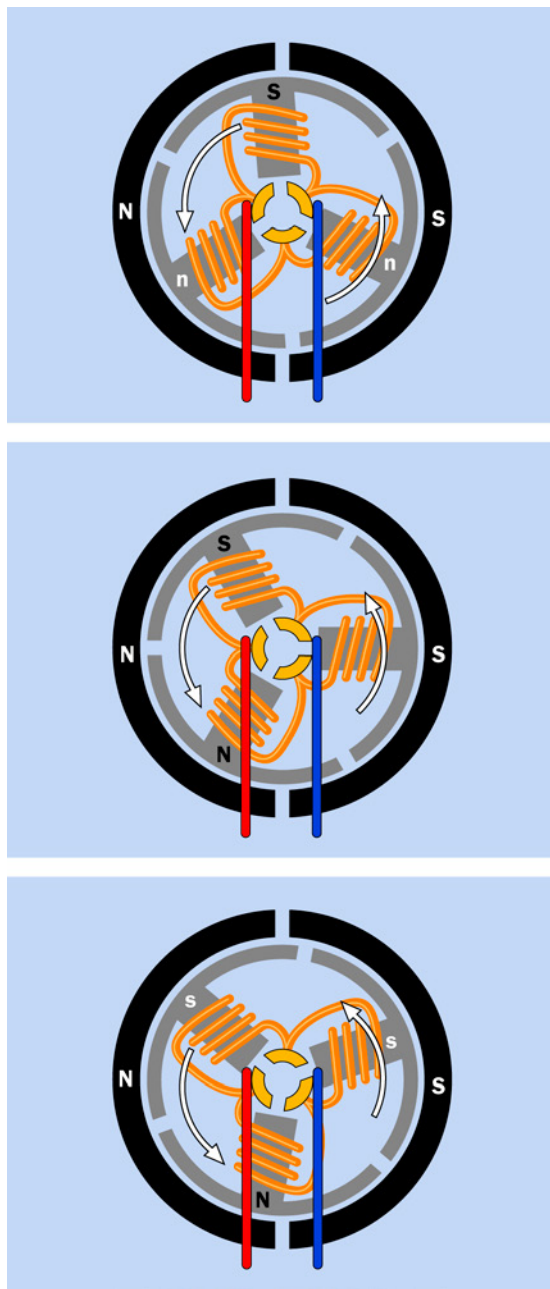


**Rysunek 22.1.** Tak wygląda budowa najprostszego silnika prądu stałego. Wał, cewka i komutator tworzą wirnik, a magnes jest tu stojanem

szczotką), prąd przez nią nie płynie i jej pole magnetyczne jest zerowe.

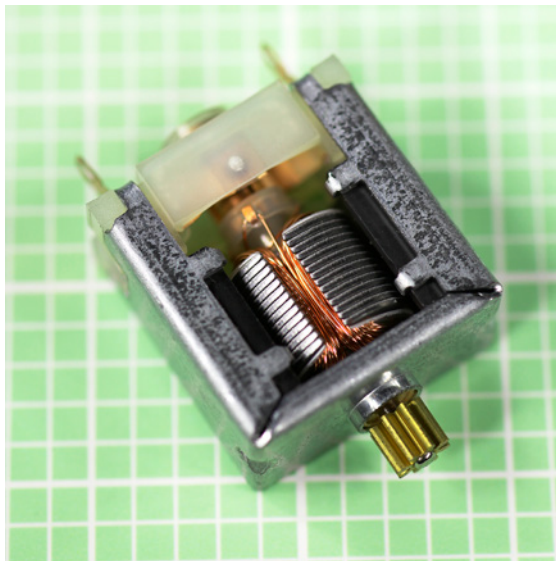
Stojan jest tutaj dwuczęściowym magnesem stałym w kształcie cylindra (na rysunku są to dwa czarne półpierścienie), ale w rzeczywistości może to być magnes jednoczęściowy. Pola magnetyczne stojana i wirnika odpychają się lub przyciągają w zależności od tego, czy są zwrócone do siebie takimi samymi biegunami, czy przeciwnymi.

Silniki prądu stałego mogą być bardzo małe, jak chociażby ten pokazany na rysunku 22.3 — zajmowana przez niego powierzchnia nie przekracza 5 cm<sup>2</sup>. Jak na swoje rozmiary mogą osiągać dość okazałą moc. Silnik pokazany w częściach na rysunku 22.4 pochodzi z 12-woltowej pompy zęzowej zdolnej do wypompowania prawie 2 m<sup>3</sup> wody w ciągu godziny. Za wymuszanie ruchu cieczy odpowiada tu niewielkie koło łopatkowe sprzężone z wirnikiem (po prawej); stojan składa się tu z dwóch niezwykle mocnych magnesów



**Rysunek 22.2.** Trzy migawkowe „zdjęcia” typowego silnika DC z trzema cewkami widzianego od strony komutatora (wał silnika został pominięty); siły odpychania i przyciągania pól magnetycznych wprawiają wirnik w ruch obrotowy, który powoduje przełączanie prądu w cewkach mające na celu dalsze wymuszanie ruchu

neodymowych umieszczonych w obudowie silnika (u góry po lewej); szczotki (u dołu po lewej) współpracują z komutatorem połączonym z pięcioma cewkami wirnika.



**Rysunek 22.3.** Miniaturowy silnik prądu stałego o napięciu znamionowym 1,5 V zajmuje powierzchnię nieprzekraczającą 5 cm<sup>2</sup>

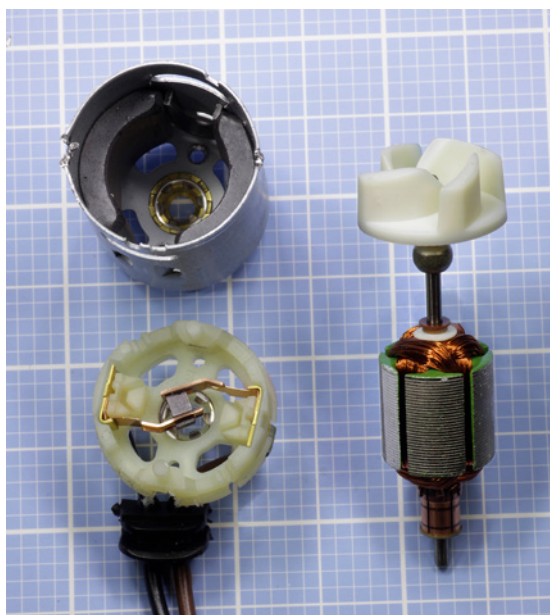
## Rodzaje

### Konfiguracje uzwojeń wirnika

Szeregowy układ cewek pokazany na rysunku 22.2 jest nazywany *połączeniem w trójkąt*. Układem alternatywnym jest *połączenie w gwiazdę*. Schematy ideowe tych układów są pokazane na rysunku 22.5. Układ trójkąta lepiej sprawdza się w silnikach wysokoobrotowych, a przy niższych obrotach generuje stosunkowo mały moment obrotowy. Połączenie w trójkąt wytwarza większy moment obrotowy przy niskich obrotach, ale przy wyższych obrotach jego możliwości są ograniczone.

### Motoreduktor

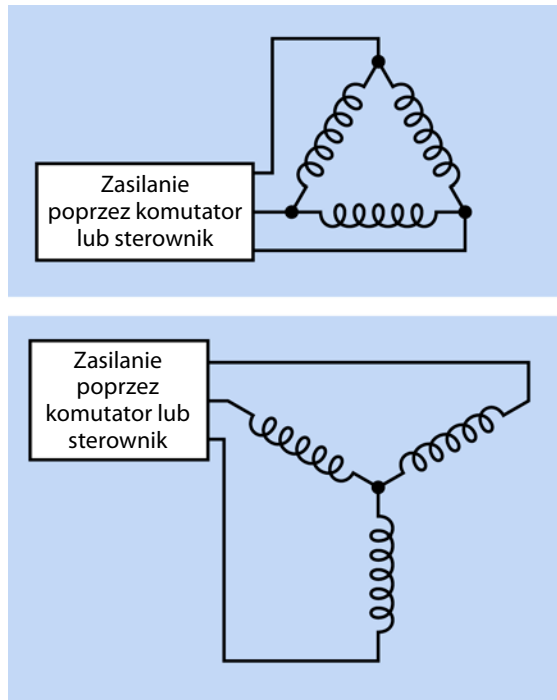
*Motoreduktor* (zwany także *silnikiem z przekładnią*) zawiera przekładnię mechaniczną obniżającą obroty w celu zwiększenia wyjściowego momentu obrotowego. Często taki zabieg jest konieczny, ponieważ w większości przypadków nominalna prędkość obrotowa silnika stałoprądowego



**Rysunek 22.4.** Tradycyjny silnik prądu stałego rozłożony na części; szczotki widoczne w lewym dolnym rogu są zamocowane w korpusie wykonanym z białego tworzywa sztucznego; pogrubione linie na papierze są w odstępach calowych (2,54 cm), a odległości pomiędzy liniami najcieńszymi wynoszą 0,1 cala (2,54 mm); silnik został wymontowany z małej pompki zębowej

zawiera się w przedziale od 3000 do 8000 rpm, co najczęściej jest zbyt dużą wartością. Zazwyczaj przekładnia i silnik są umieszczane w jednej szczelnej obudowie. Dwa przykłady takich konstrukcji są pokazane na rysunku 22.6, a budowa wewnętrzna jednej z nich — na rysunku 22.7. Po złożeniu wszystkiego w całość obie widoczne tu części przekładni ząbują się. Podobnie jak w przypadku silnika pompki zębowej magnesy stojana są zamontowane we wnętrzu obudowy. Warto zwrócić uwagę na dwa elementy zamontowane na białej plastikowej płytce razem ze szczotkami: rezystor i kondensator — ich zadaniem jest tłumienie przepięć powstających podczas przełączania cewek.

Do obniżania prędkości obrotowej zwykle stosuje się *przekładnie czołowe*. Nieco droższe są *przekładnie planetarne* (zwane też *obiegowymi*). Przekładnie czołowe, takie jak ta z rysunku 22.8, najczęściej są stosowane w zestawach po trzy lub więcej szeregowo. Całkowite przełożenie jest wtedy iloczynem przełożeń poszczególnych przekładni wchodzących w skład zestawu. I tak, jeśli zestaw składa się z trzech



**Rysunek 22.5.** Uzwojenia (cewki) wirnika tradycyjnego silnika prądu stałego mogą być połączone w trójkąt (u góry) lub gwiazdę (u dołu)



**Rysunek 22.6.** Dwa typowe motoreduktory

przekładni o przełożeniach 37 : 13, 31 : 15 i 39 : 17, to wypadkowe przełożenie będzie wynosiło:

$$R = ( 37 * 31 * 39 ) / ( 13 * 15 * 17 )$$

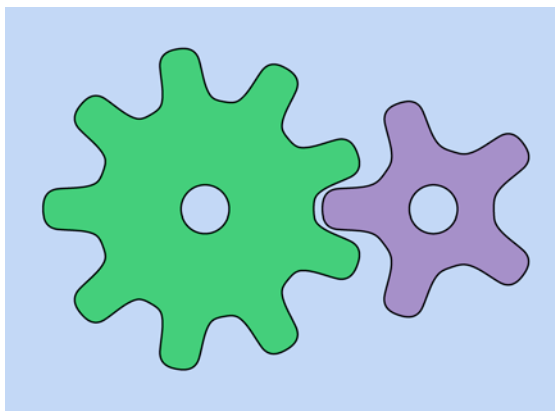


**Rysunek 22.7.** Przekładnie zębate czołowe działające w motoreduktorze zmniejszają prędkość obrotową na rzecz momentu obrotowego

czyli

$$R = 44733 / 3315 = \text{ok. } 13,5 : 1$$

W kartach produktu wartości przełożeń (R) są niemal zawsze podawane jako stosunek dwóch liczb całkowitych. Na przykład zestaw przekładni z rysunku 22.7 ma, według producenta, przełożenie 50 : 1. W rzeczywistości często są to jednak wartości ułamkowe. Ta rozbieżność bierze się stąd, że ciąg przekładni o całkowitym przełożeniu zazwyczaj ma krótszą żywotność, gdyż ewentualna wada fabryczna zęba na mniejszym kole trafia wtedy zawsze w to samo miejsce na dużym kole, a to może przyspieszać zużycie obu elementów. Dlatego liczby zębów w poszczególnych przekładniach nie mają wspólnego dzielnika (jak w przytoczonym przykładzie) i jeśli wał silnika wiruje z prędkością 500 rpm, a przełożenie nominalne wynosi 50 : 1, to raczej nie należy oczekiwać, że prędkość obrotowa na wyjściu motoreduktora będzie wynosiła dokładnie 10 rpm. Tradycyjne silniki prądu stałego raczej rzadko znajdują zastosowanie w urządzeniach



**Rysunek 22.8.** Przekładnia zębata czołowa

wymagających dużej precyzji, więc taka niedokładność nie ma wielkiego znaczenia, ale warto o niej pamiętać.

Na rysunku 22.9 pokazano *przekładnię planetarną*, zwaną także *obiegową*. Koło zewnętrzne jest nazywane *koronowym*, wewnętrzne — *słonecznym*, a koła pośrednie — *satelitami*. Te ostatnie są zamocowane na *jarzmie*. Taka przekładnia najskuteczniej obniża prędkość obrotową, jeśli silnik napędza koło słoneczne, koronowe jest nieruchome, a elementem przekazującym obroty na zewnątrz jest jarzmo satelitów. Jeśli A będzie liczbą zębów koła koronowego, a S — liczbą zębów koła słonecznego, to przełożenie wyrazi się wtedy następującym wzorem:

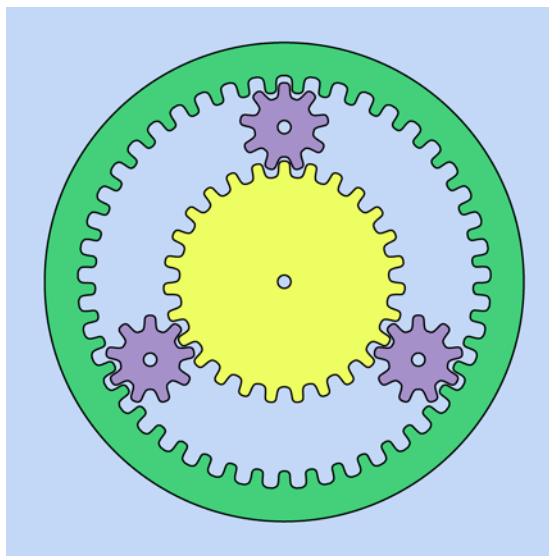
$$R = (S + A) / S$$

Ciekawe jest to, że w przekładni o opisanej konfiguracji przełożenie w ogóle nie zależy od liczby zębów kół satelitarnych. W przykładzie pokazanym na rysunku 22.9 koło słoneczne ma 27 zębów, koło koronowe ma ich 45, a zatem przełożenie wynosi tu:

$$R = (27 + 45) / 27 = \text{około } 2.7 : 1$$

Większe przełożenia można uzyskać przez łączenie przekładni satelitarnych w szereg, aby jarzmo jednej z nich napędzało koło słoneczne drugiej.

Przekładnie planetarne stosuje się głównie wtedy, gdy silnik ma pracować pod dużym obciążeniem, gdyż wtedy siła rozkłada się na większą liczbę kół zębatych, przez co zmniejsza się ryzyko uszkodzenia zębów i spowalnia się ich zużycie. Zestaw kilku przekładni planetarnych ma zwykle mniejsze



**Rysunek 22.9.** Przekładnia planetarna zwana także obiegową rozkłada moment obrotowy silnika na większą liczbę zębów niż prosta przekładnia czołowa

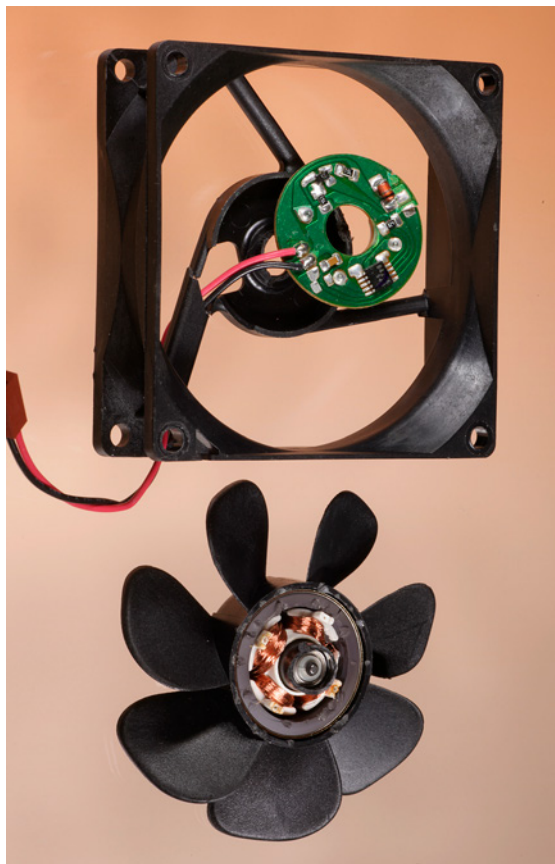
rozmiary niż zestaw przekładni czołowych. Jest jednak droższy i wprowadza nieco więcej strat energii w związku ze zwiększonym tarciem wynikającym z większej liczby współpracujących ze sobą zębów.

## Silnik bezszczotkowy

W *bezsztotkowym* silniku prądu stałego, niekiedy nazywanym *silnikiem BLDC* (od ang. *BrushLess DC motor*), cewki są rozmieszczone na wewnętrznej powierzchni stojana, a magnesy stałe są rozlokowane w wirniku. Zaletą takiego rozwiązania jest to, że cewki mogą być zasilane z pominięciem szczotek i komutatora — elementów będących najczęstszą przyczyną awarii silników tradycyjnych. Oczywiście zasilanie cewek nadal musi być odpowiednio przełączane, tyle że zamiast układu mechanicznego można zastosować przełącznik elektroniczny, wprawdzie droższy, ale za to bardziej niezawodny.

W konfiguracji o nazwie *inrunner* stojan otacza wirnik, w konfiguracji *outrunner* stojan znajduje się wewnątrz wirnika, który przybiera formę pierścienia lub walca i wiruje wokół stojana. To drugie rozwiązanie jest często stosowane w małych wentylatorach — łopatki są tu przymocowane do walcowego wirnika wyposażonego w stałe magnesy. Przykład

takiej konstrukcji pokazano na rysunku 22.10. Nieruchome cewki stojana są tu przymocowane do obudowy wentylatora (widocznej w górnej części rysunku). Ich zasilaniem steruje układ elektroniczny zmontowany na małej okrągłej zielonej płytce drukowanej.



**Rysunek 22.10.** Typowy wentylator z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego; łopatki wentylatora są zamontowane bezpośrednio na wirniku silnika

Zastosowanie półprzewodnikowych elementów przełączających do zasilania uzwojeń silnika jest określane jako *komutacja elektroniczna*. Zazwyczaj za pomocą *czujnika Halla* ustalane jest bieżące położenie wirnika i na tej podstawie ustalana jest częstotliwość komutacji, aby przełączanie wyprzedzało „o jeden krok” ruch wirnika (podczas przyspieszania) lub było z nim zsynchronizowane (w celu utrzymania stałej prędkości obrotowej). System jest porównywalny

z *silnikiem reluktacyjnym* lub *synchronicznym* — oba są opisane w rozdziale poświęconym **silnikowi prądu zmiennego**.

Tradycyjne silniki prądu stałego są produkowane i sprzedawane od końca XIX wieku, a bezszczotkowe pojawiły się dopiero w latach 60. ubiegłego wieku wraz z upowszechnieniem się elektronicznych elementów półprzewodnikowych — to dzięki nim produkcja takich silników na większą skalę stała się możliwa zarówno pod względem technicznym, jak i ekonomicznym.

## Siłownik liniowy

*Siłownik liniowy* to ogólne określenie urządzenia, które może działać siłą wzdłuż linii prostej. W zastosowaniach przemysłowych siłowniki mają zazwyczaj napęd pneumatyczny lub hydrauliczny, ale w mniejszych urządzeniach źródłem siły jest najczęściej tradycyjny silnik prądu stałego. Poprawna nazwa takich siłowników powinna brzmieć: *elektromechaniczny siłownik liniowy*, ale nie jest zbyt często stosowana.

Ruch obrotowy silnika jest zamieniany na ruch postępowy za pomocą przekładni śrubowej złożonej z nagwintowanego wału silnika i nakręcanej na ten wał nakrętki. Przekładnia jest zazwyczaj montowana w obudowie wyposażonej w *wyłączniki krańcowe*, powodujące odłączenie silnika od zasilania, gdy nakrętka osiąga swoje skrajne położenie. Ten typ wyłączników jest opisany w punkcie „Wyłączniki krańcowe” zawartym w rozdziale 6. „Przełącznik”.

## Wartości

W kartach produktu powinny być podawane wartości napięcia i prądu typowe dla umiarkowanego obciążenia silnika. Przydatna może być też wartość *prądu zatrzymania*, pobieranego przez silnik w sytuacji, gdy ze względu na zbyt duże obciążenie nie jest on w stanie obracać wału. Jeśli ta wartość nie jest podana, można ją wyznaczyć doświadczalnie przez włączenie w szereg z silnikiem amperomierza lub miernika uniwersalnego w trybie pomiaru natężenia prądu i zwiększenie obciążenia aż do całkowitego zatrzymania silnika. Silnik powinien być chroniony za pomocą **bezpiecznika** zwłocznego tolerującego wahania prądu związane z rozruchem lub zmianami obciążenia.

Istotną wartością, która powinna być podana w karcie produktu, jest *moment obrotowy* silnika. Parametr ten jest

wyrażany zasadniczo w *niutonometrach* ( $Nm$ ), choć spotyka się także starsze jednostki spoza układu SI, na przykład *kilogram razy centymetr* ( $kg\cdot cm$ ) lub *gram razy centymetr* ( $g\cdot cm$ ). Aby zrozumieć fizyczny sens momentu obrotowego, należy sobie wyobrazić poziomy pręt, którego jeden koniec jest sztywno zamocowany, a do drugiego przyczepiono obciążenie. Moment obrotowy występujący w punkcie zamocowania jest w tym przypadku równy iloczynowi długości pręta i zawieszoności na końcu obciążenia.

Jednostką momentu obrotowego (momentu siły) jest w układzie SI niuton razy metr, czyli w skrócie niutonometr. Pozaukładową jednostką jest też dyna razy metr, przy czym dyna (jednostka siły) jest 100 000 razy mniejsza od niutona — jest to siła, która ciału o masie 1 g nadaje przyspieszenie  $1\text{ m/s}^2$ .  $1\text{ Nm}$  jest równoważny w przybliżeniu  $10\,197\text{ g}\cdot\text{cm}$ .

Prędkość obrotowa tradycyjnego silnika prądu stałego może być modyfikowana przez zmianę wartości napięcia zasilającego. Gdy jednak napięcie to obniży się więcej niż do połowy wartości nominalnej, silnik może się po prostu zatrzymać.

Moc wyjściowa silnika jest równa iloczynowi jego prędkości obrotowej i momentu obrotowego osiąganego przy tej prędkości. Moc osiąga maksimum, gdy prędkość osiąga połowę swej wartości uzyskiwanej w warunkach *biegu jałowego*, a moment obrotowy — połowę swej wartości osiąganego podczas *zatrzymania*. Niestety przy tych wartościach prędkości i momentu silnik zazwyczaj wydziela znaczne ilości ciepła, przez co skraca się jego żywotność.

Małe silniki prądu stałego powinny pracować z prędkością mieszczącą się w przedziale od 70% do 90% prędkości biegu jałowego i z momentem obrotowym od 10% do 30% wartości osiąganego przy zatrzymaniu. W takich warunkach silnik osiąga maksymalną sprawność.

W przypadku silników z przekładnią obniżającą obroty wskazane jest zastosowanie napięcia zasilającego nieco niższego niż wartość znamionowa. Można dzięki temu wydłużyć żywotność urządzenia.

Przy wyborze silnika należy brać pod uwagę także dopuszczalne wartości *obciążenia osiowego* (siły działające wzdłuż osi wału silnika) i *radialnego* (siły działające prostopadle do osi wału). Wartości te powinny być podane w karcie produktu każdego silnika.

W modelarstwie lotniczym ważny jest stosunek mocy do masy silnika (wyrażany w  $W/kg$ ). Typowe wartości zawierają się w przedziale od  $25\text{ W/kg}$  do  $125\text{ W/kg}$ , przy czym im większa jest ta wartość, tym lepsze osiągi ma szansę uzyskać latający model.

W przypadku tradycyjnego silnika prądu stałego relacje między momentem obrotowym, prędkością obrotową, napięciem zasilającym i natężeniem pobieranego prądu, przy założeniu 100% sprawności, można opisać następująco:

- jeśli natężenie prądu jest stałe, moment obrotowy też jest stały, niezależnie od prędkości obrotowej;
- jeśli obciążenie silnika jest stałe (co wymusza stałość momentu obrotowego), prędkość obrotowa jest zależna od napięcia zasilającego;
- jeśli napięcie zasilające jest stałe, moment obrotowy jest odwrotnie proporcjonalny do prędkości obrotowej.

## Stosowanie

Tradycyjny silnik prądu stałego ma prostą budowę i jest tani, ale jego przeznaczeniem powinna być wyłącznie praca „dorywcza”, ponieważ szczotki i komutator ograniczają jego możliwości pracy ciągłej przez długi czas. Nie nadaje się też do zastosowań w mechanizmach precyzyjnych, gdyż jego prędkość obrotowa nie należy do parametrów, które można ustalić z dużą dokładnością.

Wraz z obniżką kosztów produkcji elektronicznych układów sterujących tradycyjne silniki prądu stałego zaczęły ustępować silnikom bezszczotkowym. Oczywiście zalety tych drugich, w postaci większej niezawodności, trwałości i dokładności, dały im pierwszeństwo w takich zastosowaniach, jak napędy dysków twardych, wentylatorów komputerowych, odtwarzaczy CD i niektórych narzędzi warsztatowych. Ze względu na dużą różnorodność rozmiarów i dobry stosunek mocy do masy są chętnie stosowane w zabawkach i małych pojazdach, od zdalnie sterowanych samochodów, samolotów i helikopterów po urządzenia transportu osobistego, takie jak elektryczne hulajnogi czy segwaye. Można je spotkać także w gramofonach z bezpośrednim napędem talerza.

Tam, gdzie wymagana jest zamiana ruchu obrotowego na postępowy, prostszym i pewniejszym rozwiązaniem jest

zastosowanie zmontowanego już *siłownika liniowego*, a nie montowanie od podstaw układu korbowego lub krzywkowego. Duże siłowniki są stosowane w automatyce przemysłowej, a małe są popularne wśród amatorów robotyki, ale znajdują zastosowanie także w drobnym sprzęcie domowym.

## Regulacja prędkości obrotowej

W szereg z silnikiem można włączyć *reostat* lub **potencjometr** i przez zmianę rezystancji sterować prędkością obrotową, ale taka metoda jest mało efektywna, ponieważ prowadzi do dodatkowych strat energii na ciepło wydzielane przez dodatkowy element oporowy. Element ten musi mieć odpowiednie parametry i najczęściej powinien być typu drutowego. W celu sprawdzenia, czy reostat jest w stanie wytrzymać obciążenie, należy zmierzyć napięcie między suwakiem a zaciskiem wejściowym oraz natężenie prądu płynącego w obwodzie.

Znacznie lepszym i zalecanym sposobem regulacji obrotów tradycyjnego silnika DC jest zasilanie impulsowe z *modulacją szerokości impulsów (PWM)*. Obwód elektryczny realizujący to zadanie jest często nazywany *przerywaczem*, gdyż przerywa stały przepływ prądu i zamienia go w przepływ impulsowy. Zazwyczaj częstotliwość impulsów jest stała, a zmienia się tylko ich szerokość (czas trwania). Od tej szerokości zależy, jak duża dawka energii zostanie przekazana do silnika przez pojedynczy impuls, a ich częstotliwość jest na tyle duża, że ciągłość ruchu wirnika jest niezakłócona.

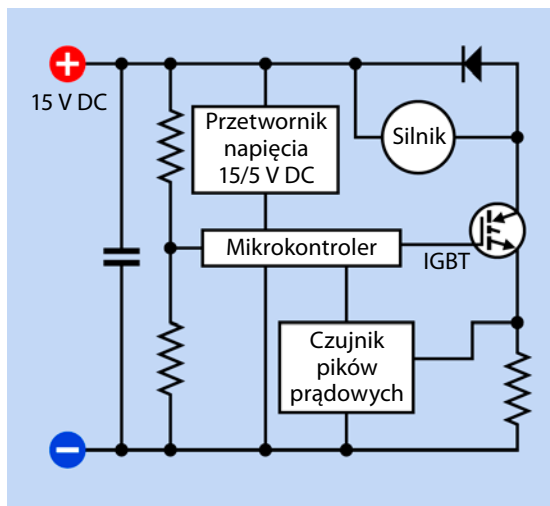
Do generowania ciągu impulsów można użyć **programowalnego tranzystora jednozłączowego (PUT)** wraz podłączonym do emitera potencjometrem. Wyjście z tranzystora można połączyć z *tyrystorem* włączonym w szereg z silnikiem lub bezpośrednio z silnikiem, jeśli ten nie jest duży (patrz rysunek 27.6).

Można też zastosować *timer 555* jako generator impulsów sterujących tranzystorem *MOSFET* połączonym szeregowo z silnikiem.

Źródłem impulsów może być także **mikrokontroler**. Wiele mikrokontrolerów ma już wbudowany obwód PWM. Zastosowanie mikrokontrolera wiąże się z koniecznością zapewnienia mu stabilizowanego zasilania (zazwyczaj 5 V DC, 3,3 V Dc lub jeszcze mniej) i użycia przełącznika elektronicznego, w postaci na przykład *tranzystora bipolarnego*

*z izolowaną bramką (IGBT)*, zdolnego do przełączania większych prądów i wytrzymującego przepięcia wywoływane indukcyjnym charakterem obciążenia. Wszystko to zwiększa koszty układu, ale mimo to w wielu nowoczesnych urządzeniach mikrokontrolery są stosowane choćby po to, żeby umożliwić obsługę większej liczby poleceń użytkownika. Zaletą takiego rozwiązania jest również to, że w przypadku konieczności wymiany silnika na inny model lub zmodyfikowania układu sterującego wystarczy dokonać stosownej korekty w programie nadzorującym pracę mikrokontrolera. Ponadto mikrokontroler umożliwia wprowadzanie bardziej zaawansowanych funkcji, takich jak realizacja ustalonych z góry sekwencji zmian prędkości obrotowej, przechowywanie w pamięci rozmaitych ustawień wprowadzonych przez użytkownika czy reagowanie na zmiany warunków pracy urządzenia — na przykład wzrost zapotrzebowania na energię lub podwyższona temperatura silnika.

Schemat układu PWM pracującego w oparciu o mikrokontroler i tranzystor bipolarny z izolowaną bramką jest pokazany na rysunku 22.11.

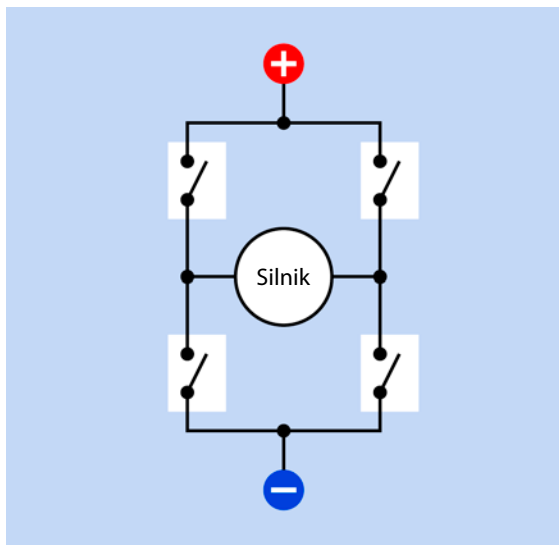


**Rysunek 22.11.** Schemat przykładowego układu sterowania silnikiem prądu stałego metodą PWM z użyciem mikrokontrolera i tranzystora bipolarnego z izolowaną bramką

## Sterowanie bezpośrednie

Do odwracania kierunku obrotów silnika prądu stałego od dawna jest stosowany układ zwany *mostkiem H*, którego

schemat pokazano na rysunku 22.12. Aby włączyć silnik, zamykana jest jedna para przełączników położonych naprzeciw siebie po przekątnej, a druga para pozostaje otwarta. W celu odwrócenia kierunku obrotów należy zmienić stan wszystkich przełączników na przeciwny. Układ jest dość prymitywny, ale jego nazwa jest wciąż używana, nawet w odniesieniu do układów scalonych, takich jak LMD18200 produkowany przez firmę National Semiconductor.

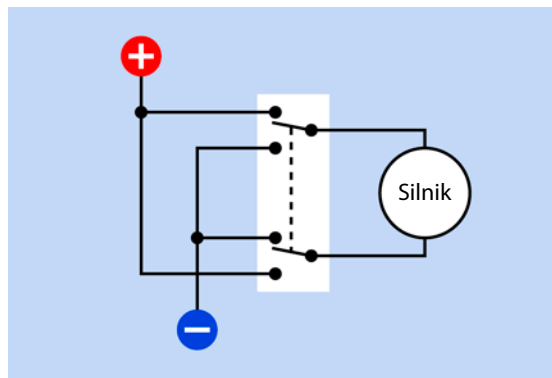


**Rysunek 22.12.** Za pomocą tego prostego układu można odwracać kierunek obrotów silnika prądu stałego; należy w tym celu zamknąć odpowiednią parę przełączników leżących naprzeciw siebie po przekątnej

Ten sam rezultat można osiągnąć za pomocą **przełącznika** lub **przełącznika** o dwóch biegunach i podwójnych terminalach, co pokazano na rysunku 22.13.

## Wyłączniki krańcowe

Tradycyjny silnik prądu stałego pracujący w trybie „tam i z powrotem” powinien współpracować z **wyłącznikami krańcowymi**, które zabezpieczą go przed przeciążeniem po osiągnięciu położenia skrajnego. Wyłączniki krańcowe są opisane w punkcie „Wyłączniki krańcowe” należącym do rozdziału 6, „Przełącznik”.



**Rysunek 22.13.** Przełącznik lub przełącznik typu DPDT może odwracać kierunek obrotów tradycyjnego silnika DC przez przełączanie biegunów zasilania

## Możliwe błędy

### Szczotki i komutator

Główną przyczyną awarii silnika prądu stałego jest ścieranie się szczotek oraz zużywanie, utlenianie i zabrudzanie komutatora. W niektórych silnikach istnieje możliwość wymiany szczotek, ale w modelach uszczelnianych i wyposażonych w przekładnię na ogół jest to niemożliwe. Do szybkiego zużywania się szczotek i komutatora przyczyniają się zarówno duży prąd, jak i duża prędkość obrotowa.

### Szum elektryczny

Przerwy w połączeniu szczotek z segmentami komutatora tradycyjnego silnika DC mogą indukować impulsy napięciowe, które mogą docierać aż do źródła zasilania, wywołując po drodze trudne do przewidzenia efekty w innych elementach obwodu. Iskrzenie na komutatorze może być źródłem silnych **zakłóceń elektromagnetycznych (EMI)**, zwłaszcza jeśli użyto tanich, niskiej jakości szczotek. Nawet wtedy, gdy współpraca szczotek z komutatorem przebiega gładko, to i tak gwałtowne zaniki zasilania cewek wywołują indukowanie się w nich silnych impulsów napięciowych, które mogą się rozprzestrzeniać po całym układzie.

Przewody zasilające silnik powinny być ze sobą splecione, aby emitowane przez nie zakłócenia wzajemnie się redukowały. Należy je układać z dala od szyn danych i linii wyjściowych z enkodera, a w razie potrzeby trzeba je ekranować.

Linie przesyłowe danych od czujników w silnikach bezszczotkowych też mogą wymagać ekranowania.

Kondensator podłączony do zacisków silnika może znacząco zredukować zakłócenia elektromagnetyczne. Niektóre silniki mają już taki kondensator wbudowany. Żeby to stwierdzić, trzeba niekiedy rozmontować obudowę silnika.

## Efekty cieplne

W świecie rzeczywistym żaden silnik nie ma sprawności na poziomie 100%, a to oznacza, że część energii pobieranej przez pracujące urządzenie jest rozpraszana w postaci ciepła. Wzrost temperatury uzwojeń silnika powoduje wzrost ich rezystancji i tym samym zmniejszenie natężenia płynącego przez nie prądu, a konsekwencją tego jest osłabienie wytwarzanego przez nie pola magnetycznego. Sprawność silnika spada, a to prowadzi do dalszego pogorszenia sytuacji. Podawane przez producenta dane na temat maksymalnej temperatury silnika należy traktować bardzo poważnie.

Najbardziej wrażliwym na wzrost temperatury elementem silnika jest izolacja uzwojeń. Zwarcie sąsiadujących ze sobą zwojów będące skutkiem uszkodzenia tej izolacji prowadzi do zwiększonego poboru energii i wydzielania jeszcze większej ilości ciepła.

Miejsca, w których obudowa silnika ma wystające ożebrowanie pełniące funkcję radiatora, powinny mieć dostęp do powietrza otaczającego silnik.

Częste zatrzymywanie, uruchamianie i odwracanie kierunku obrotów generuje udary prądowe, a te przyczyniają się do wzrostu temperatury silnika i obniżają jego niezawodność.

## Warunki zewnętrzne

Ciepłe i suche środowisko powoduje szybsze wysychanie smaru w łożyskach, a w środowisku zimnym i wilgotnym smar gęstnieje i zwiększa opory ruchu. Jeśli silnik ma pracować w środowisku nietypowym, należy zasięgnąć porady u producenta.

## Źle dobrany wał silnika

Silniki mają rozmaite wały różniące się średnicą, długością i przekrojem — ten może mieć kształt litery D lub szereg wypustek na obwodzie ułatwiających mocowanie osprzętu

w postaci kół zębatych lub pasowych i sprzęgieł. Przed zakupem należy dokładnie sprawdzić w karcie produktu, czy silnik o danym numerze ma rzeczywiście wał odpowiadający naszym potrzebom. W sklepach dla elektroników hobbyistów często są oferowane gotowe elementy osprzętu pasujące do danego typu silnika.

## Niewłaściwe mocowanie silnika

Uchwyty lub kołnierze mocujące mogą być dostarczane wraz z silnikiem, ale nie muszą, a nawet jeśli są dostarczane, to niekoniecznie muszą odpowiadać konkretnym potrzebom. Zazwyczaj ten sam silnik jest dostępny w różnych wersjach montażowych, których numery katalogowe różnią się tylko jedną cyfrą bądź literą. Wersja sprzedawana w przeszłości może być już wycofana z produkcji lub zastąpiona inną. Przed zakupem warto wszystko dokładnie sprawdzić w karcie produktu.

## Luz kątowy

*Luz kątowy* może występować w przekładni i zazwyczaj jest następstwem luzów pomiędzy współpracującymi ze sobą zębami. Szczególnie duży bywa w przekładniach wielostopniowych, które służą do znacznego obniżania prędkości obrotowej. Jego wartość mierzona na wałku wyjściowym zwykle zawiera się w przedziale od 1° do 7° i ma tendencję do powiększania się wraz ze wzrostem obciążenia silnika. Jeśli taki silnik (z przekładnią) ma służyć do dokładnego ustawiania jakiegoś urządzenia i w związku z tym został wyposażony w enkoder zliczający obroty wału silnika, układ sterujący może wymuszać ruchy tam i z powrotem, usiłując zlikwidować niedokładności wynikające z istnienia luzu kąтового. W takich zastosowaniach lepiej sprawdzają się **silniki krokowe** lub **siłowniki**.

## Łożyska

Jeśli silnik nie jest przystosowany do pracy przy dużych obciążeniach osiowych, można łatwo uszkodzić jego łożyska podczas montowania osprzętu, na przykład przez nakładanie koła zębatego lub pasowego ze zbyt dużą siłą. Nawet niewielkie uszkodzenie może generować silny hałas łożyska (patrz punkt następny) i skracać jego żywotność.

W przypadku silników bezszczotkowych najczęstszą przyczyną awarii jest zużywanie się łożysk. Próby naprawiania

tych elementów przez ich otwieranie i zwiększanie ilości smaru z reguły nie przynoszą oczekiwanych rezultatów i są tylko stratą czasu.

### **Nadmierny hałas**

Silniki elektryczne z reguły uważa się za urządzenia ciche, ale niekiedy hałas łożysk i przekładni wzmocniony przez obudowę funkcjonującą jak pudło rezonansowe może być dość duży. Hałas przekładni jest ich cechą immanentną, a łożyska zaczynają hałasować po pewnym czasie i w miarę upływu czasu stają się coraz głośniejsze.

Jeśli urządzenie zawiera kilka silników i na dodatek ma być używane w pobliżu osób szczególnie wrażliwych na hałas (na przykład w środowisku medycznym), należy dołożyć wszelkich starań, aby wały silników były należycie wyważone, a same silniki zamontowane na gumowych podkładkach lub w specjalnych tulejach tłumiących wibracje.



# Silnik prądu przemiennego

Rozróżnienie między silnikami prądu przemiennego i stałego staje się coraz mniej oczywiste, ponieważ w silnikach DC coraz częściej wykorzystuje się impulsy o modulowanej szerokości, które można uznać za swoistą postać prądu przemiennego. Wszystkie silniki zasilane prądem stałym opisano w rozdziale 22., „Silnik prądu stałego”, nawet jeśli są wyposażone w wewnętrzne układy modulujące moc. **Silniki krokowe** i **serwomotory** są traktowane jako odrębne przypadki, dlatego poświęcono im osobne rozdziały. Opisywane tutaj silniki prądu przemiennego to takie urządzenia, które pobierają prąd przemienny zwykle o przebiegu sinusoidalnym i stałej częstotliwości.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **silnik prądu stałego** (rozdział 22.),
- **silnik krokowy** (rozdział 25.),
- **serwomotor** (rozdział 24.).

## Funkcja

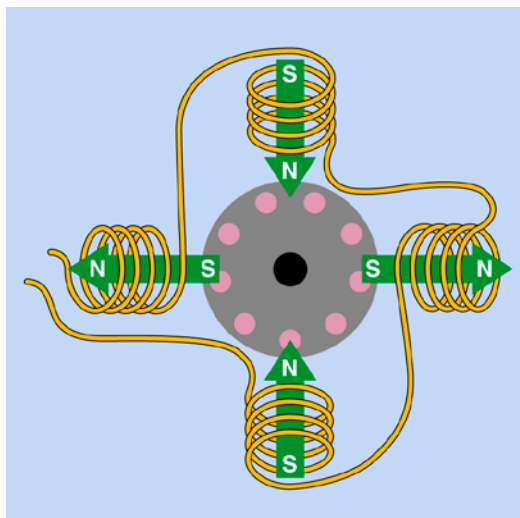
Silnik AC wykorzystuje prąd przemienny do wytwarzania zmiennego pola magnetycznego obracającego wał.

## Działanie

Silnik składa się z dwóch zasadniczych części: *stojana* (zwanego też *statorem*), który jest elementem nieruchomym, oraz obracającego się w jego wnętrzu *wirnika* (*rotora*). Prąd przemienny przepływający przez jedną lub kilka cewek w stojanie generuje zmienne pola magnetyczne oddziałujące na wirnik. Uproszczony schemat takiego silnika pokazano na rysunku 23.1 — cewki wytwarzają siły magnetyczne oznaczone zielonymi strzałkami (N oznacza biegun północny, a S — południowy).

## Budowa stojana

Wentylatory elektryczne zazwyczaj mają wbudowane silniki AC. Na rysunku 23.2 pokazano stojan dużego wentylatora elektrycznego, w którym duże średnice poszczególnych cewek zwiększają siłę pola magnetycznego. Rysunek 23.3 przedstawia z kolei stojan mniejszego wentylatora



**Rysunek 23.1.** Uproszczony schemat prostego silnika AC; zielonymi strzałkami oznaczono kierunki działania siły magnetycznej

wykonany tylko z jednej cewki (jest ona owinięta czarną taśmą izolacyjną).

Rdzeń stojana przypomina rdzeń **transformatora** w tym względzie, że zwykle składa się ze stosu płytek wykonanych



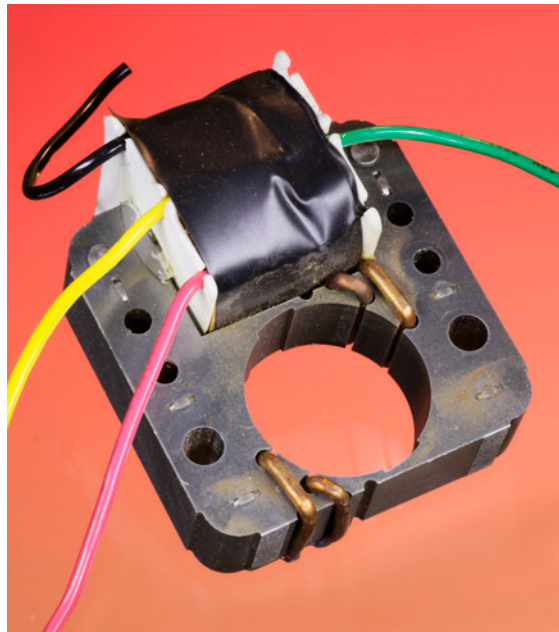
**Rysunek 23.2.** Stojan dużego wentylatora elektrycznego; każda cewka z drutu miedzianego jest wycentrowana na wypuszczeniu rdzenia skierowanym do środkowego otworu, w którym montuje się wirnik; cewki nachodzą na siebie, ponieważ ich średnice są zwiększone w celu zmaksymalizowania siły magnetycznej; każda z nich ma odczepy umożliwiające skokową zmianę prędkości za pomocą zewnętrznego przełącznika obrotowego

ze stali wysokokrzemowej (a czasami z aluminium lub żeliwa). Poszczególne płytki są od siebie izolowane cienkimi warstwami szelaku (lub podobnego materiału) zapobiegającymi powstawaniu prądów wirowych, które mogłyby krążyć wzdłuż całej grubości stojana i zmniejszać jego skuteczność.

Cewka lub cewki nawinięte na stojanie często nazywa się *uzwojeniami wzbudzającymi* lub *polowymi*, ponieważ wzbudzają one pole magnetyczne napędzające silnik.

## Budowa wirnika

W przypadku większości silników AC wirnik nie zawiera żadnych cewek ani nie jest w żaden sposób połączony elektrycznie z pozostałą częścią silnika. Jest napędzany wyłącznie przez indukcję magnetyczną i dlatego często jest nazywany *silnikiem indukcyjnym*.

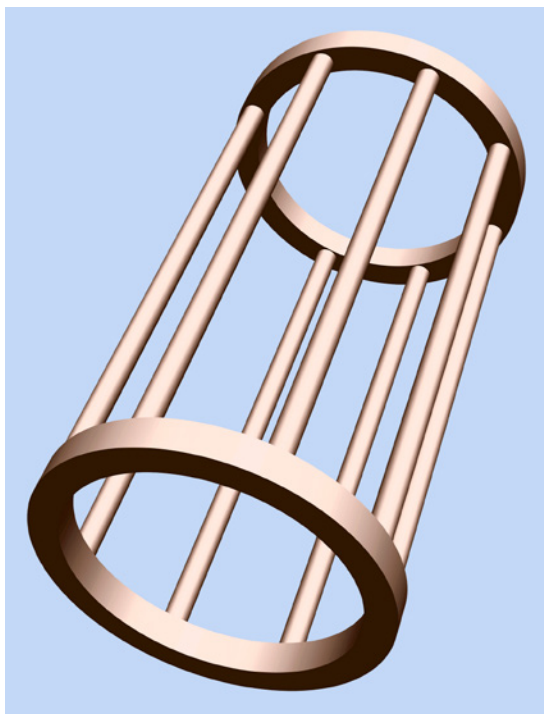


**Rysunek 23.3.** Stojan mniejszego wentylatora elektrycznego zawiera tylko jedną cewkę, która tutaj jest owinięta czarną taśmą; takie rozwiązanie wystarcza do indukowania pola magnetycznego, ale zasadniczo jest mniej efektywne niż w przypadku silników zawierających wiele cewek

Gdy prąd przemienny zmienia wartość z dodatniej na ujemną, siła magnetyczna wytwarzana w stojanie zanika i jednocześnie powstaje nowe pole o przeciwnej biegunowości. Ponieważ konstrukcja stojana powoduje, że wytwarza on pole asymetryczne, w wirniku indukowane jest wirujące pole magnetyczne. Koncepcja wirującego pola magnetycznego stanowi podstawę działania silników AC.

Podobnie jak stojan, wirnik jest wykonany z płytek ze stali wysokokrzemowej; w płytkach wbudowane są pręty niemagnetyczne, zwykle wykonane z aluminium (a czasami z miedzi), które ułożone są zasadniczo równoległe do osi obrotu. Pręty są zakończone pierścieniami po obu stronach wirnika, tworząc przewodzącą „klatkę”. Z tego powodu takie urządzenie często nazywa się *silnikiem klatkowym*.

Na rysunku 23.4 pokazano konstrukcję klatki wirnika ze zdemontowanymi płytami stalowymi w celu zwiększenia przejrzystości. W rzeczywistości pręty klatki są niemal zawsze ustawione nieco pod kątem (patrz rysunek 23.5). Taka orientacja poprawia płynność pracy i ogranicza zakleszczenia



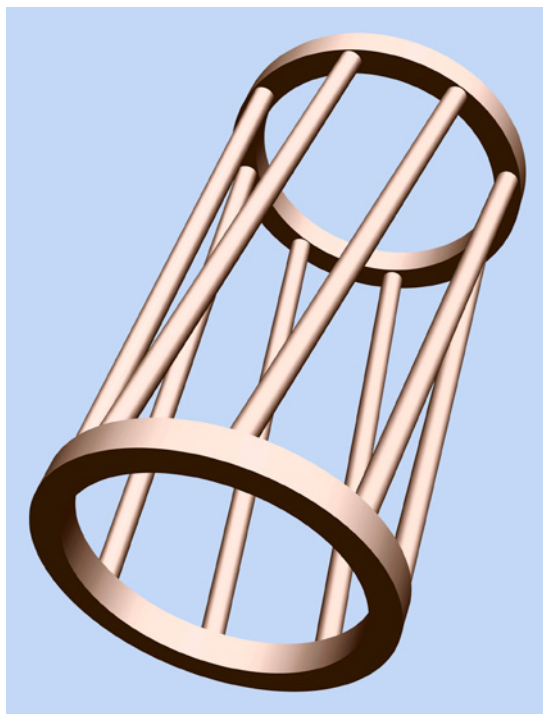
**Rysunek 23.4.** Wirnik typowego silnika AC zawiera klatkę z aluminium (a czasami z miedzi), w której występują prądy wirowe będące wynikiem wirującego pola magnetycznego wewnątrz stalowego korpusu wirnika (którego nie pokazano w celu zachowania przejrzystości rysunku); prądy te generują własne pola magnetyczne, które oddziałują z polami pochodzącymi od cewek stojana

silnika lub wahania momentu obrotowego, które mogłyby występować w przeciwnym razie.

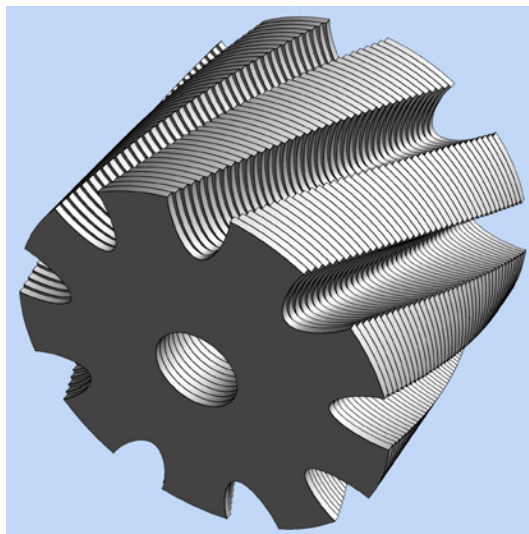
Na rysunku 23.6 pokazano stalowe płytki wirnika, które zawierają specjalne wyżłobienia na ułożone ukośnie pręty aluminiowej klatki. Rysunek 23.7 przedstawia przekrój poprzeczny wirnika z prętami klatki (w kolorze bladoczerwonym) oraz płytką stalową (w kolorze szarym).

Rzeczywisty wirnik silnika indukcyjnego pokazano na rysunku 23.8. Został on wyjęty ze stojana przedstawionego na rysunku 23.3. Łożyska widoczne na obu końcach wirnika były wcześniej przykręcone do stojana.

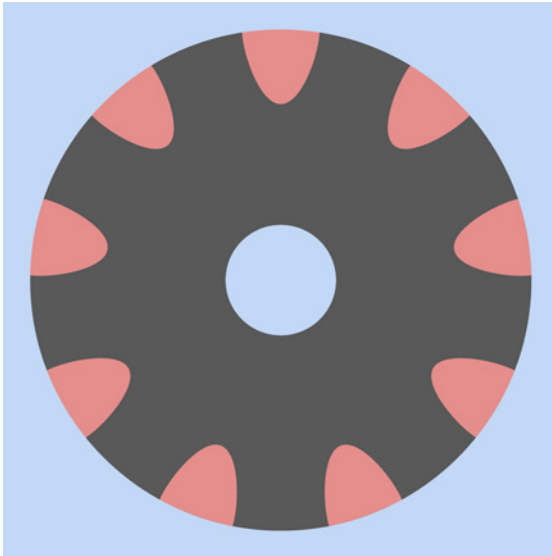
Klatka jest wykonana z materiału niemagnetycznego, który jest jednak przewodnikiem elektrycznym. Dzięki temu wirujące pole magnetyczne indukowane w stalowej części wirnika generuje w klatce wtórny prąd elektryczny o istotnej



**Rysunek 23.5.** Aby zapewnić płynniejszą pracę silnika, wzdlużne elementy klatki są zwykle ułożone ukośnie



**Rysunek 23.6.** Jak widać, stalowe płytki wirnika silnika AC są zazwyczaj przesunięte względem siebie, a powstałe w ten sposób ukośne kanały stanowią miejsce dla aluminiowych lub miedzianych prętów klatki



**Rysunek 23.7.** Przekrój poprzeczny wirnika ze stalowymi płytkami (kolor szary) oraz osadzonymi w nich elementami aluminiowej klatki (kolor bladoczerwony)

wartości tak długo, jak pole magnetyczne wewnątrz wirnika będzie wirować szybciej niż sam wirnik. Prąd płynący w podłużnych elementach klatki wytwarza własne pole magnetyczne, które oddziałuje z polami generowanymi przez cewki stojana. Siły przyciągania i odpychania między tymi polami powodują obracanie się wirnika.

Należy zauważyć, że jeśli prędkość obrotowa wirnika wzrośnie do poziomu odpowiadającego częstotliwości prądu przemiennego zasilającego cewki stojana, wówczas klatka silnika nie będzie obracana przez siłę magnetyczną i przestanie pobierać energię z pola. W przypadku idealnego silnika pozbawionego tarcia prędkość obrotowa biegu jałowego (bez obciążenia) byłaby w równowadze z częstotliwością prądu przemiennego. W rzeczywistości silnik indukcyjny nawet nie zbliża się do takiej prędkości.

Po doprowadzeniu zasilania do silnika pozostającego w stanie spoczynku pobiera on prąd rozruchowy o dużym natężeniu, podobnie jak w przypadku zwartego **transformatora**. Pod względem elektrycznym cewki stojana można porównać do uzwojenia pierwotnego w transformatorze, natomiast klatka wirnika jest odpowiednikiem uzwojenia wtórnego. Moment obrotowy indukowany w nieruchomym wirniku nosi nazwę **momentu rozruchowego**. Potem, gdy

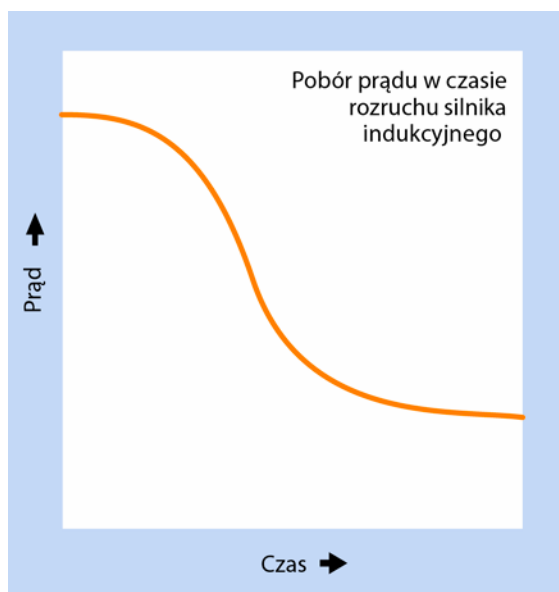


**Rysunek 23.8.** Wirnik silnika niewielkiego wentylatora; aluminiowa klatka wraz z zakończeniami mają kolor jasnoszary, natomiast stalowe płytki mają ciemniejszy odcień

prędkość silnika zaczyna rosnąć, zapotrzebowanie na energię maleje (patrz rysunek 23.9).

Po włączeniu silnika i podłączeniu go do obciążenia mechanicznego prędkość obrotowa maleje. Wraz ze spadkiem prędkości klatka wirnika wykonana z przewodników będzie pobierać więcej energii, ponieważ będzie obracać się wolniej niż wirujące pole magnetyczne. Prędkość wirowania pola jest determinowana częstotliwością prądu przemiennego, a zatem jest wartością stałą. Różnicę między prędkością wirowania pola magnetycznego a prędkością obrotową wirnika nazywa się **poślizgiem**. Większy poślizg generuje większą moc, dzięki czemu silnik indukcyjny może automatycznie uzyskiwać stan równowagi dla każdego obciążenia mieszczącego się w zakresie znamionowym.

Niewielki silnik indukcyjny pracujący pod pełnym obciążeniem może mieć wartość poślizgu na poziomie od 4% do 6%. W większych silnikach wartości te będą niższe.



**Rysunek 23.9.** Przybliżony wykres typowego poboru prądu przez silnik indukcyjny podczas rozruchu ze stanu spoczynkowego aż do osiągnięcia prędkości docelowej

## Rodzaje

Odmiany podstawowego silnika indukcyjnego opisywane powyżej są najczęściej zasilane *jedno-* lub *trójfazowym* prądem przemiennym.

*Silnik synchroniczny* to typ urządzenia, w którym wirnik zachowuje stałą prędkość obrotową niezależnie od niewielkich wahań obciążenia.

Niektóre silniki AC są wyposażone w *komutator*, który umożliwia zewnętrzne połączenie z cewkami zamontowanymi na wirniku, dzięki czemu możliwa jest regulacja prędkości obrotowej.

*Silnik liniowy* może zawierać dwa rzędy cewek zasilanych sekwencją impulsów, które przesuwają magnesy stałe lub elektromagnes od jednej cewki do drugiej. Ewentualnie cewki takiego silnika mogą poruszać się na skutek oddziaływania magnetycznego ze stacjonarną szyną podzieloną na segmenty. Szczegółowy opis silników liniowych nie należy jednak do zakresu niniejszej *Encyklopedii*.

## Jednofazowy silnik indukcyjny

Większość silników indukcyjnych jest zasilana jednofazowym prądem przemiennym (zwykle doprowadzanym ze zwykłego gniazdka elektrycznego). W takim rodzaju silnika nie jest jednak możliwy rozruch samoistny, ponieważ cewki stojana i wirnik są symetryczne. Taki układ prowadzi raczej do generowania drgań, a nie obrotu.

W celu umożliwienia inicjacji ruchu obrotowego modyfikuje się budowę stojana w taki sposób, aby generował asymetryczne pole magnetyczne, którego siły mają różne wartości w różnych kierunkach. Najprościej można to uzyskać, dodając do stojana jeden lub kilka *zwojów zwartych*. Każdy taki zwoj często jest po prostu okręgiem wykonanym z grubego przewodu miedzianego. Takie rozwiązanie zmniejsza sprawność silnika i negatywnie wpływa na jego moment rozruchowy, dlatego stosuje się je w niewielkich urządzeniach, na przykład wentylatorach elektrycznych, w których moment przy niskich obrotach nie jest istotny. Ze względu na to, że zwoje zwarte blokują pewną część pola magnetycznego, taką konfigurację często nazywa się silnikiem *zwartobiegunowym*.

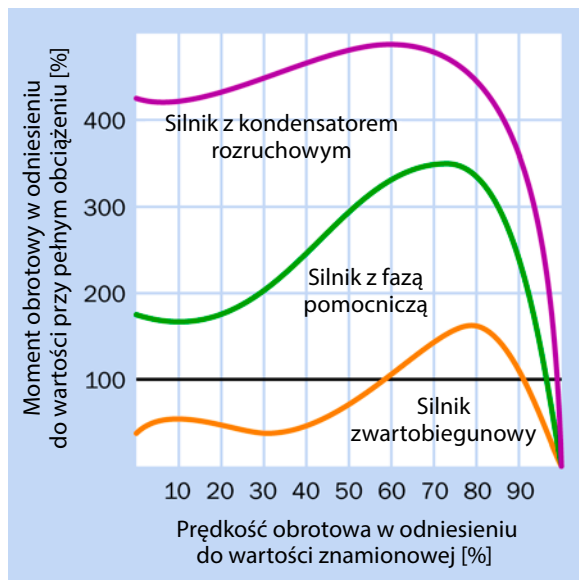
Miedziane zwoje zwarte widać w silniku wentylatora pokazanym na rysunku 23.3.

Droższą, ale bardziej wydajną alternatywą dla zwoju zwartego jest **kondensator**. Jeśli zasilanie jednej lub kilku cewek stojana będzie doprowadzane poprzez kondensator, wywoła on przesunięcie fazowe między tymi cewkami a wszystkimi pozostałymi, w rezultacie czego powstanie asymetryczne pole magnetyczne. Gdy silnik osiągnie około 80% swojej nominalnej prędkości roboczej, kondensator, który przestanie być już potrzebny, można wyłączyć z obrotu za pomocą zamontowanego dodatkowo wyłącznika odśrodkowego. Odłączenie kondensatora i zastąpienie go bezpośrednim podłączeniem do cewek stojana pozwoli zwiększyć sprawność silnika.

Trzecią możliwością rozruchu silnika jest dodanie drugiego uzwojenia do stojana. Taką cewkę wykonuje się z kilku zwojów przewodu o mniejszym przekroju i większej rezystancji niż uzwojenie główne. W rezultacie pole magnetyczne będzie skierowane ukośnie, ułatwiając rozruch silnika. Taka konfiguracja nosi nazwę silnika indukcyjnego z *fazą pomocniczą*. Uzwojenie rozruchowe w takim rozwiązaniu często określa się mianem *uzwojenia pomocniczego*. Stanowi

ono około 30% wszystkich uzwojeń stojana. Także w takim układzie można zastosować wyłącznik odśrodkowy, który będzie odłączać uzwojenie pomocnicze, gdy prędkość obrotowa silnika osiągnie od 75 do 80% wartości nominalnej.

Związek między prędkością silnika a momentem obrotowym dla opisanych powyżej rodzajów silników pokazano na rysunku 23.10. Pokazane krzywe są uproszczone i nie uwzględniają wpływu wyłącznika odśrodkowego, jeśli byłby on zamontowany.



**Rysunek 23.10.** Przybliżone krzywe przedstawiające zależność między prędkością a momentem obrotowym dla trzech rodzajów jednofazowego silnika indukcyjnego (wykres pochodzi z artykułu *AC Induction Motor Fundamentals* opublikowanego przez firmę *Microchip Technology Inc.*)

## Trójfazowy silnik indukcyjny

Większe silniki indukcyjne często są urządzeniami trójfazowymi. Trójfazowy prąd przemienny (który jest, jak dotąd, najbardziej rozpowszechnioną postacią wielofazowego prądu przemiennego) dociera do odbiorców z elektrowni lub prądniczy za pośrednictwem trzech przewodów, z których każdy przewodzi prąd przemienny przesunięty w fazie o  $120^\circ$  względem dwóch pozostałych. Zwykle takie instalacje wykorzystuje się w zastosowaniach przemysłowych. Popularną konfigurację cewek stojana w silniku trójfazowym pokazano

na rysunku 23.11. Ponieważ w trzech przewodach napięcie szczytowe występuje sekwencyjnie, takie rozwiązanie doskonale nadaje się do rozruchu silnika bez potrzeby stosowania zwojów zwartych czy kondensatora. Potężne trójfazowe silniki indukcyjne są urządzeniami bezszczotkowymi i na ogół bezobsługowymi.

## Silnik synchroniczny

Silnik synchroniczny jest rodzajem urządzenia indukcyjnego, które osiąga stan równowagi, gdy wirnik obraca się w doskonałej synchronizacji z częstotliwością zasilającego prądu przemiennego. Prędkość obrotowa zależy od liczby biegunów (cewek magnetycznych) w stojanie oraz liczby faz zasilania. Jeśli przez  $R$  oznaczymy prędkość obrotową silnika synchronicznego, przez  $f$  częstotliwość prądu przemiennego wyrażoną w hercach, a przez  $p$  liczbę biegunów przypadających na jedną fazę, wówczas:

$$R = (120 * f) / p$$

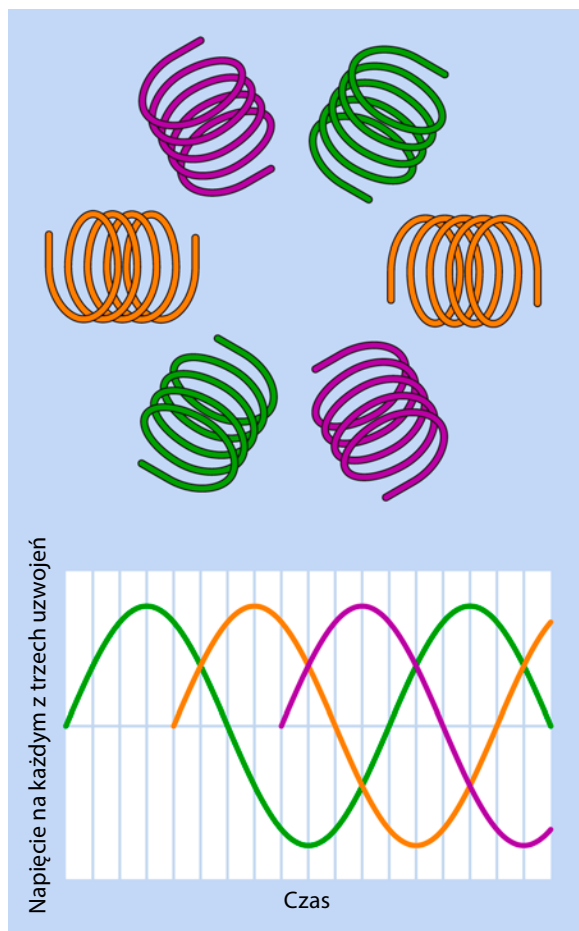
W powyższym wzorze przyjęto częstotliwość prądu AC równą 60 Hz. Dla krajów korzystających z prądu o częstotliwości 50 Hz wartość 120 należy zastąpić liczbą 100.

Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje silników synchronicznych: *wzbudzone prądem stałym*, które wymagają zewnętrznego zasilania do rozpoczęcia ruchu obrotowego, oraz *niewzbudzone*, które są maszynami o rozruchu samoczynnym. Ponieważ w elektronice częściej stosuje się silniki synchroniczne niewzbudzone, w niniejszej *Encyklopedii* pominięto opisy odmian wzbudzanych prądem stałym.

Silnik histerezowy to silnik synchroniczny, który zawiera monolityczny wirnik ze stali kobaltowej charakteryzującej się wysoką koercją magnetyczną. Oznacza to, że do odwrócenia biegunów magnetycznych wymagane jest silne pole. W rezultacie biegunowość wirnika ulega zmianom z opóźnieniem względem stale zmieniającej się biegunowości stojana, co skutkuje powstawaniem siły przyciągania obracającej wirnik. Ze względu na to, że kąt opóźnienia jest niezależny od prędkości silnika, już od momentu rozruchu generowany jest stały moment obrotowy.

## Silnik reluktancyjny

*Reluktancja* to odpowiednik magnetyczny rezystancji elektrycznej. Jeśli kawałek żelaza będzie mógł się swobodnie



**Rysunek 23.11.** Wykres przedstawia napięcie w trzech przewodach tworzących trójfazową instalację zasilania (kolory krzywych dobrano w sposób dowolny); silnik trójfazowy zawiera liczbę cewek będącą wielokrotnością trójki — najczęściej jest ich sześć, jak pokazano na grafice; trzy przewody zasilania są podłączone bezpośrednio do cewek, które indukują wirujące pole magnetyczne

poruszać w polu magnetycznym, będzie dążyć do takiego ułożenia się względem pola, aby zminimalizować reluktancję obwodu magnetycznego. Taką zasadę stosowano w pierwszych silnikach reluktancyjnych zasilanych prądem przemiennym. Obecnie, gdy układy elektroniczne sterujące napędami o zmiennej częstotliwości są znacznie tańsze, znów do niej powrócono.

Najprostszy silnik reluktancyjny zawiera wirnik wykonany z miękkiego ferromagnetyka i zaopatrzony w wystające

wypusty. Wirnik ten obraca się w stojanie, który generuje pole magnetyczne ze skierowanymi do wewnątrz biegunami. Wirnik przez cały czas dąży do wyrównania wypustów z biegunami stojana i tym samym do zmniejszenia reluktancji.

Budowę prostego silnika reluktancyjnego pokazano na rysunku 25.2 zamieszczonym w rozdziale 25., „Silnik krokowy”, ponieważ właśnie ten silnik stanowi podstawowe zastosowanie zasady reluktancyjnej.

Choć silniki reluktancyjne można zasilac wielofazowym prądem przemiennym o stałej częstotliwości, największe korzyści płyną z ich stosowania w napędach o zmiennej częstotliwości prądu. Częstotliwość ta jest regulowana prędkością silnika mierzoną przez czujnik. Dzięki temu impulsy zasilające mogą być ciągle „o krok” przed wirnikiem. Ze względu na to, że wirnik nie jest magnesem, nie generuje siły przeciw elektromotorycznej, a to oznacza, że silnik może osiągać bardzo duże prędkości.

Prosta budowa samego silnika — bez komutatora, szczotek, magnesów i cewek wirnika — stanowi czynnik równoważący koszty wymaganych układów elektronicznych. Silniki reluktancyjne mają następujące zalety:

- tanie części, łatwe metody wytwarzania oraz wysoka niezawodność;
- kompaktowe rozmiary i niewielka masa;
- sprawność nawet na poziomie przekraczającym 90%;
- możliwość uzyskania wysokiego momentu rozruchowego i wysokiej prędkości roboczej.

Do wad takich silników należą hałas, zakleszczanie się oraz konieczność ścisłego przestrzegania tolerancji wymiarowych związana z wymogiem zachowania jak najmniejszej szczeliny powietrznej między wirnikiem a stojanem.

Silnik reluktancyjny może działać w sposób synchroniczny, jeśli zostanie odpowiednio zaprojektowany.

## Napęd o zmiennej częstotliwości

Z prostymi silnikami indukcyjnymi wiążą się dość poważne problemy. Nagły wzrost energii pobieranej podczas rozruchu może obniżyć napięcie zasilania w takim stopniu, że wpłynie to na pozostałe urządzenia podłączone do tej samej instalacji zasilającej (po włączeniu sprężarki w układzie klimatyzacji

lub zamrażarce może na przykład wystąpić krótkotrwałe przygaszenie oświetlenia). Pracujący silnik może generować zakłócenia elektryczne, które na zasadzie sprzężenia zwrotnego powracają do źródła zasilania i tym samym mają negatywny wpływ także na pozostałe urządzenia. Problemem jest również wąski zakres możliwych prędkości silnika indukcyjnego.

Pojawienie się na rynku tanich półprzewodników przyczyniło się do powstania *źródeł zasilania o zmiennej częstotliwości* przeznaczonych dla silników indukcyjnych. Ze względu na fakt, że impedancja silnika maleje wraz ze spadkiem częstotliwości, prąd pobierany przez silnik rośnie. Aby temu zapobiec, zasilacz o zmiennej częstotliwości reguluje również doprowadzane napięcie.

### Silnik indukcyjny pierścieniowy

Stojan w takim silniku wygląda zasadniczo tak samo jak w jednofazowym silniku indukcyjnym. Różnica tkwi jednak w wirniku, który tutaj zawiera własny zestaw cewek. Cewki te można zasilac elektrycznie za pośrednictwem *komutatora i szczotek*, podobnie jak w **silniku prądu stałego**. Ze względu na to, że maksymalny moment obrotowy (nazywany również *momentem krytycznym*) jest proporcjonalny do rezystancji elektrycznej cewek wirnika, charakterystykę silnika można modyfikować przez zwiększanie lub zmniejszanie rezystancji zewnętrznej podłączonej za pośrednictwem komutatora. Większa rezystancja pozwala uzyskać większy moment przy małej prędkości, gdy poślizg (różnica między prędkością obrotową wirnika a wirowaniem pola magnetycznego wytwarzanego przez stojan) jest największy. Ta zależność jest szczególnie przydatna w przewodowych narzędziach elektrycznych, np. wiertarkach, w których pożądana jest możliwość uzyskania wysokiego momentu już przy niskiej prędkości obrotowej, a także szybkiego przyspieszenia do pełnej prędkości po zmniejszeniu zewnętrznej rezystancji. W przypadku wiertarki rezystancję reguluje się za pomocą wyłącznika o specjalnej konstrukcji.

Silnik indukcyjny pierścieniowy pokazano na rysunku 23.12. Wadą takiej konfiguracji są szczotki przekazujące zasilanie do wirnika, które prędzej czy później wymagają konserwacji lub wymiany. O wiele większe silniki pierścieniowe wykorzystuje się ponadto w liniach przemysłowych, na przykład prasach drukarskich lub windach, w których konieczność



**Rysunek 23.12.** Silnik wiertarki elektrycznej zawiera wirnik z cewkami zasilanymi za pomocą komutatora i szczotek — takie rozwiązanie pozwala regulować prędkość obrotową; w przypadku większości silników AC regulacja prędkości nie jest możliwa, a wirnik nie jest w żaden sposób połączony elektrycznie z pozostałą częścią silnika

regulacji prędkości sprawia, że zwykle silniki trójfazowe stają się nieprzydatne.

### Silnik uniwersalny

Jeśli cewki wirnika i stojana w silniku pierścieniowym zostaną połączone szeregowo, wówczas uzyskuje się *silnik uniwersalny*. Dzięki takiej konfiguracji może on być zasilany zarówno prądem stałym, jak i przemiennym.

Prąd stały doprowadzany do wirnika i stojana wywołuje wzajemne odpychanie magnetyczne tych elementów. Gdy wirnik zaczyna się obracać, szczotki stykające się z komutatorem

odwracają kierunek napięcia w cewkach wirnika i następuje powtórzenie procesu. Pod względem budowy takie rozwiązanie przypomina tradycyjny silnik prądu stałego. Wyjątek stanowi fakt, że w stojanie silnika uniwersalnego wykorzystuje się elektromagnesy, a nie magnesy stałe, jak w przypadku **silnika prądu stałego**.

Po podłączeniu prądu przemiennego połączenie szeregowo między cewkami stojana i wirnika sprawia, że każdy impuls doprowadzany do stojana jest przekazywany do wirnika, co skutkuje wzajemnym odpychaniem. Dodanie zwoju zwarłego do stojana zapewnia asymetrię pola magnetycznego wymaganą do rozruchu silnika.

Silniki uniwersalne nie są ograniczone częstotliwością prądu przemiennego i mogą pracować ze skrajnie wysokimi prędkościami. Charakteryzują się wysokim rozruchowym momentem obrotowym, mają niewielkie rozmiary i są tanie w produkcji. Stosuje się je na przykład w mikserach spożywczych, odkurzaczach i suszarkach. Można je również znaleźć w warsztatach, gdzie napędzają frezarki i miniaturowe narzędzia elektryczne, takie jak system wielofunkcyjny Dremel.

Silniki uniwersalne wymagają stosowania komutatora i szczotek, przez co nie nadają się do pracy ciągłej.

### „Pozorne” silniki prądu przemiennego

Może się wydawać, że pewne nowoczesne urządzenia AGD zawierają silnik AC, ale w rzeczywistości prąd przemienny jest w nich *prostowany*, a następnie przekształcany na impulsowy ze zmienną szerokością impulsów, aby umożliwić regulację prędkości. Takie urządzenie jest w rzeczywistości **silnikiem prądu stałego**; więcej informacji na jego temat można znaleźć w stosownym rozdziale.

## Wartości

Ze względu na to, że prosty silnik prądu przemiennego jest zależny od częstotliwości prądu zasilającego, prędkość popularnego silnika czterobiegunowego jest ograniczona do maksymalnie 1800 obr./min (1500 obr./min w przypadku instalacji 50 Hz).

Ograniczenie to nie dotyczy silników o regulowanej częstotliwości, uniwersalnych i pierścieniowych, które mogą osiągać prędkości od 10 000 do 30 000 obr./min. Silniki

synchroniczne zazwyczaj pracują z prędkością 1800 lub 1200 obr./min w zależności od liczby biegunów w silniku (w krajach, w których częstotliwość w sieci elektrycznej wynosi 50 Hz, a nie 60 Hz, wartości te wynoszą odpowiednio 1500 lub 1000 obr./min).

Zagadnienie momentu obrotowego generowanego przez silnik opisano dokładniej w punkcie „Wartości”, w rozdziale 22., „Silnik prądu stałego”.

## Stosowanie

Do najważniejszych zastosowań silników synchronicznych, których prędkość była sterowana częstotliwością prądu przemiennego, należały gramofony (w których talerz z płytą winylową obraca się z określoną stałą prędkością) oraz zegarki elektryczne (analogowe). Urządzenia te zaczęły być jednak coraz częściej wypierane przez odtwarzacze CD (zwykle zasilane bezszczotkowymi silnikami DC) oraz zegarki cyfrowe (na bazie oscylatorów krystalicznych).

W wielu urządzeniach stosowanych w gospodarstwach domowych nadal korzysta się jednak z silników indukcyjnych zasilanych prądem przemiennym. Przykładem mogą być niewielkie wentylatory stosowane w urządzeniach elektronicznych. Zasilanie AC pozwala zmniejszyć pobór prądu w stosunku do wersji zasilanych prądem stałym. Zasadniczo silniki indukcyjne są cięższe i mniej wydajne niż inne rodzaje takich urządzeń, a ich ograniczenia związane z uzależnieniem prędkości obrotowej od częstotliwości prądu zasilającego stanowią istotną wadę.

Prosty silnik indukcyjny nie umożliwia zaawansowanej kontroli, której wymagają nowoczesne urządzenia, takie jak odtwarzacze CD lub DVD, drukarki atramentowe bądź skanery. W takich sytuacjach o wiele lepiej sprawdzają się **silniki krokowe**, **serwomotory** lub **silniki prądu stałego z modulacją szerokości impulsu**.

*Silniki reluktancyjne* można znaleźć w urządzeniach pracujących z dużymi prędkościami, takich jak odkurzacze, wentylatory i pompy. Duże silniki o zmiennej reluktancji i wysokim prądzie nominalnym mogą być używane do zasilania pojazdów. Ich mniejsze wersje stosuje się w niektórych pojazdach do napędzania układów wspomagania kierownicy i wycieraczek.

## Możliwe błędy

W porównaniu z innymi urządzeniami zawierającymi ruchome elementy bezszczotkowy silnik indukcyjny jest jedną z najbardziej niezawodnych maszyn, jakie kiedykolwiek wynaleziono. Nie oznacza to jednak, że nie może on ulec uszkodzeniu. Ogólne problemy, jakie wiążą się ze stosowaniem wszystkich rodzajów silników, opisano w punkcie „Efekty cieplne”, w rozdziale 22., „Silnik prądu stałego”. Poniżej skupiono się na problemach związanych konkretnie z silnikami prądu przemiennego.

### Zbyt wczesne ponowne uruchomienie

Duże trójfazowe silniki indukcyjne stosowane w przemyśle mogą ulec uszkodzeniu, jeśli zostaną ponownie włączone, zanim nastąpi całkowite zatrzymanie wirnika.

### Częste wyłączanie i włączanie

W przypadku częstego wyłączania i włączania silnika istnieje ryzyko kumulacji ciepła towarzyszącego nagłym skokom natężenia prądu podczas rozruchu.

### Zbyt niskie lub niezrównoważone napięcie

Na skutek spadku napięcia silnik może pobierać więcej prądu, niż wynosi jego natężenie nominalne. W takiej sytuacji dochodzi do przegrzania silnika. Problemy mogą również występować w silnikach trójfazowych, gdy napięcie jednej z faz nie będzie zrównoważone względem pozostałych. Najczęstszą przyczyną jest otwarty wyłącznik, uszkodzenie okablowania lub przepalony bezpiecznik chroniący jedną z trzech linii fazowych. Silnik będzie wtedy usiłował pracować, korzystając z zasilania dostarczanego dwoma przewodami, ale to przeważnie kończy się jego uszkodzeniem.

## Utykanie silnika

Jeśli po włączeniu zasilania silnika indukcyjnego nie będzie możliwy jego ruch obrotowy, przewodniki w wirniku będą przewodzić bardzo duży prąd, którego energia w całości będzie rozpraszana jako ciepło. Taki udar prądowy spowoduje spalenie silnika lub przepalenie bezpiecznika bądź wyłącznika obwodu. Projektując urządzenie napędzane elektrycznie, należy szczególnie zadbać o wyeliminowanie możliwości zakleszczenia lub blokowania silnika.

## Przełączniki zabezpieczające

Dla przemysłowych silników trójfazowych dostępne są zaawansowane przełączniki zabezpieczające, które chronią przed wszystkimi opisanymi wyżej awariami. Nie należą one jednak do zakresu zagadnień opisywanych w *Encyklopedii*.

## Nadmierny moment obrotowy

Jak już wcześniej wspomniano, moment obrotowy silnika indukcyjnego rośnie zależnie od poślizgu (różnicy prędkości) między wirowaniem pola magnetycznego a obrotami wirnika. W rezultacie, jeśli dojdzie do przeciążenia silnika i będzie się on obracać wolniej, wzrośnie generowana przez niego siła obrotowa. Może to skutkować zniszczeniem innych elementów przymocowanych do silnika, na przykład pasów napędowych.

## Uszkodzenia wewnętrzne

W przeciążonym silniku indukcyjnym może dojść do pęknięcia lub zniszczenia wirnika. Oczywistym skutkiem takiej usterki mogą być drgania lub zmniejszenie mocy wyjściowej, ale mogą o niej świadczyć także istotne zmiany poboru mocy.

## Serwomechanizm

Jeśli *serwomechanizm* (w skrócie *serwo* lub *serwomotor*) jest stosowany w niewielkich, zdalnie sterowanych i zasilanych bateriami urządzeniach, bywa określany też mianem *serwo RC* (*RC* oznacza *Remote Control*, czyli zdalne sterowanie). W praktyce jednak często pomija się skrót *RC*.

### INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **silnik prądu przemiennego** (rozdział 23.),
- **silnik prądu stałego** (rozdział 22.),
- **silnik krokowy** (rozdział 25.).

### Funkcja

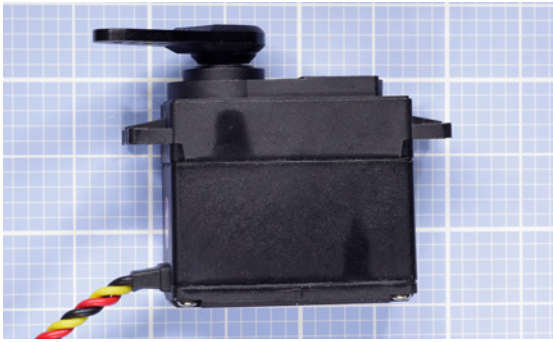
Serwomechanizm to w rzeczywistości połączenie silnika, przekładni redukcyjnej oraz miniaturowego elektronicznego układu sterującego — wszystkie te elementy są zwykle zamknięte w kompaktowej obudowie z tworzywa sztucznego. Sam silnik może być silnikiem DC, szczotkowym lub bezszczotkowym, bądź silnikiem AC. Tym, co różni serwo od innych rodzajów silników, jest fakt, że nie jest ono przeznaczone do pracy ciągłej. Jest urządzeniem „szukającym pozycji”. Zakres jego obrotów może przekraczać 180 stopni, ale na pewno będzie znacznie mniejszy niż 360 stopni. Na rysunku 24.1 pokazano dwa typowe serwa RC. Widok z boku jest pokazany na rysunku 24.2.

Układ elektroniczny znajdujący się wewnątrz obudowy interpretuje polecenia z zewnętrznego sterownika. W kodzie polecenia jest określony kąt obrotu mierzony jako przesunięcie w dowolną ze stron względem środkowego położenia w zakresie obrotów silnika. Silnik szybko obraca wał do określonego położenia i zatrzymuje go. Przez cały czas trwania sygnału oraz podtrzymywania zasilania silnik pozostaje w tym położeniu i przeciwstawia się działaniu jakichkolwiek zewnętrznych sił obrotowych. Jeśli takie siły w ogóle nie działają, a silnik pozostaje w bezruchu, pobiera bardzo mały prąd.



**Rysunek 24.1.** Typowe serwo RC może generować moment obrotowy na poziomie przekraczającym 0,35 Nm; zazwyczaj jest zasilane trzema lub czterema bateriami alkalicznymi AA połączonymi szeregowo i waży mniej niż 55 gramów

Układ elektroniczny znajdujący się wewnątrz typowego serwomechanizmu przystosowanego do zdalnego sterowania pokazano na rysunku 24.3.



**Rysunek 24.2.** Serwa RC zazwyczaj mają podobne rozmiary; tutaj pokazano widok z boku takiego urządzenia

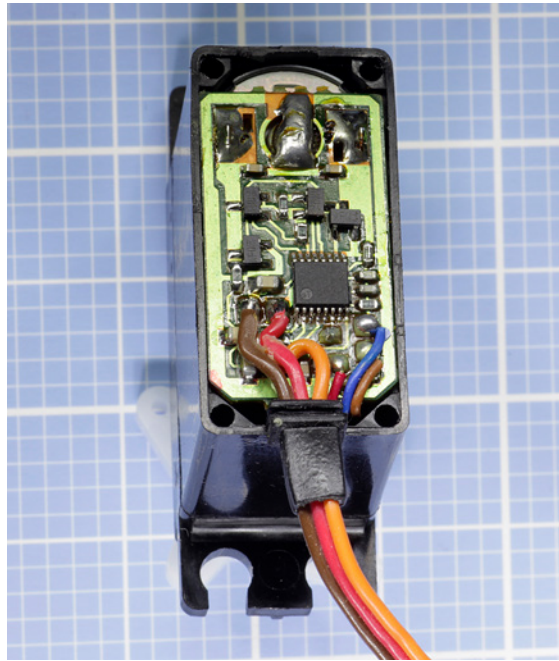
## Działanie

Serwomotory są zazwyczaj sterowane metodą *modulacji szerokości impulsu (PWM)*.

Serwa przemysłowe zwykle wymagają sterowników opracowanych w formie gotowych modułów przez producenta serwomechanizmu. Sposób kodowania sygnałów sterujących może być zastrzeżony przez twórcę całego rozwiązania. Serwomotory przeznaczone do dużych obciążeń mogą być zasilane z instalacji trójfazowej o stosunkowo wysokim napięciu. Stosuje się je na przykład w układach automatyzacji linii produkcyjnych.

W pozostałej części tego rozdziału opisane są głównie niewielkie serwa RC, a mniej miejsca poświęcone jest dużym serwomotorom przemysłowym.

W małych serwach RC strumień impulsów sterujących ma stałą częstotliwość odpowiadającą okresowi 20 ms. Dodatkowo wartości poszczególnych impulsów są interpretowane jako polecenie ustawiania wału silnika, przerwy między impulsami są natomiast pomijane. Typowy zakres szerokości impulsu dla małego silnika wynosi od 1 do 2 ms i definiuje obrót od  $-90$  do  $+90$  stopni względem pozycji środkowej. Wiele nowoczesnych silników umożliwia przekraczanie tych granic, jak również pozwala na precyzyjne zdefiniowanie zależności między szerokością impulsu a kątem obrotu. Silnik może być sterowany na podstawie tabeli wartości zawartej w oprogramowaniu mikrokontrolera lub z wykorzystaniem współczynnika konwersji pozwalającego przeliczyć szerokość impulsu na liczbę stopni obrotu.

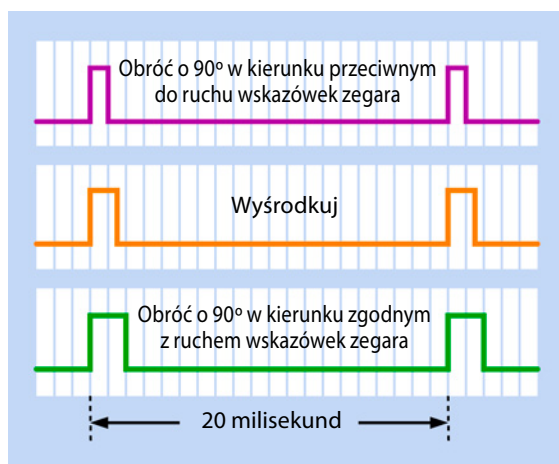


**Rysunek 24.3.** Układ elektroniczny w serwomechanizmie dekoduje ciąg impulsów określających kąt obrotu silnika

Na rysunku 24.4 pokazano typowy zakres szerokości impulsów o ustalonym okresie 20 ms (częstotliwość 50 Hz) pomiędzy początkami dwóch kolejnych impulsów. Wyjaśniono także znaczenie szerokości poszczególnych impulsów dla serwomotoru. Pośrednie szerokości impulsów są interpretowane jako instrukcje obrotu do położenia pośrednich.

W przypadku małych serwomechanizmów użytkownik musi zapewnić sterownik, który będzie spełniać powyższe wymagania. Często w tym celu należy zaprogramować *mikrokontroler*. Niektóre z takich układów są wyposażone w specjalne wyjście PWM dostosowane do wymagań serwa RC, dzięki czemu cały proces jest wyjątkowo łatwy. Niezależnie od tego mikrokontroler można podłączyć bezpośrednio do serwomechanizmu, uzyskując możliwość sterowania urządzeniem pozycjonującym w sposób maksymalnie prosty i elastyczny.

Można też zastosować prosty generator impulsów, na przykład *układ timera 555*, lub płytki sterowników dostępne w specjalistycznych sklepach dla hobbistów. Niektóre z takich płytek są wyposażone w złącza USB, które umożliwiają

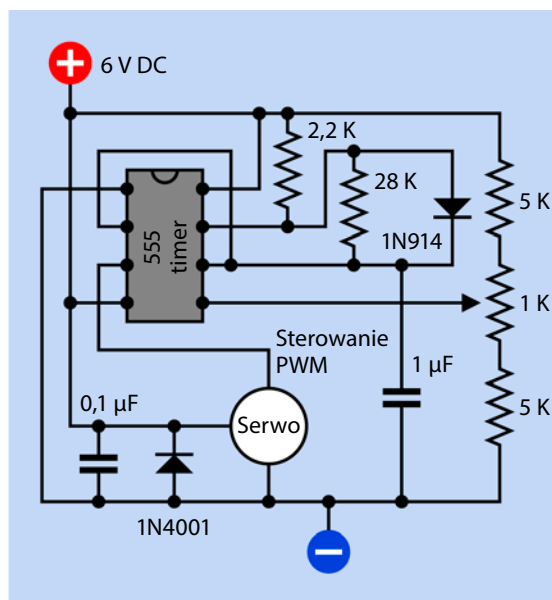


**Rysunek 24.4.** Kąt obrotu w małym serwomotorze RC jest określany na podstawie szerokości impulsu odbieranego ze sterownika; czas trwania takiego impulsu wynosi od 1 do 2 ms; częstotliwość impulsów jest ustalona na poziomie 50 Hz

sterowanie serwomotorem za pomocą oprogramowania komputerowego.

Na rysunku 24.5 pokazano schemat połączenia timera 555 z serwem RC. Wartości elementów układu wymuszają stałą częstotliwość na poziomie około 48 Hz (czyli nieco ponad 20 ms między kolejnymi wartościami szczytowymi). Znajdujący się w obwodzie kondensator  $1\ \mu\text{F}$  jest ładowany za pośrednictwem rezystora  $2,2\ \text{k}\Omega$  połączonego szeregowo z diodą, która stanowi bocznik dla rezystora  $28\ \text{k}\Omega$ . Czas ładowania odpowiada fazie „włączenia” timera. Rozładowanie kondensatora następuje za pośrednictwem rezystora  $28\ \text{k}\Omega$  — czas tego procesu odpowiada cyklowi „wyłączenia”. Potencjometr  $1\ \text{k}\Omega$  połączony szeregowo z rezystorami  $5\ \text{k}\Omega$  pełni funkcję dzielnika napięcia przyłożonego do pinu sterującego w timerze i odpowiada za regulację wartości progowych ładowania i rozładowania. Obracanie pokrętką potencjometru powoduje wydłużanie lub skracanie czasu „włączenia” w każdym cyklu bez powodowania zmiany częstotliwości. W rzeczywistości częstotliwość sygnału wyjściowego z timera może nieco odbiegać od podanej wartości, ponieważ tolerancje kondensatorów są zbyt duże. Na szczęście większość serwomotorów akceptuje pewien poziom niedokładności.

Ponieważ w tym obwodzie silnik oraz timer są zasilane z jednego źródła, między zaciskami zasilającymi serwa dodano



**Rysunek 24.5.** Serwomotorem RC można sterować za pomocą timera 555 współpracującego z odpowiednio dobranymi komponentami; położenie kątowe wału serwomotoru można regulować za pomocą potencjometru

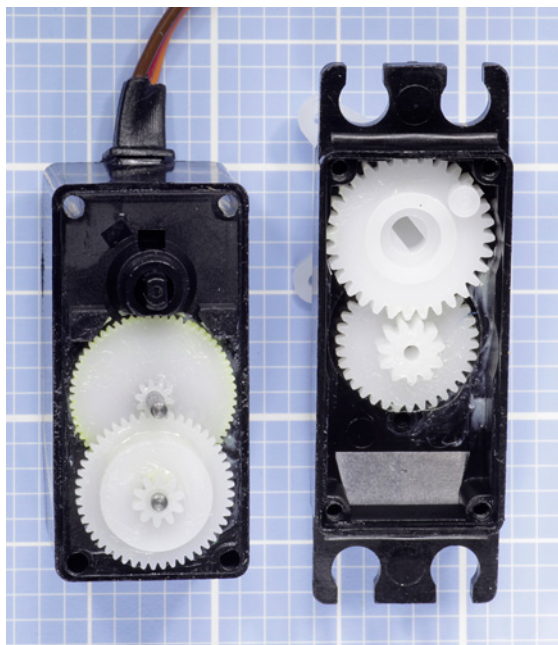
diodę zabezpieczającą kondensator w celu stłumienia zakłóceń oraz zminimalizowania siły przeciw elektromotorycznej.

Wewnątrz obudowy serwomechanizmu znajduje się układ elektroniczny, w którego skład wchodzi potencjometr obracany razem z wałkiem silnika i zapewniający informację zwrotną o położeniu tego wałka. Ograniczony zakres obrotów potencjometru wyznacza granice ruchu osi wyjściowej.

## Rodzaje

Małe serwomechanizmy mogą zawierać szczotkowe lub bezszczotkowe silniki prądu stałego. Silniki bezszczotkowe charakteryzują się oczywiście dłuższą żywotnością i generują mniejsze zakłócenia elektryczne. Porównanie silników szczotkowych i bezszczotkowych można znaleźć w rozdziale 22., „Silnik prądu stałego”.

Serwomechanizmy mogą być wyposażone w nylonowe, karbonowe lub metalowe przekładnie redukcyjne. Przekładnię nylonową znajdującą się wewnątrz tańszego serwa RC pokazano na rysunku 24.6.



**Rysunek 24.6.** Przekładnia nylonowa wewnątrz serwomechanizmu

Silnik bezszczotkowy i metalowe koła zębate nieco zwiększają cenę serwa. Przekładnie wykonane z metalu są bardziej wytrzymałe niż nylonowe (które mogą pękać pod obciążeniem), ale szybciej ulegają zużyciu, co skutkuje luzami i spadkiem precyzji w przekładni zębatej. Tarcie między powierzchniami nylonowymi jest bardzo małe, dlatego elementy wykonane z tego materiału mogą być korzystnym rozwiązaniem, zwłaszcza jeśli serwo nie jest poddawane dużym obciążeniom. Uważa się, że karbon jest pięciokrotnie wytrzymalszy niż nylon, i dlatego może być pewnego rodzaju kompromisem. Jeśli dojdzie do uszkodzenia kół zębatych (na przykład wytarcia zębów w wyniku nadmiernego obciążenia), można zakupić zamienniki, które często są oferowane przez producentów, i samodzielnie je zainstalować. Instalacja takiego koła wymaga zręczności, cierpliwości i pewnych umiejętności.

Serwa mogą być wyposażone w łożyska wałeczkowe lub spiekane łożyska ślizgowe. Te drugie są tańsze, ale z drugiej strony mniej wytrzymałe na obciążenia boczne.

W tak zwanych *serwach cyfrowych* używane są szybsze wewnętrzne moduły elektroniczne niż w ich starszych, tzw. *analogowych* odpowiednikach. Dzięki temu są w stanie

pobierać impulsy wejściowe z większą częstotliwością i z większą czułością reagować nawet na słabe, krótkotrwałe sygnały sterujące z kontrolera. Takie rozwiązania są chętniej wybierane przez hobbystów wykorzystujących serwa do sterowania modelami samolotów. Zewnętrznie protokoły sterowania w serwach cyfrowych i analogowych są takie same, ale wersje cyfrowe pozwalają zmieniać programowo granice ruchu. Aby z tego skorzystać, trzeba jednak dokupić odrębny moduł do programowania.

Do najbardziej popularnych producentów niewielkich serwomotorów należą firmy Futaba i Hitec. Wprowadzicie ich produkty korzystają z niemal identycznych protokołów sterowania, ale różnią się wałkami wyjściowymi. Z reguły stosuje się wałki *wielowypustowe* z rowkami służącymi do łączenia z orczykami. Wielowypust silnika firmy Futaba ma 25 rowków, a firmy Hitec — 24 rowki. Orczyki muszą być odpowiednio dobrane do konkretnego serwa.

## Wartości

Małe serwo zazwyczaj waży od 30 do 60 gramów, okres obrotu silnika między pozycjami krańcowymi wynosi od 1 do 2 sekund, a generowany moment obrotowy może wynosić nawet 0,35 Nm lub więcej.

### Napięcie

Małe serwa początkowo były projektowane z myślą o zasilaniu akumulatorkami 4,8 V i stosowaniu w modelach samolotów. Standardowo mogą być zasilane napięciem od 5 do 6 V DC. Istnieje kilka modeli, które mogą pracować przy wyższych napięciach.

### Natężenie prądu

Dane techniczne dostarczane przez większość producentów z reguły nie zawierają informacji o mocy pobieranej podczas generowania maksymalnego momentu obrotowego (albo jakiegokolwiek momentu). Ponieważ małe serwa często są zasilane trzema lub czterema połączonymi szeregowo bateriami alkalicznymi AA, maksymalny pobierany prąd rzadko będzie znacznie przekraczać 1 A. Gdy silnik jest włączony, ale się nie obraca i nie przeciwstawia się żadnej sile obrotowej, pobór prądu jest pomijalny. Dlatego serwa doskonale nadają się do

użytku w urządzeniach zdalnie sterowanych z zasilaniem bateryjnym.

Niektóre modele o zakresie obrotów przekraczającym 180 stopni reagują na impulsy trwające krócej niż 1 ms lub dłużej niż 2 ms. Nowy silnik należy przetestować z użyciem mikrokontrolera, który będzie generować szereg impulsów o różnym czasie trwania. Pozwoli to empirycznie wyznaczyć limity silnika. Impulsy, których czas trwania wykracza poza nominalny zakres serwa, zasadniczo są ignorowane i nie powodują ryzyka uszkodzenia.

**Szybkość obrotu** (nazywana także **czasem przejścia**) określana w karcie produktu odnosi się do czasu, jaki serwo potrzebuje, aby wykonać obrót o 60 stopni bez obciążenia wałka wyjściowego. Serwa bardzo wydajne osiągają większe momenty obrotowe dzięki większemu przełożeniu przekładni redukcyjnej, które z kolei wydłuża czas przejścia.

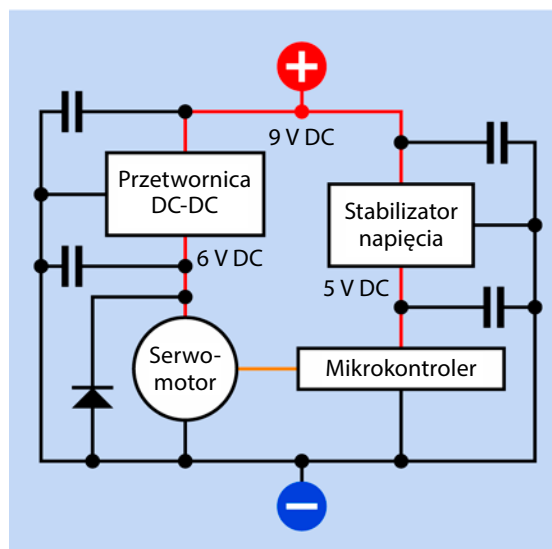
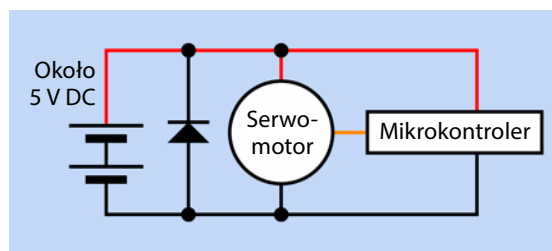
## Stosowanie

Do typowych zastosowań małych serwowatorów należą mechanizmy obracania kłapami lub sterami w modelach samolotów, układy sterowania modelami łodzi, samochodów lub robotów mobilnych, a także mechanizmy poruszania ramionami robotów.

Serwo zwykle ma trzy przewody oznaczone kolorami czerwonym (zasilanie), czarnym lub brązowym (masa) oraz pomarańczowym, żółtym lub białym (ciąg impulsów ze sterownika). Masa silnika musi być wspólna z masą sterownika. Z tego względu między zasilaniem silnika (przewód czerwony) a masą należy podłączyć ceramiczny **kondensator** bocznikujący o pojemności 0,1  $\mu\text{F}$  lub 0,01  $\mu\text{F}$ . Należy również zastosować **diode** zabezpieczającą. Żadnego z tych elementów nie wolno podłączać do przewodu sterującego, ponieważ mogłoby to zakłócać przepływ ciągu impulsów.

Do zasilania silnika można użyć zasilacza sieciowego. Należy jednak zachować ostrożność, ponieważ napięcie wyjściowe może nie być dostatecznie wygładzone. Nie ma potrzeby stosowania stabilizatora napięcia, ale konieczne jest użycie **kondensatorów** bocznikujących. Na rysunku 24.7 pokazano dwa teoretyczne schematy. Górny przedstawia układ z zasilaniem bateryjnym, na przykład czterema akumulatorami NiMH o napięciu 1,2 V. Ze względu na to, że baterie z reguły nie wywołują skoków napięcia, obwód nie zawiera

kondensatorów, ale zastosowano w nim diode, która chroni mikrokontroler przed działaniem siły elektromotorycznej powstającej podczas uruchamiania i zatrzymywania serwowatora. Na dolnym schemacie pokazano dodatkowe zabezpieczenia, które mogą być potrzebne w przypadku zasilania prądem stałym z **zasilacza** sieciowego. **Przetwornica** DC-DC zasilająca silnik napięciem 6 V DC wymaga kondensatorów wygładzających (stosowna informacja powinna się znaleźć w karcie produktu). Podobny wymóg ma **stabilizator napięcia**, który doprowadza stabilizowane napięcie 5 V DC do mikrokontrolera. Także w tym przypadku w obwodzie zasilania silnika znajduje się dioda zabezpieczająca. Na obu schematach kolorem pomarańczowym oznaczono przewód sterujący przekazujący sygnały impulsowe do serwowatora.



**Rysunek 24.7.** Dwa możliwe schematy zasilania niewielkiego serwowatora; górny przypadek dotyczy zasilania bateriami (na przykład czterema ogniwami NiMH 1,2 V), a dolny ilustruje układ z zasilaczem sieciowym 9 V DC; dodatkowe informacje można znaleźć w tekście

W internetowych sklepach elektronicznych oferujących serwomechanizmy dostępne są także różne orczyki nakładane na wałki. Wśród takich orczyków wyróżnia się tarcze, ramiona pojedyncze, ramiona podwójne oraz orczyki czteroramienne w układzie krzyżowym. Orczyk jednoramienny często nazywa się po prostu *orczykiem* — to określenie funkcjonuje również w odniesieniu do każdego rodzaju nakładek. Orczyki zwykle mają otwory, dzięki którym można je przykręcić do innych podzespołów za pomocą niewielkich wkrętów lub śrub z nakrętkami. Kilka różnych orczyków pokazano na rysunku 24.8.



**Rysunek 24.8.** Producenci silników oferują także różne nakładki na wałek nazywane orczykami; niebieski egzemplarz jest metalowy, pozostałe są wykonane z tworzywa sztucznego

Po nasunięciu orczyka na wielowypustowy wałek silnika zabezpiecza się jego położenie, dokręcając jeden środkowy wkręt. Jak już wcześniej wspomniano, wielowypusty oferowane przez dwóch największych producentów niewielkich serwomechanizmów (firmy Futaba i Hitec) są ze sobą niekompatybilne.

## Modyfikacje konieczne do uzyskania ciągłego ruchu obrotowego

Istnieje możliwość takiego zmodyfikowania małego serwomotoru, aby pracował w trybie ciągłym.

Najpierw należy otworzyć obudowę silnika, a następnie wyśrodkować położenie potencjometru, wysyłając ze sterownika kilka impulsów o długości 1,5 ms. Ustawiony dokładnie w pozycji środkowej suwak potencjometru należy przykleić lub w jakikolwiek inny sposób unieruchomić. Po wykonaniu tego zabiegu należy potencjometr odłączyć mechanicznie od zespołu napędowego.

Przed ponownym zamontowaniem silnika należy odciąć ograniczniki mechaniczne wyznaczające zakres ruchu wałka silnika. Ze względu na to, że potencjometr został zablokowany, wewnętrzny układ elektroniczny serwomechanizmu będzie „widzieć” wałek stale w położeniu środkowym. Jeśli sterownik wyśle impuls z poleceniem obrotu silnika w lewo lub w prawo względem pozycji środkowej, silnik zacznie się obracać, próbując osiągnąć zadane położenie. Potencjometr nie wyśle jednak informacji zwrotnej o uzyskaniu nastawionej pozycji przez silnik, dlatego wałek będzie się obracać w nieskończoność.

W takim trybie działania podstawowa cecha charakterystyczna dla serwomechanizmu nie istnieje, ponieważ silnik nie wykonuje obrotu do położenia o określonym kącie. Dodatkowo problem może stwarzać zatrzymanie serwa — musiałoby ono otrzymać polecenie, które będzie precyzyjnie odpowiadać ustalonej pozycji suwaka potencjometru. Ponieważ podczas unieruchamiania potencjometru jego ustawienie pod wpływem tarcia mogło się zmienić, konieczne może być wykonanie kilku prób w celu ustalenia szerokości impulsu, która będzie odpowiadać nastawie potencjometru.

Celem takiego przystosowania serwomechanizmu do pracy ciągłej może być wykorzystanie jego zalet w postaci wysokiego momentu obrotowego, małych rozmiarów, niewielkiej masy oraz łatwości sterowania za pomocą mikrokontrolera.

W odpowiedzi na sygnały płynące od hobbystów, którzy często w ten sposób modyfikowali swoje serwomotory, niektórzy producenci zdecydowali się wprowadzić na rynek serwomotory z możliwością pracy ciągłej jako funkcją wbudowaną. Zazwyczaj zawierają one potencjometr nastawny służący do kalibracji silnika i ustawienia środkowego położenia wału.

## Możliwe błędy

### Nieprawidłowe podłączenie przewodów

Znaczenie kolorów poszczególnych przewodów można sprawdzić w dokumentacji technicznej dostarczonej przez producenta. Podczas gdy w przypadku prostego silnika prądu stałego możliwa jest zmiana kierunku pracy przez odwrócenie biegunowości zasilania, wykonanie takiej operacji z serwomotorem jest niedopuszczalne.

## Niedopasowanie orczyka i wałka

Orczyki do wałków wielowypustowych jednej marki silników mogą nie pasować do wałków innych producentów i nie należy ich montować na siłę.

## Zbyt szybko wysłane polecenia

Oprogramowanie mikrokontrolera sterującego serwomotorem musi zapewniać wystarczający czas, aby serwomotor mógł zareagować przed odebraniem sygnału nakazującego ustawienie wału w nowym położeniu. Konieczne może być wprowadzenie w oprogramowaniu specjalnych pętli opóźniających.

## Wahania impulsów

Szarpany i nieprzewidywalny ruch ramienia serwomotoru zwykle oznacza, że doszło do zakłócenia ciągu impulsów przez zewnętrzne zakłócenia elektryczne. Przewód sterujący prowadzący do serwomotoru powinien być jak najkrótszy i nie powinien przebiegać w pobliżu sąsiednich przewodników prądu przemiennego, układów przełączających z wysoką częstotliwością ani przewodów sterujących podłączonych do innych serwomotorów.

## Przeciążenie silnika

Serwo zdolne do wytworzenia siły 10 N w odległości 2 cm od osi wałka może, gdy dojdzie do jego zablokowania,

bez problemów wygenerować moment wystarczający do wyrwania się z mocowania lub wygięcia bądź złamania ramienia przymocowanego do wałka. W idealnej sytuacji należałoby stosować stosunkowo „słabe” mocowania, aby w przypadku uszkodzenia skutki były przewidywalne, a ewentualna wymiana uszkodzonego elementu nie wiązała się z dużymi kosztami.

## Nieprawidłowy cykl pracy

Niewielkie serwa są przeznaczone do pracy przerywanej. Stałe włączanie i wyłączanie powoduje zużycie, zwłaszcza jeśli silnik jest wyposażony w komutator szczotkowy lub metalowe przekładnie redukcyjne.

## Zakłócenia elektryczne

Silniki szczotkowe zawsze stanowią źródło zakłóceń elektrycznych; podobnie każde serwo będzie powodować udary napięciowe podczas rozruchu i zatrzymywania. Dioda zabezpieczająca może być wtedy niewystarczająca do ochrony czułych mikrokontrolerów i innych układów scalonych. Aby ograniczyć skutki takich zdarzeń, serwo może być zasilane napięciem odseparowanym od stabilizowanego napięcia zasilającego układy scalone, a do obwodu zasilania mikrokontrolera można dodać kondensatory filtrujące o większej pojemności. Niestety nie da się uniknąć stosowania wspólnej masy dla silnika i układów scalonych.



# Silnik krokowy

Często nazywa się go *silniczkem krokowym*, a czasami *silnikiem skokowym*. Jest rodzajem *silnika indukcyjnego*, ale poświęcono mu odrębny rozdział w niniejszej *Encyklopedii*, ponieważ ma wyjątkowe znaczenie dla urządzeń elektronicznych, które umożliwiają sterowanie cyfrowe i w których wymaga się precyzyjnego pozycjonowania ruchomych elementów.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **silnik prądu stałego** (rozdział 22.),
- **silnik prądu przemiennego** (rozdział 23.),
- **serwomechanizm** (rozdział 24.).

## Funkcja

Silnik krokowy obraca swój wałek napędowy o precyzyjnie ustalone kąty (kroki) w odpowiedzi na sekwencję impulsów (zwykle jeden krok na impuls). Impulsy są doprowadzane do szeregu cewek albo inaczej *uzwojeń*, *stojana*, który stanowi nieruchomą część silnika i zwykle ma postać pierścienia otaczającego wirnik będący z kolei ruchomym elementem silnika. Kroki często nazywa się również *fazami*, a silnik obracający się o niewielkie kąty określa się mianem silnika o *wielu fazach*.

Teoretycznie silnik krokowy doprowadza do cewek stojana prąd na stałym poziomie niezależnym od prędkości obrotowej. W rezultacie moment obrotowy maleje wraz ze wzrostem prędkości i odwrotnie — moment będzie mieć największą wartość, gdy wirnik nie obraca się lub jest zablokowany.

Silnik wymaga odpowiedniego układu sterowania, który będzie generować sekwencję impulsów. Taki układ sterowania musi zawierać niewielki dedykowany obwód, mikrokontroler lub komputer z dodatkowymi tranzystorami sterującymi, zdolnymi do przewodzenia wymaganego prądu. Krzywą momentu obrotowego można rozszerzyć, stosując sterownik zwiększający napięcie w miarę wzrostu prędkości emitowania impulsów sterujących.

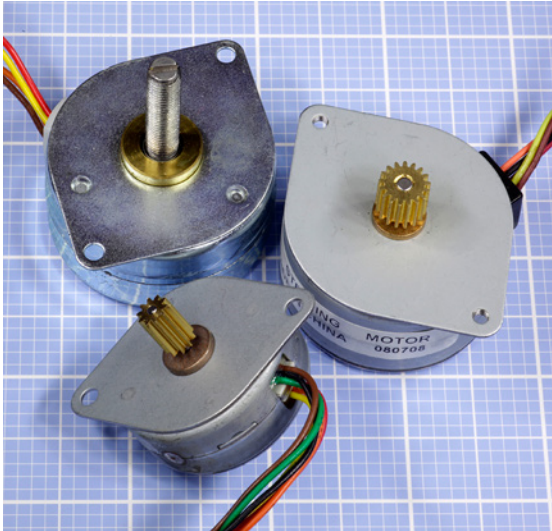
Ze względu na to, że działanie silnika jest kontrolowane przez zewnętrzne układy elektroniczne, a jego budowa wewnętrzna jest zwykle symetryczna, silnik krokowy może pracować w obu kierunkach z jednakowym momentem obrotowym. Może również pozostawać nieruchomy, mimo że cewki stojana nadal będą pobierać prąd.

## Działanie

Stojan zawiera wiele biegunów wykonanych z łatwo magnesowalnego żelaza lub innego materiału magnetycznego. Każdy biegun może być zasilany przez odrębną cewkę. Częściej występuje jednak rozwiązanie polegające na zasilaniu kilku biegunów przez jedną dużą cewkę. We wszystkich rodzajach silników krokowych zestawy biegunów stojana są sekwencyjnie magnetyzowane, powodując obracanie się wirnika. Gdy zasilanie biegunów jest niezmiennie i pozostaje w jednej konfiguracji, wirnik nie obraca się.

Wirnik może składać się z jednego lub kilku magnesów stałych, które oddziałują z polami magnetycznymi generowanymi w stojanie. Warto zwrócić uwagę, że taka budowa odróżnia silnik krokowy od *klatkowego*, w którym klatka jest wbudowana w wirnik i oddziałuje z wirującym polem magnetycznym, ale nie zawiera magnesów trwałych.

Na rysunku 25.1 pokazano trzy niewielkie silniczki krokowe. W kolejności od lewego górnego rogu zgodnie z ruchem wskazówek zegara są to modele cztero-, pięcio- i sześcioprzewodowy (rozdzielenie między tymi typami wyjaśniono w następnym punkcie). Silnik po lewej stronie u góry jest wyposażony w gwintowany wałek, na który można nakręcić pierścien pośredniczący w przenoszeniu ruchu. Gdy wałek silnika będzie się obracał w lewo lub w prawo, pierścien będzie się przesuwał w górę lub w dół.

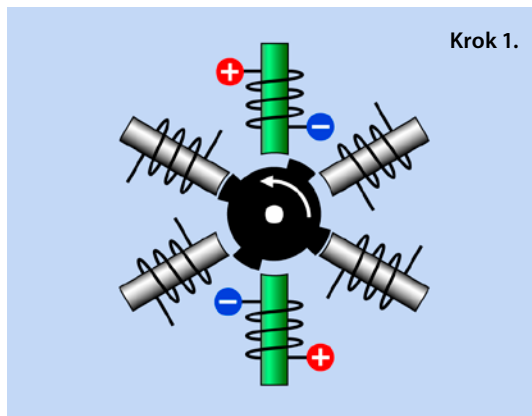


Rysunek 25.1. Trzy niewielkie silniczki krokowe

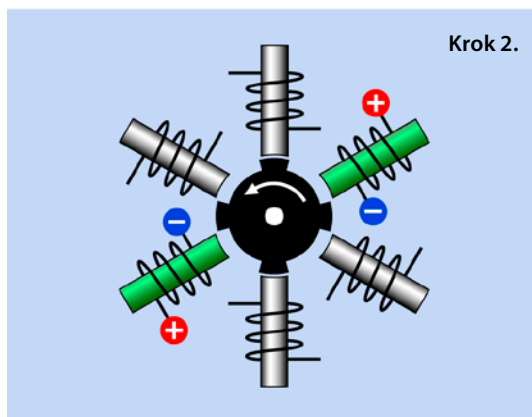
## Reluktancyjne silniki krokowe

W najprostszym rodzaju silnika krokowego stosowany jest wirnik, który nie zawiera magnesów stałych. Podstawą jego działania jest zasada *minimalnej reluktancji* (reluktancja jest magnetycznym odpowiednikiem rezystancji elektrycznej). Wystające części wirnika dążą do ustawienia się zgodnie z zewnętrznymi polami magnetycznymi stojana, ponieważ wtedy reluktancja układu jest najmniejsza. Więcej informacji na temat zmiennej reluktancji można znaleźć w punkcie „Silnik reluktancyjny”, w rozdziale 23., „Silnik prądu przemiennego”.

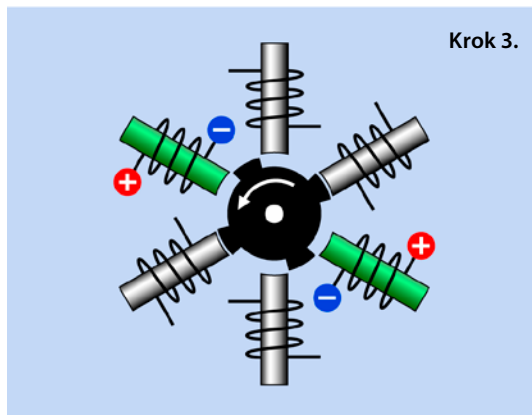
Silnik krokowy o zmiennej reluktancji wymaga zewnętrznego sterownika, który będzie sekwencyjnie zasilac cewki stojana. Takie rozwiązanie pokazano na rysunku 25.2; widać na nim sześć biegunów (zasilanych parami) ułożonych symetrycznie wokół wirnika, który ma na obwodzie cztery



Krok 1.



Krok 2.



Krok 3.

Rysunek 25.2. W silniku krokowym o zmiennej reluktancji wirnik porusza się w celu zminimalizowania reluktancji za każdym razem, gdy kolejna para cewek otrzyma impuls zasilający; w każdym kroku cewki są zasilane impulsem prądowym i wytwarzają pola magnetyczne zmuszające wirnik do obrócenia się o określony kąt

występy (zwykle nazywane *zębami*). Sześć biegunów stojana oraz cztery zęby wirnika to minimalne liczby tych elementów zapewniające niezawodną pracę reluktancyjnego silnika krokowego.

Na rysunku rdzeń każdego bieguna, który jest aktualnie namagnesowany, ma kolor zielony, natomiast kolorem szarym oznaczono rdzenie w stanie roznamagnesowania. Na każdym ze schematów pokazano stany, w których cewki stojana są tuż po otrzymaniu impulsu zasilającego, a wirnik nie zdążył jeszcze na to zareagować. W celu uproszczenia rysunku pominięto zewnętrzny układ impulsowy zasilający cewki. W rzeczywistym silniku wirnik ma mnóstwo żeber, których odstępów od stojana są skrajnie małe, aby zmaksymalizować działanie sił magnetycznych.

W 6-biegunowym silniku reluktancyjnym, w którym wirnik zawiera cztery zęby, każde doprowadzenie impulsu zasilania przez sterownik do nowej pary cewek powoduje obrócenie wirnika o 30 stopni w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Wartość ta nosi nazwę *kąta kroku*. W tym przypadku silnik wykona 12 kroków w ramach pełnego obrotu wałka o 360 stopni. Taka konfiguracja bardzo przypomina układ 3-fazowego *silnika indukcyjnego*, który pokazano na rysunku 23.11 rozdziału poświęconego silnikowi **prądu przemiennego**. Silnik prądu przemiennego jest jednak przystosowany do zasilania przez źródło napięcia o stałej częstotliwości, a ponadto pracuje w sposób płynny i ciągły, a nie w sposób krokowy.

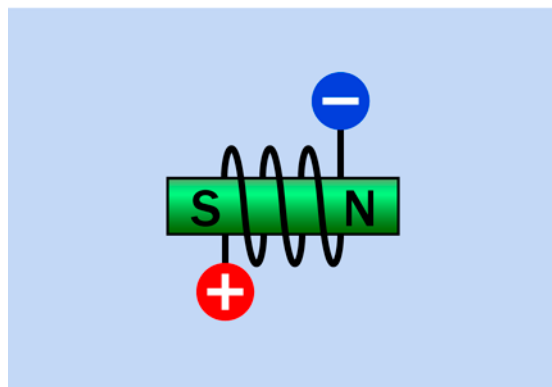
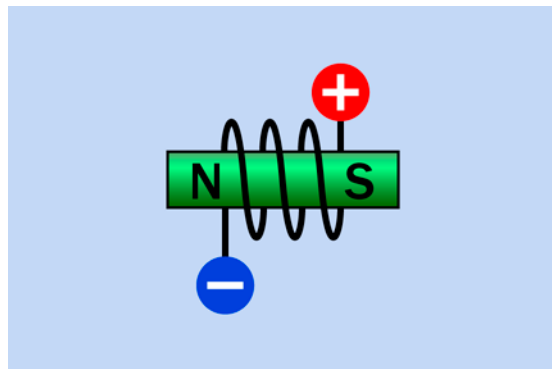
Zasadniczo silniki reluktancyjne są większe niż modele z wirnikami magnesowanymi i często wymagają informacji zwrotnej z czujnika, który monitoruje kąt ustawienia wałka i przekazuje te dane do elektronicznego układu sterującego. Takie rozwiązanie nosi nazwę *układu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym*. Większość mniejszych silniczków krokowych pracuje w *otwartym układzie sterowania*, w którym informacja zwrotna o położeniu nie jest wymagana, pod warunkiem że liczba impulsów wysyłanych do silnika jest zliczana i traktowana jako sposób śledzenia jego ustawienia.

## Silniki krokowe z magnesem trwałym

W najpopularniejszej odmianie silnika krokowego jego wirnik zawiera magnesy trwałe. Takie rozwiązanie wymaga sterownika zdolnego do odwrócenia pola magnetycznego generowanego przez poszczególne cewki stojana, aby

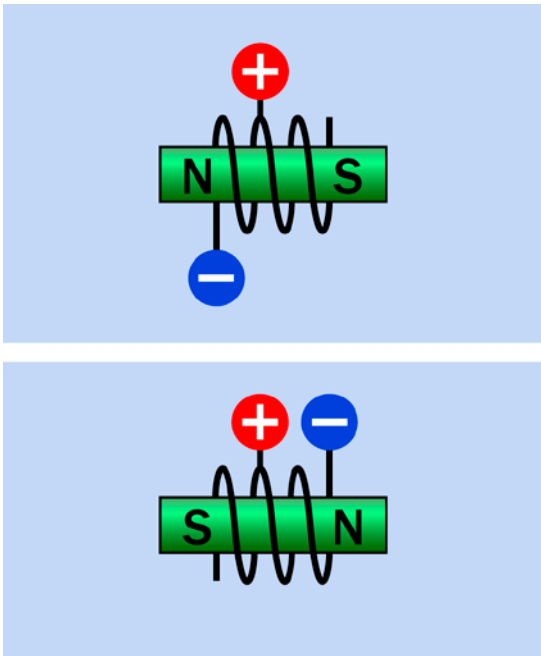
mogły one naprzemiennie przyciągać i odpychać magnesy wirnika.

W silniku *bipolarnym* pole magnetyczne jest odwracane po prostu przez zmianę kierunku prądu przepływającego przez cewkę. Pokazano to schematycznie na rysunku 25.3. W silniku *unipolarnym* pole magnetyczne jest odwracane poprzez przyłożenie dodatniego napięcia do środkowego odczepu cewki i uziemienie jednego lub drugiego końca. Pokazano to schematycznie na rysunku 25.4.



**Rysunek 25.3.** W silniku bipolarnym pole magnetyczne generowane przez poszczególne cewki stojana jest odwracane przez zmianę kierunku prądu

Oba rodzaje silnika często mają budowę złożoną z dwóch części — górnej i dolnej — które otaczają jeden długi wirnik. Taką konstrukcję pokazano na rysunku 25.5. Jedna duża cewka (lub cewka z centralnym odczepem) indukuje pole magnetyczne we wszystkich biegunach górnej części, przesuwając fazę o jeden krok względem drugiego zestawu biegunów w części dolnej, które to bieguny są zasilane przez

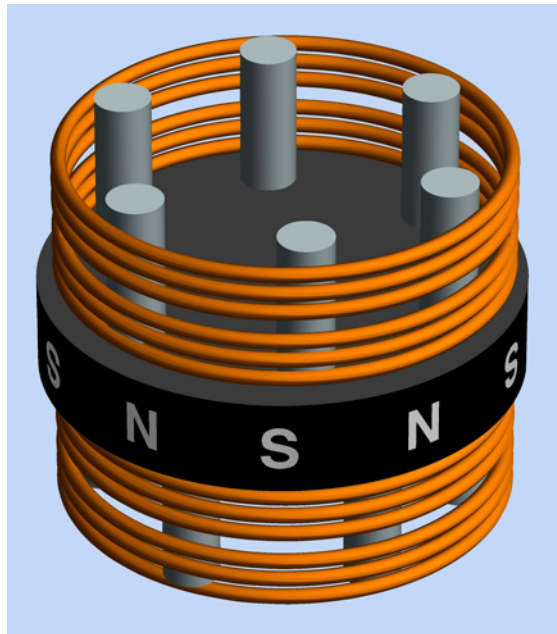


**Rysunek 25.4.** Kierunek pola magnetycznego tej cewki można odwracać przez przykładanie dodatniego napięcia ciągle do odczepu środkowego i uziemienie na przemian jednego lub drugiego końca cewki

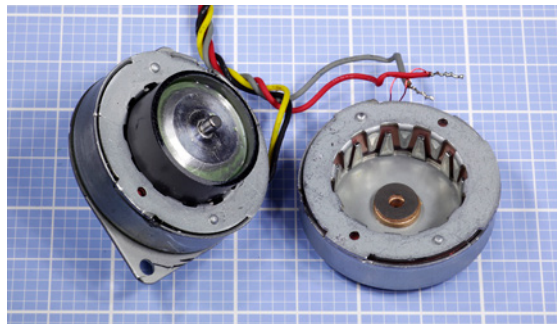
odrębną cewkę (taką budowę mają wszystkie trzy silniki z rysunku 25.1). Wirnik silnika jest na tyle długi, że przechodzi przez obie części, dlatego jest napędzany kolejno przez jedną i drugą.

Na rysunku 25.6 pokazano odłączone od siebie obie części silnika czteroprzewodowego. Wirnik pozostał w części widocznej po lewej stronie. Jest on zamknięty w czarnym walcu będącym magnesem trwałym podzielonym na segmenty o odrębnych biegunach. W drugiej części (po prawej stronie) widać cewkę otaczającą metalowe „zęby”, które stają się biegunami stojana po doprowadzeniu prądu do cewki.

Na rysunku 25.7 pokazano ten sam silnik, który został rozmontowany w jeszcze większym stopniu. Cewka była zabezpieczona na obwodzie kawałkiem taśmy, którą odklejono w celu pokazania zwojów. Pozostała część silnika (u góry po prawej stronie) zawiera drugą, niewidoczną na rysunku, taką samą cewkę z własnym zestawem biegunów, które są przesunięte w fazie o jeden krok względem biegunów w części pierwszej.

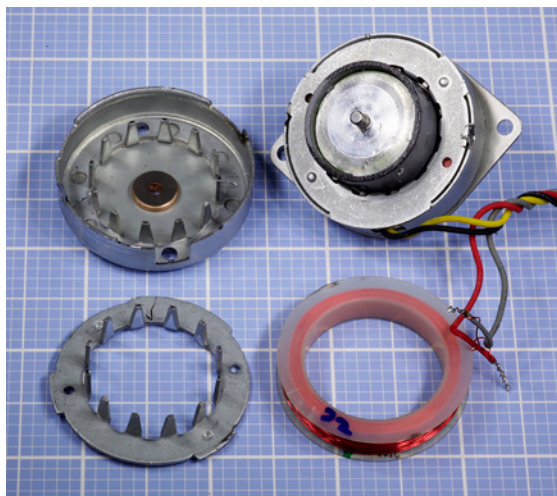


**Rysunek 25.5.** Grafika przedstawiająca w uproszczeniu budowę silnika „dwupoziomowego”; szczegółowe informacje można znaleźć w tekście



**Rysunek 25.6.** Rozmontowany na dwie części silnik krokowy; po lewej stronie widać jego wirnik, a po prawej — jeden ze stojanów otoczony cewką

Ze względu na to, że graficzne przedstawienie sił pola w dwuczęściowym silniku krokowym jest niezwykle trudne, pozostałe schematy dotyczą uproszczonych konfiguracji z minimalną liczbą biegunów stojana, z których każdy posiada własną cewkę.



**Rysunek 25.7.** Silnik krokowy z poprzedniego rysunku rozmontowany w jeszcze większym stopniu

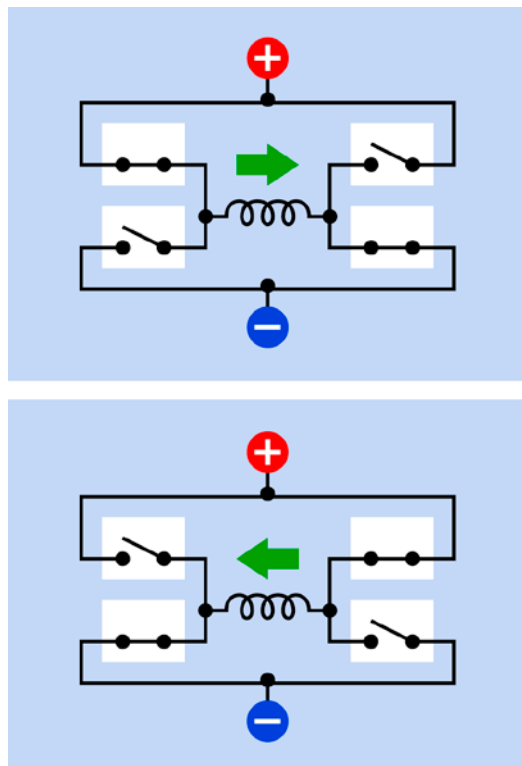
## Bipolarne silniki krokowe

Najbardziej podstawową metodą zmiany kierunku przepływu prądu w cewce jest zastosowanie przełączników w konfiguracji *mostka H*. Taki układ pokazano na rysunku 25.8, na którym zielona strzałka wskazuje kierunek pola magnetycznego. W rzeczywistych obwodach stosuje się przełączniki półprzewodnikowe. Dostępne są również układy scalone zawierające wszystkie komponenty potrzebne do sterowania bipolarnym silnikiem krokowym.

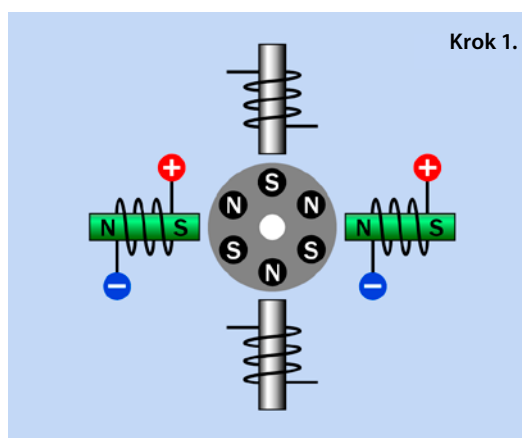
Na rysunkach 25.9, 25.10, 25.11 i 25.12 pokazano cztery kolejne kroki wykonywane przez silnik bipolarny. W celu zachowania przejrzystości pominięto elektronikę w postaci mostków H sterujących poszczególnymi cewkami. Podobnie jak poprzednio, rdzenie cewek będących pod napięciem pokazano w kolorze zielonym, a cewki niezasilane mają kolor szary. Wirnik widać zawsze w momencie tuż przed zareagowaniem na zmianę pola magnetycznego w poszczególnych krokach.

## Silniki unipolarne

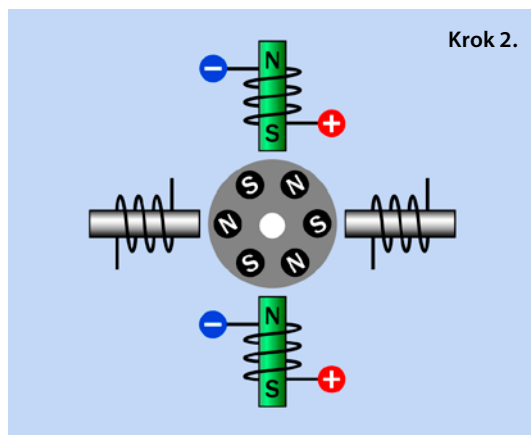
Elektroniczne układy sterujące silnikiem unipolarnym mogą być prostsze niż w przypadku modeli bipolarnych, ponieważ do uziemienia końców cewki można zastosować dostępne w handlu tranzystory przełączające. Klasyczny pięcioprzewodowy, unipolarny silnik krokowy, jaki często stosują hobbyści-amatorzy w robotach lub podobnych projektach, może



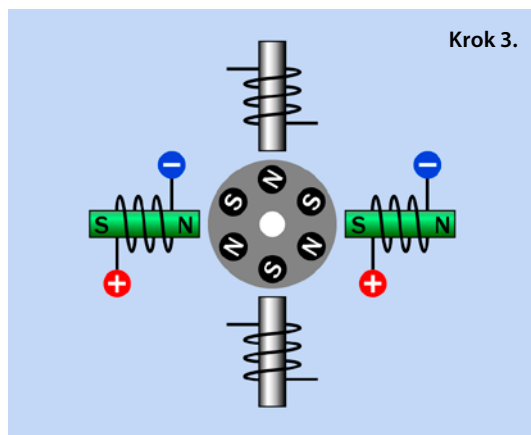
**Rysunek 25.8.** Najbardziej podstawowa, a zarazem najprostsza metoda zmiany kierunku prądu przepływającego przez cewkę polegająca na zastosowaniu mostka H; w rzeczywistości przełączniki zastępuje się elementami półprzewodnikowymi



**Rysunek 25.9.** Bipolarny silnik krokowy pokazany tuż przed wykonaniem przez wirnik pierwszego kroku w reakcji na pola magnetyczne wytworzone przez cewki stojące



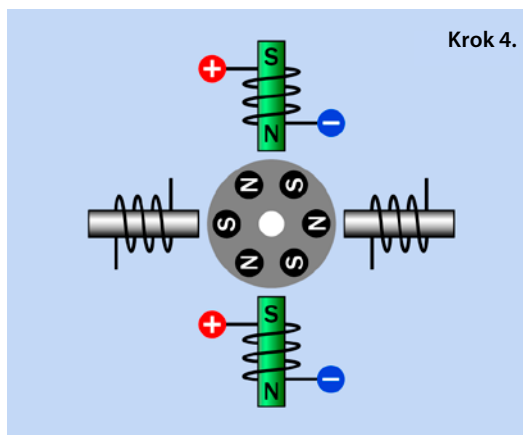
**Rysunek 25.10.** Bipolarny silnik krokowy z poprzedniego rysunku; wirnik wykonał obrót o jeden krok, a zasilanie cewek zmieniło się w celu wymuszenia następnego kroku



**Rysunek 25.11.** Bipolarny silnik krokowy po wykonaniu drugiego kroku i tuż przed rozpoczęciem trzeciego obrotu

być sterowany przez tak proste komponenty jak zestaw [timerów 555](#). Taki rodzaj silnika jest jednak mniej wydajny, biorąc pod uwagę jego masę i rozmiary, ponieważ w danym momencie zasilana jest jedynie połowa każdej z cewek.

Na rysunkach 25.13, 25.14, 25.15 i 25.16 pokazano schematycznie najprostszą konfigurację układu unipolarnego, który składa się z czterech cewek stojana oraz wirnika z sześcioma biegunami magnetycznymi. Na każdym z rysunków pokazano stan, w którym cewki stojana są tuż po otrzymaniu impulsu zasilającego i rozpoczyna się krótki okres, kiedy to



**Rysunek 25.12.** Bipolarny silnik krokowy po wykonaniu trzeciego kroku; gdy wirnik zareaguje na zmianę pól magnetycznych, jego ustawienie będzie identyczne jak na pierwszym rysunku w tej serii

ma nastąpić reakcja wirnika. Cewki będące pod napięciem zawierają metalowe rdzenie w kolorze zielonym. Uzwojenia i przewody, w których nie płynie prąd, mają kolor szary. Otwarte i zamknięte przełączniki a, b, c oraz d informują o drodze przepływu prądu przez przewody oznaczone kolorem czarnym.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że cewki po przeciwnych stronach silnika są zasilane w tym samym czasie, podczas gdy pozostała para cewek pozostaje wtedy bez zasilania. Ustawienie sterownika w taki sposób, aby cykle „włączania” cewek zachodziły na siebie, pozwala wygenerować większy moment obrotowy, ale jednocześnie zwiększa pobór mocy.

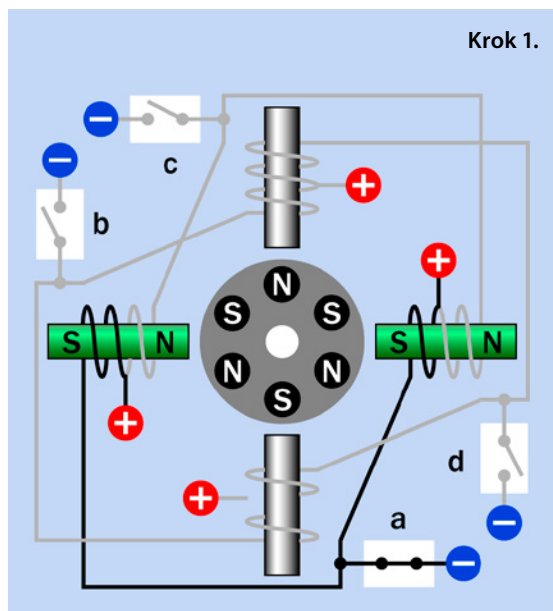
Silnik o większej liczbie biegunów stojana może obracać się o mniejsze kąty, pod warunkiem że bieguny te będą oddzielnie zasilane. Jeśli jednak cewki mają odrębne uzwojenia, zwiększa się wtedy koszt silnika.

## Rodzaje

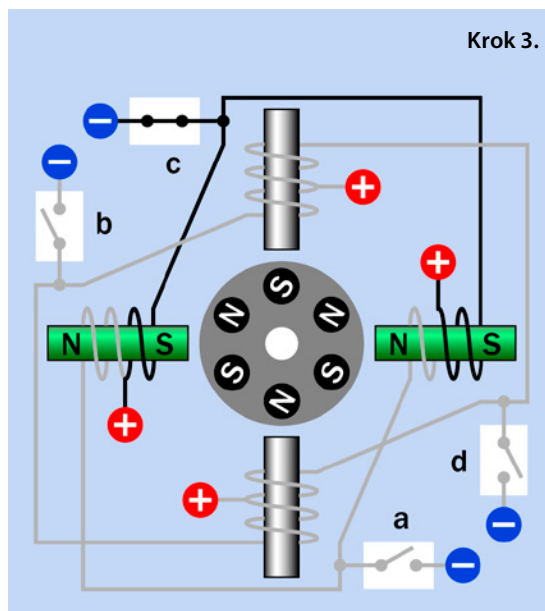
Oprócz omówionych powyżej modeli bipolarnych i unipolarnych dostępne są jeszcze inne rodzaje silników krokowych.

### Silnik o wielu fazach

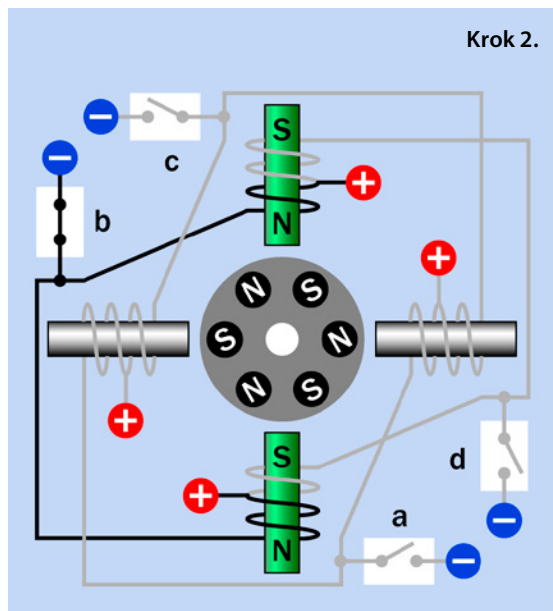
Tą nazwą określa się wszelkie rodzaje silników krokowych, w których dodatkowe bieguny pozwalają zredukować rozmiar kroku. Do zalet silników wielofazowych należą płynna



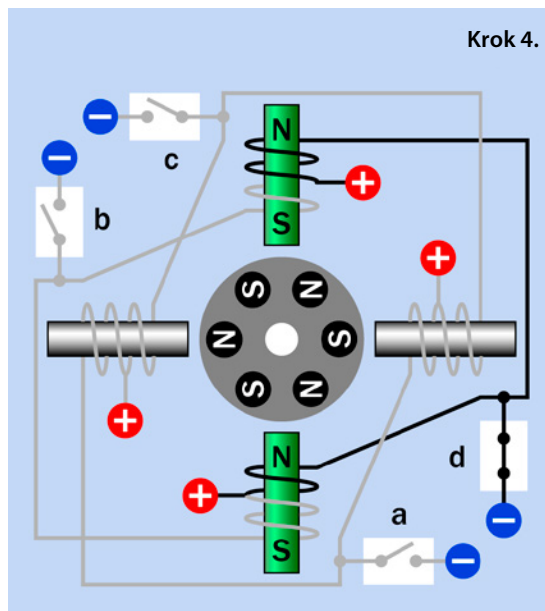
**Rysunek 25.13.** Cewki w tym unipolarnym silniku krokowym są tuż po odebraniu impulsu zasilającego, a wirnik jest tuż przed wykonaniem pierwszego kroku



**Rysunek 25.15.** Silnik z poprzedniego rysunku; jego cewki właśnie odebrały impuls zasilający i wymuszają wykonanie trzeciego kroku przez wirnik



**Rysunek 25.14.** Silnik z poprzedniego rysunku; jego cewki właśnie odebrały impuls zasilający i wymuszają wykonanie drugiego kroku przez wirnik



**Rysunek 25.16.** Gdy wirnik wykona czwarty krok, powróci do położenia, które będzie identyczne z pokazanym na rysunku pierwszym

praca przy dużych prędkościach oraz wysoka precyzja ustawienia żądanej pozycji wałka. Dodatkowe cewki pozwalają również uzyskać większą moc, ale oczywiście podnoszą koszt silnika.

## Silnik hybrydowy

Taki silnik, oprócz tego, że zawiera magnesy trwałe, ma również wirnik zębaty, który umożliwia regulowanie reluktancji. Jest to stosunkowo popularny typ silników, ponieważ zęby wirnika zwiększają precyzję i skuteczność pracy. Biorąc pod uwagę sterowanie, silnik ten przypomina klasyczny silnik krokowy z magnesem trwałym.

## Silnik z cewkami bifilarnymi

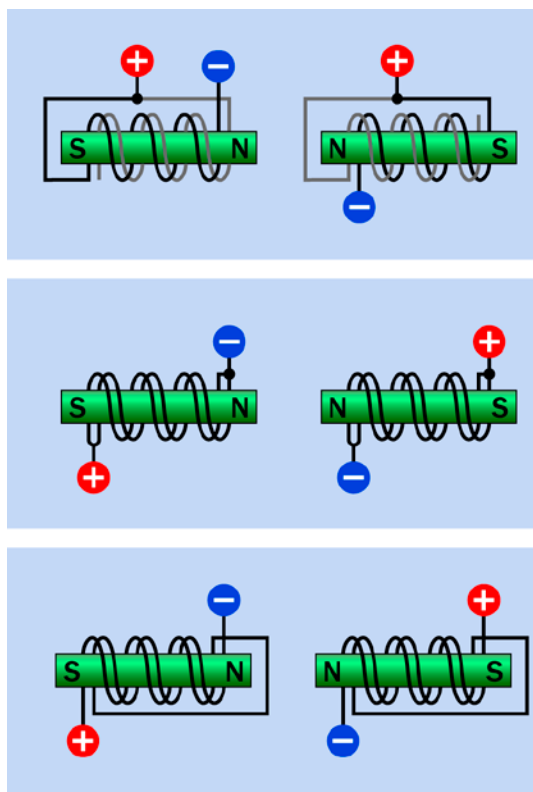
W tego rodzaju silnikach, czasami nazywanych *uniwersalnymi* silnikami krokowymi, każdy biegun stojana stanowią dwie nawinięte równoległe cewki. Jeśli więc istnieją dwa bieguny lub dwa zestawy biegunów i oba końce każdego uzwojenia są wyprowadzone na zewnątrz silnika, to łącznie dostępnych jest osiem przewodów. Dlatego taki model czasami określa się mianem *silnika 8-przewodowego*.

Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość uzyskania trzech różnych konfiguracji cewek wewnętrznych. Przez odpowiednie zwieranie ze sobą przewodów można uzyskać silnik pracujący w trybie unipolarnym lub bipolarnym.

Górna para schematów z rysunku 25.17 przedstawia przypadek, w którym koniec jednej cewki jest połączony z początkiem drugiej cewki i do tego wspólnego punktu (który pełni funkcję odczepu środkowego) jest przyłożone napięcie dodatnie, podobnie jak w silniku jednobiegunowym. Biegunowość magnetyczna cewki zależy od tego, który jej koniec jest połączony z masą. Tę część każdej cewki, która nie przewodzi prądu, oznaczono kolorem szarym.

Na środkowych schematach widać połączone ze sobą sąsiednie końce cewek, przez co uzwojenia są zasilane równoległe, a ich biegunowość magnetyczna zależy od polaryzacji napięcia, podobnie jak w silniku bipolarnym.

Cewki mogą być również połączone szeregowo, jak pokazano na dolnej parze schematów. Taki układ zapewnia większy moment obrotowy przy niskiej prędkości i mniejszy moment przy wysokiej prędkości, a jednocześnie umożliwia pracę przy wyższym napięciu i mniejszym natężeniu prądu.



**Rysunek 25.17.** W silniku bifilarnym dwie cewki są nawinięte równoległe na każdy biegun stojana; można je podłączyć przy użyciu odczepu środkowego, aby pracowały w trybie silnika unipolarnego (górne schematy), bądź zasilac równoległe (schematy środkowe) lub szeregowo (schematy dolne), aby działały jak w silniku bipolarnym

## Silnik o wielu fazach

W silniku wielofazowym poszczególne cewki stojana są zazwyczaj połączone szeregowo, a między każdą parą uzwojeń znajduje się odczep. Możliwą konfigurację pokazano na rysunku 25.18, na którym widać dwie kolejne fazy obrotu. Kąt obrotu przypadający na jeden krok może być jednak o połowę mniejszy, jeśli kierunek napięcia będzie zmieniany tylko w jednym miejscu w danym czasie. Sposób okablowania silnika zapewnia to, że podczas każdego kroku bez zasilania pozostaje tylko jedna cewka, ponieważ jej oba końce mają taki sam potencjał. Z tego względu silnik może mieć wysoki moment obrotowy mimo stosunkowo niewielkich rozmiarów.

W niektórych silnikach wielofazowych wprowadzenie dodatkowych przewodów pozwala uzyskać dostęp do obu

końców wszystkich cewek, które w tym przypadku nie są połączone wewnątrz. Takie rozwiązanie pozwala dostosować sterowanie silnikiem do konkretnych potrzeb.

### Sterowanie mikro krokowe

W odpowiednio zaprojektowanym silniku krokowym, którego napięcie sterujące będzie właściwie modulowane, można uzyskać bardzo małe, pośrednie kąty kroków. Niektórzy producenci deklarują, że można osiągnąć wartości na poziomie nawet 0,007 stopnia. Silnik pracujący w takim trybie ma jednak mniejszą zdolność do generowania momentu obrotowego.

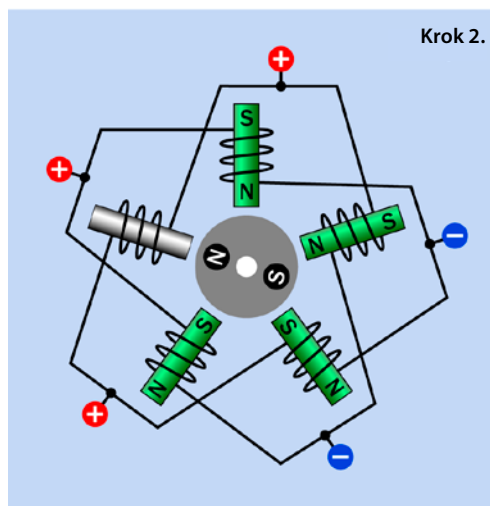
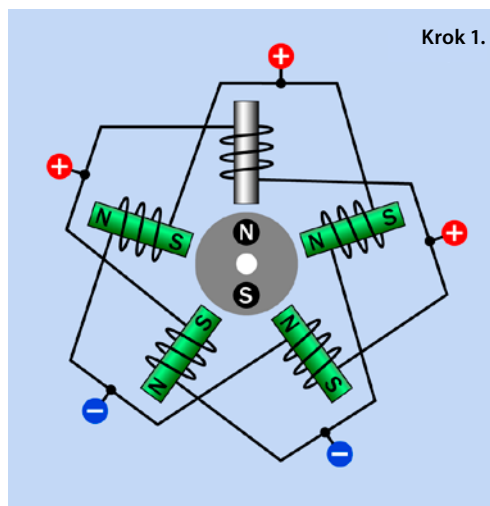
Najprostszym rodzajem techniki mikro krokowej jest sterowanie półkrokowe. Aby uzyskać taki tryb w silniku unipolarnym, każda cewka musi osiągnąć stan „wyłączenia”, zanim nastąpi odwrócenie jej biegunów magnetycznych.

### Detekcja położenia wirnika i sprzężenie zwrotne

Jeśli tylko ciąg impulsów wysyłanych do silnika zapewnia wirnikowi wystarczającą ilość czasu na reakcję, nie ma potrzeby stosowania mechanizmu sprzężenia zwrotnego i wysyłania informacji z potwierdzeniem położenia wirnika. Wystarczający jest wtedy otwarty układ sterowania. W przypadku nagłego przyspieszania, hamowania, wahań obciążenia i (lub) zmiany kierunku obrotów, a także przy wysokich prędkościach konieczne może być zastosowanie *systemu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym*, w ramach którego specjalny czujnik przekazuje informacje zwrotne o bieżącym ustawieniu wirnika.

### Sterowanie napięciowe

Szybkie obroty silnika krokowego wymagają szybkiego włączania i wyłączania pól magnetycznych w uzwojeniach stojana. Indukcyjność własna uzwojeń może w związku z tym ograniczać prędkość silnika. Jednym ze sposobów na poradzenie sobie z tym problemem jest zastosowanie wyższego napięcia. Bardziej zaawansowanym rozwiązaniem jest sterownik zapewniający wysokie napięcie początkowe, które następnie jest zmniejszane lub nagle przerywane po wykryciu przez czujnik, że natężenie prądu cewki wzrosło wystarczająco do przewyższenia indukcyjności własnej uzwojeń i osiągnęło ustalony limit. Taki sterownik można określić mianem *sterownika-obcinacza*, ponieważ napięcie



**Rysunek 25.18.** Wielofazowy silnik krokowy; przykładanie napięcia w pokazany sposób powoduje, że podczas każdego kroku tylko jedna cewka nie jest zasilana, a to pozwala uzyskać duży moment obrotowy, jak na silnik o stosunkowo niewielkich rozmiarach

jest tu „obcinane”, z reguły przez tranzystory mocy. Takie rozwiązanie jest formą *modulacji szerokości impulsu*.

### Wartości

Kąt kroku odnosi się do wyrażonego w stopniach kąta obrotu wykonywanego przez wałek silnika w ramach jednego pełnego kroku. Wartość ta jest zależna od fizycznej budowy

silnika. Największy kąt kroku wynosi 90 stopni, natomiast najbardziej zaawansowane silniki mogą realizować kroki na poziomie 1,8 stopnia (bez stosowania techniki mikrokroków).

Maksymalny moment obrotowy, jaki może być generowany przez silnik, omówiono w punkcie „Wartości”, w rozdziale 22., „Silnik prądu stałego”.

Do podstawowych parametrów, które także należy uwzględnić podczas doboru silnika krokowego, należą masa i rozmiary silnika oraz długość i średnica wałka.

## Stosowanie

Silniki krokowe wykorzystuje się do sterowania operacjami ustalania położenia głowicy w napędach dyskowych, przesuwania głowic drukujących i podawania papieru w drukarkach oraz do sterowania ruchem czujników w skanerach i kopiarkach.

W przemyśle i branży badawczo-rozwojowej takie silniki mogą służyć do regulacji urządzeń optycznych (nowoczesne teleskopy często są wyposażone w silniki krokowe) oraz sterowania zaworami w rurociągach.

Silnik krokowy może sterować *siłownikiem liniowym*, zwykle za pośrednictwem śruby gwintowanej (nazywanej prawidłowo śrubą pociągową) lub przekładni ślimakowej. Więcej informacji na temat siłowników liniowych można znaleźć w punkcie „Siłownik liniowy”, w rozdziale 22., „Silnik prądu stałego”. Choć silnik krokowy zapewnia większą dokładność niż tradycyjny silnik prądu przemiennego, wprowadzenie przekładni nieuchronnie wiąże się z pewnym pogorszeniem precyzji.

Do zalet silników krokowych należą:

- precyzja pozycjonowania — zwykle błąd wynosi od 3% do 5% na krok; procentowy błąd kąta nie sumuje się w kolejnych obrotach silnika;
- możliwość pracy w szerokim zakresie prędkości, w tym przy bardzo niskich prędkościach, bez potrzeby korzystania z przekładni redukcyjnych;
- bezproblemowy rozbieg, hamowanie i zmiana kierunku pracy;
- tani osprzęt sterujący w przypadkach, gdy dozwolone jest sterowanie w układzie otwartym;

- wysoka niezawodność ze względu na brak szczotek i komutatora.

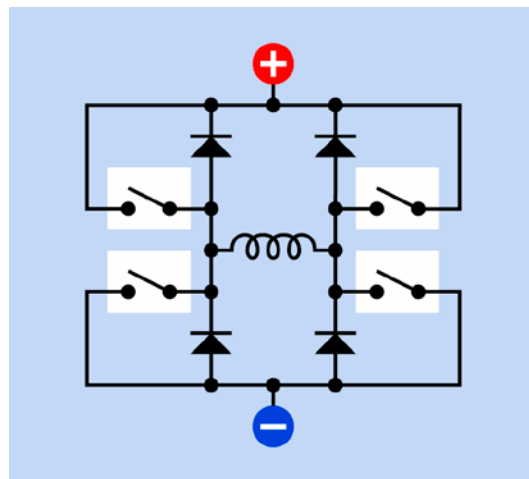
Do wad zaliczamy:

- hałas i drgania,
- rezonans przy niskich prędkościach,
- postępujący spadek momentu obrotowego przy dużych prędkościach.

## Diody zabezpieczające

Niewielkie silniki krokowe mogą być sterowane bezpośrednio przez tranzystory mocy, *układy Darlingtona*, a nawet *timery 555*. W większych silnikach powstaje jednak znacząca *siła przeciwelektromotoryczna* (gdy poszczególne cewki stojana zaczynają wytwarzać pole magnetyczne) lub siła elektromotoryczna (gdy pole magnetyczne zanika), natomiast w silnikach bipolarnych dodatkowo dochodzi do skoków napięcia towarzyszących zmianom kierunku przepływu prądu. W silniku unipolarnym, gdy tylko jedna część cewki jest zasilana za pośrednictwem odczepu środkowego, w drugiej części indukuje się napięcie tak samo jak we wtórnym uzwojeniu *transformatora*.

Uproszczony schemat ilustrujący miejsce podłączenia diody w silniku bipolarnym pokazano na rysunku 25.19.



**Rysunek 25.19.** Obwód w postaci mostka H należy rozbudować o diody zabezpieczające, które będą chronić inne elementy przed siłą elektromotoryczną generowaną przez zmieniający się prąd w cewce stojana

Dostępne są układy scalone, które oprócz wymaganych tranzystorów mocy zawierają także diody zabezpieczające. Istnieją również silniki krokowe z wbudowanymi takimi diodami. Przed podłączeniem silnika do źródła zasilania należy sprawdzić stosowne informacje w karcie produktu dostarczonej przez producenta.

## Kontrola położenia

Wbudowane elektroniczne układy sterujące **serwomotorem** zazwyczaj wywołują obrót wałka do precyzyjnie określonego położenia; robią to w odpowiedzi na sygnał o modulowanej szerokości impulsu generowany przez zewnętrzne źródło, na przykład mikrokontroler. Kąt obrotu silnika krokowego pracującego w otwartym układzie sterowania musi być wyznaczany metodą zliczania kroków w stosunku do początkowej pozycji wyjściowej. Takie ograniczenie silników krokowych można pokonać, stosując układy sterowania ze sprzężeniem zwrotnym. Wiąże się to jednak z koniecznością monitorowania pracy silnika, co zwiększa złożoność sterownika zewnętrznego. Decyzję o wyborze między silnikiem krokowym a serwomotorem należy więc podejmować w zależności od konkretnego zastosowania.

## Możliwe błędy

Ogólne problemy, jakie wiążą się ze stosowaniem wszystkich rodzajów silników, opisano w punkcie „Efekty cieplne”, w rozdziale 22., „Silnik prądu stałego”. Poniżej przedstawiono problemy właściwe dla silników krokowych.

### Niewłaściwe okablowanie

Ze względu na to, że silnik krokowy jest zasilany wieloma przewodami, istnieje duże ryzyko popełnienia błędów podczas podłączania. Ryzyko jest tym większe, że wiele silników nie jest oznaczanych żadnymi numerami katalogowymi. Pierwszym wyzwaniem jest więc określenie rodzaju silnika, z jakim mamy do czynienia. Bez podłączania silnika do zasilania obracamy wałek za pomocą palca wskazującego i kciuka — silnik z namagnesowanym wirnikiem nie będzie obracać się tak swobodnie jak silnik reluktancyjny, ponieważ magnesy wirnika będą oddziaływać wypustami stojana.

Jeśli silnik unipolarny jest stosunkowo nieduży i ma pięć przewodów, to niemal na pewno zawiera dwie cewki,

z których każda ma odczep środkowy. Ich funkcje można sprawdzić, przykładając dodatnie napięcie do czerwonego przewodu i kolejno uziemiając pozostałe przewody. Przyklejenie małego kawałka taśmy do wałka silnika pomoże określić jego obroty.

Pomocny może okazać się również miernik uniwersalny — znając rezystancję, można określić wewnętrzne połączenia cewek silnika. Rezystancja między końcami cewki jest bowiem w przybliżeniu dwukrotnie większa niż rezystancja między odczepem środkowym a końcem cewki.

Silnik wielofazowy także może mieć pięć przewodów, ale w tym przypadku rezystancja między dwoma dowolnymi niesąsiadującymi ze sobą przewodami będzie 1,5 raza większa niż rezystancja między dwoma dowolnymi sąsiednimi wprowadzeniami.

### Gubienie kroków

Jeśli w otwartym układzie sterowania silnik pominie jakieś impulsy lub ich nie odbierze ze sterownika, ten nie będzie miał dokładnych informacji o kącie ustawienia wałka. Takie zjawisko nosi nazwę *gubienia kroków*. Jego przyczyną mogą być gwałtowne skoki częstotliwości sygnału sterującego, dlatego wszelkie jej zmiany (zwiększanie lub zmniejszanie) należy wykonywać stopniowo. Taki tryb sterowania nazywa się *rampowaniem* prędkości silnika. Ze względu na bezwładność wirnika lub urządzenia napędzanego silnik krokowy nie potrafi natychmiastowo reagować na zmiany prędkości.

Gdy silnik wykona jeden lub kilka obrotów więcej, niż zostało to przekazane w poleceniu sterującym, wówczas mówimy o *przeregulowaniu*.

Gubienie kroków występuje także w sytuacji, gdy silnik nadal obraca się po odłączeniu zasilania (albo celowym, albo wynikającym z usterki zewnętrznej). W przypadku otwartego układu sterowania należy tak zaprogramować sterownik, aby po każdym włączeniu zasilania resetował położenie wału silnika.

### Nadmierny moment obrotowy

*Moment spoczynkowy* (*detent torque*) odpowiada maksymalnej sile obrotowej, którą można przyłożyć do wałka, nie powodując jego obrotu, gdy silnik nie jest włączony. Z *momentem trzymającym* (*holding torque*) odnoszącym się do

maksymalnej siły obrotowej przykładanej do wałka, która nie spowoduje jego obrotu, mamy do czynienia, gdy silnik nie porusza się, ale sterownik doprowadza do niego zasilanie. Można także wyróżnić *moment rozruchowy*, czyli maksymalny moment obrotowy, który może wytworzyć silnik, aby przezwyciężyć opory i uzyskać pełną prędkość (angielska nazwa tego parametru to *pull-in torque*). *Moment krytyczny (pull-out torque)* oznacza maksymalny moment obrotowy, jaki może być generowany przez pracujący silnik bez gubienia kroków (i utraty synchronizacji ze sterownikiem). W specyfikacji technicznej silnika powinny znajdować się niektóre lub wszystkie z powyższych parametrów. Przekroczenie którejkolwiek z tych wartości spowoduje gubienie kroków.

## Histereza

Pojęcie histerezy w tym przypadku odnosi się do sytuacji, gdy sterownik wysyła do silnika krokowego polecenie ustawienia określonej pozycji. *Histereza* określa się wtedy sumaryczny błąd między rzeczywistą pozycją osiąganą przez silnik obracający się w prawo a rzeczywistą pozycją osiąganą przez silnik obracający się w lewo. Różnica ta wynika z faktu, że silnik krokowy często zatrzymuje się tuż przed określoną pozycją, zwłaszcza podczas pracy pod dużym obciążeniem. Z tego względu każdy układ wymagający wysokiej precyzji należy sprawdzić w rzeczywistych warunkach, aby określić ewentualną histerezę silnika.

## Rezonans

Silnik charakteryzuje się własną częstotliwością rezonansową. Jeśli będzie drgać z częstotliwością bliską tej wartości, amplituda drgań będzie się powiększać, a to może generować błędy w ustalaniu położenia wałka, przyspieszać zużycie przekładni (jeśli są zamontowane) i łożysk, zwiększać poziom hałasu i przyczyniać się do powstawania innych problemów. W należycie opracowanych kartach produktu powinna się znaleźć informacja o częstotliwości rezonansowej silnika i jeśli to możliwe, silnik powinien pracować w warunkach, w których jego drgania mają częstotliwość przewyższającą tę wartość. Problem ten można rozwiązać, stosując gumowe elementy mocujące i elastyczne komponenty układu przeniesienia napędu. Wibracje można również próbować *tłumić*, obciążając silnik dodatkową masą.

Należy jednak pamiętać, że podłączenie jakiegokolwiek ciężaru bezpośrednio do wałka spowoduje obniżenie częstotliwości rezonansowej.

Rezonans może także prowadzić do *gubienia kroków* (patrz punkty powyżej).

## Kołysanie

W systemach sterowania ze sprzężeniem zwrotnym (w pętli zamkniętej) czujnik zamontowany na silniku przesyła do sterownika informację o położeniu wałka i, jeśli jest to konieczne, sterownik odpowiednio koryguje to położenie. Podobnie jak w każdym układzie sprzężenia zwrotnego, także w tym przypadku istnieje pewne opóźnienie. W rezultacie przy pewnych prędkościach może wystąpić zjawisko *kołysania* lub *oscylowania* położenia wałka, będące skutkiem nadmiernych korekt wprowadzanych przez sterownik — musi on wtedy korygować swoje korekty. Niektóre sterowniki z funkcją sprzężenia zwrotnego omijają ten problem w ten sposób, że przez większość czasu pracują w trybie sterowania otwartego, a korekty wprowadzają jedynie w sytuacjach, które mogą powodować gubienie kroków (na przykład po wykryciu nagłych zmian prędkości).

## Nasylenie magnetyczne

Zwiększanie momentu obrotowego silnika krokowego poprzez podniesienie napięcia (a tym samym zwiększenie natężenia prądu w cewkach stojana) może być kuszące, ale w rzeczywistości silniki są zwykle zaprojektowane w taki sposób, że przy napięciu znamionowym rdzenie cewek osiąga punkt zbliżony do punktu nasycenia magnetycznego. W rezultacie zwiększenie napięcia powoduje jedynie nieznaczny wzrost mocy silnika, ale znacząco rośnie ilość wydzielanego ciepła.

## Rozmagnesowanie wirnika

Nadmierne ciepło może spowodować częściowe rozmagnesowanie magnesów trwałych w wirniku. Demagnetyzacja może również wystąpić w sytuacji wystawienia tych magnesów na działanie prądu przemiennego o wysokiej częstotliwości, gdy wirnik się nie obraca. Dlatego próby uruchamiania silnika krokowego z wysoką prędkością przy zablokowanym wirniku mogą doprowadzić do nieodwracalnego obniżenia jego sprawności.

# Dioda

Termin **dioda** niemal zawsze odnosi się do elementu półprzewodnikowego, którego prawidłowa nazwa to „dioda ze złączem PN”. Taka pełna nazwa nie jest jednak używana. Wczesną odmianą diody był tak zwany *detektor kryształkowy*. Jeszcze wcześniej słowo **dioda** oznaczało rodzaj *lampy próżniowej*, która obecnie jest już rzadko używana poza nadajnikami radiowymi o dużej mocy oraz niektórymi urządzeniami wchodzącymi w skład najwyższej klasy systemów audio.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **prostownik** (punkt „Prostowanie” w podrozdziale „Stosowanie”),
- **tranzystor jednozłączowy** (rozdział 27.),
- **LED** — (dioda emitująca światło) (tom 2.).

## Funkcja

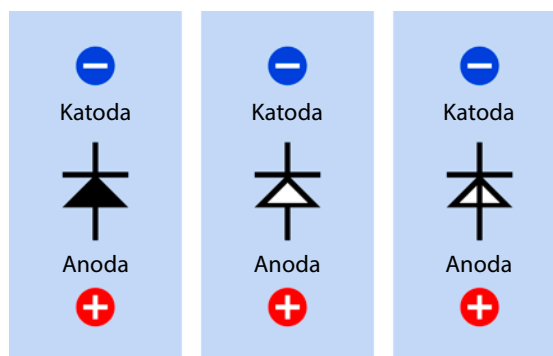
Dioda jest elementem o dwóch końcówkach, który pozwala na przepływ prądu w jednym kierunku zwanym *kierunkiem przewodzenia*. Przepływ jest możliwy, gdy *anoda* diody ma wyższy potencjał niż *katoda*. Mówi się, że w takim stanie dioda jest *spolaryzowana w kierunku przewodzenia*. Jeśli biegunowość napięcia zostanie odwrócona, dioda będzie *spolaryzowana w kierunku zaporowym* i będzie blokować przepływ prądu w zakresie swoich wartości znamionowych.

Diody często pełnią funkcję prostowników przekształcających prąd przemienny w stały. Mogą również służyć do tłumienia skoków napięcia lub ochrony podzespołów, dla których napięcie o odwrotnym kierunku byłoby niebezpieczne. Szczególne zastosowanie znajdują także w obwodach wysokich częstotliwości.

*Dioda Zenera* stabilizuje napięcie, *dioda pojemnościowa* steruje generatorem wysokiej częstotliwości, a *diody tunelowe*, *diody Gunna* oraz *diody PIN* są stosowane w układach wysokich częstotliwości ze względu na ich możliwości w zakresie szybkiego przełączania. **Dioda elektroluminescencyjna (LED)** jest niezwykle wydajnym źródłem światła, które szczegółowo omówiono w 2. tomie *Encyklopedii*. **Dioda światłoczuła** reguluje swoją zdolność do przewodzenia prądu

w zależności od ilości światła, które na nią pada. Wykorzystuje się ją jako czujnik, który opisano w tomie 3.

Na rysunku 26.1 pokazano ogólne symbole schematyczne diody.



**Rysunek 26.1.** Powszechnie stosowane ogólne symbole diody; wszystkie trzy mają takie samo znaczenie; kierunek strzałki utworzonej z trójkąta wskazuje konwencjonalny kierunek przepływu prądu (od plusa do minusa), gdy dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia

Podstawowy symbol diody jest modyfikowany zależnie od jej konkretnego rodzaju; przykłady pokazano na rysunku 26.2.



skutecznego (RMS). Każda dioda w kształcie walca ma oznaczenie w postaci srebrnego paska (lub czarnego w przypadku diody 1N4148) wskazującego *katodę*, czyli ten koniec, który jest „bardziej ujemny”, jeśli dioda jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia. Prąd szczytowy może znacznie przekraczać prąd ciągły, nie powodując przy tym uszkodzenia elementu. Dodatkowe informacje można znaleźć w karcie produktu.

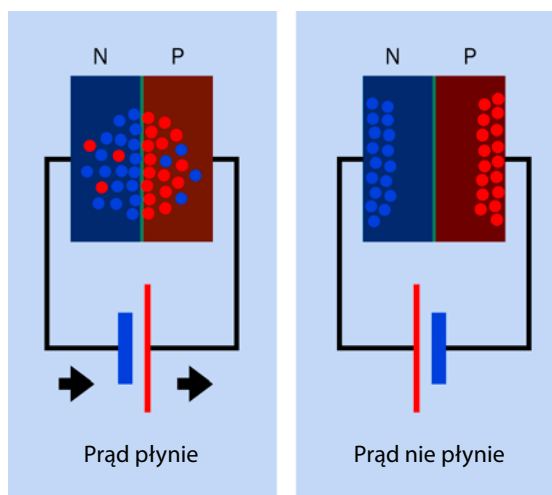
## Działanie

Dioda jest dwuwarstwowym *półprzewodnikiem* zwykle wykonanym z krzemu, czasami germanu, a znacznie rzadziej z innych materiałów. Do warstw wprowadzone są domieszki modyfikujące właściwości elektryczne materiału (dokładniej opisano to w rozdziale 28. „Tranzystor bipolarny”). *Warstwa N* (po stronie ujemnej, katodowej) ma nadmiar ujemnych elektronów. *Warstwa P* (po stronie dodatniej, anodowej) ma deficyt elektronów, co generuje wynikowy ładunek dodatni. Niedobór elektronów można również rozpatrywać jako nadmiar „ładunków dodatnich” lub precyzyjniej — jako nadmiar *dziur elektronowych*, które są swoistymi miejscami na elektrony.

Gdy połączymy ujemny biegun zewnętrznego źródła zasilania z katodą diody oraz dodatni biegun z jej anodą, to dioda będzie spolaryzowana w kierunku przewodzenia, a elektrony i dziury pod wpływem sił odpychania będą się przemieszczać w kierunku złącza między warstwami (patrz rysunek 26.4). Jeśli w diodzie krzemowej różnica potencjałów będzie większa niż około 0,6 V, czyli przekroczy *wartość progową*, ładunki zaczną przepływać przez złącze. Wartość progowa w diodzie germanowej wynosi około 0,2 V, a w diodzie Schottky’ego jest równa mniej więcej 0,4 V.

Gdy połączymy ujemny biegun zewnętrznego źródła zasilania z anodą, a dodatni biegun z katodą, wówczas polaryzacja diody ma charakter zaporowy, a elektrony i dziury elektronowe są odciągane od złącza. Okolice złącza stają się *obszarem zubożonym*, który uniemożliwia przepływ prądu.

Podobnie jak każdy element elektroniczny, także dioda nie jest w 100% skuteczna. Gdy jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia i przewodzi prąd, wprowadza niewielki spadek napięcia o wartości około 0,7 V. Wartość ta dotyczy diody krzemowej (dioda Schottky’ego może powodować

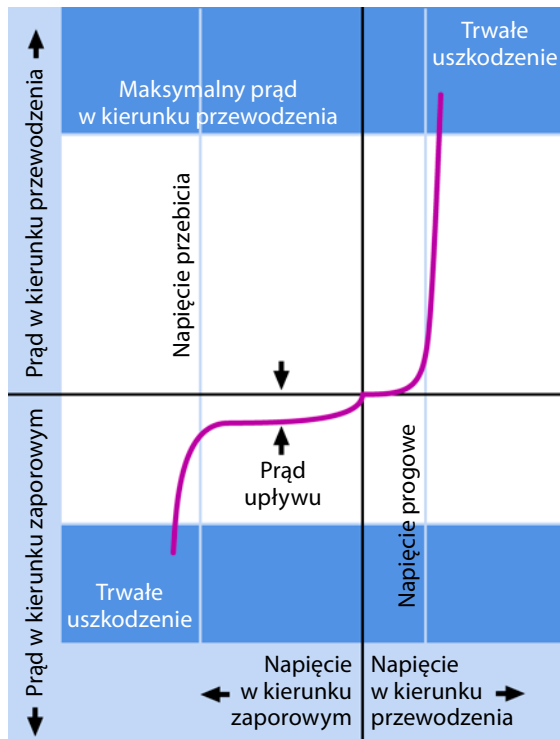


**Rysunek 26.4.** Wnętrze diody półprzewodnikowej; Po lewej: przy polaryzacji w kierunku przewodzenia napięcie z baterii (u dołu, w celu zwiększenia przejrzystości płytki oznaczono kolorami) wymusza przepływ ładunków w warstwach N i P w kierunku centralnego złącza diody; rozpoczyna się wtedy przepływ prądu; po prawej: przy polaryzacji w kierunku zaporowym ładunki w warstwach N i P są odciągane od złącza centralnego, które staje się obszarem zubożonym i nie może przewodzić prądu

spadek wynoszący zaledwie 0,2 V, dioda germanowa około 0,3 V, a niektóre LED-y generują spadek w zakresie od 1,4 do 4 V). Wiąże się to z rozpraszaniem energii w postaci ciepła. Gdy dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym, także nie jest w 100% skuteczna, tyle że tym razem w blokowaniu przepływu prądu. Niewielka ilość prądu, która zdoła przez nią przepłynąć, nazywa się *upływem*. Niemal zawsze jego natężenie jest mniejsze niż 1 mA, a w zależności od rodzaju diody może nie przekraczać kilku mikroamperów.

Działanie wyidealizowanej diody zilustrowano na rysunku 26.5. Po prawej stronie wykresu widać, że gdy na diodzie spolaryzowanej w kierunku przewodzenia stopniowo rośnie napięcie, prąd nie przepływa przez nią aż do momentu przekroczenia napięcia progowego. Wtedy natężenie prądu zaczyna rosnąć bardzo gwałtownie, ponieważ *rezystancja dynamiczna* diody maleje niemal do zera. Lewa strona wykresu odnosi się do diody spolaryzowanej w kierunku zaporowym o stopniowo rosnącym napięciu. Początkowo przepływa przez nią jedynie bardzo niewielki prąd upływu (w celu zwiększenia czytelności został on znacznie wyolbrzymiony). Na koniec, gdy napięcie osiąga charakterystyczną dla

danej diody wartość zwaną *napięciem przebicia*, rezystancja złącza znów spada niemal do zera. Na obu końcach krzywej dioda jest wysoce podatna na trwałe uszkodzenia przez prąd od nadmiernym natężeniu. Z wyjątkiem diod Zenera i waraktorów polaryzacja w kierunku zaporowym nie powinna osiągać poziomu odpowiadającego napięciu przebicia.



**Rysunek 26.5.** Gdy napięcie polaryzujące diodę w kierunku przewodzenia osiągnie wartość progową dla złącza, dioda zaczyna przewodzić prąd; po odwróceniu kierunku napięcia polaryzującego początkowo płynie prąd upływowy o niewielkim natężeniu; nadmierne napięcie czy to w kierunku przewodzenia, czy w zaporowym powoduje przypływ prądu o natężeniu wystarczającym do zniszczenia diody

Skala na osi Y wykresu z rysunku 26.5 nie oddaje rzeczywistości. W wielu diodach wartość napięcia przebicia (polaryzacja w kierunku zaporowym) może być nawet 100 razy większa od napięcia progowego (polaryzacja w kierunku przewodzenia). Ta niespójność skali została wprowadzona rozmyślnie w celu zwiększenia przejrzystości rysunku.

## Rodzaje

### Obudowy

Niektóre diody w ogóle nie mają żadnych informacji nadrukowanych na obudowie; inne mogą mieć naniesiony numer katalogowy. Jakikolwiek inne dane są spotykane bardzo rzadko. Nie istnieje żadna konwencja dotycząca oznaczania właściwości elektrycznych diod za pomocą kolorów lub skrótów. Jeśli jeden z końców jest w jakikolwiek sposób oznaczony, niemal zawsze jest to katoda. Jednym ze sposobów na zapamiętanie znaczenia paska na katodowym końcu diody prostowniczej lub impulsowej jest wyobrażenie sobie, że przypomina on kreskę na symbolu graficznym.

### Diody impulsowe

Nazywane są także *diodami przełączającymi* lub *szybkimi*. Ich małe rozmiary zapewniają niską reaktancję pojemnościową złącza, co z kolei przekłada się na bardzo dużą szybkość działania. Ich budowa nie gwarantuje odporności na prądy o dużych natężeniach. Dawniej diody tego rodzaju były oferowane w obudowach z wyprowadzeniami osiowymi przeznaczonymi do montażu przewlekane (podobnie jak tradycyjne tranzystory). Choć takie modele nadal są dostępne, o wiele powszechniejsze są obecnie konstrukcje przystosowane do montażu powierzchniowego.

### Diody prostownicze

Mają większe rozmiary niż diody impulsowe i mogą przewodzić prądy o większych natężeniach. Wyższe wartości reaktancji pojemnościowej złącza sprawiają, że nie nadają się do szybkiego przełączania. Diody prostownicze często mają wyprowadzenia osiowe, choć w przypadku zastosowań wymagających przepływu dużych prądów mogą mieć inną konstrukcję obejmującą na przykład radiator lub elementy umożliwiające połączenie z radiatorem.

Nie istnieją ogólnie przyjęte wartości maksymalne lub minimalne, które pozwalałyby odróżniać diody prostownicze od diod impulsowych.

## Dioda Zenera

Dioda Zenera zasadniczo działa bardzo podobnie do diody prostowniczej lub impulsowej. Wyjątkiem jest jej niższe napięcie przebicia.

Dioda Zenera jest przeznaczona do pracy z polaryzacją w kierunku zaporowym. Oznacza to, że w porównaniu z tradycyjnymi diodami prąd konwencjonalny jest przepuszczany przez nią „w niewłaściwym kierunku”. Wraz ze wzrostem natężenia prądu spada *rezystancja dynamiczna* takiej diody. Zależność tę pokazano na rysunku 26.6, na którym dwie krzywe w różnych kolorach odpowiadają dwóm różnym diodom Zenera (krzywe opracowano na podstawie danych producenta). Dzięki takiemu działaniu dioda Zenera znajduje zastosowanie w prostych układach stabilizacyjnych — przepływ prądu w kierunku zaporowym w warunkach przebicia uniemożliwia dalszy wzrost napięcia. Inne zastosowania diody Zenera opisano w punkcie „Stabilizacja napięcia DC i tłumienie szumów”. Typową diodę Zenera pokazano na rysunku 26.7.

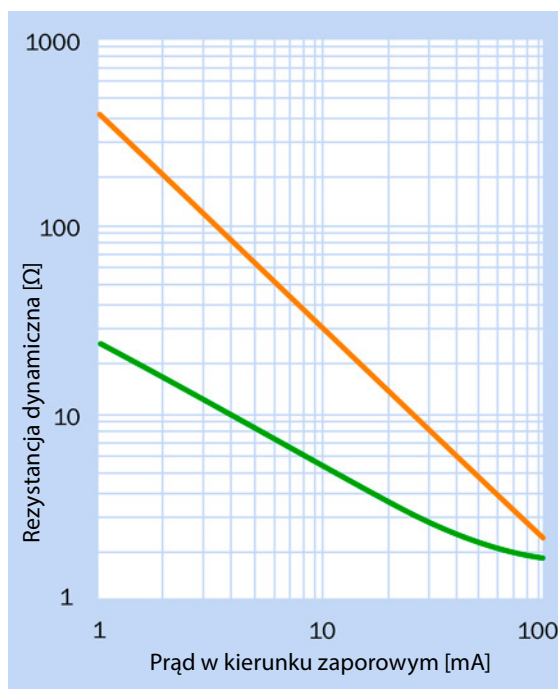
## Transil (dioda TVS)

Rodzaj diody Zenera, który służy do ochrony czułych urządzeń przed przepięciami. Zadaniem takiej diody jest ograniczanie nagłych wzrostów napięcia przez odprowadzanie nadmiaru energii do masy. Dioda TVS jest w stanie stłumić napięcie wynoszące nawet 30 000 V, powstałe na skutek uderzenia pioruna lub wyładowania elektrostatycznego. Diody TVS zazwyczaj są umieszczane wraz z innymi diodami w chipach przystosowanych do montażu powierzchniowego.

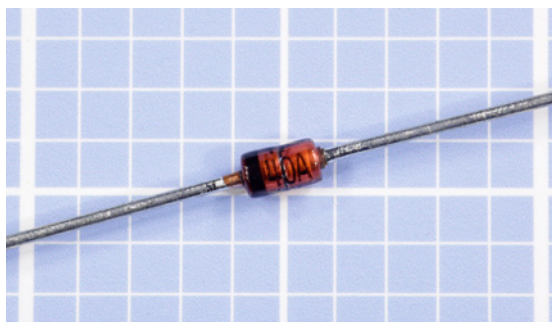
Diody TVS stosuje się również w obwodach ograniczających skutki wyładowań elektrostatycznych (ESD), do jakich może dochodzić po dotknięciu urządzenia elektronicznego przez osobę, na której zgromadziły się ładunki elektrostatyczne.

## Dioda Schottky’ego

Ten rodzaj diody charakteryzuje się niską reaktancją pojemnościową złącza, co zapewnia szybsze przełączanie niż w przypadku standardowych diod krzemowych. Wprowadza również mniejszy spadek potencjału przy polaryzacji w kierunku przewodzenia. Ta cecha może być pożądana w układach niskonapięciowych i zapewnia mniejsze rozpraszanie energii w zastosowaniach, w których dioda służy do sterowania przepływem prądu. Dioda Schottky’ego zawiera



**Rysunek 26.6.** Dane techniczne dostarczane przez producenta mogą zawierać tego rodzaju wykresy; tutaj jest pokazana zmiana rezystancji dynamicznej dwóch diod Zenera spolaryzowanych w kierunku zaporowym jako reakcja na zmiany natężenia prądu



**Rysunek 26.7.** Dioda Zenera 1N4740

złącze półprzewodnik-metal, dlatego jest nieco droższa niż zwykłe diody krzemowe o podobnych wartościach znamionowych napięcia i prądu.

## Dioda pojemnościowa

Ta dioda, nazywana również *warikapem* lub *waraktorem*, charakteryzuje się zmienną pojemnością elektryczną sterowaną napięciem przykładanym w kierunku zaporowym. W innych diodach to zjawisko również występuje, ale waraktory są specjalnie przystosowane do korzystania z niego przy bardzo wysokich częstotliwościach. Napięcie powoduje rozszerzanie się lub kurczenie obszaru zubożonego między warstwami P i N, co można porównać do zbliżania się lub oddalania od siebie okładek kondensatora.

Ponieważ maksymalna pojemność diody pojemnościowej jest bardzo mała i wynosi około 100 pF, jej zastosowania są ograniczone. Szeroko wykorzystuje się ją w układach radiowych, w których zmienna pojemność zależna od napięcia zapewnia wyjątkowo skuteczny sposób sterowania częstotliwością obwodu oscylacyjnego. W niemal wszystkich odbiornikach radiowych waraktor steruje oscylatorem z pętlą fazową. W krótkofalówkach może służyć do strojenia filtra monitorującego częstotliwość odbieranego sygnału radiowego.

Dioda pojemnościowa jest zawsze spolaryzowana w kierunku zaporowym na poziomie poniżej napięcia przebicia, dlatego nie występuje w niej przewodzenie prądu. Napięcie sterujące taką diodą musi być całkowicie wolne od jakichkolwiek wahań, które mogłyby wpływać na częstotliwość rezonansową obwodu.

## Dioda tunelowa, dioda Gunna, dioda PIN

Tego rodzaju diody są przeznaczone do pracy przy bardzo wysokich częstotliwościach lub w układach mikrofalowych, czyli tam, gdzie zwykle diody nie sprawdzają się ze względu na zbyt małą szybkość przełączania.

## Matryca diodowa

Jest to zespół co najmniej dwóch diod zamkniętych w jednej obudowie dwurzędowej typu DIP (częściej spotykane) lub chipie przystosowanym do montażu powierzchniowego. Konfiguracja wewnętrzna oraz układ wyprowadzeń zależą od konkretnego urządzenia. Matryce diodowe mogą być stosowane jako zakończenia torów transmisji danych w celu zminimalizowania szumów wynikających z odbicia sygnału.

## Mostek prostowniczy

Choć w rzeczywistości jest to matryca diodowa, w katalogach powszechnie występuje właśnie pod nazwą *mostka prostowniczego*. Oferowany jest on w wielu odmianach do montażu przewlekanego o prądzie znamionowym nawet do 25 A. Niektóre modele są przeznaczone do prostowania prądu jednofazowego, a inne prostują również prąd trójfazowy. Mostki z zaciskami śrubowymi mogą prostować prąd o napięciu przekraczającym 1000 V i natężeniu osiągającym nawet 1000 A. Mostek zwykle nie zawiera żadnych elementów służących do wygładzania lub filtrowania napięcia wyjściowego. Więcej informacji na temat działania mostka prostowniczego można znaleźć w punkcie „Prostowanie”.

## Wartości

W karcie produktu typowej diody powinny znajdować się następujące informacje wyrażone przy użyciu podanych tu skrótów:

- maksymalny ciągły prąd przewodzenia:  $I_{F}$ ,  $I_{O}$  lub  $I_{Omax}$ ;
- napięcie przewodzenia (spadek potencjału wprowadzany przez diodę):  $V_{F}$ ;
- szczytowe napięcie wsteczne DC (nazywane również maksymalnym napięciem blokującym lub napięciem przebicia):  $P_{iV}$ ,  $U_{dc}$  lub  $U_{br}$ ;
- maksymalny prąd zaporowy (nazywany również prądem upływu):  $I_{r}$ .

W kartach produktu diod stosowanych w układach prądu przemiennego mogą się znaleźć również dodatkowe dane. Podany może być na przykład szczytowy prąd udarowy w kierunku przewodzenia lub dopuszczalny zakres temperatury.

Typową diodą impulsową jest model 1N4148 (pokazany u dołu rysunku 26.3), którego maksymalny prąd przewodzenia wynosi 300 mA, a wywołany przez niego spadek potencjału ma wartość około 1 V. Taka dioda toleruje szczytowe napięcie wsteczne na poziomie 75 V. Wartości te mogą się nieznacznie różnić w zależności od producenta podzespołu.

Diody prostownicze z serii 1N4001, 1N4002 i 1N4003 charakteryzują się maksymalnym prądem przewodzenia równym 1 A oraz napięciem przewodzenia nieznacznie

przekraczającym 1 V. W zależności od modelu są mniej lub bardziej odporne na napięcie wsteczne — od 50 do 1000 V. Również w tym przypadku wartości mogą się nieznacznie różnić w zależności od producenta podzespołu.

Diody Zenera charakteryzują się innymi parametrami, ponieważ są używane w polaryzacji zaporowej jako urządzenia stabilizujące napięcie, a nie jako układy prostownicze. W danych katalogowych mogą występować następujące parametry:

- napięcie Zenera (potencjał, przy którym dioda zaczyna przewodzić prąd w kierunku wstecznym, gdy jest spolaryzowana w kierunku zaporowym; innymi słowy, jest to odpowiednik napięcia przebiccia):  $V_z$ ;
- impedancja Zenera lub rezystancja dynamiczna (rezystancja diody wyznaczona dla polaryzacji w kierunku zaporowym przy napięciu Zenera):  $Z_z$ ;
- maksymalny lub dopuszczalny prąd Zenera (bądź prąd wsteczny):  $I_z$  lub  $I_{zm}$ ;
- maksymalna lub całkowita moc strat:  $P_d$  lub  $P_{tot}$ .

Napięcie Zenera może być określone jako zakres lub po prostu jako wartość maksymalna.

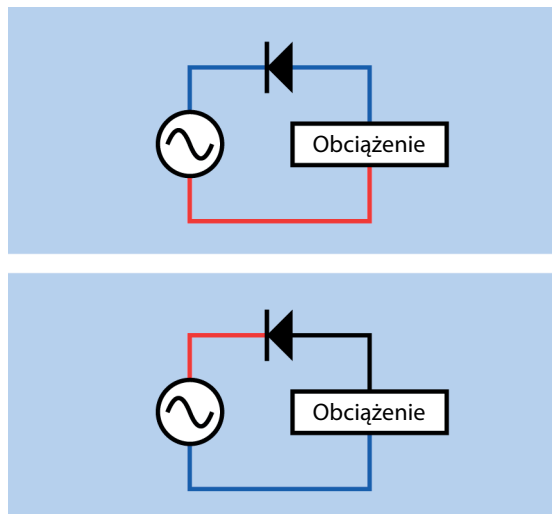
Wartości graniczne prądu przewodzenia często nie są podawane, ponieważ taka dioda nie jest przewidziana do pracy z polaryzacją w kierunku przewodzenia.

## Stosowanie

### Prostowanie

*Dioda prostownicza*, jak sama nazwa wskazuje, służy do prostowania prądu przemiennego, czyli do konwersji prądu AC na DC. W *prostowniku półokresowym (jednopołówkowym)* wykorzystywana jest jedna dioda blokująca połowę sinusoidalnego przebiegu prądu przemiennego. Na rysunku 26.8 pokazano podstawowy obwód prostownika półokresowego. Na górnym schemacie dioda zezwala na przepływ prądu przez obciążenie w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (w lewo). Na dole dioda blokuje prąd usiłujący przepłynąć w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara (w prawo). Choć w przebiegu wyjściowym istnieją „przerwy” między impulsami, taki układ może służyć do realizowania prostych zadań, na przykład zasilania diody

LED, a po dodaniu kondensatora wygładzającego może zasilać cewkę przekaźnika stałoprądowego.

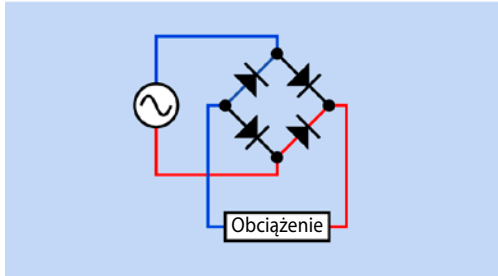
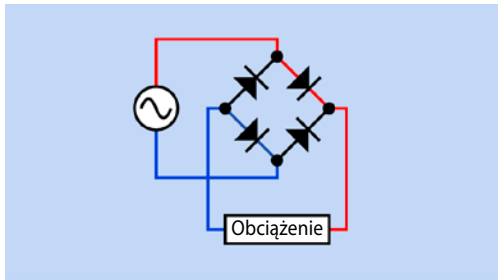


**Rysunek 26.8.** Prostownik półokresowy (jednopołówkowy); w tej konfiguracji dioda pozwala na przepływ prądu przemiennego w lewo, ale blokuje jego przepływ w kierunku przeciwnym

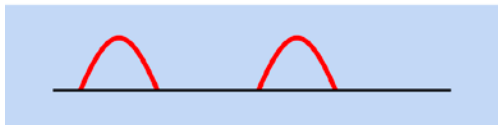
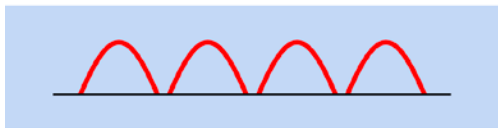
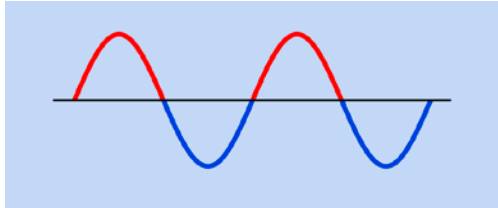
*Prostownik pełnookresowy (dwupołówkowy)* za pomocą czterech diod efektywniej prostuje prąd przemienny i ułatwia jego wygładzenie za pomocą **kondensatorów**. Prosty obwód takiego prostownika pokazano na rysunku 26.9. Porównanie przebiegów wejściowych i wyjściowych dla prostowników pół- i pełnookresowych przedstawiono na rysunku 26.10.

Prostowanie dwupołówkowe rzadko jest realizowane za pomocą elementów dyskretnych, ponieważ w handlu są dostępne mostki prostownicze w postaci kompletnych modułów będących samodzielnymi komponentami. Diody prostownicze jako elementy dyskretnie częściej stosuje się do tłumienia impulsów *siły przeciw elektromotorycznej*, co zostanie bardziej szczegółowo opisane w następnym punkcie.

Na rysunku 26.11 przedstawiono starą, ale nadal powszechnie spotykaną konstrukcję mostka prostowniczego. Takie urządzenie o wymiarach w przybliżeniu 5 cm × 5 cm × 4 cm jest podzielone na cztery sekcje (wyznaczone końcówkami lutowniczymi po prawej stronie), przy czym każda sekcja odpowiada pod względem funkcjonalnym jednej nowoczesnej diodzie. Na rysunku 26.12 pokazano stosunkowo nowoczesne prostowniki; model po lewej obsługuje prąd



**Rysunek 26.9.** Podstawowy schemat powszechnie stosowanego mostka prostowniczego; kolorami zaznaczono biegunowość; przewody w kolorze czarnym nie przewodzą prądu, ponieważ jest on blokowany przez diody; warto zwrócić uwagę, że polaryzacja obciążenia jest stała

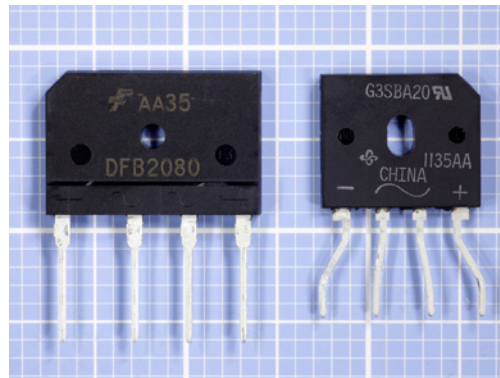


**Rysunek 26.10.** Wykres górny: przebieg sinusoidalny napięcia źródła prądu przemiennego; wartości napięcia zmieniają się między dodatnimi (kolor czerwony) a ujemnymi (kolor niebieski) względem linii neutralnej (kolor czarny); wykres środkowy: prąd AC przekształcony przez prostownik pełnokresowy; ze względu na to, że diody nie przewodzą prądu poniżej wartości progowej napięcia, między impulsami znajdują się niewielkie przerwy; wykres dolny: sygnał na wyjściu prostownika półokresowego

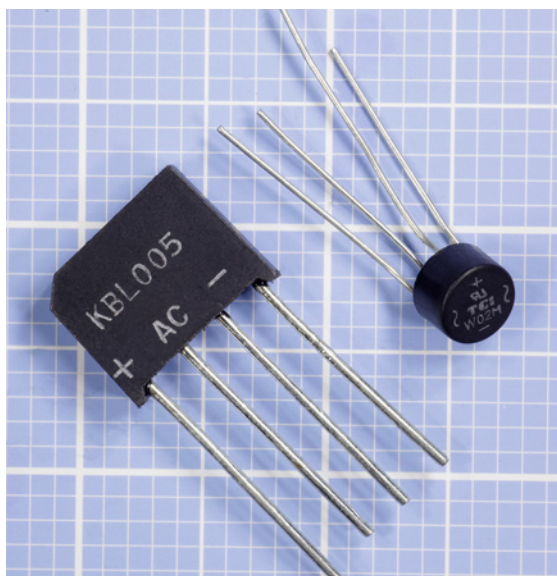
ciągły o natężeniu 20 A przy napięciu skutecznym (RMS) 800 V, a model po prawej — prąd ciągły 4 A przy napięciu skutecznym 200 V. Widoczny w lewej części rysunku 26.13 mostek może przewodzić ciągły prąd 4 A przy napięciu 50 V RMS, natomiast model po prawej stronie charakteryzuje się prądem znamionowym 1,5 A przy napięciu 200 V RMS.



**Rysunek 26.11.** Zanim pod koniec lat 60. ubiegłego wieku zaczęto produkować układy scalone, często stosowano takie prostowniki krzemowe, które zajmowały powierzchnię około 13 cm<sup>2</sup>



**Rysunek 26.12.** Pełnokresowe mostki prostownicze są powszechnie dostępne w takich obudowach; szczegółowe informacje można znaleźć w tekście



**Rysunek 26.13.** Mniejsze pełnookresowe mostki prostownicze zdolne do ciągłego przewodzenia prądu o natężeniu od 1,5 A do 4 A

Wyjście stałoprądowe prostownika z reguły stanowią piny skrajne, czyli pierwszy i ostatni, natomiast zasilanie AC jest doprowadzane do dwóch pinów środkowych. Pin dodatni DC może być dłuższy niż pozostałe i zazwyczaj jest oznaczony symbolem „+”.

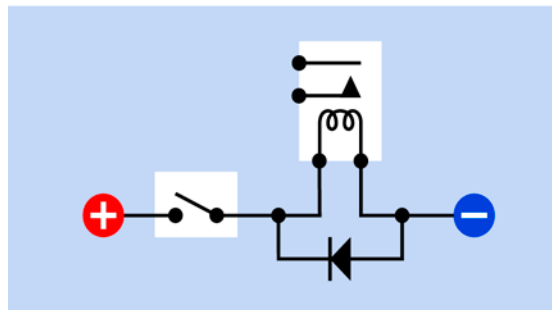
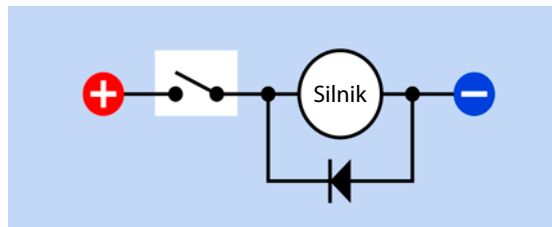
Dwupołówkowe mostki prostownicze są dostępne również w wersjach do montażu powierzchniowego. Model pokazany na rysunku 26.14 ma znamionową wartość prądu 0,5 A.



**Rysunek 26.14.** Ten element do montażu powierzchniowego zawiera cztery diody składające się na obwód dwupołówkowego mostka prostowniczego o ciągłym prądzie znamionowym 0,5 A; zajmuje powierzchnię około 1,3 cm<sup>2</sup>

## Tłumienie siły przeciw elektromotorycznej

Cewka przekaźnika, silnik lub inne urządzenie o dużej indukcyjności podczas włączania lub wyłączenia zwykle generuje skok napięcia. Powstającą wtedy siłę elektromotoryczną można stłumić za pomocą bocznikującej diody prostowniczej. W przeciwnym razie mogłoby dojść do uszkodzenia pozostałych elementów obwodu. Diodę w takim układzie określa się mianem *diody zabezpieczającej*, *diody obcinającej* lub *tlumika stanów niestabilnych*. Patrz rysunek 26.15.



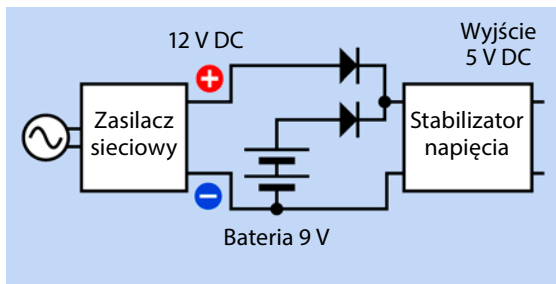
**Rysunek 26.15.** Diodę prostowniczą często montuje się równolegle do silnika (u góry), przekaźnika (u dołu) lub innego urządzenia o dużej indukcyjności, która podczas włączania lub wyłączenia wywołuje nagłe skoki napięcia wstecznego; dioda tłumi takie skoki i tym samym chroni pozostałe elementy obwodu przed uszkodzeniem

## Wybór napięcia zasilającego

Dioda jest czuła na napięcie pomiędzy swoimi końcami: anodą i katodą. Innymi słowy, jeśli katoda jest pod napięciem 9 V względem masy obwodu, a anoda ma napięcie 12 V, to różnica wynosząca 3 V znacznie przekracza wartość progową, więc dioda przewodzi prąd elektryczny (rzeczywiste dopuszczalne wartości będą zależęły od napięcia przewodzenia diody). Jeśli napięcie zostanie odwrócone, dioda będzie blokować przepływ prądu.

Taką właściwość można wykorzystać w urządzeniu, które będzie automatycznie wybierać między zasilaniem sieciowym

a bateryjnym 9-woltowym. Schemat takiego obwodu pokazano na rysunku 26.16. Po podłączeniu zasilacza sieciowego dostarczającego napięcie 12 V DC będzie on „rywalizować” z baterią o to, które z nich ma zasilać stabilizator napięcia. Bateria dostarcza napięcie 9 V DC za pośrednictwem dolnej diody do katody diody górnej, ale zasilacz sieciowy ma pierwszeństwo, ponieważ doprowadza do anody tej diody napięcie 12 V DC. W rezultacie bateria przestaje zasilać obwód (dolna dioda jest spolaryzowana zaporowo) aż do momentu odłączenia zasilacza, kiedy to zaczyna działać ponownie, przy czym górna dioda uniemożliwia przepływ prądu przez zasilacz sieciowy.



**Rysunek 26.16.** Dwie diody połączone katodami automatycznie wybierają między napięciem 12 V DC z zasilacza a wewnętrzną baterią 9 V

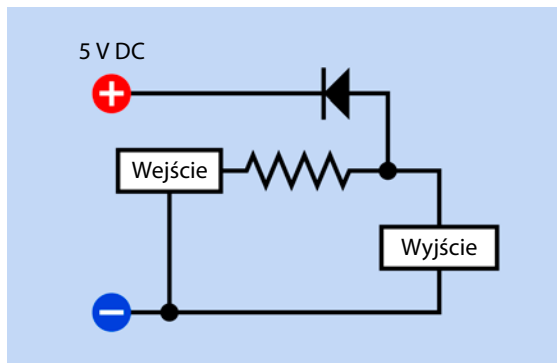
Stabilizator napięcia z tego schematu przyjmuje napięcie 12 V DC lub 9 V DC i przekształca je w napięcie 5 V DC (w przypadku zasilania 12 V DC stabilizator będzie generować większe straty energii — będzie wydzielał więcej ciepła).

## Obcinanie napięcia

Dioda może służyć do *obcinania* napięcia do żądanej wartości. Jeśli konieczne jest, aby napięcie podawane do półprzewodnikowego układu CMOS zasilanego napięciem 5 V lub podobnie czułego urządzenia nie wykraczało poza określony zakres, można anodę diody podłączyć do wejścia tegoż układu, a katodę do źródła zasilania 5 V. Jeśli napięcie wejściowe wzrośnie powyżej 5 V i różnica potencjałów przekroczy wartość progową diody, nadmiar energii zostanie przekierowany do źródła zasilania. Patrz rysunek 26.17.

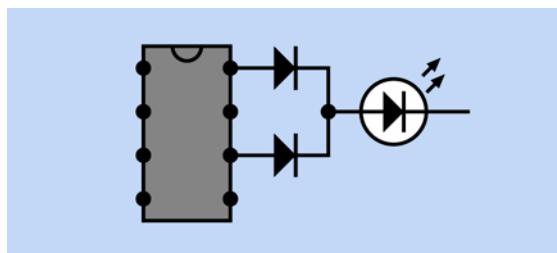
## Bramka logiczna

Dioda impulsowa nie jest idealną bramką logiczną, ponieważ zwykle wprowadza spadek potencjału o około 0,6 V, co



**Rysunek 26.17.** Dioda obcinająca może ograniczać napięcie wyjściowe — w tym przykładzie do około 5,6 V; jeśli napięcie na wyjściu wzrośnie powyżej tej wartości względem wspólnej masy, wówczas różnica potencjałów na diodzie spowoduje odprowadzenie nadmiernej energii z powrotem do źródła 5 V

może być istotną wartością w obwodzie 5-woltowym i prawdopodobnie niedopuszczalną w obwodzie 3,3-woltowym. Może jednak być przydatna po stronie wyjściowej, na przykład gdy kilka wyjść z układu logicznego lub mikrokontrolera ma sterować jednym urządzeniem, takim jak dioda LED. Taki właśnie obwód pokazano na rysunku 26.18. Połączone w ten sposób diody będą działać podobnie jak bramka OR, zapobiegając przy tym przepływowi prądu wstecznego między poszczególnymi wyjściami.



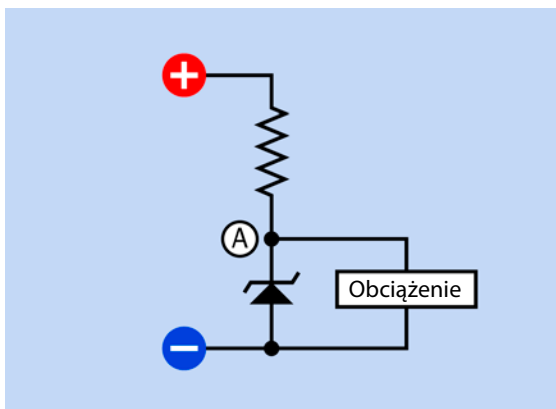
**Rysunek 26.18.** Dwa lub więcej wyjść z układu logicznego lub mikrokontrolera można połączyć za pośrednictwem diod w celu sterowania innym urządzeniem, na przykład diodą LED, z jednoczesną ochroną chipu przed przepływem prądu wstecznego; diody tworzą bramkę logiczną OR

## Stabilizacja napięcia DC i tłumienie szumów

Jak już wcześniej wspomniano, rezystancja dynamiczna diody Zenera spolaryzowanej w kierunku zaporowym maleje

wraz ze wzrostem natężenia prądu. Zależność ta zaczyna obowiązywać w punkcie, w którym dochodzi do przebicia złącza (po osiągnięciu *napięcia Zenera*), i w ograniczonym zakresie ma charakter mniej więcej liniowy.

Dzięki takiej unikalnej właściwości dioda Zenera znajduje zastosowanie w bardzo prostych stabilizatorach napięcia, w których jest połączona szeregowo z rezystorem. Taki obwód pokazano na rysunku 26.19. W zrozumieniu jego działania pomocne może być porównanie diody i rezystora do specyficznego rodzaju dzielnika napięcia, którego wyjście jest w punkcie A. Gdy wahania zasilania powodują wzrost napięcia wejściowego, zwiększa się prąd przepływający przez diodę Zenera, co powoduje odpowiedni spadek jej rezystancji dynamicznej. Mniejsza rezystancja tej części dzielnika powoduje obniżenie napięcia wyjściowego w punkcie A kompensujące wzrost napięcia zasilania.

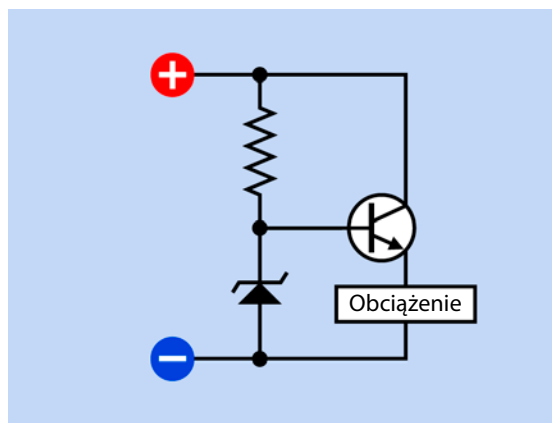


**Rysunek 26.19.** Podstawowy obwód ilustrujący zdolność diody Zenera do kompensacji wahań zasilania lub obciążenia i utrzymywania mniej więcej stałego napięcia w punkcie A

Z drugiej strony, jeśli obciążenie w obwodzie wzrośnie i będzie powodować spadek napięcia wejściowego, prąd przepływający przez diodę Zenera będzie maleć, powodując wzrost jej rezystancji, a to z kolei zwiększy napięcie w punkcie A i doprowadzi do kompensacji jego wahań.

Ponieważ połączony szeregowo rezystor może wydzielać dużo ciepła, do sterowania obciążeniem można zastosować tranzystor, tak jak pokazano na rysunku 26.20.

Dane katalogowe mogą zawierać informacje dotyczące zależności rezystancji dynamicznej diody Zenera od natężenia prądu w formie wykresów podobnych do pokazanych na



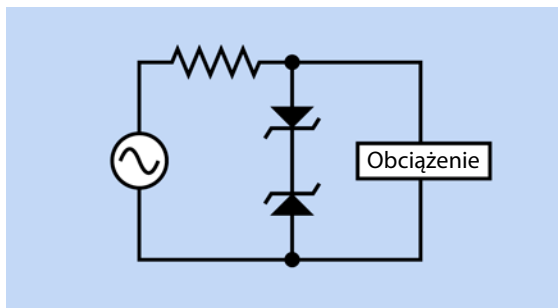
**Rysunek 26.20.** Do obwodu z poprzedniego rysunku można dodać tranzystor, aby zmniejszyć straty energii w rezystorze

rysunku 26.6. W rzeczywistości zamiast elementów dyskretnych stosuje się scalone **stabilizatory napięcia**, takie jak LM7805 z funkcją automatycznej kalibracji, który nie wymaga rezystora szeregowego i jest w dużym stopniu niezależny od temperatury. Niemniej jednak model LM7805 zawiera diodę Zenera, a zasada jego działania jest taka sama jak opisanych wyżej układów.

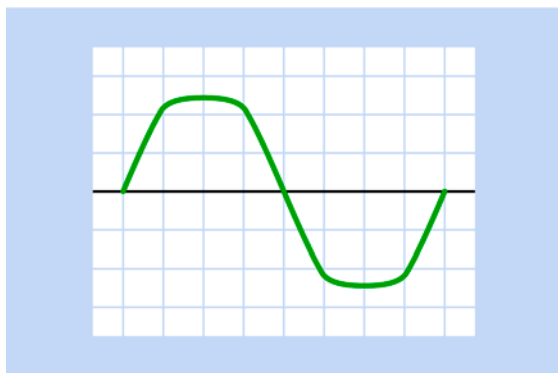
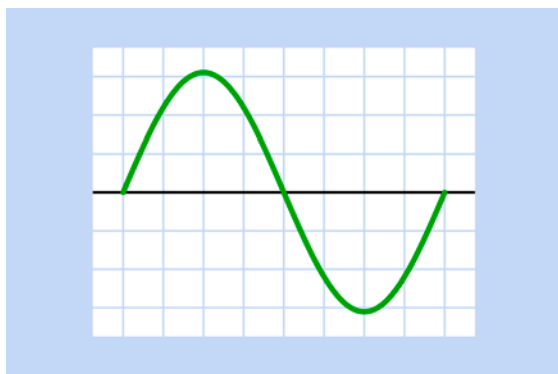
## Sterowanie napięciem AC i obcinanie sygnału

Bardziej praktycznym zastosowaniem diody Zenera jest ograniczanie napięcia AC i (lub) przycinanie przebiegu sinusoidalnego. Takie zadania realizuje się za pomocą dwóch diod połączonych szeregowo z przeciwnymi polaryzacjami. Podstawowy schemat takiego obwodu pokazano na rysunku 26.21. Natomiast rysunek 26.22 przedstawia przycięty przebieg prądu przemiennego. W takim układzie, gdy jedna dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym, to druga — w kierunku przewodzenia. Dioda Zenera spolaryzowana w kierunku przewodzenia działa podobnie jak każda inna dioda — pozwala na stosunkowo swobodny przepływ prądu tak długo, jak długo napięcie przekracza wartość progową. Po zmianie kierunku napięcia zamieniają się funkcjami — pierwsza z nich jedynie przewodzi prąd, natomiast druga ogranicza napięcie. W ten sposób diody nie dopuszczają do wystąpienia na obciążeniu napięć o wartościach szczytowych. Napięcie Zenera każdej diody należy dobrać w taki sposób, aby było niewiele większe niż napięcie AC

w układach sterowania, natomiast w układach przycinania napięcia było od niego nieco niższe.



**Rysunek 26.21.** Dwie diody Zenera o przeciwnych polaryzacjach połączone szeregowo mogą przycinać lub ograniczać przebiegi sinusoidalne napięcia AC

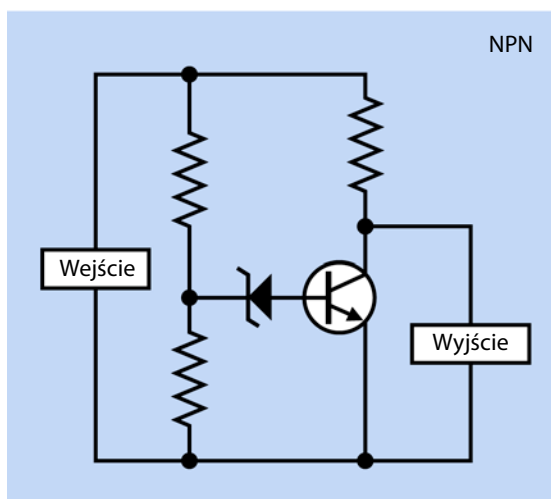
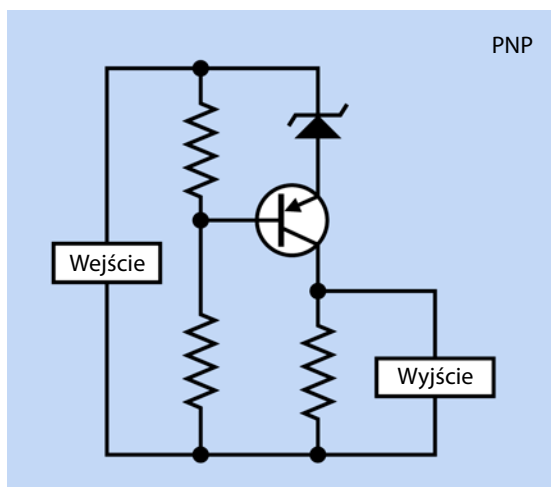


**Rysunek 26.22.** U góry: sinusoidalny przebieg napięcia AC w wersji niezmodyfikowanej; u dołu: ten sam przebieg przycięty przez diody połączone szeregowo w sposób pokazany na poprzednim rysunku

## Wykrywanie zmian napięcia

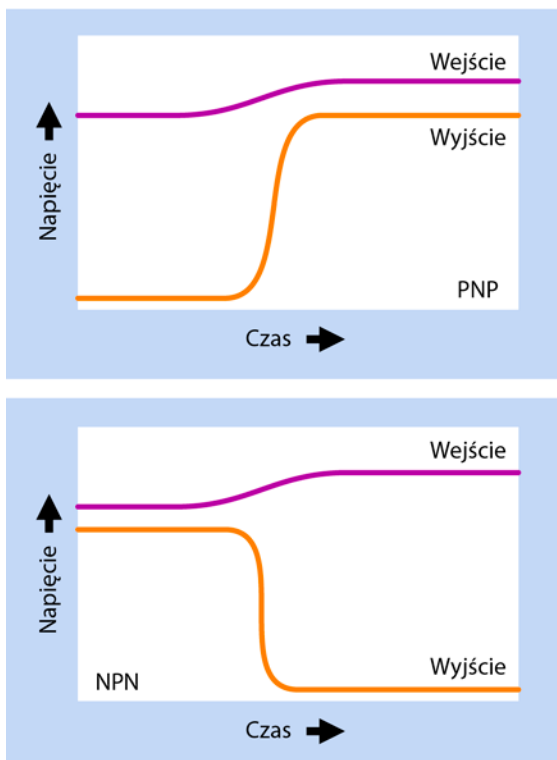
Dioda Zenera może służyć do wykrywania niewielkich zmian napięcia i generowania na tej podstawie przełącznikowego sygnału wyjściowego.

Górny schemat z rysunku 26.23 przedstawia diodę Zenera, która blokuje pojawienie się napięcia na emiterze tranzystora PNP, gdy podzielone napięcie wejściowe ma wartość mniejszą od napięcia Zenera (przebiecia) diody. W tym stanie tranzystor jest w zasadzie nieprzewodzący (przepływa przez niego tylko bardzo mały prąd upływu), a napięcie na wyjściu



**Rysunek 26.23.** Diodę Zenera można stosować także w połączeniu z tranzystorem; szczególne informacje są podane w tekście

jest niemal zerowe. Gdy tylko podzielone napięcie wejściowe wzrośnie powyżej wartości Zenera, tranzystor zaczyna przewodzić i napięcie jest podawane na wyjście. Zasilanie z wejścia jest więc przenoszone na wyjście, co pokazano na górnym wykresie rysunku 26.24.



**Rysunek 26.24.** Teoretyczne przebiegi na wyjściu tranzystorów w układach z poprzedniego rysunku

Dolny schemat z rysunku 26.23 przedstawia diodę Zenera, która blokuje pojawienie się napięcia na bazie tranzystora NPN, podczas gdy napięcie wejściowe ma wartość poniżej napięcia Zenera (przebiecia) diody. W tym stanie tranzystor zasadniczo nie przewodzi prądu, a napięcie zasilania jest podawane na wyjście. Gdy tylko napięcie na wejściu wzrośnie powyżej wartości Zenera, następuje aktywacja tranzystora, który przekierowuje prąd do masy z pominięciem wyjścia, na którym napięcie jest teraz prawie zerowe. W ten sposób sygnał wejściowy zostaje odwrócony, co pokazano na dolnym wykresie rysunku 26.24 (pod warunkiem, że prąd jest wystarczająco duży, aby doprowadzić tranzystor do stanu nasycenia).

## Możliwe błędy

### Przebieżenie

Jeśli dojdzie do przekroczenia maksymalnego prądu przewodzenia, może dojść do zniszczenia diody przez wydzielane ciepło. Jeśli w diodzie spolaryzowanej w kierunku zaporowym dojdzie do przekroczenia szczytowego napięcia wstecznego, prąd przewyższy blokujące możliwości diody i dojdzie do *przebiecia lawinowego*, które też zazwyczaj oznacza zniszczenie elementu. Zakresy działania typowej diody pokazano na rysunku 26.5.

### Odwrócona polaryzacja

Diody Zenera wyglądają niemal identycznie jak inne diody, a dodatkowo na wszystkich z nich znajdują się takie same oznaczenia identyfikujące katodę. Diody Zenera powinny być jednak polaryzowane w kierunku zaporowym, natomiast pozostałe — w kierunku przewodzenia. W związku z tym istnieje poważne ryzyko zainstalowania diody „na odwrót”, co może skutkować uszkodzeniami, a przynajmniej niewłaściwymi rezultatami, zwłaszcza jeśli taki błąd zostanie popełniony w zasilaczu. Bardzo mała rezystancja diody względem prądu przewodzenia sprawia, że jest ona szczególnie podatna na przepalenie, jeśli zostanie niewłaściwie podłączona.

### Niewłaściwy rodzaj diody

Jeśli zamiast diody prostowniczej lub impulsowej zostanie użyta dioda Zenera, obwód nie będzie działał prawidłowo, ponieważ z dużym prawdopodobieństwem dioda Zenera będzie miała o wiele mniejsze napięcie przebiecia, a tym samym nie będzie blokować prądu wstecznego. Z drugiej strony, gdy zamiast diody Zenera zastosujemy diodę impulsową lub prostowniczą, wówczas nastąpi obcięcie napięcia wstecznego (lub zostanie ono ustawione na poziomie napięcia przewodzenia diody). Ze względu na to, że diody często są niewystarczająco oznakowane, warto przechowywać diody Zenera oddzielnie od pozostałych.



# Tranzystor jednozłączowy

Tranzystor jednozłączowy (UJT — ang. *Unijunction Transistor*) i programowalny tranzystor jednozłączowy (PUT — ang. *Programmable Unijunction Transistor*) różnią się budową wewnętrzną, ale ich działanie jest na tyle podobne, że można im poświęcić wspólny rozdział.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **dioda** (rozdział 26.),
- **tranzystor bipolarny** (rozdział 28.),
- **tranzystor polowy** (rozdział 29.).

## Funkcja

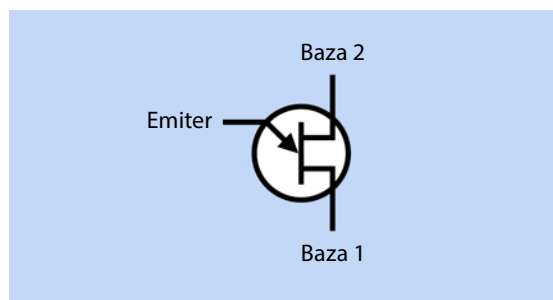
Wbrew swoim nazwom tranzystor jednozłączowy (UJT) oraz programowalny tranzystor jednozłączowy (PUT) nie są wzmacniaczami prądu takimi jak na przykład tranzystory bipolarne. Są elementami przełączającymi, które bardziej przypominają diody niż tranzystory.

Tranzystor UJT może służyć do tworzenia obwodów oscylacyjnych o niskich i średnich częstotliwościach. Tranzystor PUT ma podobne możliwości, ale dodatkowo charakteryzuje się bardziej zaawansowanym sterowaniem i może funkcjonować z prądami o mniejszych natężeniach. Tranzystory UJT straciły na popularności w latach 80. ubiegłego wieku, kiedy to pojawiły się układy takie jak *timer 555*, oferujące większą elastyczność i bardziej stabilną częstotliwość wyjściową, na dodatek w bardziej przystępnej cenie. Obecnie są rzadko używane w przeciwieństwie do tranzystorów PUT, które nadal są powszechnie stosowane jako elementy dyskretne do montażu przewlekane. Podczas gdy obwody scalone, jak na przykład timer 555, generują przebiegi prostokątne, tranzystory jednozłączowe w obwodach oscylacyjnych wytwarzają serie impulsów szpilkowych.

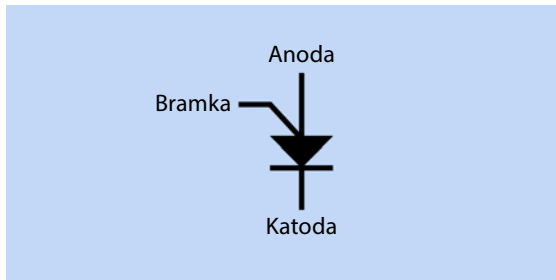
Tranzystor PUT często wykorzystuje się do wyzwiania **tyrystora** (opisanego w tomie 2. *Encyklopedii*) i znajduje

on zastosowanie w obwodach niskoprądowych, w których może pobierać nawet jedynie kilka mikroamperów.

Symbole schematyczne obu podzespołów pokazano na rysunkach 27.1 i 27.2. Choć symbol tranzystora UJT bardzo przypomina oznaczenie **tranzystora polowego** (FET), ich działanie jest zupełnie inne. Wygięta strzałka oznacza tranzystor UJT, natomiast prosta odnosi się do tranzystora polowego. Ta z pozoru drobna różnica ma istotne znaczenie.



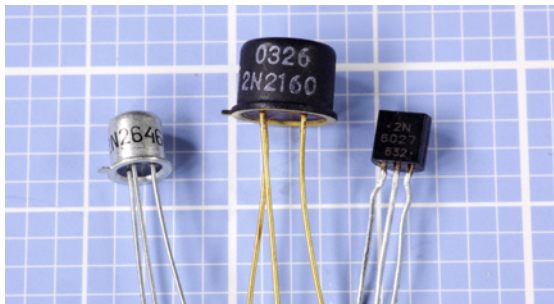
**Rysunek 27.1.** Symbol graficzny tranzystora jednozłączowego (UJT); istotna jest tutaj zagięta strzałka; podobnie wygląda symbol tranzystora polowego, który jednak ma prostą strzałkę; każdy z tych tranzystorów działa zupełnie inaczej



**Rysunek 27.2.** Symbol elektryczny programowalnego tranzystora jednozłączowego (PUT); oznaczenie to trafnie sugeruje podobieństwo do działania diody wzbogaconej o bramkę pozwalającą regulować napięcie progowe

Symbol schematyczny tranzystora PUT wiąże się z jego funkcją, która przypomina działanie diody z dodaną bramką.

Na rysunku 27.3 pokazano starsze tranzystory jednozłączowe (po lewej stronie i na środku) i programowalny tranzystor jednozłączowy (po prawej). Pierwszy od lewej ma moc maksymalną 300 mW i napięcie międzybazowe 35 V; środkowy: moc 450 mW, napięcie międzybazowe 35 V; po prawej: moc 300 mW, napięcie przewodzenia bramka-katoda 40 V, napięcie anoda-katoda 40 V.

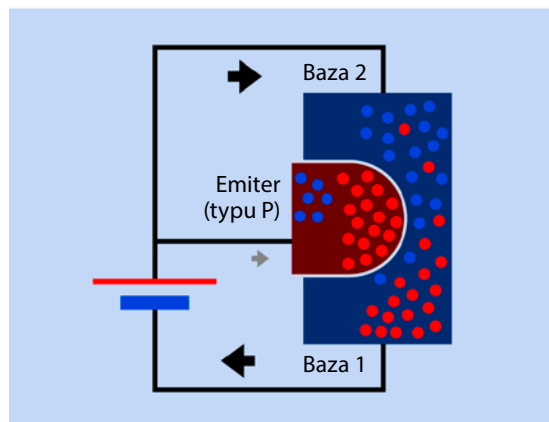
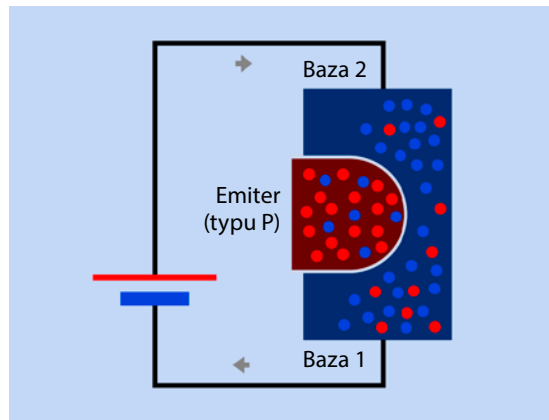


**Rysunek 27.3.** Tranzystory jednozłączowe pokazane po lewej stronie i na środku odchodzą już do lamusa; egzemplarz po prawej stronie to programowalny tranzystor jednozłączowy (PUT), który nadal jest powszechnie dostępny i szeroko stosowany jako wyzwalacz tyrystora

## Działanie

Tranzystor UJT to urządzenie półprzewodnikowe z trzema elektrodami, które jednak zawiera tylko dwa obszary półprzewodnika typu N i P oraz jedno złącze pomiędzy nimi — stąd nazwa *tranzystor jednozłączowy*. Wyprowadzenia podłączone do przeciwległych końców jednego kanału

półprzewodnika typu N noszą nazwy *Baza 1* i *Baza 2*, przy czym Baza 2 wymaga nieznacznie większego potencjału niż Baza 1. Mniejszy obszar półprzewodnika typu P znajdujący się w połowie odległości między bazami określa się mianem *emitera*. Budowę wewnętrzną i zasadę działania takiego tranzystora pokazano w uproszczeniu na rysunku 27.4.

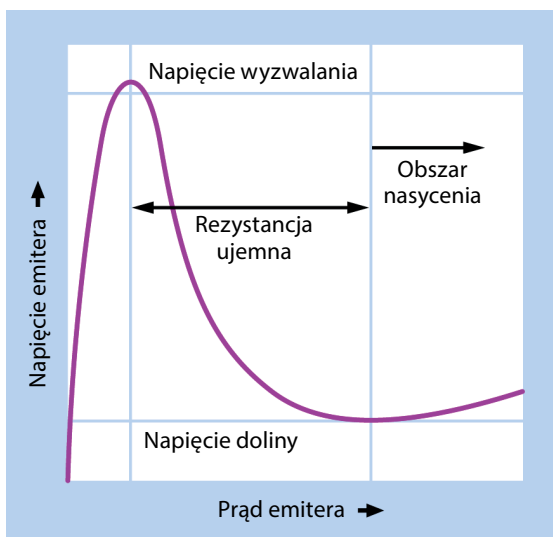


**Rysunek 27.4.** Budowa wewnętrzna i działanie tranzystora jednozłączowego

Gdy do emitera nie jest przyłożone żadne napięcie, stosunkowo wysoka rezystancja (zwykle przekraczająca 5 kΩ) zapobiega przepływowi prądu o znaczącym natężeniu między obszarami Baza 2 i Baza 1. Gdy potencjał dodatni na emiterze wzrośnie do *wartości progowej* (podobnie jak w przypadku *napięcia progowego* diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia), wówczas rezystancja wewnętrzna tranzystora UJT gwałtownie maleje, umożliwiając przepływ prądu przez emiter i Bazę 2 do Bazy 1 (określenie „prąd” zostało tu

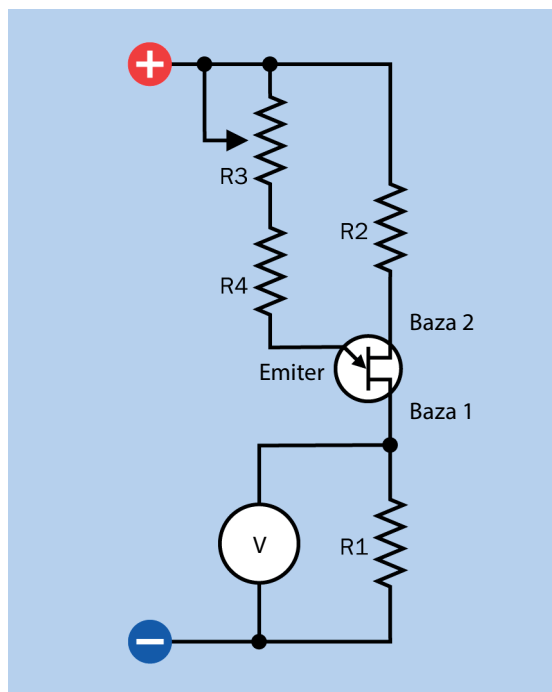
użyte w znaczeniu konwencjonalnym; przepływ elektronów odbywa się w kierunku przeciwnym). Prąd przepływający z Bazy 1 do Bazy 2 jest znacznie większy niż ten, który płynie z emitera do Bazy 1.

Wykres z rysunku 27.5 przedstawia działanie tranzystora UJT. Wraz ze wzrostem napięcia przyłożonego do emitera prąd przepływający do podzespołu z emitera nieznacznie rośnie aż do momentu osiągnięcia napięcia wyzwalania. Następuje wtedy gwałtowny spadek rezystancji wewnętrznej, który pociąga za sobą obniżenie napięcia na emiterze, a natężenie prądu nadal istotnie rośnie. Ze względu na spadek rezystancji taki obszar jest nazywany zakresem *ujemnej rezystancji dynamicznej*. W rzeczywistości rezystancja nigdy nie spada poniżej zera, ale jej zmiana ma znak ujemny. Po tym jak napięcie na emiterze zmaleje do wartości minimalnej nazywanej czasami *napięciem doliny*, natężenie nadal będzie rosnać, ale odtąd będzie następować też niewielki wzrost napięcia. W danych technicznych natężenie szczytowe oznacza się często jako  $I_p$ , natomiast natężenie doliny — jako  $I_v$ .



**Rysunek 27.5.** Krzywa odpowiedzi dla tranzystora jednozłączowego (UJT); gdy dodatni potencjał na emiterze osiąga napięcie wyzwalania, rezystancja wewnętrzna drastycznie spada i następuje wzrost natężenia prądu, a tranzystor przechodzi w tryb pracy z rezystancją ujemną

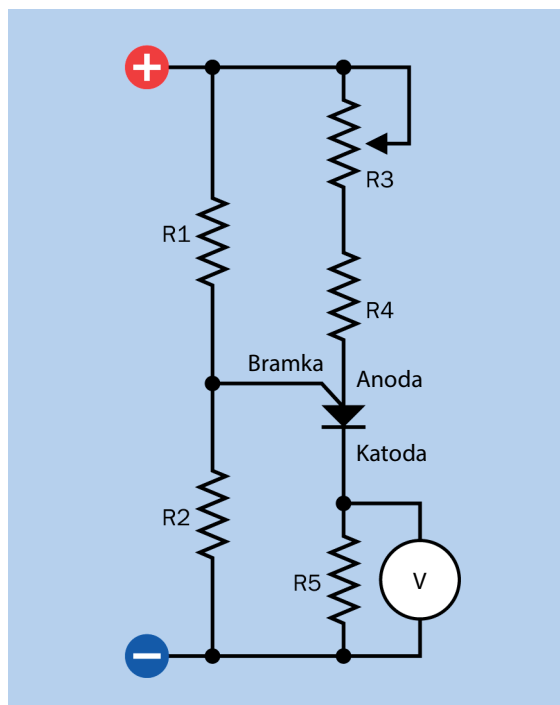
Na rysunku 27.6 przedstawiono obwód testowy ilustrujący działanie tranzystora UJT. Do sygnalizowania jego stanu służy woltmierz. Typowe napięcie zasilania wynosi od 9 V DC do 20 V DC.



**Rysunek 27.6.** Obwód testowy dla tranzystora jednozłączowego (UJT) zawierający woltmierz pokazujący reakcję na zwiększanie napięcia emitera za pomocą potencjometru

Działanie tranzystora PUT pod wieloma względami przypomina funkcjonowanie tranzystorów UJT, choć jego budowa jest całkiem inna — składa się z czterech warstw półprzewodnikowych i działa podobnie jak tyrystor

Wyzwolenie tranzystora PUT następuje w wyniku zwiększenia napięcia na anodzie. Obwód testowy dla tego typu tranzystora pokazano na rysunku 27.7. Wyzwolenie następuje, gdy napięcie na anodzie przekroczy poziom progowy, o którego wartości decyduje bramka. Po wyzwoleniu tranzystora jego rezystancja wewnętrzna maleje i zaczyna się przepływ prądu między anodą a katodą, a do bramki przepływa prąd o mniejszym natężeniu. Niemal dokładnie przypomina to działanie diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia. Różnica polega tylko na tym, że tutaj istnieje możliwość kontrolowania, albo inaczej „zaprogramowania”, poziomu progowego przez ustalenie odpowiedniej wartości dodatniego potencjału na bramce za pomocą dzielnika napięcia złożonego z rezystorów  $R_1$  i  $R_2$ .



**Rysunek 27.7.** Obwód testowy dla programowalnego tranzystora jednozłączowego (PUT) zawierający woltmierz, który pokazuje reakcję tranzystora na zmiany napięcia anody dokonywane za pomocą potencjometru

Krzywa napięcia wyjściowego tranzystora PUT jest bardzo zbliżona do krzywej z rysunku 27.5, choć w tym przypadku wartości natężenia i napięcia mierzy się na katodzie.

## Rodzaje

Tranzystory PUT i UJT nie występują w wersjach do montażu powierzchniowego.

Tranzystory UJT zwykle mają obudowy z czarnego tworzywa, aczkolwiek starsze były zamykane w metalowych puszkach. Tranzystory PUT niemal zawsze są zamknięte w obudowach z czarnego tworzywa sztucznego. Po skierowaniu wyprowadzeń tranzystora PUT do dołu i ustawieniu płaskiej powierzchni obudowy w kierunku widza wyprowadzenia te ustawiają się w następującej kolejności, od lewej do prawej: anoda, bramka, katoda.

## Wartości

Napięcie wyzwalania tranzystora UJT można obliczyć na podstawie wartości rezystorów R1 i R2 z rysunku 27.6 i przyłożonego do nich napięcia. Zamiast sumy  $R1 + R2$  często używa się oznaczenia  $R_{bb}$ , a całkowite napięcie na tych dwóch rezystorach (według rysunku 27.6 jest ono równe napięciu zasilania) oznacza się jako  $U_{bb}$ . Wartość  $U_{\tau}$ , czyli napięcie wyzwalania, wyraża się więc wzorem:

$$U_{\tau} = U_{bb} * (R1 / R_{bb})$$

Człon  $(R1/R_{bb})$  określa się mianem *współczynnika blokowania* (lub *podziału napięć*) i często oznacza grecką literą  $\rho$ .

Zazwyczaj w tranzystorze UJT wartość tego współczynnika wynosi co najmniej 0,7, ponieważ rezystancję R1 dobiera się tak, aby była większa niż R2. Typowe wartości rezystancji R1 i R2 mogą wynosić odpowiednio 180  $\Omega$  i 100  $\Omega$ . Jeśli R4 ma wartość 50 k $\Omega$ , a jako element R3 służy liniowy potencjometr 100 k $\Omega$ , to wyzwolenie tranzystora PUT powinno nastąpić, gdy na potencjometrze ustawiona zostanie mniej więcej połowa zakresu. Napięcie nasycenia emitera zazwyczaj mieści się w przedziale od 2 do 4 V.

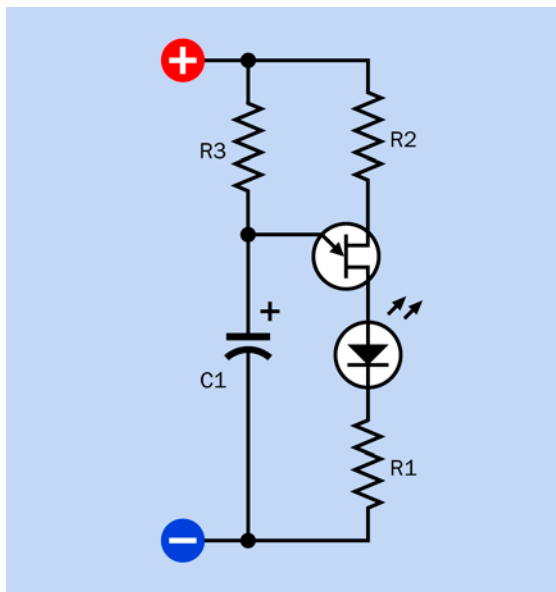
W przypadku tranzystora PUT typowe wartości elementów w obwodzie testowym są następujące: napięcie zasilania od 9 do 20 V DC, rezystancja 28 k $\Omega$  dla elementu R1, 16 k $\Omega$  dla R2, 20  $\Omega$  dla R5, 280 k $\Omega$  dla R4 i 500 k $\Omega$  dla potencjometru liniowego R3. Przy takich wartościach tranzystor PUT powinien zostać wyzwolony po ustawieniu mniej więcej środkowej wartości na potencjometrze.

Stabilny prąd przewodzenia między anodą a katodą zwykle ma maksymalną wartość 150 mA, natomiast między bramką a katodą zazwyczaj nie przekracza 50 mA. Moc strat nie powinna przekraczać 300 mW. Powyższe wartości będą niższe w temperaturach powyżej 25°C.

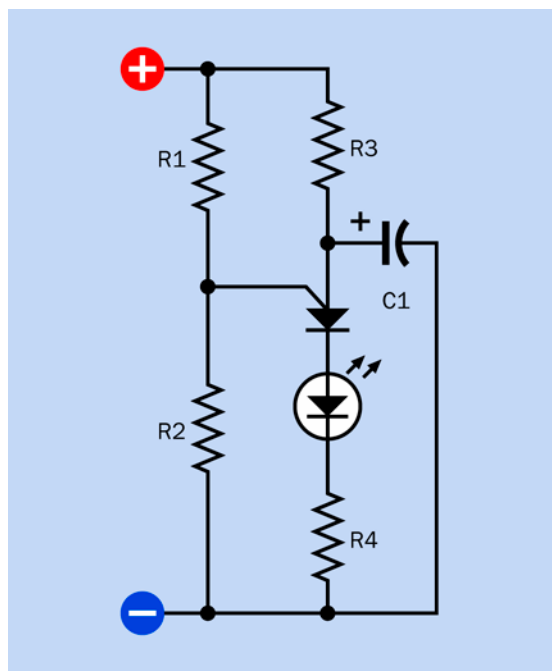
W zależności od stosowanego tranzystora PUT można znacznie obniżyć pobór energii, zwiększając kilkaset razy rezystancję i jednocześnie obniżając napięcie zasilania do 5 V. Wyjście katodowe tranzystora PUT można wtedy połączyć z bazą tranzystora NPN w celu wzmocnienia.

## Stosowanie

Na rysunku 27.8 pokazano obwód prostego oscylatora zbudowanego na bazie tranzystora UJT, a na rysunku 27.9 pokazano podobny układ z tranzystorem PUT. Początkowo napięcie zasilania powoduje ładowanie kondensatora do czasu, gdy potencjał na emiterze tranzystora UJT lub anodzie tranzystora PUT osiągnie wartość napięcia progowego. W tym momencie następuje rozładowanie kondensatora przez emiter, po czym cały cykl rozpoczyna się ponownie. Wartości rezystancji są tu podobne do zastosowanych w opisanych powyżej obwodach testowych, a w celu uzyskania zauważalnego migotania diody LED należy zastosować kondensator o pojemności 2,2  $\mu\text{F}$ . W przypadku mniejszej pojemności obwód będzie generować szybsze oscylacje. W obwodzie z tranzystorem PUT modyfikowanie wartości  $R_1$  i  $R_2$  pozwala na precyzyjne sterowanie wartością napięcia wyzwalającego.



**Rysunek 27.8.** Prosty obwód oscylatora z tranzystorem jednozłączowym (UJT); gdy gromadzi się ładunek w akumulatorze, napięcie na emiterze rośnie do momentu wyzwolenia tranzystora; w tym momencie następuje rozładowanie kondensatora poprzez emiter



**Rysunek 27.9.** Prosty obwód oscylatora z programowalnym tranzystorem jednozłączowym (PUT); gdy gromadzi się ładunek w akumulatorze, napięcie na anodzie rośnie do momentu wyzwolenia tranzystora; w tym momencie następuje rozładowanie kondensatora poprzez anodę. Napięcie na bramce sterujące napięciem wyzwalania jest ustawiane za pomocą rezystorów  $R_1$  i  $R_2$

Prawdopodobnie najczęstszym zastosowaniem tranzystora PUT jest obecnie wyzwalanie **tyrystora**.

## Możliwe błędy

### Pomyłki terminologiczne

Programowalny tranzystor jednozłączowy (PUT) jest czasami utożsamiany ze zwykłym tranzystorem jednozłączowym (UJT). Pamiętając o tym, że oba te elementy działają w zupełnie inny sposób, należy zawsze podawać pełną nazwę „programowalny tranzystor jednozłączowy” lub posługiwać się skrótem PUT. Jeśli zastąpimy tranzystor PUT tranzystorem UJT lub na odwrót, obwód nie zadziała tak, jak powinien.

## Niewłaściwa polaryzacja

Tranzystory UJT i PUT nie są przeznaczone do pracy przy polaryzacji zaporowej. W tranzystorze UJT między Bazą 2 a Bazą 1 powinno istnieć niewielkie napięcie polaryzujące w kierunku przewodzenia (tzn. potencjał Bazy 2 powinien być wyższy niż potencjał Bazy 1), niezależnie od potencjału emitera. Potencjał emitera może wynosić od 0 woltów wzwyż. W tranzystorze PUT polaryzacja w kierunku przewodzenia powinna występować między jego anodą a katodą (potencjał anody musi być wyższy niż katody), a pośrednie napięcie dodatnie na bramce jest ustalane za pomocą rezystorów R1 i R2 pełniących funkcję dzielnika napięcia (patrz rysunek 27.7). Nieprawidłowa polaryzacja będzie skutkować nieprzewidywalnym działaniem tranzystora, a nawet jego uszkodzeniem.

## Przeciążenie

Podobnie jak każdy półprzewodnik, także tranzystory UJT i PUT należy chronić przed nadmiernym prądem, który może przepalić podzespół. Nie wolno ich podłączać bezpośrednio do źródła zasilania bez zastosowania odpowiednich rezystorów ograniczających natężenie prądu. Maksymalna moc ciągłego rozpraszania energii w tranzystorach UJT i PUT wynosi zwykle 300 mW.

# Tranzystor bipolarny

Słowo *tranzystor* jako takie często oznacza właśnie *tranzystor bipolarny*, ponieważ to ten typ tranzystora stał się najpowszechniej używanym elementem półprzewodnikowym. Poprawną nazwą jest jednak *tranzystor bipolarny*. Niekiedy stosowana jest też nazwa *bipolarny tranzystor złączowy* (*BJT* od *Bipolar Junction Transistor*).

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **tranzystor jednozłączowy** (rozdział 27.),
- **tranzystor polowy** (rozdział 29.),
- **diak** (tom 2.),
- **triak** (tom 2.),
- **przełącznik** (rozdział 9.),
- **przełącznik półprzewodnikowy** (tom 2.).

## Funkcja

Tranzystor bipolarny może służyć do wzmacniania zmian prądu lub włączania i wyłączania obwodów elektrycznych. Jako element wzmacniający wyparł *lampy próżniowe* używane wcześniej do wzmacniania elektrycznych sygnałów o częstotliwości radiowej lub akustycznej. Jako przełącznik przypomina trochę **przełącznik**, z tym że w stanie „wyłączenia” mimo wszystko przewodzi niewielki prąd zwany *upływem*.

Tranzystor bipolarny jest *dyskretnym* elementem półprzewodnikowym, jeśli jest zamknięty w odrębnej obudowie z trzema elektrodami (wyprowadzeniami). Zestaw wielu tranzystorów zamkniętych w jednej obudowie z wieloma wyprowadzeniami jest nazywany *układem scalonym*. Układ Darlingtona złożony w rzeczywistości z dwóch tranzystorów też jest zaliczany do elementów dyskretnych, ponieważ wygląda i działa podobnie jak pojedynczy tranzystor. Wiele układów scalonych jest opisanych w drugim tomie *Encyklopedii*.

## Działanie

Pierwsze tranzystory były produkowane z germanu, ale ostatecznie większą popularność zdobył inny materiał półprzewodnikowy — krzem. Czysty krzem w temperaturze pokojowej zachowuje się jak izolator, ale zupełnie zmienia swoje właściwości po „zanieczyszczeniu” go niewielką ilością domieszki wprowadzającej elektrony nadmiarowe oddzielające się od swoich atomów i mogące poruszać się swobodnie. W wyniku takiego domieszkowania powstaje *półprzewodnik typu N* zdolny do przewodzenia prądu (przepływu elektronów), jeśli tylko zostanie *spolaryzowany* zewnętrznym napięciem elektrycznym.

Inne domieszki mogą wprowadzać tak zwane dziury, będące w rzeczywistości niedoborami elektronów. W ten sposób powstaje *półprzewodnik typu P* zawierający nadmiarowe ładunki dodatnie. Każda dziura ma dodatni ładunek elektryczny i może zostać zneutralizowana przez połączenie się z elektronem.

Tranzystor bipolarny NPN składa się z cienkiej warstwy półprzewodnika typu P obłożonej z obu stron warstwami półprzewodnika typu N. Warstwy te noszą nazwy *kolektor*, *baza* i *emiter* i każda z nich ma własną elektrodę wyprowadzoną

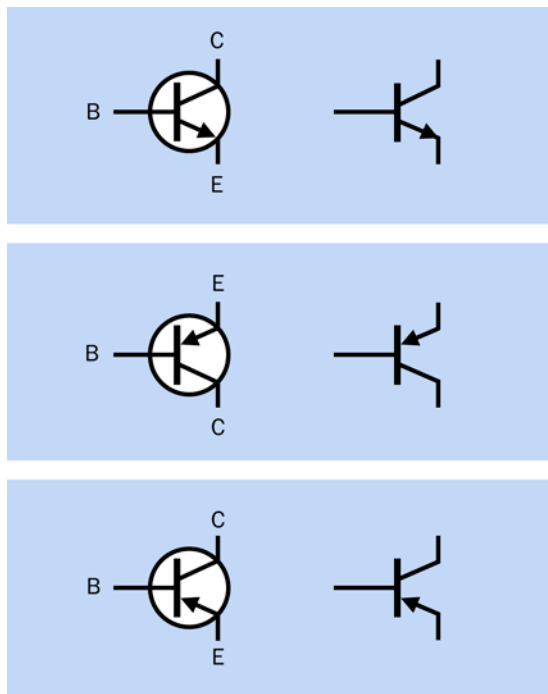
na zewnątrz obudowy. Doprowadzenie ładunków ujemnych z zewnątrz do emitera (wytworzenie potencjału ujemnego) spowoduje odepchnięcie obecnych w nim elektronów w kierunku warstwy środkowej, czyli bazy. Jeśli w tym samym czasie do bazy zostaną doprowadzone ładunki dodatnie (zostanie wytworzony potencjał dodatni), to będą one przyciągać elektrony gromadzące się po stronie emitera. O takiej *polaryzacji bazy* w stosunku do emitera mówi się, że ma kierunek *przewodzenia*. Możliwa jest też *polaryzacja w kierunku zaporowym*, kiedy to potencjał bazy jest niższy (ujemny) w stosunku do emitera. Przy polaryzacji bazy w kierunku przewodzenia przyciąga ona elektrony z emitera. Ze względu na niewielką grubość bazy elektrony te są teraz bardzo blisko kolektora. Jeśli potencjał bazy wzrasta, rosnąca siła przyciągania rozpędza elektrony do tego stopnia, że przeskakują one do obszaru kolektora, skąd mogą już swobodnie przepływać do dodatniego bieguna źródła zasilania, czyli do miejsca o jeszcze większym ich niedoborze.

Tak więc emiter tranzystora PNP wysyła elektrony w stronę bazy, a kolektor przechwytuje je i przekazuje na zewnątrz. Trzeba przy tym pamiętać, że elektrony są nośnikami ładunku ujemnego i przepływają zawsze od bieguna ujemnego do dodatniego (a mówiąc ogólniej, od potencjału niższego do wyższego). Umowny kierunek przepływu prądu jest dokładnie odwrotny i jest fikcją mającą uzasadnienie tylko historyczne<sup>1</sup>. Strzałka widoczna na symbolu schematycznym tranzystora wskazuje właśnie ten umowny przepływ ładunków dodatnich (od plusa do minusa), czyli od kolektora do emitera.

W tranzystorze PNP cienka warstwa półprzewodnika N jest otoczona z obu stron grubszy warstwami półprzewodnika typu P. Warstwa środkowa, czyli baza, jest spolaryzowana ujemnie w stosunku do emitera, a działanie takiego tranzystora jest odwrócone w stosunku do struktury NPN, ponieważ tutaj pojęcia „emitowanie” i „przechwytywanie” odnoszą się do dziur, a nie elektronów. Kolektor powinien mieć potencjał ujemny w stosunku do bazy, a prąd umowny

(płynący od plusa do minusa) przepływa tym razem od emitera do kolektora. Taki też kierunek wskazuje strzałka na symbolu schematycznym tranzystora PNP.

Symbole tranzystorów NPN i PNP są pokazane na rysunku 28.1. Najczęściej stosowanym symbolem tranzystora NPN jest ten w lewym górnym rogu — z literami C, B i E oznaczającymi kolektor, bazę i emiter. Na niektórych schematach pomijane są nie tylko te litery, ale również okrąg symbolizujący obudowę — wtedy symbol tranzystora wygląda tak jak na rysunku po prawej stronie.



**Rysunek 28.1.** Symbol tranzystora NPN (u góry) i PNP (w środku i na dole); niekiedy w celu uproszczenia schematu symbole są odwracane i rysowane bez okręgu oznaczającego obudowę

W środkowej części rysunku jest pokazany symbol tranzystora PNP. Taki układ wyprowadzeń, z kolektorem od dołu, spotyka się najczęściej, ponieważ kolektor ma mieć niski potencjał, a zazwyczaj na schematach masa (mająca najniższy potencjał) jest umieszczana na dole. Symbol tego samego tranzystora, ale z odwróconym układem wyprowadzeń, jest pokazany w dolnej części rysunku. Tutaj emiter i kolektor mają takie samo położenie jak w przypadku tranzystora NPN z górnej części rysunku. Oczywiście spotykane są jeszcze

<sup>1</sup> Z fikcyjnością umownego kierunku prądu można się zgodzić w odniesieniu do metali i półprzewodników, w których rzeczywiście przepływ prądu polega na ruchu elektronów (ruch dziur w półprzewodniku P też w gruncie rzeczy jest skutkiem przemieszczania się elektronów), ale w cieczach i gazach możliwy jest przecież ruch dodatnich jonów, a to oznacza, że kierunek umowny może pokrywać się z rzeczywistym — *przyp. tłum.*

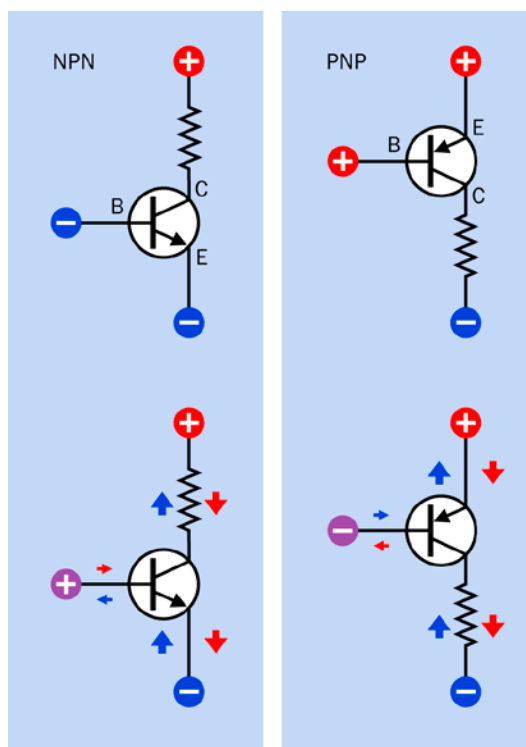
inne orientacje tych symboli, a stosuje się je po to, by maksymalnie uprościć schemat przez zmniejszenie liczby krzyżujących się przewodów. Kierunek strzałki (skierowanej do środka lub na zewnątrz) zawsze określa typ tranzystora, PNP lub NPN, i wskazuje kierunek przepływu prądu.

Tranzystory o strukturze NPN są znacznie częściej stosowane niż te ze strukturą PNP. W początkowym okresie rozwoju techniki tranzystorowej produkcja modelu PNP była trudniejsza i droższa, dlatego większość układów elektronicznych została opracowana pod kątem tranzystora NPN. Poza tym tranzystory NPN umożliwiają szybsze przełączanie, ponieważ elektrony są znacznie mobilniejsze od dziur.

Aby zapamiętać funkcje kolektora i emitera w tranzystorze NPN, można sobie wyobrazić, że kolektor zbiera dodatnie ładunki z zewnątrz i kieruje je *do wewnątrz* tranzystora, a emiter wysyła je *na zewnątrz*. Warto też kojarzyć strzałkę z emiterem i pamiętać, że strzałka zawsze wskazuje kierunek przepływu prądu umownego (polegającego na przemieszczaniu się ładunków dodatnich). W zapamiętaniu kierunku strzałki na symbolach tranzystorów NPN może pomóc następująca reguła mnemotechniczna: „(Ni)e (P)okazuje (N) a bazę”.

Przepływ prądu w tranzystorach NPN i PNP jest pokazany na rysunku 28.2. Tranzystor NPN widoczny u góry po lewej nie przewodzi prądu (poza niewielkim upływem), ponieważ baza ma taki sam potencjał jak emiter (albo bardzo do niego zbliżony), który jest podłączony do masy lub ujemnego bieguna baterii. U dołu po lewej fioletowy znak „plus” pokazuje, że baza ma *relatywnie* dodatni potencjał, przynajmniej o 0,6 V wyższy niż potencjał emitera (w przypadku tranzystora krzemowego). To zmusza elektrony do przemieszczania się od emitera do kolektora, tak jak pokazują strzałki niebieskie. Strzałki czerwone pokazują kierunek przepływu prądu umownego (który zawsze płynie od plusa do minusa). Małe strzałki oznaczają przepływ prądu o małym natężeniu. Rezystor w obwodzie kolektora zabezpiecza tranzystor przed przepływem zbyt dużego prądu i może być traktowany jako obciążenie obwodu.

Tranzystor PNP widoczny u góry po prawej nie przewodzi prądu (poza niewielkim upływem), ponieważ baza ma taki sam potencjał jak emiter (albo bardzo do niego zbliżony), który jest podłączony do dodatniego bieguna baterii. U dołu po prawej fioletowy znak plus pokazuje, że baza ma



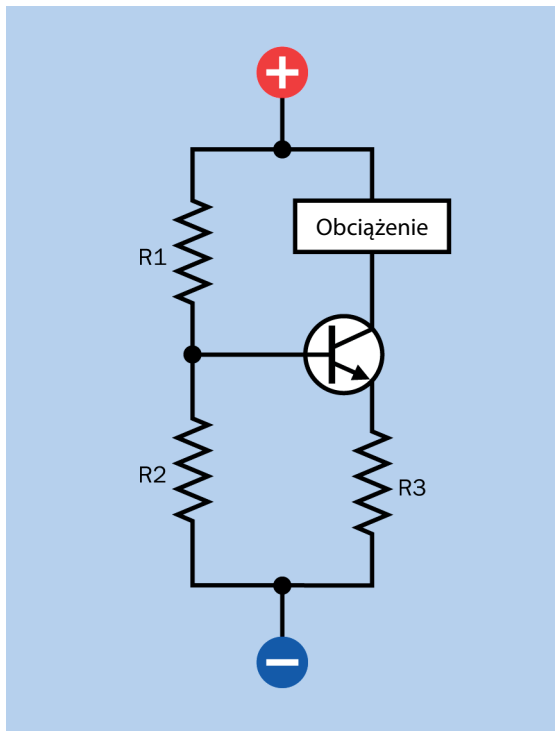
**Rysunek 28.2.** Przepływ prądu przez tranzystory NPN i PNP; szczegóły są opisane w tekście

*relatywnie* ujemny potencjał, przynajmniej o 0,6 V niższy niż potencjał emitera (w przypadku tranzystora krzemowego). To zmusza elektrony do przemieszczania się, tak jak pokazują strzałki niebieskie. Warto zauważyć, że w tranzystorze NPN prąd wpływa do bazy, a w tranzystorze PNP wypływa z niej. W przedstawionych na rysunku schematach pominięto dla uproszczenia rezystor zabezpieczający bazę.

Tranzystor NPN wzmacnia prąd bazy tylko wtedy, gdy potencjał kolektora jest wyższy niż potencjał bazy i potencjał bazy jest wyższy od potencjału emitera o co najmniej 0,6 V. Jeśli tranzystor jest spolaryzowany w taki właśnie sposób i przepływający przez niego prąd nie przekracza określonych przez producenta wartości granicznych, niewielkie zmiany prądu bazy wywołują znacznie większe zmiany prądu płynącego między emiterem i kolektorem. Dlatego mówi się, że tranzystor jest *wzmacniaczem prądowym*.

Do sterowania potencjałem bazy, aby był mniejszy od potencjału kolektora i większy od potencjału emitera (w przypadku

tranzystora NPN), stosuje się zazwyczaj *dzielnik napięcia* w sposób pokazany na rysunku 28.3.



**Rysunek 28.3.** Rezystory  $R_1$  i  $R_2$  stanowią dzielnik napięcia zapewniający właściwą polaryzację tranzystora NPN

Więcej informacji na temat dzielnika napięcia zawiera rozdział 10, „Rezystor”.

## Wzmocnienie prądowe

Możliwości wzmacniające tranzystora określa się przez podanie *współczynnika wzmocnienia prądowego* zwanego też *współczynnikiem beta*, który wyraża stosunek zmiany prądu kolektora do wywołującej ją zmiany prądu bazy. Do oznaczania wartości tego współczynnika zwykle się używać greckiej litery  $\beta$  (beta). Wzór na obliczanie tej wartości wygląda następująco:

$$\beta = \Delta I_c / \Delta I_b$$

gdzie  $I_c$  jest prądem kolektora,  $I_b$  — prądem bazy, a symbol  $\Delta$  oznacza niewielką zmianę wartości parametru, przed którym stoi.

Wzmocnienie prądowe jest oznaczane także jako  $h_{FE}$ , gdzie E sygnalizuje wspólny emiter, F — prąd przewodzenia, a mała litera h informuje, że chodzi o hybrydowy opis własności tranzystora.

Współczynnik beta jest zawsze większy od 1, a często przekracza 100. Oczywiście konkretna wartość zależy od typu tranzystora. Wpływ na nią mają również temperatura, napięcie zasilające, prąd kolektora i niedokładności procesu produkcyjnego. Gdy parametry pracy tranzystora nie spełniają przewidzianych dla niego warunków, wzór na obliczanie współczynnika beta przestaje obowiązywać.

Prąd może wpływać do tranzystora NPN przez dwa wyprowadzenia, a wypływa przez jedno. Dlatego zawsze jest spełniona następująca zależność:

$$I_e = I_c + I_b$$

gdzie  $I_e$  jest prądem emitera,  $I_c$  — prądem kolektora, a  $I_b$  — prądem bazy.

Gdy potencjał bazy tranzystora NPN maleje i osiąga wartość różniącą się od potencjału emitera o mniej niż 0,6 V, tranzystor przestaje przewodzić prąd i przechodzi w stan wyłączenia, choć ciągle płynie przez niego niewielki prąd upływu.

Gdy prąd bazy staje się na tyle duży, że tranzystor nie potrafi go już zmocnić, to znaczy, że osiągnięty został stan *nasylenia* tranzystora. W tym stanie impedancja wewnętrzna tranzystora przyjmuje wartość najmniejszą z możliwych, a to oznacza duży wzrost natężenia prądu. Aby nie dopuścić do uszkodzenia tranzystora przez nadmierny prąd, należy w obwód kolektora włączyć rezystor zabezpieczający.

Każdy tranzystor ma określone wartości maksymalne dla prądu kolektora, prądu bazy i napięcia między kolektorem a emiterem. Wartości te powinny być podane w karcie produktu. Przekroczenie którejkolwiek z nich zazwyczaj prowadzi do uszkodzenia tranzystora.

## Terminologia

W *stanie nasylenia* baza tranzystora jest nasycona elektronami (nie może ich przyjąć więcej), natomiast impedancja pomiędzy kolektorem a emiterem maleje do poziomu najniższego z możliwych.

**Stan odcięcia** tranzystora NPN występuje wtedy, gdy zbyt niski potencjał bazy uniemożliwia przepływ prądu od kolektora do emitera, nie licząc szczytkowego upływu.

**Tryb aktywny**, zwany też **trybem liniowym**, jest dla tranzystora stanem pośrednim pomiędzy nasyceniem a odcięciem i wtedy współczynnik wzmocnienia  $\beta$  (lub  $h_{FE}$ , czyli stosunek prądu kolektora do prądu bazy) utrzymuje się na mniej więcej stałym poziomie. Oznacza to, że prąd kolektora jest niemal dokładnie proporcjonalny do prądu bazy. Liniowość tej zależności ulega zachwianiu, gdy tranzystor zbliża się do stanu nasycenia.

## Rodzaje

**Tranzystory małosygnalowe** to te, których prąd kolektora nie przekracza 500 mA, a maksymalna moc strat jest nie większa niż 1 W. Są używane do wzmacniania słabych sygnałów o częstotliwościach akustycznych i do przełączania niewielkich prądów. Przy dobieraniu tranzystora do sterowania obciążeniem o charakterze indukcyjnym, na przykład silnikiem, należy pamiętać, że początkowy udar prądowy może znacząco przewyższać znamionową wartość prądu pobieranego podczas ciągłej pracy urządzenia.

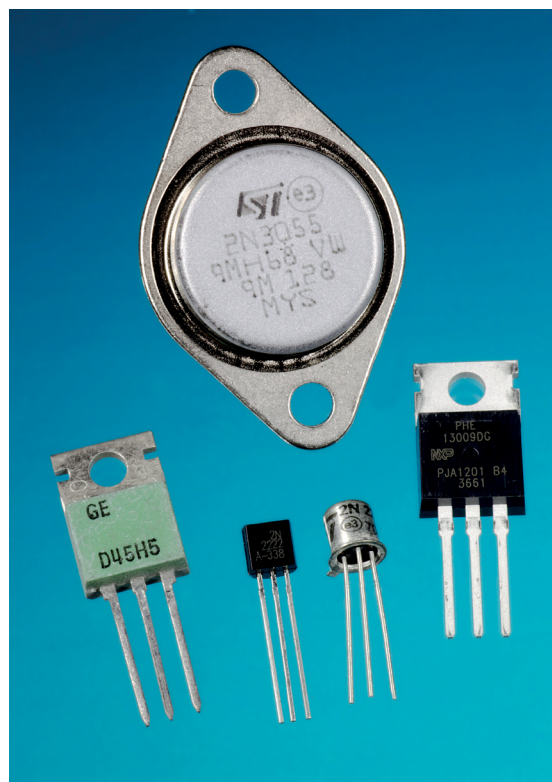
**Tranzystory przełączające o małej mocy** mają dużo wspólnego z tranzystorami małosygnalowymi, ale ogólnie charakteryzują się krótszymi czasami reakcji, mniejszymi wartościami wzmocnienia prądowego i większą wrażliwością na wzrost prądu kolektora. Szczegóły należy sprawdzać w danych katalogowych.

**Tranzystory wysokiej częstotliwości** są stosowane głównie we wzmacniaczach i generatorach sygnałów wizyjnych. Mają małe rozmiary i duże częstotliwości znamionowe sięgające nawet 2000 MHz.

**Tranzystory mocy** wyróżniają się dużymi wartościami mocy i prądów — od 1 W do 500 W i 150 A. Są większe od pozostałych rodzajów i znajdują zastosowanie w stopniach wyjściowych wzmacniaczy audio, a także w **zasilaczach impulsowych** (patrz rozdział 16., „Zasilacz”). Na ogół mają znacznie mniejsze wzmocnienie prądowe (rzędu 20 lub 30) niż mniejsze tranzystory (te osiągają 100, a nawet więcej).

Kilka przykładowych tranzystorów pokazano na rysunku 28.4. U góry: tranzystor mocy 2N3055 typu NPN. Jego

pierwsze egzemplarze zostały wyprodukowane pod koniec lat 60. ubiegłego wieku i nadal jest on produkowany. Można go często znaleźć w zasilaczach i wzmacniaczach przeciwsonbnych. Jego moc znamionowa wynosi 115 W. W drugim rzędzie, pierwszy od lewej: tranzystor mocy PNP ogólnego przeznaczenia o mocy 50 W. Pierwszy od prawej: tranzystor przełączający wysokiej częstotliwości stosowany w statecznikach elektrycznych (współpracujących z lampami wyładowczymi), przetwornicach, falownikach, stabilizatorach impulsowych i systemach sterowania silnikiem. Wytrzymuje stosunkowo wysokie napięcia (do 700 V wartości szczytowej między kolektorem a emiterem) i ma znamionową moc na poziomie 80 W. W drugim rzędzie pośrodku: dwa warianty małosygnalowego tranzystora przełączającego NPN o nazwie 2N2222, wprowadzonego do produkcji w latach 60. ubiegłego wieku i nadal stosowanego. Obudowa metalowa typu TO-19 dopuszcza nieco większą moc rozpraszania



**Rysunek 28.4.** Przykłady często stosowanych tranzystorów; szczegółowy opis znajduje się w tekście

energii niż obudowa syntetyczna TO-92 (odpowiednio 1,8 W i 1,5 W przy temperaturze kolektora nie większej niż 25°C).

## Obudowy

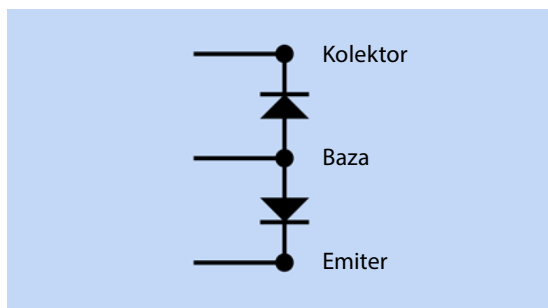
Dawniej tranzystory małosygnałowe były umieszczane w walcowych obudowach aluminiowych o średnicy mniej więcej 5 mm. Obecnie można je jeszcze spotkać w tej postaci, ale częściej mają obudowy wykonane z czarnego tworzywa sztucznego. Tranzystory mocy są umieszczane w prostopadłościennych kostkach z tworzywa sztucznego mających tylną ściankę wykonaną z metalu albo w metalowych obudowach typu guzikowego. W obu przypadkach są to obudowy umożliwiające przykręcenie tranzystora do *radiatora*.

## Rozkład wyprowadzeń

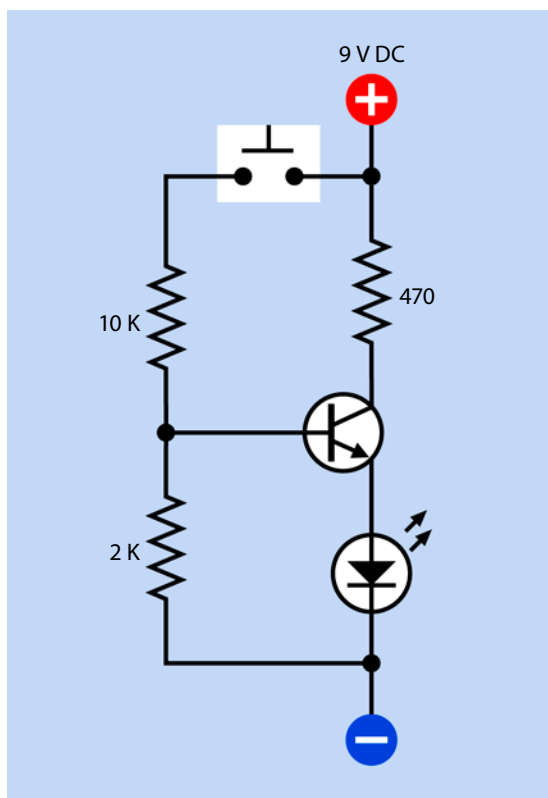
Obudowy tranzystorów bardzo rzadko zawierają oznaczenia pozwalające jednoznacznie ustalić, które wyprowadzenie należy do kolektora, które do bazy i które do emitera. Dawne „puszkowe” obudowy metalowe zawierają na dolnym kołnierzu niewielki występ wskazujący zwykle na wyprowadzenie emitera, ale nie zawsze. Tranzystory mocy w obudowach metalowych zazwyczaj mają z tą obudową połączony wewnętrznie kolektor. Tranzystory przeznaczone do montażu powierzchniowego mają na obudowie kropkę lub inny znak wskazujący bazę (w przypadku tranzystora bipolarnego) lub bramkę (w przypadku tranzystora polowego).

Tranzystory do montażu przewlekane zazwyczaj mają na obudowie nadrukowany lub wygrawerowany numer katalogowy, ale do jego odczytania często potrzebne jest szkło powiększające. W razie jakichkolwiek wątpliwości co do układu wyprowadzeń należy zajrzeć do karty produktu. Jeśli karta jest niedostępna, trzeba przeprowadzić stosowny test za pomocą miernika. Niektóre multimetry zawierają funkcję sprawdzania tranzystorów, która może pomóc w ocenie sprawności danego elementu i nawet zmierzyć jego współczynnik wzmocnienia. Jeśli miernik nie ma takiej funkcji, można go ustawić w trybie sprawdzania diod i przetestować poszczególne złącza. Sprawny tranzystor NPN powinien się zachowywać tak jak dwie diody połączone ze sobą anodami, tak jak na rysunku 28.5. Gdy układ wyprowadzeń jest nieznany, można tą metodą ustalić, które z nich należy do bazy. Wyprowadzenia emitera i kolektora można zidentyfikować

na podstawie wyników prostego testu przeprowadzonego w układzie pokazanym na rysunku 28.6.



**Rysunek 28.5.** Sprawny tranzystor NPN powinien się zachowywać tak jak dwie diody połączone w pokazany tutaj sposób; przetestowanie tych „diod” pozwala nie tylko stwierdzić, czy tranzystor jest sprawny, ale również rozpoznać, które z jego wyprowadzeń należy do bazy



**Rysunek 28.6.** Taki prosty układ pozwala nie tylko przetestować tranzystor pod kątem sprawności, ale również ustalić, które z jego wyprowadzeń należy do emitera, a które do kolektora

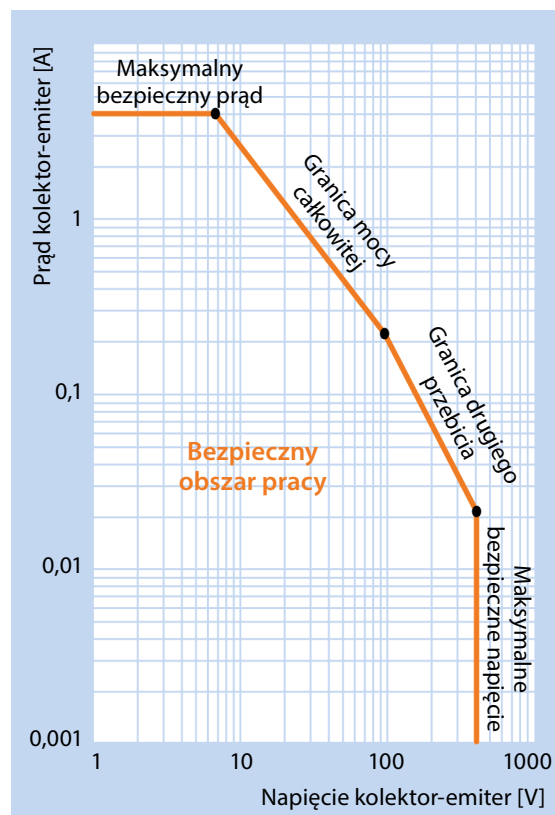
## Wartości

W danych katalogowych dotyczących tranzystorów występują rozmaite symbole i skróty. Często, ale nie zawsze, litery stojące na pozycjach dalszych niż pierwsza są zapisywane jako indeks dolny. Oto wykaz najczęściej spotykanych symboli i skrótów:

$h_{FE}$	Współczynnik wzmocnienia prądowego
$\beta$	To samo co $h_{FE}$
$V_{CEO}$	Napięcie między kolektorem a emiterem (przy odłączonej bazie)
$V_{CBO}$	Napięcie między kolektorem a bazą (przy odłączonym emiterze)
$V_{EBO}$	Napięcie między emiterem a bazą (przy odłączonym kolektorze)
$V_{CEsat}$	Napięcie między kolektorem a emiterem w stanie nasycenia
$V_{BEsat}$	Napięcie między bazą a emiterem w stanie nasycenia
$I_C$	Prąd kolektora
$I_{CM}$	Maksymalny szczytowy prąd kolektora
$I_{BM}$	Maksymalny szczytowy prąd bazy
$P_{TOT}$	Maksymalna moc rozpraszania energii w temperaturze pokojowej
$T_J$	Maksymalna bezpieczna temperatura złącza

Często wartości tych parametrów są wartościami granicznymi i ich przekroczenie może prowadzić do uszkodzenia tranzystora.

Karty produktu publikowane przez producenta mogą zawierać wykres pokazujący *bezpieczny obszar pracy* (SOA — ang. *Safe Operating Area*) tranzystora. Częściej jest on zamieszczany na kartach tranzystorów mocy, gdyż w tym przypadku kluczowe jest rozpraszanie ciepła. Wykres pokazany na rysunku 28.7 został zaczerpnięty z karty produktu krzemowego tranzystora mocy wyprodukowanego przez firmę Philips. Bezpieczny obszar pracy jest ograniczony od góry przez poziomy segment reprezentujący maksymalny bezpieczny prąd, a z prawej — przez pionowy segment reprezentujący maksymalne bezpieczne napięcie. Prostokątny obszar wyznaczony przez te dwie wartości jest jednak obcięty przez dwa ukośne segmenty reprezentujące *granice mocy całkowitej* i *granice drugiego przebiecia*. Ta druga granica odnosi się do powstawania lokalnych „gorących punktów”, w których półprzewodnik zmniejsza swój opór i pozwala



**Rysunek 28.7.** Wykres, zaczerpnięty z karty produktu, przedstawia granice bezpiecznego obszaru pracy (SOA) tranzystora mocy firmy Philips; szczegółowy opis znajduje się w tekście

na przepływ większego prądu, a to powoduje dalszy wzrost temperatury i dalsze zmniejszenie oporu. Ostatecznie dochodzi do roztopienia półprzewodnika, w wyniku czego następuje zwarcie — mówi się wtedy, że tranzystor uległ przebiciu. Granice mocy całkowitej i drugiego przebicia znacząco zmniejszają bezpieczny obszar pracy, który bez nich byłby ograniczony tylko maksymalnymi bezpiecznymi wartościami prądu i napięcia.

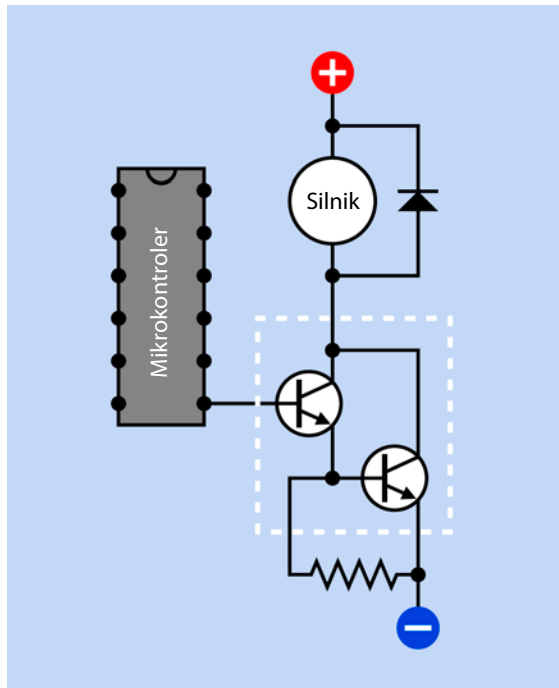
## Stosowanie

Obszar zastosowań tranzystorów dyskretnych zaczął się zmniejszać, gdy układy scalone stały się tańsze i zaczęto umieszczać w nich coraz bardziej rozbudowane obwody z wieloma tranzystorami. Na przykład cały wzmacniacz 5-watowy, który kiedyś był montowany z wielu odrębnych części, teraz można nabyć w postaci jednego chipu wymagającego uzupełnienia zaledwie kilkoma kondensatorami. Wzmacniacze większej mocy wykorzystują układy scalone do przetwarzania sygnałów wejściowych, a w końcowych stopniach mocy nadal polegają na tranzystorach pracujących pojedynczo lub co najwyżej w parach.

## Układ Darlingtona

Tranzystory jednostkowe (dyskretne) przydają się, gdy trzeba zainstalować wzmacniacz lub przełącznik w jednym miejscu obwodu elektronicznego. Przykładem może być sytuacja, w której mikrokontroler musi włączać i wyłączać mały silnik. Wprawdzie silnik może być zasilany takim samym napięciem jak mikrokontroler, ale na pewno potrzebuje znacznie większego prądu niż te 20 mA, które można maksymalnie uzyskać na wyjściu typowego mikrokontrolera. W takim przypadku można się posłużyć parą tranzystorów pracujących w *układzie Darlingtona* (patrz rysunek 28.8). Wypadkowe wzmocnienie takiej pary może mieć wartość nawet powyżej 100 000. Obwód złożony z mikrokontrolera i układu Darlingtona może służyć do sterowania prędkością obrotową silnika (przy założeniu, że jest to zwykły silnik prądu stałego).

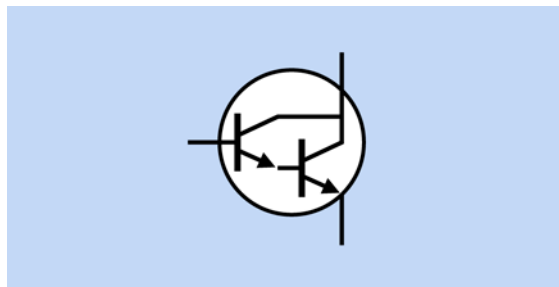
W układzie pokazanym na rysunku mikrokontroler musi mieć masę (na rysunku została pominięta) wspólną z tranzystorami. Rezystor może być konieczny, aby odprowadzić prąd upływu pierwszego tranzystora (gdy ten jest w stanie wyłączenia) i zapobiec wysterowaniu drugiego. Dioda



**Rysunek 28.8.** Gdy emiter jednego tranzystora NPN łączy się z bazą drugiego, oba tranzystory tworzą układ Darlingtona (otoczony białą linią przerywaną); wzmocnienie prądowe takiej pary jest równe iloczynowi wzmocnień poszczególnych tranzystorów

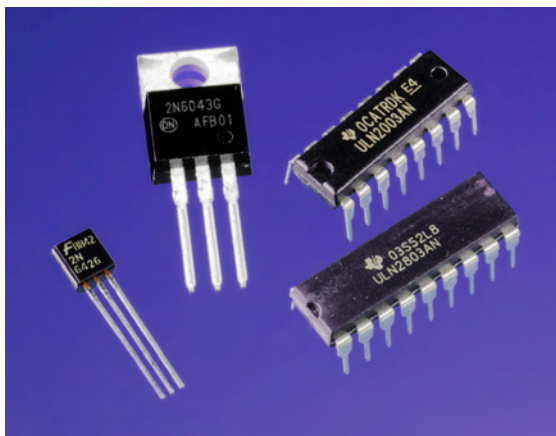
zabezpiecza tranzystory przed przepięciami, jakie mogą powstawać podczas włączania i wyłączania silnika.

Układy Darlingtona są dostępne w takich samych obudowach jak pojedyncze tranzystory, a na schematach mogą być zastępowane symbolem pokazanym na rysunku 28.9.



**Rysunek 28.9.** Układ Darlingtona zamknięty w jednej obudowie tranzystorowej może być na schemacie przedstawiony w formie takiego symbolu; wyprowadzenia takiego układu można traktować tak, jakby były wyprowadzeniami pojedynczego tranzystora NPN

Przykłady układów Darlingtona zamkniętych w różnych obudowach są pokazane na rysunku 28.10.

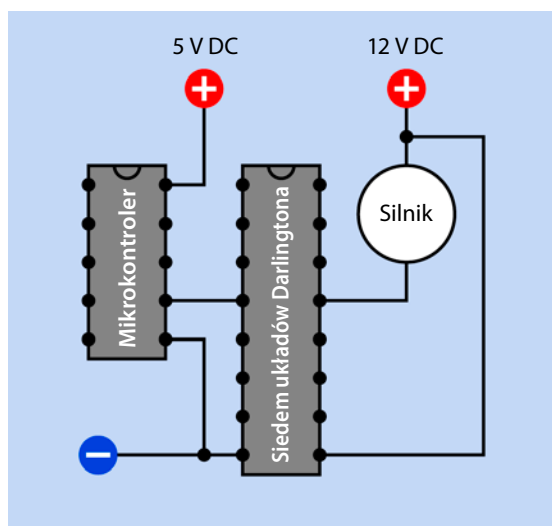


**Rysunek 28.10.** Różne obudowy układu Darlingtona; od lewej do prawej: element 2N6426 zawiera układ o znamionowym prądzie kolektora 500 mA; układ 2N6043 może przewodzić w sposób ciągły prąd o natężeniu do 8 A; układy scalone ULN2003 i ULN2803 zawierają, odpowiednio, siedem i osiem układów Darlingtona

Dostępne są też układy scalone zawierające po siedem lub osiem układów Darlingtona. Zazwyczaj są to układy o prądzie znamionowym 500 mA, ale można je łączyć równolegle, by umożliwić przepływ większego prądu. Bardzo często układy Darlingtona są już fabrycznie wyposażane w diodę zabezpieczającą, więc mogą bezpośrednio sterować obciążeniem o charakterze indukcyjnym.

Typowy przykład takiego rozwiązania jest pokazany na rysunku 28.11. Funkcje wyprowadzeń mikrokontrolera są tu całkowicie hipotetyczne i nie były wzorowane na żadnym rzeczywistym chipie. Chip z układami Darlingtona to ULN2003 z siedmioma takimi parami, z których każda ma pin wejściowy po lewej stronie i wyjściowy po prawej. Każdy pin od 1. do 7., licząc od góry po lewej stronie, może być użyty do sterowania podłączonego do pinu leżącego dokładnie po stronie przeciwnej.

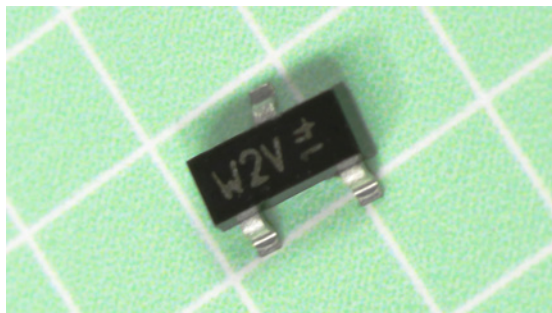
Wysoki poziom sygnału na wejściu powoduje obniżenie napięcia na wyjściu, z tym że napięcie wyjściowe może przyjmować wartości z zupełnie innego zakresu, ponieważ urządzenie, z którego chip pobiera prąd — w tym przypadku jest to silnik — może być zasilane z zupełnie innego źródła. To drugie źródło zasilania — w prezentowanym przykładzie jest to źródło o napięciu 12 V DC — musi mieć wspólną



**Rysunek 28.11.** W obudowie chipu ULN2003 mieści się siedem układów Darlingtona; każdy z nich może sterować prądem płynącym przez podłączone urządzenie; więcej szczegółów jest podanych w tekście

masę z mikrokontrolerem lub każdym innym elementem zastosowanym po stronie wejściowej. Prawy dolny pin chipu z układami Darlingtona jest zasilany ze źródła 12-woltowego, ponieważ wewnętrznie jest on połączony z diodami zabezpieczającymi (po jednej dla każdego układu). Dlatego na schemacie nie ma diody bocznikującej silnik.

Chip z układami Darlingtona nie ma odrębnego pinu do połączenia z dodatnim biegunem zasilania, ponieważ tranzystory wchodzące w skład tych układów są zasilane poprzez podłączone do nich urządzenia zewnętrzne.

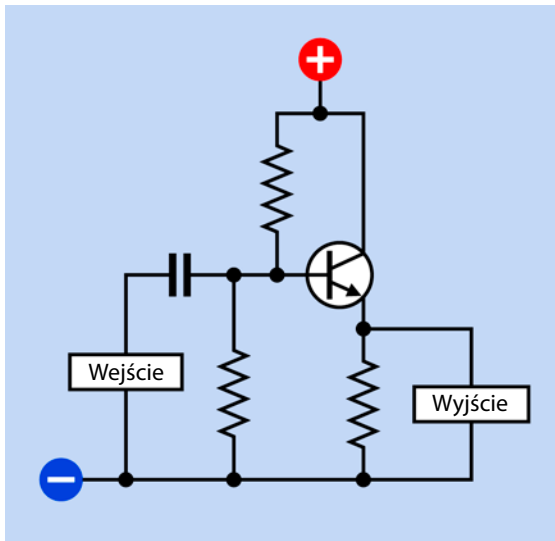


**Rysunek 28.12.** Układ Darlingtona w wersji przeznaczony do montażu powierzchniowego; kwadraty widoczne w tle mają boki długie na 2,54 mm; więcej szczegółów podano w tekście

Na rysunku 28.12 pokazano układ Darlingtona w wersji przeznaczony do montażu powierzchniowego. Obudowa ma zaledwie 3 mm długości, ale układ ma znamionowy prąd kolektora na poziomie 500 mA i moc całkowitą równą 250 mW (przy temperaturze nieprzekraczającej 25°C).

## Wzmacniacze

Dwa podstawowe układy wzmacniaczy tranzystorowych są pokazane na rysunkach 28.13 i 28.14. Konfiguracja *ze wspólnym kolektorem* jest wzmacniaczem prądowym, a nie napięciowym. Kondensator na wejściu blokuje składową stałą prądu pobieranego ze źródła sygnału. Dwa rezystory po stronie wejściowej tworzą dzielnik napięcia ustalający potencjał bazy tranzystora (czyli tzw. *punkt pracy*), wokół którego może się wahać wzmacniany sygnał.

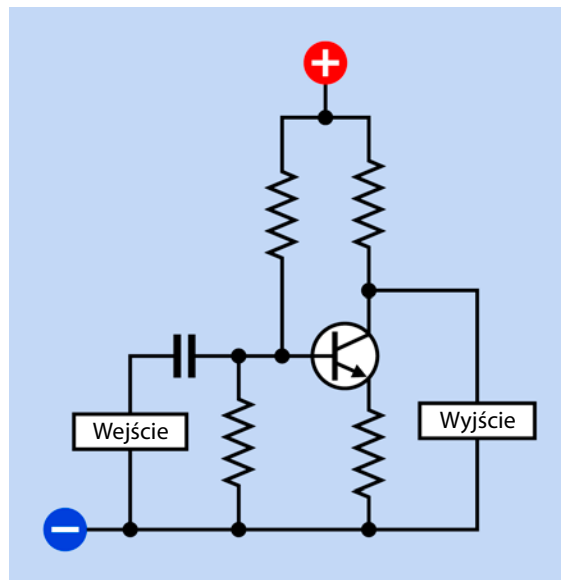


**Rysunek 28.13.** Podstawowy układ wzmacniacza ze wspólnym kolektorem; więcej szczegółów podano w tekście

Układ ze *wspólnym emiterem* daje wzmocnienie napięciowe zamiast prądowego, a przy tym odwraca fazę sygnału. Szczegółowe omówienie układów wzmacniających wykracza poza ramy tej publikacji.

## Przełączniki (klucze tranzystorowe)

Do zastosowań w układach przełączających opracowano wiele nowoczesnych tranzystorów, które są w stanie



**Rysunek 28.14.** Podstawowy układ wzmacniacza ze wspólnym emiterem; więcej szczegółów podano w tekście

przewodzić znacznie większe prądy, ale również one mają swoje ograniczenia. Niewiele tranzystorów mocy jest w stanie przepuścić między kolektorem a emiterem prąd większy niż 50 A, a napięcie pomiędzy tymi elektrodami z reguły nie może być większe niż 1000 V. Pod pewnymi względami przekaźniki elektromechaniczne wciąż mają przewagę i nadal są stosowane. W tabeli zaprezentowanej na rysunku 28.15 porównano parametry decydujące o możliwościach przełączających tranzystora, **przełącznika półprzewodnikowego** i **przełącznika elektromechanicznego**.

## Możliwe błędy

### Niewłaściwe podłączenie tranzystora bipolarnego

Niewłaściwe zidentyfikowanie wyprowadzeń (elektrod) tranzystora może z oczywistych względów spowodować jego uszkodzenie, z tym że przypadkowa zamiana emitera z kolektorem niekoniecznie musi mieć tak groźne skutki. Ze względu na wewnętrzną symetrię urządzenia może ono funkcjonować z kolektorem w roli emitera i na odwrót. Firma Rohm, wielki producent elementów półprzewodnikowych, zamieściła taką informację na swoich stronach

internetowych, dodając jednak, że efektem takiej zamiany jest zmniejszenie współczynnika  $\beta$  lub  $h_{FE}$  do około 10% wartości nominalnej. Jeśli tranzystor działa, ale nie wzmacnia tak, jak powinien, warto sprawdzić, czy został właściwie podłączony do reszty układu, a w szczególności, czy nie pomyłono wyprowadzeń kolektora i emitera.

## Niewłaściwe podłączenie chipu z układami Darlingtona

Podczas gdy pojedynczy układ Darlingtona zamknięty w obudowie tranzystorowej trudno odróżnić pod względem działania od zwykłego tranzystora, kilka takich układów upakowanych w obudowie układu scalonego może wpisać w zakłopotanie, ponieważ taki element zachowuje się zupełnie odmiennie od większości układów scalonych, jak chociażby tych z bramkami logicznymi.

	Tranzystor	Przełącznik półprzewodnikowy	Przełącznik elektromechaniczny
Długotrwała niezawodność	Znakomita	Znakomita	Ograniczona
Styki NC	Nie	Tak	Tak
Styki DT	Nie	Nie	Tak
Zdolność do przełączania dużych prądów	Ograniczona	Nie w każdym przypadku	Dobra
Zdolność do przełączania prądów przemiennych	Nie	Tak	Tak
Zdolność do wyzwalania prądem przemiennym	Nie	Tak	Tak
Możliwość miniaturyzacji	Znakomita	Słaba	Słaba
Wrażliwość na ciepło	Tak	Tak	Nie bardzo
Podatność na korozję	Nie	Nie	Tak
Sprawność przy dużych prędkościach	Znakomita	Dobra	Słaba
Przewaga cenowa w zakresie niskich napięć i prądów	Tak	Nie	Nie
Przewaga cenowa w zakresie dużych napięć i prądów	Nie	Nie	Tak
Upływ prądu w stanie wyłączenia	Tak	Tak	Nie
Obwód wyzwalający odizolowany od obwodu przełączanego	Nie	Tak	Tak

Rysunek 28.15. Porównanie właściwości urządzeń przełączających

Często popełnianym błędem jest łączenie urządzenia wyjściowego z masą, a nie z dodatnim biegunem zasilania. Wystarczy spojrzeć na rysunek 28.11 i wyobrazić sobie błędne podłączenie silnika do ujemnego bieguna baterii 12-woltowej.

Źródłem błędów może być także sama karta produktu wydana przez producenta chipu, takiego jak ULN2003. Producent opisuje tam działanie chipu, jakby w środku były inwertery logiczne. Wprawdzie takie myślenie o układach Darlingtona jest w pewnym aspekcie uprawnione, trzeba jednak pamiętać, że są to pary tranzystorów bipolarnych wzmacniających prąd doprowadzany do bazy pierwszego z nich. Producenci rzadko też informują o możliwości wykorzystania wspólnego pinu wszystkich diod zabezpieczających tranzystory przed przepięciami wywoływanych przez obciążenia o charakterze indukcyjnym. Trzeba uważać, żeby nie pomylić tego pinu (zwykle jest u dołu po prawej) z pinem wspólnej masy (zwykle u dołu po lewej). Podłączenie pinu diodowego do zasilania jest opcjonalne, natomiast podłączenie tego drugiego pinu do masy wspólnej z układem sterującym jest konieczne.

## Nieostrożne lutowanie

Jak wszystkie elementy półprzewodnikowe, tranzystory są wrażliwe na przegrzanie i można je łatwo uszkodzić podczas lutowania. Aby tego uniknąć, należy używać lutownicy o małej mocy. Na czas lutowania można na każdym wyprowadzeniu zapiąć miedzianego krokodylka, aby działał jak radiator i odprowadzał nadmiar ciepła.

## Zbyt wysokie napięcie lub za duży prąd

Podczas pracy tranzystor może ulec uszkodzeniu, jeśli wartości napięć między jego elektrodami i (lub) prądów płynących przez te elektrody przekroczą wartości dopuszczalne. Przepuszczenie prądu przez tranzystor bez żadnego rezystora szeregowego niemal zawsze kończy się przepaleniem półprzewodnika, podobnie zresztą jak w przypadku zastosowania rezystora o źle dobranej wartości.

Maksymalna moc rozpraszania energii przez tranzystor jest zawsze podawana w karcie produktu. Niech ta moc wynosi na przykład 200 mW, a napięcie zasilające niech wynosi 12 V DC. W takiej sytuacji maksymalny prąd kolektora będzie wynosił  $200/12$  mA, czyli około 15 mA (w obliczeniach został pominięty prąd bazy będący niewielkim ułamkiem prądu kolektora). Jeśli emiter jest podłączony bezpośrednio do masy, obciążenie podłączone do wyjścia ma dużą impedancję, a transrezystancję da się pominąć, to zgodnie z prawem Ohma rezystor, który należy włączyć między kolektorem i źródłem zasilania, powinien mieć wartość  $12/0,015 = 800 \Omega$ .

W aplikacjach, w których tranzystor ma pełnić funkcję klucza (przełącznika prądu), zazwyczaj przyjmuje się, że prąd bazy ma stanowić 20% prądu kolektora. W omawianym przykładzie należałoby więc zastosować rezystor o wartości 4,7 k $\Omega$ . Na wszelki wypadek warto jednak zmierzyć rzeczywiste natężenie prądu i wartość napięcia między kolektorem a emiterem.

## Zbyt duży prąd upływu

W układzie Darlingtona lub jakiegokolwiek innej konfiguracji dwóch tranzystorów, w której wyjście jednego łączy się z bazą drugiego, prąd upływu tego pierwszego, będącego w stanie wyłączenia, może być wzmacniany przez drugi tranzystor. Aby tego uniknąć, można część niepożądanego prądu skierować do masy poprzez rezystor bocznikujący podłączony do bazy drugiego tranzystora. Oczywiście taki rezystor zabierze też część użytecznego prądu wpływającego do bazy drugiego tranzystora, gdy pierwszy jest aktywny, ale wartość tego rezystora dobiera się zazwyczaj taką, przy której zabierze on najwyżej 10% prądu bazy. Przykład obwodu z układem Darlingtona i tranzystorem bocznikującym jest pokazany na rysunku 28.8.

# Tranzystor polowy (FET)

Nazwa **tranzystor polowy** obejmuje grupę urządzeń półprzewodnikowych, w skład której wchodzi złączowe tranzystory polowe (JFET — ang. *Junction Field-Effect Transistor*), będące odmianą najprostszą, i tranzystory polowe z tlenkiem metalu (MOSFET — ang. *Metal-Oxide Semiconductor Field-effect Transistor*), zwane też Tranzystorami polowymi z izolowaną bramką (IGFET — ang. *Insulated-Gate Field-Effect Transistor*). Zasady działania tych tranzystorów w dużej mierze się pokrywają i dlatego urządzenia te zostały opisane w jednym haśle *Encyklopedii*.

## INNE POWIĄZANE PODZESPOŁY:

- **tranzystor bipolarny** (rozdział 28.),
- **tranzystor jednozłączowy** (rozdział 27.),
- **dioda** (rozdział 26.).

## Funkcja

Tranzystor polowy wytwarza pole elektryczne, aby za jego pomocą sterować przepływem prądu przez kanał półprzewodnikowy. Mikroskopijnej wielkości tranzystory typu MOSFET są podstawowym elementem składowym *układów scalonych CMOS* (ang. *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Duże dyskretne tranzystory MOSFET są w stanie przełączać prądy o dużym natężeniu, na przykład w ściemniaczach światła, wzmacniaczach audio czy układach sterujących silnikami. Tranzystory polowe stały się niezastąpione w elektronice komputerowej.

**Tranzystor bipolarny** jest uważany za *wzmacniacz prądowy*, ponieważ niewielki prąd bazy wpływa na wielkość znacznie większego prądu kolektora. Natomiast tranzystor polowy jest traktowany jako *wzmacniacz napięciowy*, gdyż natężenie pola elektrycznego sterującego przepływem prądu jest zależne od napięcia wejściowego i praktycznie nie wymaga poboru prądu ze źródła sygnału. Właśnie ta cecha (znikoma wartość prądu bramki) sprawia, że tranzystory polowe doskonale nadają się do pracy w układach przetwarzających sygnały o małej mocy.

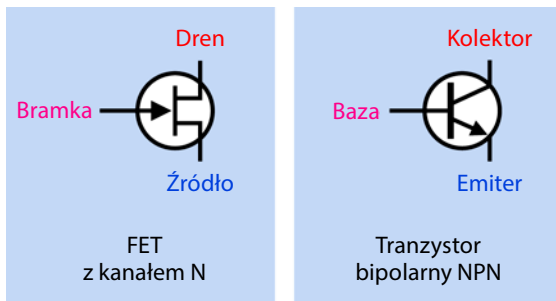
## Działanie

Ten podrozdział jest podzielony na dwie części, z których jedna jest poświęcona tranzystorom typu JFET, a druga — tranzystorom MOSFET.

### JFET

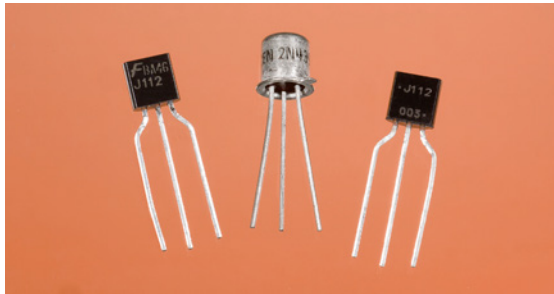
*Złączowy tranzystor polowy (JFET)* jest najprostszą odmianą FET-ów. Tak jak tranzystor bipolarny może być typu PNP lub NPN, tak JFET może mieć *kanał typu P* lub *N*, w zależności od tego, czy kanał przewodzący prąd jest domieszkowany akceptorami (dodatnio), czy donorami (ujemnie). Dokładniejsze omówienie domieszkowania półprzewodnika jest zawarte w rozdziale 28. „Tranzystor bipolarny”.

Nośniki ładunku ujemnego są znacznie mobilniejsze, dlatego kanał typu N szybciej przełącza prąd niż kanał typu P i jest też częściej stosowany. Na rysunku 29.1 pokazano obok siebie (dla porównania) symbole schematyczne tranzystorów polowego z kanałem N i bipolarnego NPN. Podobieństwo symboli sugeruje podobieństwo tych elementów, ale trzeba pamiętać, że pierwszy działa jako wzmacniacz prądowy, a drugi jest w zasadzie wzmacniaczem napięciowym.



**Rysunek 29.1.** Porównanie symboli tranzystora JFET z kanałem N (po lewej) i bipolarnego NPN (po prawej) sugeruje podobieństwo działania tych elementów jako przełączników lub wzmacniaczy, ale pod względem funkcjonalnym są między nimi wyraźne różnice

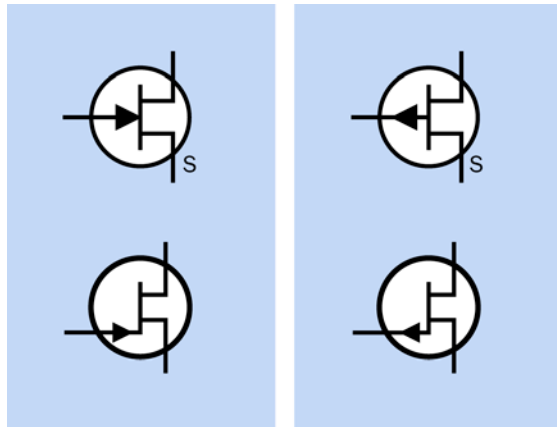
Na rysunku 29.2 pokazano zdjęcia trzech JFET-ów z kanałem N. Model J112 jest dostarczany przez kilku producentów, przy czym na rysunku widoczne są egzemplarze pochodzące od firm Fairchild Semiconductor (po lewej) i On Semiconductor (po prawej). Choć ich pełne numery katalogowe się różnią, wartości parametrów mają niemal identyczne, włącznie z napięciami dren-bramka i dren-źródło wynoszącymi 35 V oraz prądem bramki równym 50 mA. Widoczny w środku tranzystor 2N4392 ma metalową obudowę, jest trzy razy droższy i dysponuje znacznie większą mocą (1,8 W, podczas gdy pozostałe mają, odpowiednio, 0,3 W i 0,35 W).



**Rysunek 29.2.** Złączowe tranzystory polowe (JFET); szczegółowy opis znajduje się w tekście

Symbole schematyczne takich tranzystorów z kanałami N i P są pokazane na rysunku 29.3 (po lewej z kanałem N, po prawej z kanałem P). Wersje górne i dolne są równie często stosowane i ich znaczenie jest takie samo. W przypadku wersji górnych ze względu na ich symetrię powinno się dodawać literkę S obok źródła, aby nie było wątpliwości co do rozkładu wyprowadzeń. W praktyce jest ona często

omijana, a wtedy osoba czytająca schemat musi drogą dedukcji dociekać, po której stronie jest źródło, a po której dren. Wprowadzie w niektórych JFET-ach wyprowadzenia te są zamienne, ale nie dotyczy to wszystkich odmian tych tranzystorów.

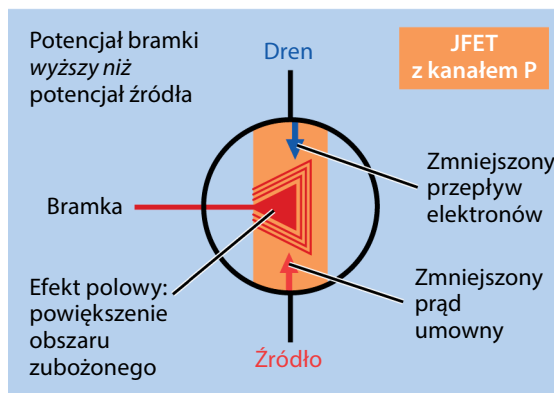
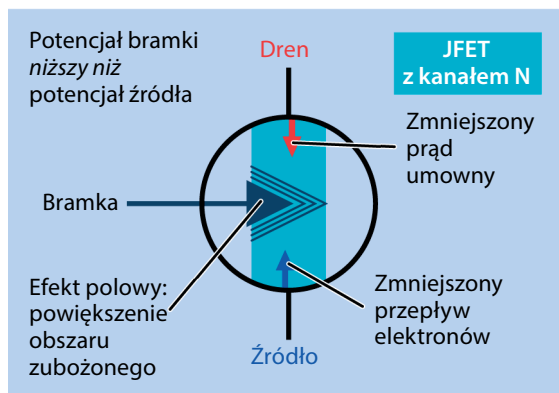
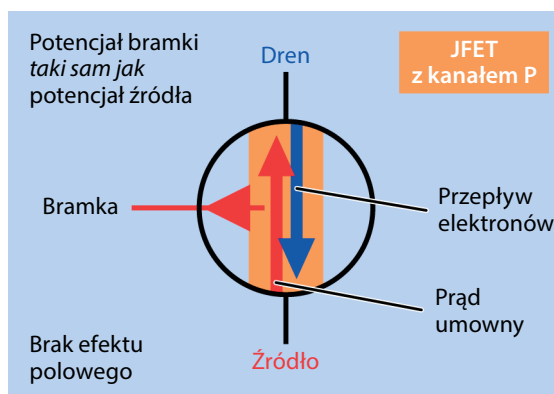
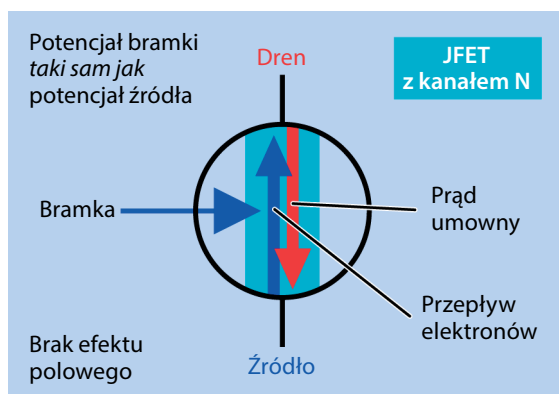


**Rysunek 29.3.** Symbole schematyczne tranzystorów polowych złączowych (JFET); po lewej: tranzystory z kanałem N; po prawej: tranzystory z kanałem P; symbole górne i dolne mają takie samo znaczenie; okręgi mogą być pominięte, podobnie jak litera S, ale w przypadku symboli symetrycznych wprowadza to pewną niejednoznaczność

Okrąg otaczający symbol tranzystora jest pomijany sporadycznie, gdy w grę wchodzi element dyskretny, natomiast praktycznie zawsze jest pomijany wtedy, gdy chodzi o kilka tranzystorów tworzących układ scalony.

Grafika ilustrująca funkcjonowanie kanału N jest pokazana na rysunku 29.4. Źródło dostarcza elektronów, które stosunkowo swobodnie przepływają przez kanał typu N (z domieszkami donorowymi) i docierają do drenu. Oczywiście prąd umowny (przepływ ładunków dodatnich) płynie w tym przypadku odwrotnie, czyli od drenu do źródła, które ma niższy potencjał.

Tranzystor JFET działa jak normalnie zamknięty przełącznik. Jego rezystancja jest mała, gdy potencjał bramki jest równy potencjałowi źródła. Natomiast gdy potencjał bramki maleje poniżej potencjału źródła — czyli bramka staje się bardziej ujemna niż źródło — prąd jest *odcinany* w wyniku efektu polowego (właśnie to przedstawia dolna część rysunku 29.4).



**Rysunek 29.4.** U góry: prąd umowny przepływa swobodnie od drenu do źródła poprzez kanał typu N z nadmiarowymi elektronami; u dołu: obniżenie potencjału bramki względem źródła tworzy efekt polowy utrudniający przepływ prądu

**Rysunek 29.5.** U góry: prąd umowny przepływa swobodnie od źródła do drenu poprzez kanał typu P z nadmiarowymi dziurami; u dołu: podwyższenie potencjału bramki względem źródła tworzy efekt polowy utrudniający przepływ prądu

W przypadku tranzystora z kanałem P sytuacja odwraca się (patrz rysunek 29.5). Teraz źródło ma potencjał dodatni (ale nadal jest źródłem ładunków), a dren może być uziemiony. Gdy bramka i źródło mają takie same potencjały, prąd umowny przepływa swobodnie od źródła do drenu. Gdy potencjał bramki wzrasta powyżej potencjału źródła, prąd jest odcinany.

Tranzystor bipolarny, jeśli nie jest odpowiednio wysterowany, blokuje przepływ prądu, ale gdy jego baza jest spolaryzowana w kierunku przewodzenia, zmniejsza swoją rezystancję. Dlatego jest traktowany jako *urządzenie wzbogacane*. W przeciwieństwie do niego tranzystor JFET normalnie przepuszcza prąd i zwiększa swoją rezystancję, gdy baza jest spolaryzowana w kierunku zaporowym, gdyż wtedy

zwiększa się *obszar zubożenia* w kanale przepustowym. Konsekwentnie należałoby takie urządzenie nazwać *zubożanym*.

Porównanie podstawowych cech obu typów tranzystorów, bipolarnego i polowego złączowego, jest zawarte w tabeli pokazanej na rysunku 29.6.

## Działanie tranzystora JFET

Napięcie między bramką i źródłem jest zazwyczaj oznaczane przez  $U_{gs}$ , a napięcie między drenem i źródłem — przez  $U_{ds}$ .

Załóżmy, że bramka jest połączona ze źródłem, czyli że  $U_{gs} = 0$ . W takiej sytuacji wzrost napięcia  $U_{ds}$  powoduje w przybliżeniu proporcjonalny wzrost natężenia prądu płynącego przez kanał tranzystora. Innymi słowy, tranzystor

	Tranzystor bipolarny NPN	JFET z kanałem N
Rodzaj wzmocnienia	Prądowe	Napięciowe
Polaryzacja robocza	Dodatnia	Ujemna
Stan przy braku polaryzacji	Nieprzewodzenie	Przewodzenie
Stan przy polaryzacji roboczej	Lepsze przewodnictwo	Gorsze przewodnictwo

Rysunek 29.6. Porównanie właściwości bipolarnego tranzystora NPN i złączowego tranzystora polowego

JFET zachowuje się wtedy jak rezystor o niewielkiej wartości, dla którego stosunek napięcia do natężenia prądu jest w przybliżeniu stały. Przedział napięć, w którym ta reguła jest spełniona, nosi nazwę *zakresu omowego*. Wartość rezystancji w tym zakresie jest zależna od typu tranzystora i przeważnie wynosi od 10  $\Omega$  do 1 k $\Omega$ .

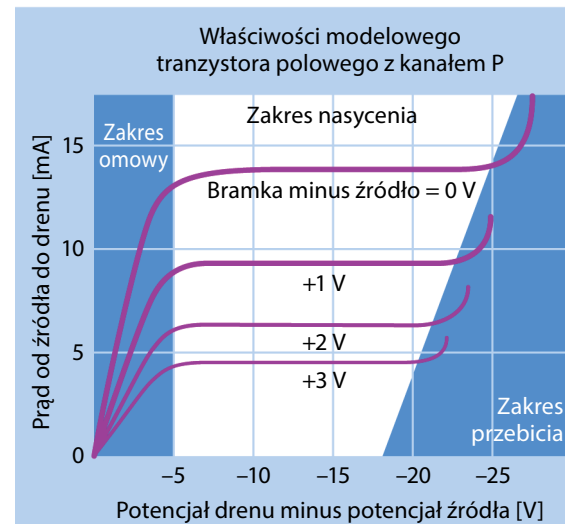
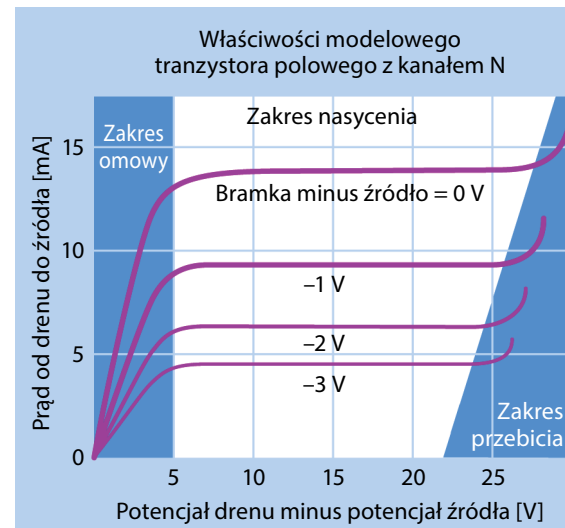
Powyżej pewnej wartości napięcia  $U_{ds}$  natężenie prądu przestaje rosnać, gdyż kanał przechodzi w stan *nasycenia*. Ten płaski przebieg zależności prądu od napięcia jest nazywany *zakresem nasycenia*, a natężenie płynącego wtedy prądu jest oznaczane przez  $I_{dss}$  (prąd drenu w stanie nasycenia). Dla danego typu tranzystora wartość ta jest w przybliżeniu stała, choć może się nieco zmieniać w zależności od zastosowanych metod produkcyjnych.

Dalszy wzrost napięcia  $U_{ds}$  prowadzi w końcu do stanu *przebiecia* (pełna nazwa to *przebiecie dren-źródło*). Natężenie płynącego wtedy prądu jest zależne wyłącznie od wydajności zewnętrznego źródła i innych elementów obwodu połączonych szeregowo z tranzystorem. Stan przebiecia może mieć destrukcyjne skutki podobnie jak w przypadku *diody*.

Co się stanie, gdy potencjał bramki zmaleje w stosunku do potencjału źródła, to znaczy gdy  $U_{gs}$  stanie się ujemne? W zakresie omowym tranzystor będzie się zachowywał jak rezystor o większej wartości i osiągnie stan nasycenia przy mniejszej wartości prądu, ale przy niemal takiej samej wartości napięcia  $U_{ds}$ . Dalsze obniżanie potencjału bramki względem potencjału źródła zwiększa rezystancję kanału.

O tranzystorze można powiedzieć, że zachowuje się wtedy jak *rezystor sterowany napięciem*.

Opisane wyżej zależności są pokazane graficznie na rysunku 29.7. Górna część rysunku odnosi się do tranzystora z kanałem N, a dolna przedstawia wykresy sporządzone dla tranzystora z kanałem P. Jedne i drugie wykresy są niemal identyczne, a różnią się przede wszystkim kierunkiem

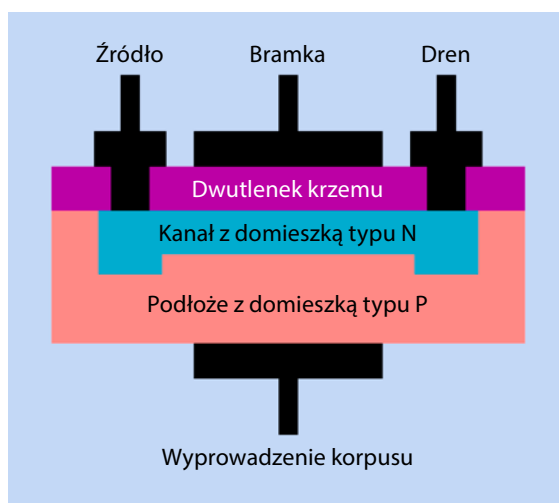


Rysunek 29.7. U góry: wykresy zależności prądu przepływającego przez kanał N w zależności od napięć między wyprowadzeniami tranzystora; u dołu: wykresy analogicznych zależności dla tranzystora z kanałem P

przepływu prądu i znakami napięć. Mniej istotną różnicą jest to, że tranzystor z kanałem P trochę szybciej osiąga stan przebicia niż tranzystor z kanałem N.

## MOSFET-y

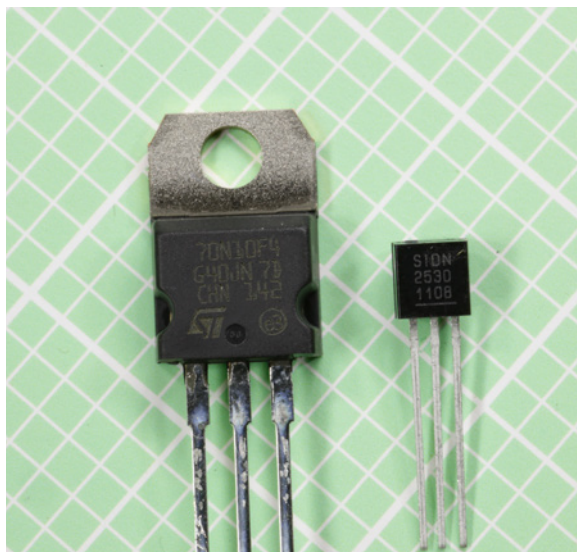
MOSFET-y stały się jednymi z najczęściej stosowanych elementów elektronicznych — używa się ich wszędzie, zarówno w pamięciach komputerowych, jak i w wysokoamperowych zasilaczach impulsowych. Ich nazwa jest skrótem od angielskiego określenia *Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*, które oznacza tranzystor polowy złożony z warstw półprzewodnika, tlenku i metalu. W dużym uproszczeniu konstrukcja ta jest pokazana na rysunku 29.8.



**Rysunek 29.8.** Uproszczony przekrój tranzystora MOSFET z kanałem N; grubość warstwy dwutlenku krzemu została tu przesadnie pogrubiona; czarne wyprowadzenia są wykonane z metalu

Zdjęcia dwóch różnych MOSFET-ów są pokazane na rysunku 29.9.

Podobnie jak JFET, tranzystor typu MOSFET ma trzy wyprowadzenia nazywane bramką, źródłem i drenem. Działa również podobnie, to znaczy wytwarza efekt polowy, za pomocą którego steruje przepływem prądu przez kanał. (Niektóre MOSFET-y mają czwarte wyprowadzenie opisane w dalszej części hasła). Metalowe wyprowadzenia źródła i drenu tworzą kontakty elektryczne z przeciwnymi końcami kanału, a bramka jest oddzielona od kanału cienką warstwą dwutlenku krzemu (stąd słowo *tlenek*), co zwiększa



**Rysunek 29.9.** Dwa MOSFET-y; po lewej: obudowa TO-220, maksymalny ciągły prąd drenu 65 A, napięcie przebicia dren-źródło 100 V; po prawej: mniejsza obudowa, maksymalny ciągły prąd drenu 175 mA, napięcie przebicia dren-źródło 300 V

impedancję wejściową do co najmniej 100 000 GΩ i w rezultacie zmniejsza prąd bramki praktycznie do zera. Duża impedancja wejściowa MOSFET-u umożliwia podłączenie go do wyjścia cyfrowego układu scalonego bez konieczności stosowania jakichkolwiek układów pośredniczących. Warstwa dwutlenku krzemu jest *dielektrykiem*, a to oznacza, że ładunek zgromadzony po jednej stronie wymusza zgromadzenie po drugiej stronie ładunku o takiej samej wartości, ale z przeciwnym znakiem. Bramka stykająca się z jedną stroną tej warstwy pełni taką samą funkcję jak okładzina kondensatora.

Warstwa dwutlenku krzemu izoluje bramkę od kanału, co sprawia, że niemożliwy jest przepływ niepożądanego prądu zwrotnego. W JFET-ach, które nie mają takiej warstwy izolacyjnej, jeśli potencjał źródła wzrośnie w stosunku do potencjału bramki o więcej niż 0,6 V, przez złącze bramka-kanał popłynie prąd, a jako że rezystancja wewnętrzna jest bardzo mała, taki niekontrolowany przepływ może doprowadzić do uszkodzenia tranzystora. Dlatego JFET-y powinny być zawsze polaryzowane w kierunku zaporowym.

W MOSFET-ach nie ma tego ograniczenia i potencjał bramki może być wyższy lub niższy od potencjału źródła. Dzięki tej

właściwości mogą one pracować nie tylko jako urządzenia wzbogacane, ale również jako *urządzenia zubożane* normalnie wyłączone i do włączenia wymagające spolaryzowania w kierunku przewodzenia. Wszystko zależy w dużej mierze od stopnia domieszkowania kanału N nośnikami ładunków swobodnych i w konsekwencji jego zdolności do przewodzenia prądu bez żadnej pomocy ze strony odpowiedniego spolaryzowania bramki.

W tranzystorze zubożanym kanał jest przewodzący, a przyłożenie ujemnego napięcia do bramki zmniejsza jego zdolność przewodzenia.

W tranzystorze wzbogacanym kanał jest nieprzewodzący, a przyłożenie dodatniego napięcia do bramki czyni go przewodzącym.

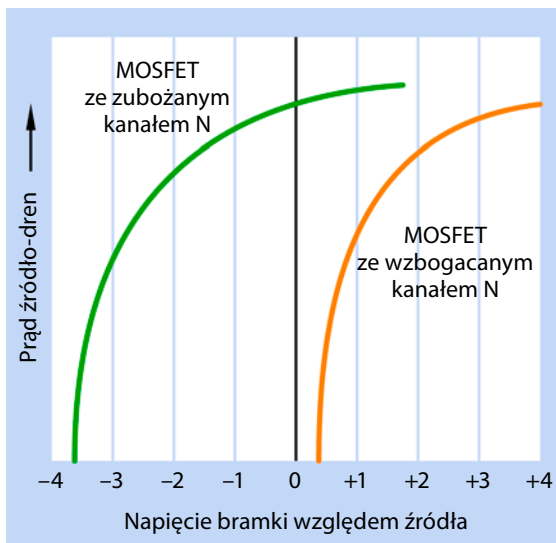
W obu przypadkach przejście od polaryzacji ujemnej do dodatniej poprawia przewodnictwo kanału, a różnica sprowadza się tylko do odmiennych warunków początkowych.

Dokładnie ilustruje to rysunek 29.10. Oś pionowa (logarytmiczna) reprezentuje prąd przepływający przez kanał tranzystora MOSFET. Linia zielona opisuje działanie tranzystora zubożanego. Miejsce jej przecięcia ze wspomnianą osią pionową reprezentuje zerową polaryzację, kiedy to kanał

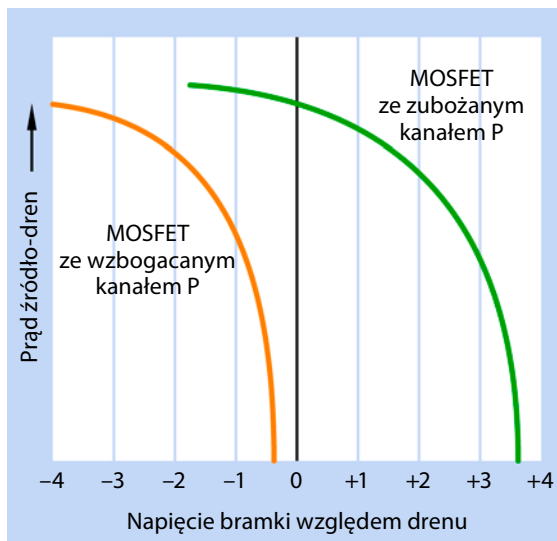
wykazuje naturalną przewodność, podobnie jak tranzystor typu JFET. Na lewo od tego punktu, gdzie napięcie polaryzujące ma wartości ujemne (oznaczone na osi poziomej), krzywa opada, co oznacza, że przewodność kanału maleje — aż do zera.

Widoczna na tym samym wykresie krzywa pomarańczowa przedstawia działanie wzbogacanego tranzystora MOSFET, który przy zerowej polaryzacji nie przewodzi prądu. W miarę wzrostu dodatniego napięcia polaryzującego przewodność również rośnie, podobnie jak w tranzystorze bipolarnym.

Sprawa komplikuje się jeszcze bardziej, jeśli się weźmie pod uwagę, że MOSFET, podobnie jak JFET, może mieć kanał P, który też może funkcjonować w trybie zubożania lub wzbogacania. Działanie tego wariantu ilustruje rysunek 29.11. Tak jak poprzednio, krzywa zielona reprezentuje MOSFET z kanałem zubożanym, a pomarańczowa — z kanałem wzbogacanym. Na osi poziomej są oznaczone wartości napięcia między bramką a drenem. Wariant zubożony ma naturalną przewodność przy polaryzacji zerowej i przestaje przewodzić dopiero wtedy, gdy potencjał bramki przekroczy o odpowiednią wartość potencjał drenu. Wariant wzbogacany ma zerową przewodność, dopóki bramka nie zostanie odpowiednio spolaryzowana.

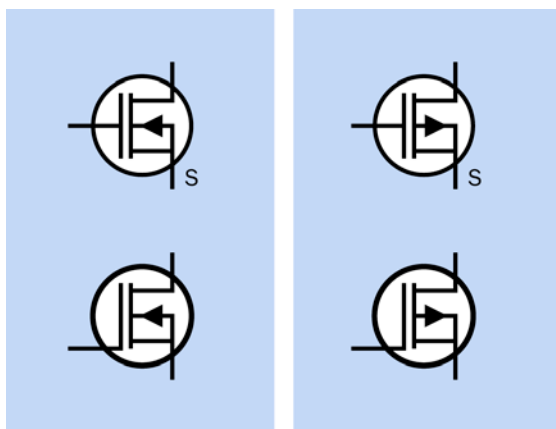


**Rysunek 29.10.** Przewodność elektryczna kanału N w wersjach zubożanej i wzbogacanej; szczegółowy opis znajduje się w tekście (wg książki *Sztuka elektroniki* Horowitz i Hilla)



**Rysunek 29.11.** Przewodność elektryczna kanału P w wersjach zubożanej i wzbogacanej; szczegółowy opis znajduje się w tekście

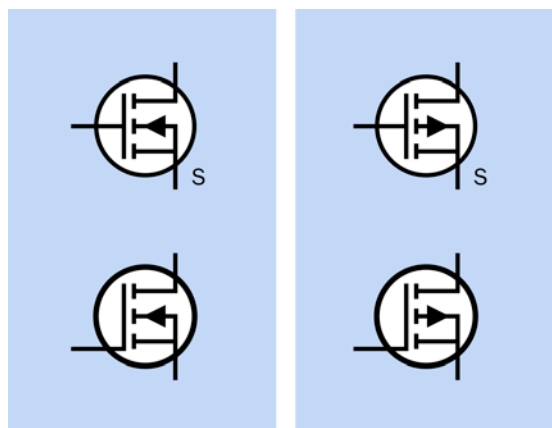
Na rysunku 29.12 pokazano symbole schematyczne MOSFET-ów zubożanych. Symbole w niebieskich prostokątach są sobie równoważne — w lewym prostokącie są symbole dla wersji z kanałem N, a w prawym — dla wersji z kanałem P. Podobnie jak w przypadku tranzystorów JFET litera S oznaczająca źródło powinna być dodawana do symbolu symetrycznego, ale w praktyce często jest pomijana. Symbol ze strzałką skierowaną do bramki oznacza tranzystor z kanałem N, a symbol ze strzałką skierowaną od bramki oznacza tranzystor z kanałem P. Odstęp między dwiema liniami pionowymi wskazuje na obecność dielektrycznej warstwy dwutlenku krzemu. Druga od lewej pionowa linia reprezentuje kanał tranzystora.



**Rysunek 29.12.** Symbole tranzystorów MOSFET z kanałem zubożanym, które pod względem funkcjonalnym są podobne do tranzystorów JFET; oba symbole po lewej stronie są równoważne i reprezentują tranzystor z kanałem N; symbole po prawej stronie reprezentują tranzystor z kanałem P

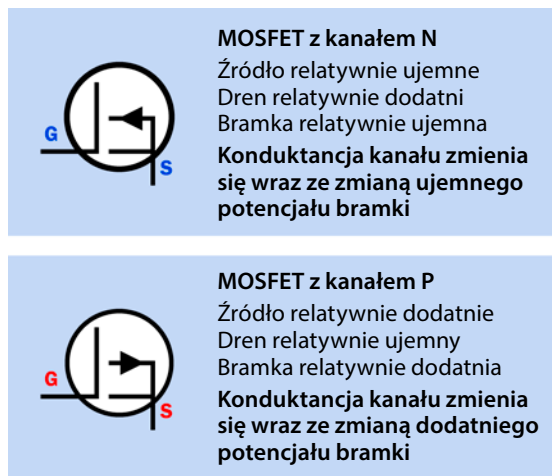
Symbole tranzystorów MOSFET z kanałem wzbogacanym różnią się od zubożanych tym, że linia reprezentująca kanał jest przerywana (patrz rysunek 29.13), co ma przypominać o tym, iż taki tranzystor jest „normalnie wyłączony” (nie przewodzi prądu przy zerowej polaryzacji bramki). O tym, czy tranzystor ma kanał N, czy P, informuje kierunek strzałki — jeśli jest zwrócona w stronę bramki, to kanał jest typu N, a jeśli jest zwrócona w przeciwną stronę, to kanał jest typu P.

Aby pomóc w usystematyzowaniu tych wszystkich informacji na temat symboli MOSFET-ów, na rysunkach 29.14 i 29.15 zamieszczono graficzne podsumowanie najważniejszych



**Rysunek 29.13.** Symbole tranzystorów MOSFET z kanałem wzbogacanym; oba symbole po lewej stronie są równoważne i reprezentują tranzystor z kanałem N; symbole po prawej stronie reprezentują tranzystor z kanałem P

kwestii. Są tam pokazane fragmenty symboli wraz z objaśnieniem ich znaczenia. Każdy fragment z rysunku 29.14 można nałożyć na dowolny fragment z rysunku 29.15, aby otrzymać pełny symbol jednego z czterech możliwych typów tranzystora MOSFET. Na przykład połączenie górnej części rysunku 29.14 z dolną częścią rysunku 29.15 daje symbol tranzystora ze wzbogacanym kanałem typu N.



#### MOSFET z kanałem N

Źródło relatywnie ujemne  
Dren relatywnie dodatni  
Bramka relatywnie ujemna  
**Konduktancja kanału zmienia się wraz ze zmianą ujemnego potencjału bramki**

#### MOSFET z kanałem P

Źródło relatywnie dodatnie  
Dren relatywnie ujemny  
Bramka relatywnie dodatnia  
**Konduktancja kanału zmienia się wraz ze zmianą dodatniego potencjału bramki**

**Rysunek 29.14.** Aby utworzyć pełny symbol jednego z czterech możliwych typów tranzystora MOSFET, należy nałożyć dowolny z tych fragmentów na którykolwiek fragment z następnego rysunku; szczególnie w tekście



### MOSFET zubożony normalnie włączony

Zmiana potencjału bramki (na bardziej ujemny dla kanału N, bardziej dodatni dla kanału P) zmniejsza przepływ prądu

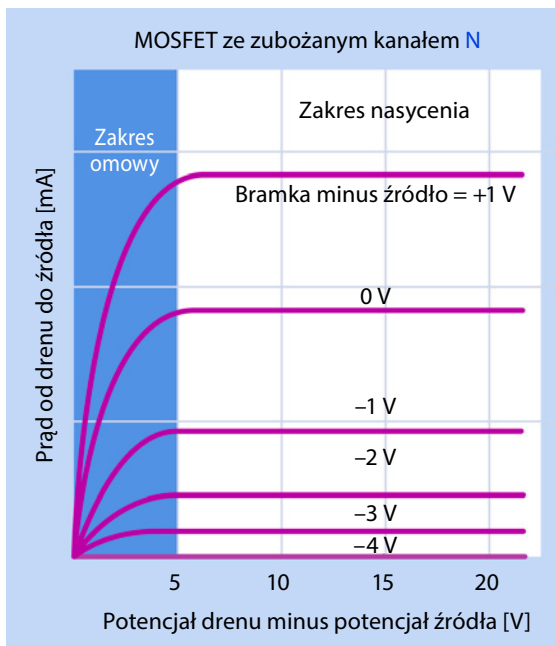


### MOSFET zubożony normalnie wyłączony

Zmiana potencjału bramki (na mniej dodatni dla kanału N, mniej ujemny dla kanału P) zmniejsza przepływ prądu

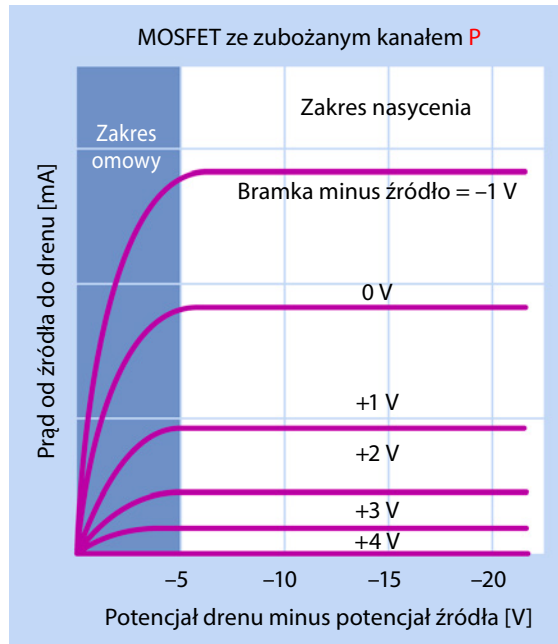
**Rysunek 29.15.** Aby utworzyć pełny symbol jednego z czterech możliwych typów tranzystora MOSFET, należy nałożyć dowolny z tych fragmentów na którykolwiek fragment z rysunku poprzedniego; szczegóły w tekście

Dodatkową pomocą w porządkowaniu wiedzy na temat MOSFET-ów niech będą cztery wykresy zamieszczone na



**Rysunek 29.16.** Przepływ prądu przez MOSFET ze zubożonym kanałem typu N

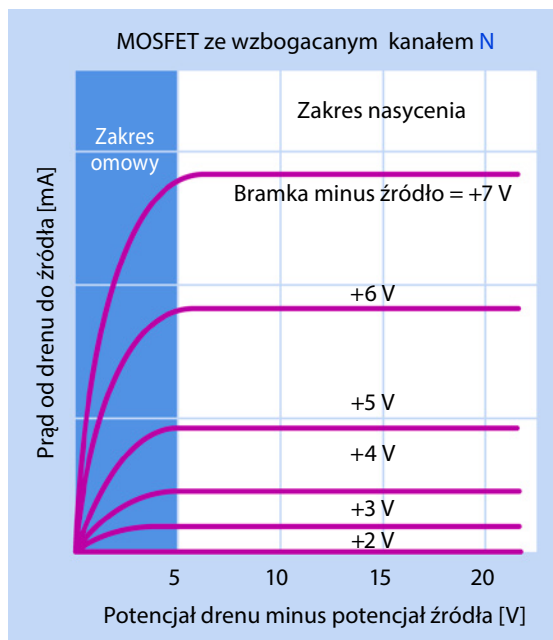
rysunkach 29.16, 29.17, 29.18 i 29.19. Podobnie jak w przypadku JFET-ów, można tu wyróżnić początkowy obszar omowy, po którym następuje obszar nasycenia z relatywnym swobodnym przepływem prądu przez kanał tranzystora. O wielkości tego prądu decyduje napięcie między bramką a źródłem. Wizualnie wykresy nie różnią się między sobą, ale nie można na nie patrzeć, nie zwracając uwagi na widoczne tam wartości napięć. To one różnicują te cztery typy MOSFET-ów.



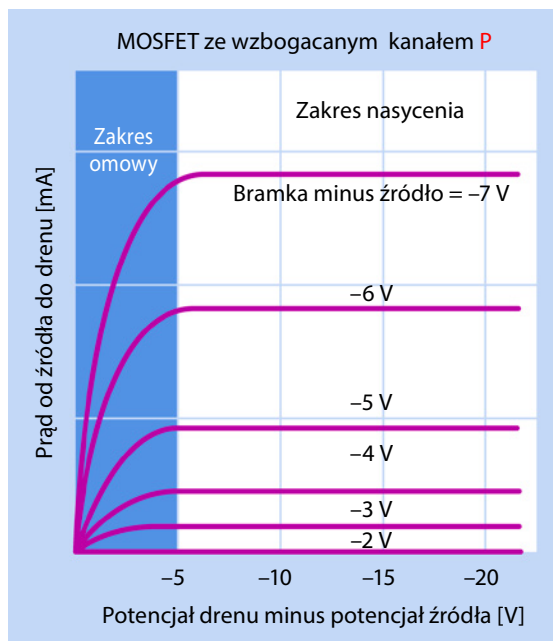
**Rysunek 29.17.** Przepływ prądu przez MOSFET ze zubożonym kanałem typu P

Na każdym wykresie wskazano napięcie polaryzujące bramkę, które blokuje przepływ prądu (reprezentuje je prosta pokrywająca się z poziomą osią wykresu). Można więc wykorzystywać taki tranzystor do otwierania i zamykania obwodu zamiast tradycyjnego przełącznika mechanicznego. Oczywiście wartości napięć mogą się różnić w zależności od konkretnego modelu tranzystora.

Najbardziej użyteczne w tej roli są tranzystory ze wzbogacanym kanałem N, ponieważ w stanie wyłączenia (przy zerowej polaryzacji bramki) ich rezystancja jest bardzo duża. Do otwarcia kanału przewodzącego prąd między źródłem a drenem potrzebne jest tu stosunkowo duże napięcie



**Rysunek 29.18.** Przepływ prądu przez MOSFET ze wzbogacnym kanałem typu N



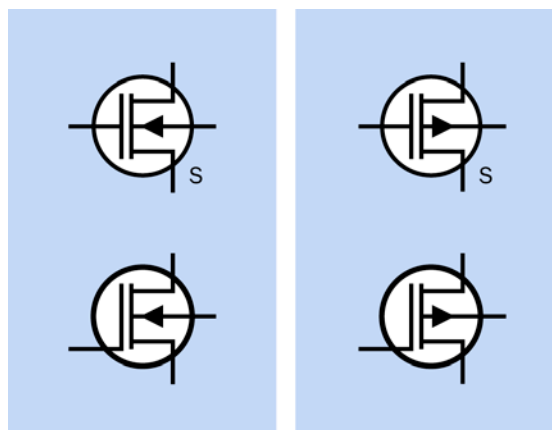
**Rysunek 29.19.** Przepływ prądu przez MOSFET ze wzbogacnym kanałem typu P

polaryzujące, ale mimo to nie jest pobierany żaden prąd bramki. Brak prądu bramki umożliwia sterowanie pracą tranzystora bezpośrednio przez typowy 5-woltowy cyfrowy układ scalony.

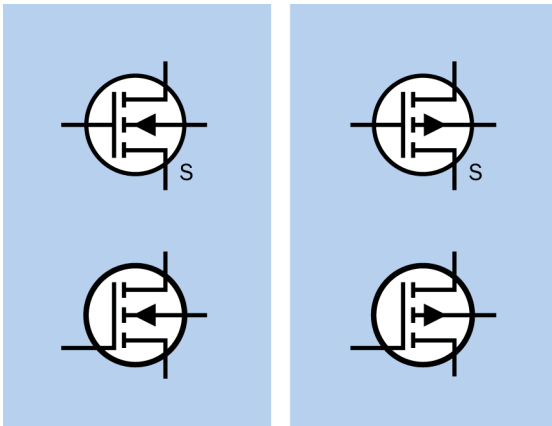
Obecnie częściej stosowane są MOSFET-y z kanałem zubożanym niż te z kanałem wzbogacnym.

### Podłoże tranzystora MOSFET

Do tej pory nie zostało opisane czwarte wyprowadzenie wielu MOSFET-ów zwane *korpusem*. Jest ono połączone z podłożem, na którym zamontowana jest cała konstrukcja wewnętrzna tranzystora. Podłoże jest oddzielone od kanału tylko pojedynczym złączem PN. Zazwyczaj jest ono łączne wewnętrznie z wyprowadzeniem źródła i takie właśnie rozwiązanie jest prezentowane na zamieszczonych wcześniej symbolach schematycznych. Istnieje jednak możliwość użycia tego wyprowadzenia do zmiany wartości progowej potencjału bramki. Symbole graficzne tranzystorów z odrębnym wyprowadzeniem podłoża są pokazane na rysunkach 29.20 (MOSFET-y zubożane) i 29.21 (MOSFET-y wzbogane).



**Rysunek 29.20.** Symbole schematyczne tranzystora MOSFET z kanałem zubożanym w wersji z odrębnym wyprowadzeniem podłoża



**Rysunek 29.21.** Symbole schematyczne tranzystora MOSFET z kanałem wzbogacanym w wersji z odrębnym wyprowadzeniem podłoża

Pełny opis sposobów użycia tego wyprowadzenia modyfikowania charakterystyk tranzystora wykracza poza zakres *Encyklopedii*.

## Rodzaje

Poza opisanymi wyżej dwoma rodzajami tranzystorów polowych istnieje jeszcze kilka innych.

### MESFET-y

Skrót pochodzi od angielskiej nazwy *Metal-Semiconductor Field Effect Transistor* oznaczającej tranzystor polowy złożony z warstw półprzewodnika i metalu. Ten typ tranzystorów polowych jest produkowany z arsenku galu i znajduje zastosowanie głównie w aparaturze radiowej.

### VMOSFET-y

Większość tranzystorów polowych może przewodzić prądy o stosunkowo niewielkim natężeniu, a VMOSFET-y (MOSFET-y z kanałem w kształcie litery V) są w stanie wytrzymać natężenie prądu o wartości nawet 50 A i napięcia sięgające 1000 V. Przewodzenie dużych prądów jest możliwe, ponieważ rezystancja kanału nie przekracza tutaj 10  $\Omega$ . Urządzenia te, zwane często *MOSFET-ami mocy*, są oferowane przez niemal wszystkich producentów elementów półprzewodnikowych i są powszechnie stosowane w zasilaczach impulsowych.

### MOSFET rowkowy (Trench MOSFET)

W tego typu tranzystorach prąd płynie nie poziomo, lecz pionowo. Nazwa pochodzi od rowków na powierzchni półprzewodnika, w których umieszczona jest bramka. Dzięki kilku innowacjom udało się jeszcze bardziej zmniejszyć rezystancję kanału i obniżyć wydzielanie ciepła. Tranzystory o takich parametrach są stosowane w przemyśle samochodowym jako zamienniki **przełączników** elektromechanicznych.

## Wartości

Parametrami tranzystora polowego, których wartości maksymalne można znaleźć w karcie produktu, są między innymi:  $U_{ds}$  (napięcie dren-źródło, czyli różnica potencjałów między drenem a źródłem),  $U_{dg}$  (napięcie dren-bramka, czyli różnica potencjałów między bramką a drenem),  $U_{gsr}$  (odwrotne napięcie bramka-źródło), prąd bramki i całkowita moc w mW. Wartości napięć mają charakter względny, a zatem w przypadku tranzystora o  $U_{ds}$  równym 25 V napięcia drenu i źródła mogą wynosić, odpowiednio, 50 V i 25 V. Podobnie, aby w tranzystorze JFET uzyskać efekt odciążenia, należy przyłożyć do bramki odpowiednio duże napięcie ujemne w stosunku do źródła, czyli na przykład wymusić potencjał źródła na poziomie 6 V, podczas gdy bramka ma potencjał 3 V.

JFET-y i MOSFET-y przeznaczone do przełączania niewielkich prądów mają zazwyczaj kanały o rezystancji zaledwie kilku omów i mogą przełączać prąd z częstotliwością do 10 MHz.

Karta produktu tranzystora typu MOSFET może zawierać również takie wartości, jak napięcie progowe bramki ( $U_{gs}$  lub  $U_{th}$ ), przy którym bramka zaczyna wpływać na wartość prądu, oraz maksymalny prąd drenu w stanie włączenia ( $I_{d(on)}$ ), który zwykle jest określany dla temperatury 25°C.

## Stosowanie

Połączenie bardzo dużej impedancji wejściowej, niskiego poziomu szumów, małego zużycia energii w stanie wyłączenia z bardzo dużą szybkością przełączania sprawia, że MOSFET-y znajdują mnóstwo rozmaitych zastosowań.

### Wady kanału typu P

MOSFET-y z kanałem P są mniej popularne niż MOSFET-y z kanałem N, ponieważ krzem typu P ma większą

rezystywność wynikającą z mniejszej ruchliwości nośników akceptorowych.

## Zamiennosc z tranzystorami bipolarnymi

W wielu przypadkach tranzystor bipolarny można z powodzeniem zastąpić odpowiednio dobranym MOSFET-em z kanałem wzbogacanym i zyskać obniżenie poziomu szumów, szybsze działanie, znacznie większą rezystancję wejściową i zazwyczaj mniejsze straty energii.

## Przedwzmacniacz

MOSFET-y doskonale sprawdzają się we wszelkiego rodzaju przedwzmacniaczach i obecnie nawet produkuje się przeznaczone do tych celów układy scalone z takimi właśnie tranzystorami.

## Rezystor sterowany napięciem

Prosty rezystor sterowany napięciem można zbudować na bazie tranzystora typu JFET lub MOSFET, o ile jego działanie zostanie ograniczone do obszaru liniowego (omowego).

## Kompatybilność z urządzeniami cyfrowymi

JFET-y są zazwyczaj zasilane ze źródła o napięciu do 25 V DC. Mogą być jednak sterowane wysokim lub niskim poziomem napięcia wyjściowego z cyfrowych urządzeń 5-woltowych. Jeśli FET ma współpracować z cyfrowym układem TTL, w którym różnica między poziomami niskim i wysokim wynosi nie więcej niż 2,5 V, należy zastosować rezystor podciągający o wartości 4,7 kΩ.

## Możliwe błędy

### Elektryczność statyczna

Ponieważ bramka MOSFET-u jest izolowana od pozostałych struktur tranzystora i działa podobnie jak płytka kondensatora, ma szczególną skłonność do gromadzenia elektryczności statycznej. Po przekroczeniu określonej wartości zgromadzonego ładunku może dojść do przebicia warstwy izolacyjnej i w konsekwencji uszkodzenia jej. MOSFET jest szczególnie wrażliwy na wyładowania elektrostatyczne, ponieważ jego warstwa tlenkowa jest niezwykle cienka. Należy więc zachować szczególną ostrożność przy pracy z tego typu

elementami. Przed wzięciem do ręki tranzystora MOSFET należy dotknąć uziemionego obiektu lub założyć uziemioną opaskę na nadgarstek. Należy też upewnić się, że każdy obwód zawierający takie tranzystory ma odpowiednią ochronę przed skokami napięcia.

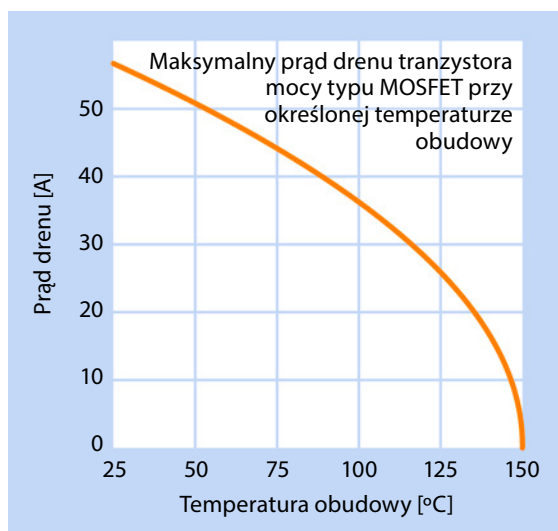
MOSFET nie powinien być wkładany ani wyjmowany, gdy obwód, w którym działa, jest włączony lub zawiera napięcie resztkowe nierozładowanych kondensatorów.

### Ciepło

Awaria z powodu przegrzania ma szczególne znaczenie w przypadku tranzystorów MOSFET. Nota aplikacyjna firmy Vishay dotycząca elementów półprzewodnikowych o dużej mocy podaje, że jest mało prawdopodobne, aby w rzeczywistych warunkach udało się zapewnić temperaturę pracy elementu istotnie niższą niż 90°C, jednak możliwości przewodzenia prądu podawane w karcie produktu zwykle zakładają temperaturę na standardowym poziomie 25°C.

Z drugiej strony, wartości znamionowe mocy ciągłej mają niewielkie znaczenie dla urządzeń przełączających, których współczynnik wypełnienia impulsu jest znacznie poniżej 100%. Istotne są również inne czynniki, takie jak możliwość przepięć, częstotliwość przełączania czy integralność połączenia między tranzystorem a jego radiatorem. Sam radiator niczego nie gwarantuje, ponieważ on tylko dąży do utrzymania średniej temperatury „chłodzonego” elementu, a niestety nie ma prostego sposobu na śledzenie chwila po chwili rzeczywistej temperatury złącza wewnątrz MOSFET-u.

Mając na uwadze mnogość nieznanych czynników, należy dobierać MOSFET-y mocy w sposób wyjątkowo zachowawczy. Zgodnie z samouczkiem w *EE Times* rzeczywisty prąd przełączany przez MOSFET powinien być mniejszy niż połowa jego prądu znamionowego przy 25°C, ale powszechnie stosuje się wartości z przedziału od jednej czwartej do jednej trzeciej. Na rysunku 29.22 pokazano zalecane wartości maksymalnego prądu drenu w różnych temperaturach. Przekroczenie tego zalecenia może wytworzyć dodatkowe ciepło, którego nie można rozproszyć, co prowadzi do dalszego gromadzenia się ciepła i w rezultacie niekontrolowanego wzrostu temperatury mogącego spowodować uszkodzenie tranzystora.



**Rysunek 29.22.** Maksymalny zalecany prąd drenu w MOSFET-ach mocy, związany z temperaturą obudowy elementu. Pochodzi z artykułu [Power MOSFET](#) zamieszczonego w serwisie *EE Times*

## Niewłaściwa polaryzacja

Jak wcześniej zauważono, zastosowanie polaryzacji w kierunku przewodzenia w odniesieniu do JFET może spowodować, że złącze między bramką a źródłem zacznie się zachowywać jak dioda spolaryzowana w kierunku przewodzenia i napięcie na bramce będzie wyższe niż napięcie na źródle o około 0,6 V lub więcej (w przypadku JFET-u z kanałem N). Złącze będzie miało stosunkowo niewielki opór, przez co przyczyni się do dalszego wzrostu prądu i niszczących konsekwencji. Ważne jest zaprojektowanie urządzenia w taki sposób, aby ewentualny błąd użytkownika nie mógł doprowadzić do takiej sytuacji.

# Symbole schematyczne

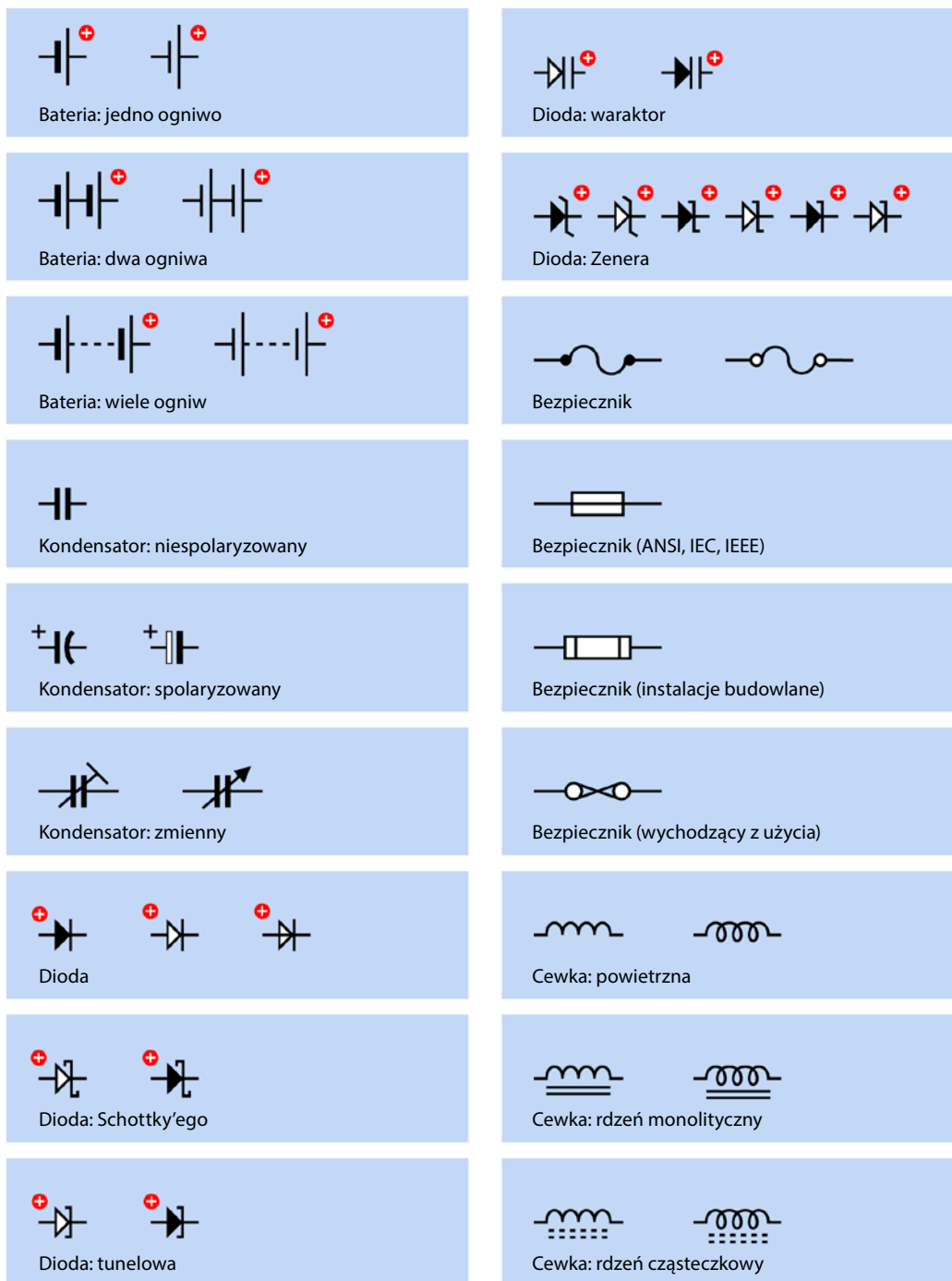
A

W tym dodatku zostały zebrane symbole schematyczne wszystkich elementów opisanych w pierwszym tomie *Encyklopedii*. Ułożone są w zasadzie alfabetycznie, gdyż wykaz ma służyć jako łatwy do przeszukiwania materiał referencyjny. Odstępstwa od tej reguły występują tylko w przypadku elementów o dużym stopniu pokrewieństwa — na przykład symbol **potencjometru** znalazł się obok symbolu **rezystora**; z tego samego powodu do jednej grupy trafiły wszystkie symbole **tranzystorów**.

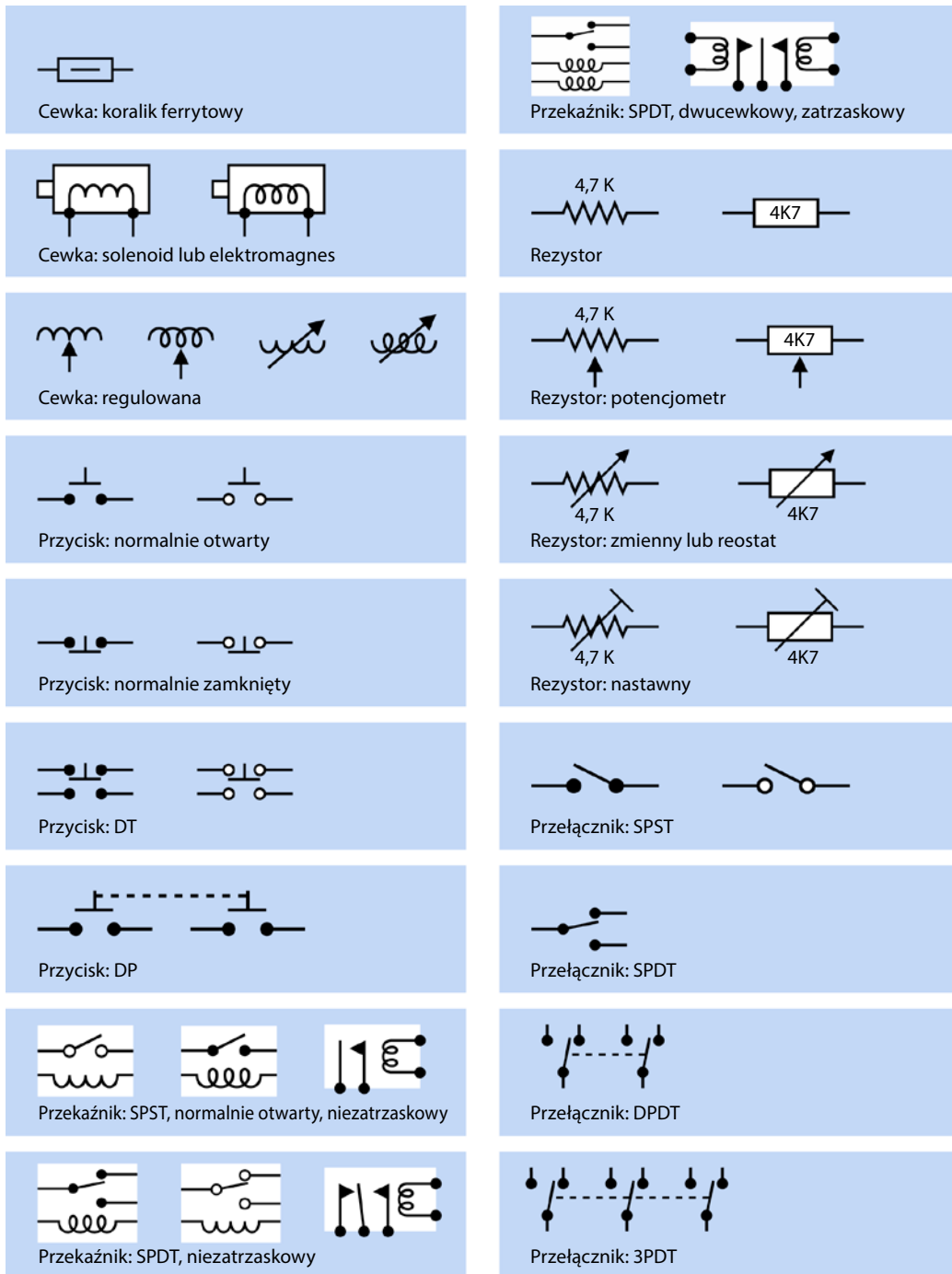
Warianty symboli widoczne w tym samym niebieskim prostokącie są pod względem funkcjonalnym równoważne.

Jeśli w jakimś elemencie ważna jest polaryzacja lub biegunowość, dodatni biegun jest wskazany czerwonym znakiem plus (+). Ten znak nie jest częścią symbolu. W przypadku kondensatorów spolaryzowanych, w których biegunowość wyprowadzeń jest wyraźnie oznaczana (a przynajmniej powinna być), znak plus jest częścią symbolu i ma kolor czarny.

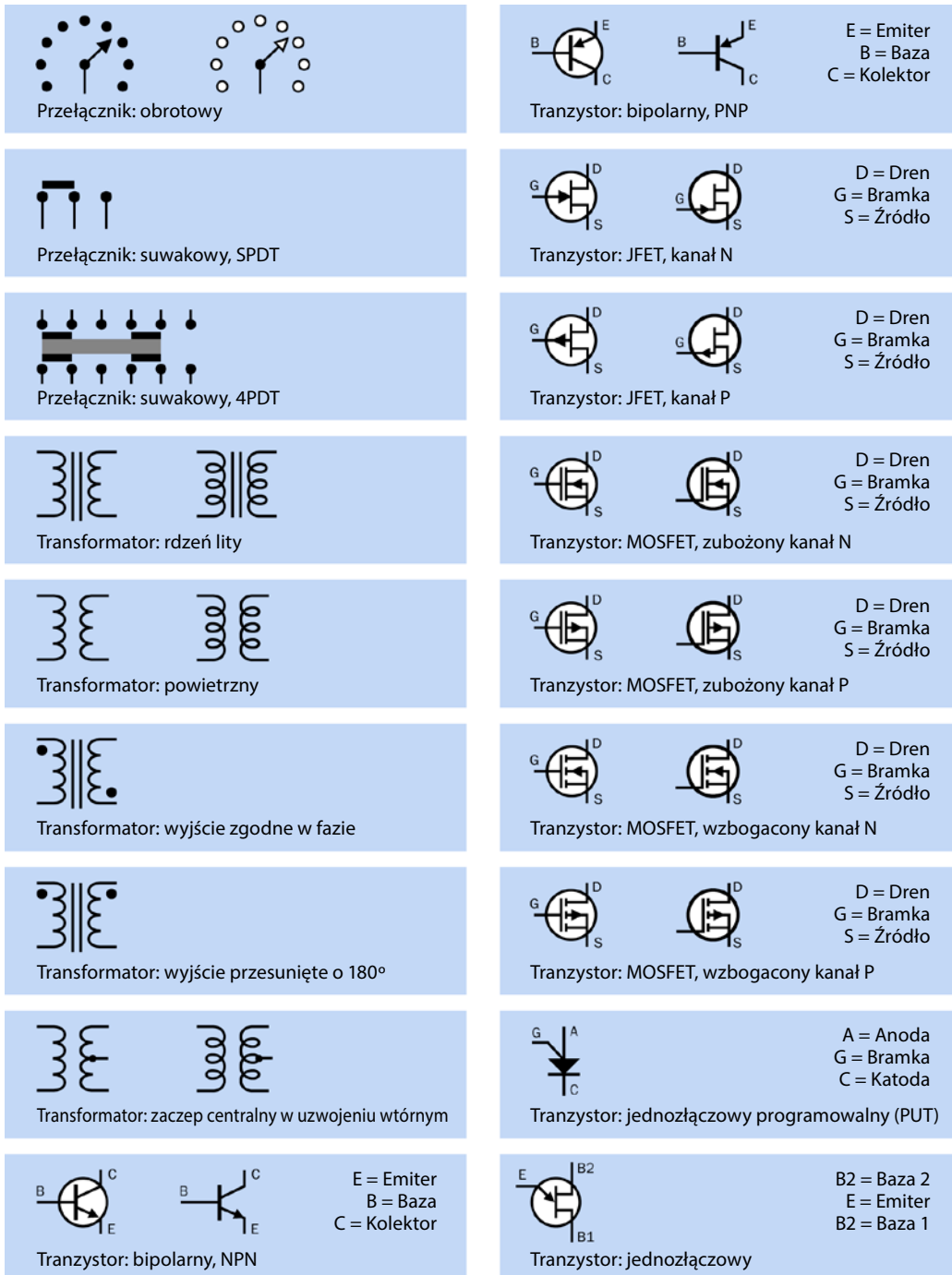
Prezentowany wykaz z pewnością nie zawiera wszystkich możliwych wariantów poszczególnych symboli. Niektóre rzadko używane zostały pominięte. Wydaje się jednak, że lista jest wystarczająco bogata, by skutecznie pomóc w nauce czytania schematów elektronicznych.



Rysunek A.1. Symbole schematyczne



Rysunek A.1. Symbole schematyczne, ciąg dalszy



Rysunek A.1. Symbole schematyczne, ciąg dalszy

## A

absorpcja dielektryczna, 108  
akumulator, 5, 7  
  kwasowo-ołowiowy, 10, 15, 16  
  litowo-jonowy, 9  
  litowo-polimerowy, 9  
  niklowo-kadmowy, 9  
  niklowo-metalowo-wodorkowy, 10  
  VRLA, 9  
autotransformator, 138

## B

bateria, 5  
  alkaliczna, 7–9  
  cynkowo-węglowa, 8, 9  
baterie  
  całkowite rozładowanie, 15  
  działanie, 6  
  jednorazowe, 7, 8  
  ładowanie odwrotne, 15  
   napięcie znamionowe, 13  
  natężenie prądu, 11  
  pojemność energetyczna, 11  
  polaryzacja, 15  
  połączenie równoległe, 16  
  sprawność, 15  
  stosowanie, 14  
  wielokrotnego użytku, 7, 9  
  zasiarczenie, 16  
  zwarcie, 15  
bezpiecznik, 21  
  do montażu przewlekanego, 24

  montowany powierzchniowo, 26  
  resetowalny, 21, 25, 26  
  samochodowy, 23  
  taśmowy, 24  
  wkręcany, 22  
bezpieczniki  
  dobór, 27  
  działanie, 21  
  lokalizacja, 28  
  napięcie znamionowe, 22  
  prąd znamionowy, 22  
  stosowanie, 26  
  uszkodzenie, 28  
  wkładki topikowe, 23  
  wyzwalanie, 25  
biegun przełącznika, 38  
biegunowość  
  elektryczna, 121  
  magnetyczna, 119, 121  
bramka logiczna, 228

## C

cewka  
  powietrzna, 129  
  regulowana, 123  
cewki indukcyjne, 117 *Patrz także*  
  solenoid, elektromagnes  
  biegunowość, 121  
  częstotliwości radiowe, 131  
  częstotliwość rezonansu  
    własnego, 127  
  działanie, 118  
  filtr ferrytowy, 124

  indukcyjność magnetyczna, 126  
  miniaturyzacja, 130  
  nasylenie, 130  
  prąd nasycenia, 127  
  przepływ prądu stałego, 119  
  rdzeń  
    magnetyczny, 120, 122  
    niemagnetyczny, 123  
    toroidalny, 124  
  reaktancja, 127  
  reluktancja, 127  
  stała czasowa, 127  
  stosowanie, 128  
  wskaźnik indukcyjności, 127  
  żyrator, 125  
częstotliwości radiowe, 131  
czujnik Halla, 182

## D

dielektryk, 101, 111  
dioda, *Patrz także* prostownik,  
   tranzystor jednozłączowy  
   elektroluminescencyjna,  
    LED, 219  
  Gunna, 219, 224  
  impulsowa, 222, 228  
  obcinająca, 227, 228  
  PIN, 219, 224  
  pojemnościowa, 219, 220, 224  
  prostownicza, 222, 225  
  Schottky'ego, 220, 223  
  tunelowa, 219, 220, 224  
  TVS, 223

zabezpieczająca, 227  
Zenera, 219, 223, 230

diody  
działanie, 221  
matryce diodowe, 224  
napięcie  
AC, 229  
DC, 228  
zasilające, 227

obcinanie  
napięcia, 228  
sygnału, 229

obudowy, 222

odwrócona polaryzacja, 231  
polaryzacja, 221  
przeciążenie, 231  
stosowanie, 225  
tłumienie szumów, 228

drabinka  
kondensatorowa, 99  
rezystorowa, 75, 76

dzielnik napięcia, 83, 160, 242

## E

elektroliza, 5  
elektromagnes, 167  
budowa, 168  
działanie, 168  
stosowanie, 169  
z ruchomym rdzeniem, *Patrz*  
solenoid, 171

enkoder obrotowy, 59,  
*Patrz także* przełącznik  
obrotowy  
działanie, 59  
impulsy, 61  
montaż, 61  
opory ruchu  
obrotowego, 61  
stosowanie, 62  
styki, 61, 62  
system zapadkowy, 61  
wyjście, 61  
zakłócenia poślizgowe, 62

## F

fala sinusoidalna napięcia, 156  
falownik, 155 *Patrz także* zasilacz,  
przetwornica DC-DC  
działanie, 155  
stosowanie, 157

FET, 251

filtr  
dolnoprzepustowy, 106  
ferrytowy, 124  
górnoprzepustowy, 105, 128  
pasmowoprzepustowy, 128

## G

głębokie rozładowanie, 9  
gniazda bezpiecznikowe, 27

## H

histereza, 218

## I

indukcja wzajemna, 134  
indukcyjność  
magnetyczna cewki, 126  
pasożytnicza, 85

## J

jednostka  
amperogodzina, Ah, 11  
AhM, 12  
farad, F, 102  
niutonometr, Nm, 183  
om, 77  
wołtoamper, VA, 139

JFET, 251

## K

keypad, 34  
kod Graya, 54  
komutacja elektroniczna, 182

kondensator, 95 *Patrz także* bateria  
bocznikujący, 105  
ceramiczny, 98, 101  
elektrolityczny bipolarny, 99, 100  
foliowy, 101  
montowany powierzchniowo, 98  
nastawny, 111  
płaski, 98  
stroikowy, 115  
sprzęgający, 105  
tantalowy, 100  
w roli akumulatora, 108  
wygładzający, 106  
zmienny, 111, 113

kondensatory  
absorpcja elektryczna, 108  
biegunowość, 108  
ciepło, 109  
działanie, 95, 111  
ekranowanie, 115  
łączenie, 104  
pojemność, 102  
prąd zmienny, 104  
przeciążenie  
napięciowe, 108  
reaktancja  
pojemnościowa, 104  
stała  
czasowa, 103  
dielektryczna, 103  
stosowanie, 105, 113  
szeregowa rezystancja  
zastępcza, 104  
upływność, 108  
wibracje, 109  
materiał wierzchni, 115

końcówki  
konektorowe, 45  
przewlekane, 45

## L

liczba Peukerta, 12  
liniowy stabilizator  
napięcia, 141

listwa kołkowa, 17  
luz kątowy, 186

## Ł

ładowanie odwrotne, 15  
ładowarka, 7  
łączniki zasilania, 46  
łuk elektryczny, 47, 71

## M

matryca  
  diodowa, 224  
  kondensatorów, 99  
  rezystorowa, 75  
mechaniczny enkoder  
  obrotowy, 55  
MESFET, 260  
mikroprzełącznik, 45  
mikroprzycisk, 34  
moc pozorna, 139  
modulacja szerokości  
  impulsów, 147, 184, 200  
montaż  
  panelowy, 45  
  powierzchniowy, 45  
  przewlekany, 45  
  zatraskowy, 45  
MOSFET, 255  
  rowkowy, 260  
mostek prostowniczy, 224, 226  
motoreduktor, 179

## N

napięcie  
  doliny, 235  
  spoczynkowe, 68  
  zadziałania, 68  
  znamionowe  
    baterii, 13  
    bezpiecznika, 22  
napięciowy współczynnik  
  rezystancji, 80  
natężenie prądu, 11

## O

obwód  
  LC, 114  
  RC, 96, 97  
odczep transformatora, 135  
ogniwo  
  elektrolityczne, 5  
  galwaniczne, 5, 6  
  guzikowe, 5  
  NiCd, 10  
  paliwowe, 7  
opornica, [Patrz](#) potencjometr  
orczyk, 204  
oświetlenie schodowe, 47

## P

panel membranowy, 35  
pojemność  
  elektryczna  
    kondensatora, 102  
  energetyczna baterii, 11  
pole magnetyczne, 118  
poliester, 101  
polipropylen, 102  
poliwęglan, 102  
potencjometr, 87 [Patrz także](#)  
  enkoder obrotowy,  
  rezystor  
  klasyczny, 89  
  liniowy, 88  
  logarytmiczny, 88  
  montażowy, 88, 91  
  suwakowy, 91  
  wielobrotowy, 90  
  wielosekcyjny, 91  
  z przełącznikiem, 91  
potencjometry  
  charakterystyka, 94  
  działanie, 88  
  przegrzanie, 94  
  stosowanie, 92  
  zużycie, 93  
powielacz napięcia, 144

półprzewodnik  
  typu N, 239  
  typu P, 239  
prawo Peukerta, 12  
prąd  
  podtrzymania, 25  
  przemienny, 141  
  przemienny udarowy, 175  
  rozruchowy, 157  
  stały, 141  
  upływu, 250  
  wyzwalania, 25  
  zatrzymania, 182  
prędkość obrotowa silnika, 184  
prostownik, 142  
  pełnookresowy, 225  
przebieg sinusoidalny napięcia AC,  
  226, 230  
przedwzmacniacz, 261  
przełącznik, 63, [Patrz także](#) przełącznik  
  AC, 65  
  czasowy, 68, 69  
  kontaktronowy, 66, 68  
  małosygnałowy, 67, 69  
  neutralny, 65  
  niezatraskowy, 65  
  ogólnego przeznaczenia, 67, 69  
  samochodowy, 67, 69  
  spolaryzowany, 65  
  ukierunkowany, 65  
  zatraskowy, 65  
przełączniki  
  cewka, 64  
  dobór typu, 70  
  działanie, 64  
  kotwica, 64  
  łuk elektryczny, 71  
  montaż, 70  
  pole magnetyczne, 71  
  polaryzacja, 70  
  prąd stały i przemienny, 70  
  przepięcia, 71  
  stosowanie, 69  
  stukanie, 70  
  styki, 64

- układ wyprowadzeń, 70
- układy pinów, 66
- przekładnia z kompensacją luzów, 112
- przełącznik, 37, 248 *Patrz także*
- przycisk
  - ciśnieniowy, 38
  - dźwigniowy, 41, 42
  - Halla, 38
  - kluczykowy, 55
  - kołyskowy, 40, 41
  - migowy, 35, 39
  - MOSFET, 148
  - nożowy, 37
  - obrotowy, 51
    - działanie, 52
    - enkoder obrotowy, 55
    - kod Graya, 54
    - kodowanie komplementarne, 54
    - kodowanie proste, 54
    - miniaturowy, 55
    - niedopasowanie oznaczeń, 57
    - stosowanie, 56, 57
    - styki, 56
    - typu DIP, 53
  - płatwowy, 44
  - plywakowy, 38
  - rtęciowy, 38
  - suwakowy, 40, 41
  - tarczowy, 55
  - typu
    - DIP, 43
    - SIP, 44
  - wandaloodporny, 45
- przełączniki
  - biegun, 38
  - działanie, 38
  - łuk elektryczny, 47
  - mocowanie, 45
  - montaż, 49
  - obwody logiczne, 47
  - przepust, 38
  - rodzaj wyprowadzeń, 48
  - schematy połączeń, 49
  - stany ON-OFF, 39
  - stosowanie, 46

- styk, 45
  - drżanie, 48
  - wspólny, 38
- terminal, 38
- zimne luty, 48
- zużycie, 48
- przerywacz, 184
- przetwornica DC-DC, 147, *Patrz także* zasilacz, stabilizator, falownik
- działanie, 147
- napięcie wyjściowe, 151, 153
- obciążeniowy współczynnik stabilizacji, 151
- poziom tętnienia i szumu, 152
- prądy wejściowy i wyjściowy, 151
- sprawność, 151
- stosowanie, 152
- temperatura, 153
- typu
  - boost, 149
  - buck, 148
  - flyback, 149
  - zakłócenia elektryczne, 153
- przycisk, 29, *Patrz także* przełącznik, przełącznik obrotowy
- alarmowy, 35
- kodowany matrycowo, 34
- nożny, 33
- suwakowy, 31
- typu
  - 6PDT, 33
  - SPST, 34
- zatrząskowy, 33
- przyciski
  - bieguny, 30
  - działanie, 30
  - keypada numerycznego, 34
  - mocowanie, 32
  - montaż, 36
  - stany ON-OFF, 30
  - stosowanie, 35
  - terminale, 30
  - uszczelnienie, 33
  - zależne, 35

## R

- raster, 18
- rdzeń
  - magnetyczny, 120, 122
  - niemagnetyczny, 123
  - toroidalny, 124
- reaktancja indukcyjna, 96, 127
- regulacja barwy dźwięku, 82
- reluktancja, 127, 194, 208
- reostat, 88
- rezystancja
  - dynamiczna, 221
  - dynamiczna ujemna, 235
  - wewnętrzna, 11
- rezystor, 73 *Patrz także* potencjometr
- drurowy, 74
- grubowarstwowy, 75
- mocy, 74
- montowany powierzchniowo, 75
- niepalny, 79
- ogólnego przeznaczenia, 74
- osiowy, 74
- podciągający, 82, 83
- precyzyjny, 74
- radialny, 74
- SMD, 79
- ściągający, 82, 83
- zmienny, 87

- rezystory
  - ciepło, 84
  - działanie, 74
  - folia
    - metalowa, 80
    - węglowa, 80
  - indukcyjność pasożytnicza, 85
  - kod paskowy, 79
  - kompozyt węglowy, 80
  - ograniczanie prądów, 82
  - połączenie
    - równoległe, 84
    - szeregowe, 82, 84
  - stabilność, 80
  - stosowanie, 82
  - szum, 85

- tolerancja, 77
- układ RC, 83
- wartości
  - nominalne, 78
  - rzeczywiste, 85
  - znamionowe, 85
- współczynnik rezystancji, 80
- zwoje drutowe, 80

rotor, 111

## S

- scalone pakiety RC, 77
- schemat
  - budowy przekaźnika, 66
  - mostka prostowniczego, 226
  - połączeń przełącznika, 43, 44
  - przełączników suwakowych, 42
  - silnika AC, 189
  - stabilizatora LM7805, 164
  - układu sterowania silnikiem, 184
  - zasilania serwomotoru, 203
- serwomechanizm, 199
  - cykl pracy, 205
  - działanie, 200
  - podłączenie przewodów, 204
  - przekładnia nylonowa, 202
  - ruch ciągły, 204
  - sterowanie, 201
  - stosowanie, 203
  - wahania impulsów, 205
  - zakłócenia elektryczne, 205
- siatka rezystorowa, 75
- silnik krokowy, 207
  - bipolarny, 209, 211
  - budowa, 210
  - diody zabezpieczające, 216
  - działanie, 207
  - gubienie kroków, 217
  - histereza, 218
  - hybrydowy, 214
  - kołysanie, 218
  - kontrola położenia, 217
  - moment obrotowy, 217
  - nasycenie magnetyczne, 218
  - o wielu fazach, 212, 214
  - okablowanie, 217
  - reluktancyjny, 208, 209
  - rezonans, 218
  - sprężenie zwrotne, 215
  - sterowanie
    - mikrokrokowe, 215
    - napięciowe, 215
  - stosowanie, 216
  - unipolarny, 209, 211
  - wirnik, 208, 215, 218
  - z cewkami bifilarnymi, 214
  - z magnesem trwałym, 209
- silnik prądu przemiennego, 189 *Patrz także* serwomotor
  - działanie, 189
  - indukcyjny
    - jednofazowy, 193
    - pięścieniowy, 196
    - trójfazowy, 194
  - klatkowy, 190
  - komutator, 193
  - liniowy, 193
  - moment obrotowy, 198
  - pozorny, 197
  - przekaźniki zabezpieczające, 198
  - reluktancyjny, 194, 197
  - stojan, 189
  - stosowanie, 197
  - synchroniczny, 194
  - udar prądowy, 198
  - uniwersalny, 196
  - uszkodzenia, 198
  - wirnik, 189–192
- silnik prądu stałego, 177
  - bezszcotkowy, 181
  - działanie, 177
  - efekty cieplne, 186
  - hałas, 187
  - komutator, 185
  - liniowy, 182
  - luz kątowy, 186
  - łożyska, 186
  - mocowanie, 186
  - moment obrotowy, 182
  - motoreduktor, 179
  - obciążenia, 183
  - przekładnia
    - planetarna, 181
    - zębata, 180, 181
  - regulacja prędkości obrotowej, 184
  - sterowanie bezpośrednie, 184
  - stojan, 177
  - stosowanie, 183
  - szczotki, 185
  - szum elektryczny, 185
  - układ cewek, 179
  - uzwojenia wirnika, 180
  - wał, 186
  - wirnik, 177, 178
  - wyłączniki krańcowe, 185
- siła
  - elektromotoryczna, 13, 107, 120
  - przeciwelektromotoryczna, 121, 227
- sinusoida modyfikowana, 156
- solenoid, 171 *Patrz także* cewka
  - indukcyjna, elektromagnes
  - klapkowy, 174
  - kompaktowy, 174
  - obrotowy, 174
  - zatraskowy, 174
- solenoidy
  - działanie, 172
  - moc, 175
  - przegrzewanie, 175
  - stosowanie, 175
  - trzęsienie, 175
- stabilizator napięcia, 159, *Patrz także* zasilacz, przetwornica DC-DC
  - liniowy
    - LDO, 159, 162
    - quasi-LDO, 162
  - regulowany, 161
  - standardowy, 159
- stabilizatory napięcia
  - działanie, 159
  - identyfikacja komponentu, 164
  - kontrola ciepła, 164
  - obudowa, 160, 161
  - odpowiedź przejściowa, 164

- piny, 163
- rozpoznanie wyprowadzeń, 165
- stosowanie, 163

stała

- czasowa, 103, 127
- dielektryczna, 103

stator, 111

stożan, 189, 190

styczniki, 68

styki wyłączników krańcowych, 46

superkondensator, 8

symbole

- baterii, 6
- diody, 219
- potencjometru, 88
- przełącznika, 63, 65
- przełącznika, 37, 51
- przycisku, 29, 31
- rezystora, 73
- schematyczne, 263
- solenoidu, 173
- tranzystora, 240
  - MOSFET, 257, 259, 260
  - polowego, 252
  - PUT, 234
  - UJT, 233

szeregowa rezystancja zastępcza, 104

szum elektryczny, 85

## Ś

ślizgacz, 88

## T

temperaturowy współczynnik rezystancji, 80

tłumienie siły przeciwelektromotorycznej, 227

tłumik, 106, 121

- przebieg, 77
- stanów nieustalonych, 227

topik, 21

transformator, 133 *Patrz także* zasilacz sieciowy, przetwornica, falownik

audio, 138

- do montażu powierzchniowego, 139
- rdzeniowy, 136
- regulowany, 138
- separacyjny, 137
- wtykowy, 137
- z dzielonym karkasem, 139
- zasilający, 136

transformatory

- częstotliwość prądu przemiennego, 140
- działanie, 134
- odczep, 135
- odwrócenie wejścia i wyjścia, 140
- przebieg, 140
- rdzeń ferromagnetyczny, 135
- stosowanie, 140
- uzwojenie
  - pierwotne, 133
  - wtórne, 133
- wspólna masa, 140

transil, 223

tranzystor bipolarny, 239

- baza, 240
- działanie, 239
- emiter, 240
- kolektor, 240
- małosygnałowy, 243
- mocy, 243
- obudowy, 244
- podłączenie, 248
- prąd upływu, 250
- przełączający o małej mocy, 243
- przepływ prądu, 241
- stan
  - nasycenia, 242
  - odcięcia, 243
- stosowanie, 246
- symbole, 245
- tryb aktywny, 243
- wspólny emiter, 248
- wyprowadzenia, 244

- wysokiej częstotliwości, 243
- wzmocnienie prądowe, 242

tranzystor jednozłączowy, 233

- Patrz także* dioda
- budowa, 234
- działanie, 234
- obwód testowy, 235, 236
- polaryzacja, 238
- programowalny, 233
- przebieg, 238
- stosowanie, 237

tranzystor polowy, FET, 251

- działanie, 251
- efekt polowy, 253
- elektryczność statyczna, 261
- JFET, 251
- MOSFET, 255
- MOSFET rowkowy, 260
- podłoże, 259
- polaryzacja, 262
- przebieg, 261
- przekrój, 255
- przepływ prądu, 258
- przewodność elektryczna, 256
- stan przebiecia, 254
- stosowanie, 260
- VMOSFET, 260
- zakres
  - nasycenia, 254
  - omowy, 254
- złączowy, 251

trymer, 111–115

## U

układ

- Darlingtona, 160, 246, 249
- ogniwa galwanicznego, 6
- RC, 83, 107

upływność, 96, 221

## V

VMOSFET, 260

## W

- waraktor, 111
- wariak, 138
- wirnik, 190–192
- współczynnik
  - H, 12
  - rezystancji, 80
  - zawartości harmonicznych, 156
- wyłączniki
  - krańcowe, 46
  - nadprądowe, 21
- wyprowadzenia drutowe, 45
- wyzwalanie bezpiecznika, 25
- względna przenikalność elektryczna, 103

- wzmacniacz, 248
  - napięciowy, 251
  - prądowy, 241, 242, 251

## Z

- zasiarczenie, 16
- zasilacz, 141 *Patrz także*
  - transformator, przetwornica DC-DC, falownik
  - impulsowy, 141, 142
  - liniowy stabilizowany, 141
  - nastawny, 144
  - niestabilizowany, 144
  - otwarty, 144
  - zamknięty, 144

- zasilacze
  - podzespoły, 143
  - stosowanie, 145
  - udar prądowy, 145
  - usterka
    - kondensatora, 145
    - zakłócenia, 145
- zimne luty, 48
- złącza śrubowe, 45
- zworka, 17
  - działanie, 17
  - stosowanie, 18

## Ż

- żyrotor, 125, 130

# PROGRAM PARTNERSKI

— GRUPY HELION —

1. ZAREJESTRUJ SIĘ
2. PREZENTUJ KSIĄŻKI
3. ZBIERAJ PROWIZJĘ

Zmień swoją stronę WWW w działający bankomat!

**Dowiedz się więcej i dołącz już dzisiaj!**

<http://program-partnerski.helion.pl>

GRUPA  
**Helion** 

## KOMPLEKSOWO SZKOLIMY NOWOCZESNY BIZNES



IT



BIZNES



PROJEKTY



PROCESY

NASZE SZKOLENIA SĄ PROWADZONE  
ZGODNIE Z METODĄ

# BLENDDED LEARNING

modelem kształcenia, który łączy tradycyjne szkolenie z dostępem do nowoczesnych narzędzi - wideokursów, e-booków i audiobooków

T: 609 850 372 E: SZKOLENIA@HELION.PL

[WWW.HELIONSZKOLENIA.PL](http://WWW.HELIONSZKOLENIA.PL)