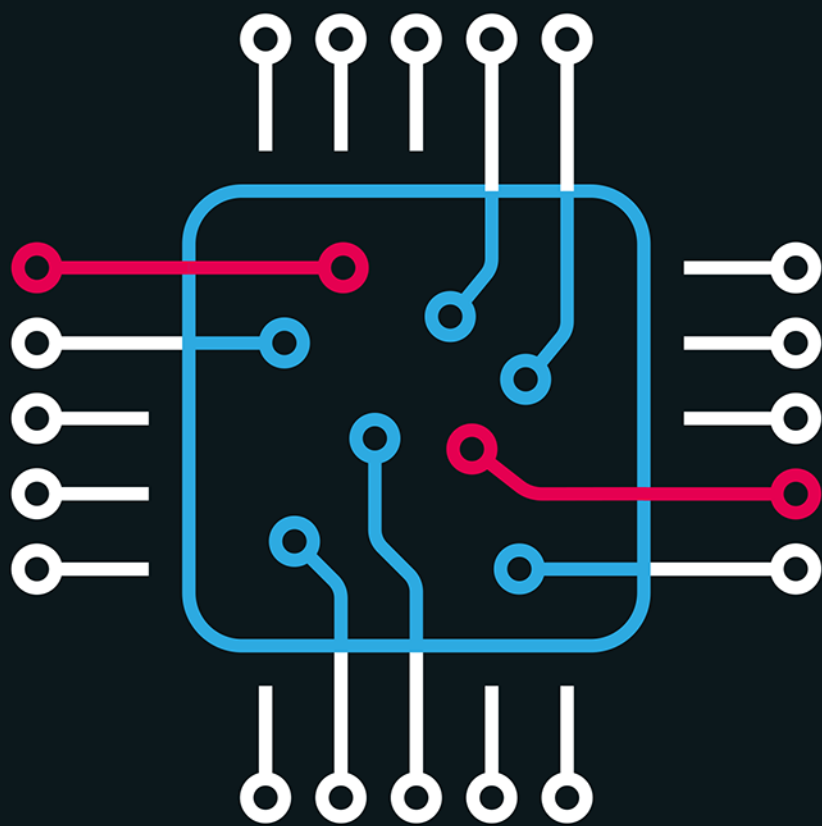


Marcin Olszewski

ELEKTRONIKA DLA INFORMATYKÓW

i studentów kierunków nieelektrycznych



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 wydawca 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 wydawca nie ponoszą również żadnej odpowiedzialności za ewentualne szkody wynikłe z wykorzystania informacji zawartych w książce.

Redaktor prowadzący: Małgorzata Kulik

Projekt okładki: Studio Gravite / Olsztyn

Obarek, Pokoński, Pazdrijowski, Zaprucki

Grafika na okładce została wykorzystana za zgodą Shutterstock.com

Skład komputerowy w systemie L^AT_EX wykonał autor.

Helion S.A.

ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice

tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63

e-mail: helion@helion.pl

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

Drogi Czytelniku!

Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres

<https://helion.pl/user/opinie/elein/>

Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

ISBN: 978-83-283-8906-9

Copyright © Helion S.A. 2022

Printed in Poland.

- [Kup książkę](#)
- [Poleć książkę](#)
- [Oceń książkę](#)

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

Spis treści

Wstęp	11
-----------------	----

I. Repetytoria

Rozdział 1. Powtórka z matematyki	17
1.1. Różniczkowanie i całkowanie	17
1.1.1. Fizyczna interpretacja pochodnych i całek	17
1.1.2. Obliczanie pochodnych	20
1.1.3. Obliczanie całek	22
1.1.4. Wzory przybliżone	23
1.2. Liczby zespolone	24
1.2.1. Liczby zespolone jako para	24
1.2.2. Postać kanoniczna	24
1.2.3. Graficzna prezentacja	25
1.2.4. Postać wykładnicza	27
1.2.5. Dzielenie liczb zespolonych	27

Rozdział 2. Podstawowe informacje o prądzie elektrycznym	29
2.1. Od fizyki do elektroniki	29
2.2. Pierwotne pojęcia elektrodynamiki	30
2.2.1. Ładunki i pola	30
2.2.2. Natężenie pola elektrycznego	31
2.2.3. Potencjał pola elektrycznego	31
2.2.4. Przewodniki i izolatory	34
2.3. Prąd elektryczny	35
2.4. Prawo Ohma	37
2.5. Siła elektromotoryczna	40
2.6. Moc prądu elektrycznego	40
2.7. Prawa Kirchhoffa	41
2.7.1. I prawo Kirchhoffa	41
2.7.2. II prawo Kirchhoffa	42
2.8. Uwagi odnośnie do nazewnictwa	43
2.9. Podsumowanie	44

II. Elektronika analogowa

Rozdział 3. Minimum elektrotechniki	47
3.1. Elementy obwodów	47
3.2. Łączenie obwodów	49
3.3. Rezystory	50
3.3.1. Prawo Ohma dla elektroników	51
3.3.2. Wartości i szeregi	51

3.3.3.	Zapis skrótowy wartości i kod paskowy	52
3.3.4.	Moc strat	54
3.3.5.	Inne parametry rezystorów	54
3.3.6.	Potencjometry	54
3.4.	Dwójniki i rezystancja zastępcza	55
3.4.1.	Połączenie szeregowe rezystorów	56
3.4.2.	Połączenie równoległe rezystorów	57
3.4.3.	Połączenie mieszane	58
3.5.	Dzielnik napięcia	58
3.5.1.	Nieobciążony dzielnik	58
3.5.2.	Dzielnik regulowany	59
3.5.3.	Dzielnik obciążony	60
3.5.4.	Kompensacyjny pomiar napięcia*	60
3.5.5.	Dwa dzielniki = mostek*	61
3.6.	Źródła napięć i prądów	62
3.6.1.	Źródła idealne	62
3.6.2.	Symbole źródeł na schematach	63
3.6.3.	Zasilanie i masa układu	64
3.6.4.	Rzeczywiste źródła napięć i prądów	65
3.6.5.	Modelowanie źródeł rzeczywistych	66
3.6.6.	Równoważność źródeł prądowych i napięciowych	68
3.6.7.	Charakterystyki wyjściowe źródeł	69
3.6.8.	Moc źródeł rzeczywistych	71
3.7.	Twierdzenie Thevenina	72
3.7.1.	Twierdzenie Nortona	73
3.7.2.	Dzielnik obciążony raz jeszcze	73
3.7.3.	Rezystancja wewnętrzna theveninowskiego źródła	74
3.7.4.	Rezystancja wejściowa i wyjściowa	74
3.8.	Pomiar wielkości elektrycznych	76
3.8.1.	Dokładność przyrządów pomiarowych	77
3.8.2.	Rzeczywiste i idealne przyrządy pomiarowe	78
3.8.3.	Techniczny pomiar rezystancji	78
3.9.	Rozwiązywanie obwodów	79
3.9.1.	Wykorzystanie praw Kirchhoffa	80
3.9.2.	Wykorzystanie twierdzenia Thevenina	82
3.9.3.	Przekształcanie źródeł	83
3.9.4.	Elementarne składanie	84
3.9.5.	Zasada superpozycji	85
3.9.6.	Inne metody	86
3.10.	Czwórniki — ogólniej*	86
3.11.	Skale decybelowe	88
Rozdział 4.	Obwody prądów zmiennych	93
4.1.	Sygnały	93
4.1.1.	Sygnały okresowe	94
4.1.2.	Charakterystyki sygnałów okresowych	97
4.1.3.	Składowa stała	99
4.1.4.	Sygnały nieokresowe	100
4.1.5.	Szumy	101
4.1.6.	Sygnały modulowane	102

4.2.	Analiza fourierowska	103
4.2.1.	Widmo sygnału	103
4.2.2.	Znaczenie techniczne analizy fourierowskiej	104
4.2.3.	Rozszerzenie na sygnały nieokresowe	106
4.3.	Kondensatory i cewki	107
4.3.1.	Fizyczna realizacja kondensatorów i cewek	107
4.3.2.	Rzeczywiste parametry kondensatorów	109
4.3.3.	Rzeczywiste parametry cewek	111
4.3.4.	Elektrotechniczna definicja pojemności i indukcyjności	112
4.3.5.	Ładowanie i rozładowanie kondensatora	113
4.3.6.	Cewka w układach przełączających	115
4.4.	Cewki i kondensatory w obwodach prądów sinusoidalnych	116
4.4.1.	Szeregowy obwód RLC	119
4.4.2.	Liczby zespolone w analizie obwodów prądów sinusoidalnych	121
4.4.3.	Uogólniony dzielnik napięcia	122
4.4.4.	Moc w obwodach z kondensatorami i cewkami	123
4.5.	Proste filtry	125
4.5.1.	Rodzaje filtrów	125
4.5.2.	Częstotliwości graniczne	126
4.5.3.	Filtr dolnoprzepustowy	127
4.5.4.	Filtr górnoprzepustowy	129
4.5.5.	Rząd filtru	130
4.5.6.	Inne rodzaje filtrów	131
4.5.7.	Układy całkujące i różniczkujące	131
4.5.8.	Pojemności i indukcyjności pasożytnicze	132
4.5.9.	Kondensatory sprzęgające	133
4.5.10.	Kondensatory blokujące	134
4.6.	Transformatory	134
4.7.	Przełączniki	136
Rozdział 5. Elementy nieliniowe		141
5.1.	Charakterystyki statyczne elementów nieliniowych	141
5.2.	Analiza obwodów z elementami nieliniowymi	145
5.2.1.	Wykorzystanie praw Kirchhoffa	145
5.2.2.	Metoda graficzna	146
5.2.3.	Metody przybliżone	147
5.2.4.	Parametry mało- i wielkosygnałowe	149
5.3.	Moc w obwodach z elementami nieliniowymi	151
5.4.	Dioda półprzewodnikowa	152
5.4.1.	Niezbędna ilość teorii	152
5.4.2.	Dioda prostownicza	153
5.4.3.	Ważne parametry diod	156
5.4.4.	Dzielnik z diodą prostowniczą	156
5.4.5.	Diody elektroluminescencyjne	157
5.4.6.	Dioda Zenera	159
5.4.7.	Dzielnik napięcia z diodą tunelową*	161
5.4.8.	Inne diody w elektronice	163
5.5.	Układy diodowe	163
5.5.1.	Prostowniki	163
5.5.2.	Detektory	167
5.5.3.	Ogranicznik	170

5.5.4.	Zabezpieczenie przeciwprzepięciowe	170
5.6.	Zniekształcenia nieliniowe	171
Rozdział 6.	Tranzystory bipolarne	175
6.1.	Podstawowy model tranzystora	175
6.1.1.	Tranzystor dwójnikowo	176
6.1.2.	Najprostszy tranzystor	177
6.1.3.	Charakterystyki statyczne tranzystorów	180
6.1.4.	Stany pracy tranzystora	182
6.1.5.	Ważne parametry tranzystora	183
6.2.	Najprostsze układy tranzystorowe	184
6.2.1.	Obwód bazy i kolektora	184
6.2.2.	Uwagi odnośnie do indeksowania napięć i prądów	186
6.2.3.	Sterowanie obciążeniem	187
6.2.4.	Tranzystorowe źródło prądowe	188
6.3.	Wzmacniacz tranzystorowy	189
6.3.1.	Układy pracy tranzystora	190
6.3.2.	Ustalenie punktu pracy	191
6.3.3.	Wtórnik emiterowy	192
6.3.4.	Układ wspólnego emitera	193
6.4.	Tranzystor dynamicznie	195
6.4.1.	Pojemności złączone	196
6.4.2.	<i>Efekt Millera*</i>	196
6.5.	Parowanie tranzystorów	197
Rozdział 7.	Układy tranzystorowe	199
7.1.	Źródła prądowe	199
7.1.1.	Podstawowy układ z tranzystorem	199
7.1.2.	Źródło prądowe z diodą Zenera	200
7.1.3.	Zwierciadło prądowe	201
7.2.	Zasilanie	202
7.2.1.	Zwiększanie obciążalności dzielnika napięciowego	202
7.2.2.	Układ Darlingtona	202
7.2.3.	Dzielnik z diodą Zenera	203
7.2.4.	Stabilizator ze sprzężeniem zwrotnym	204
7.3.	Wzmacniacz różnicowy	206
7.3.1.	Mostek dwóch wzmacniaczy OE	206
7.3.2.	Podstawowy układ wzmacniacza różnicowego	206
7.3.3.	Asymetryczny wzmacniacz różnicowy	208
7.3.4.	Wzmacniacz różnicowy ze źródłem prądowym	210
7.4.	Wzmacniacz przeciwsoalny	211
7.4.1.	Wtórnik emiterowy z ujemnym zasilaniem	211
7.4.2.	Wzmacniacz przeciwsoalny klasy B	213
7.4.3.	Wzmacniacz klasy AB	215
7.4.4.	Kilka uwag o wzmacniaczach mocy	216
7.5.	Sprzężenie zwrotne i generatory	217
7.5.1.	Ogólnie o sprzężeniu zwrotnym	217
7.5.2.	Ujemne sprzężenie zwrotne emiterowe i kolektorowe	219
7.5.3.	Sprzężenie zwrotne w układach generacyjnych	219
7.6.	Tranzystor bipolarny jako przełącznik	221
7.6.1.	Inwerter	221

7.6.2.	Multiwibrator astabilny	222
7.6.3.	Przerzutnik Schmitta	225
Rozdział 8.	Tranzystory unipolarne	229
8.1.	Podstawy działania tranzystorów unipolarnych	230
8.1.1.	Fizyczne podstawy działania FET	230
8.1.2.	Klasyfikacja i symbole tranzystorów unipolarnych	230
8.1.3.	Charakterystyki tranzystorów unipolarnych	232
8.1.4.	Parametry katalogowe tranzystorów polowych	236
8.2.	Wzmacniacze z tranzystorami unipolarnymi	239
8.2.1.	Punkt pracy	239
8.2.2.	Wtórnik źródłowy	241
8.2.3.	Wzmacniacz o wspólnym źródle	243
8.3.	Układy przełączające z tranzystorami polowymi	244
8.3.1.	Sterowanie obciążeniem	244
8.3.2.	Inwertery nMOS i CMOS	246
8.3.3.	Mostek H	246
8.3.4.	Sterowanie PWM	248
8.3.5.	Klucze analogowe	249
Rozdział 9.	Technika scalona	253
9.1.	Wzmacniacze operacyjne	254
9.1.1.	Idealny wzmacniacz operacyjny	254
9.1.2.	Podstawowe układy wzmacniające	256
9.1.3.	Wzmacniacz różnicowy	258
9.1.4.	Sumator	259
9.1.5.	Realizacja funkcji nieliniowych	260
9.1.6.	Źródła prądowe	262
9.1.7.	Układ całkujący i różniczkujący	263
9.1.8.	Praca z niesymetrycznym zasilaniem	264
9.1.9.	Parametry rzeczywistych wzmacniaczy operacyjnych	266
9.2.	Komparatory	268
9.2.1.	Komparator drabinkowy	270
9.2.2.	Komparator okienkowy	270
9.2.3.	Przerzutnik Schmitta	271
9.3.	Scalone trójkońcówkowe stabilizatory napięcia	273
9.3.1.	Regulacja napięcia wyjściowego	274
9.3.2.	Zwiększenie obciążalności	275
9.3.3.	Źródło prądowe	275
9.4.	Układ czasowy 555	276
9.4.1.	Budowa wewnętrzna	276
9.4.2.	Generator przebiegu prostokątnego	278
9.4.3.	Układy scalone na schematach	279

III. Elektronika cyfrowa

Rozdział 10.	Podstawy, techniki	283
10.1.	Wprowadzenie	283
10.2.	System binarny	284
10.2.1.	Systemy liczenia	284
10.2.2.	Dwójkowy system liczenia	285
10.2.3.	Inne systemy liczbowe w elektronice cyfrowej	287

10.3.	Kody liczbowe	288
10.3.1.	Popularne kody	289
10.3.2.	Kodery, dekodery, transkodery	290
10.3.3.	Liczby ujemne*	290
10.3.4.	Liczby stało- i zmiennoprzecinkowe*	291
10.4.	Podstawy cyfrowej logiki	292
10.4.1.	Zapis funkcji logicznych	292
10.4.2.	Elementarne funktory	293
10.4.3.	Podstawy algebry Boole'a	296
10.4.4.	Bramki wielowejsiowe	298
10.5.	Techniki wykonania układów cyfrowych	299
10.5.1.	Ważne parametry bramek	300
10.5.2.	Serie 7400 i 4000	300
10.5.3.	Technika bipolarna	301
10.5.4.	Technika unipolarna	302
10.5.5.	Układy pośredniczące	303
10.6.	Klasyfikacja układów cyfrowej elektroniki	304
Rozdział 11.	Układy kombinacyjne	305
11.1.	Zapis funkcji na podstawie tablicy stanów	305
11.1.1.	Przykład projektowy	305
11.1.2.	Optymalizacja układów kombinacyjnych	307
11.2.	Multipleksery, demultipleksery	310
11.2.1.	Przełącznik cyfrowy	311
11.2.2.	Transmisja szeregową	312
11.2.3.	Realizacja dowolnych układów kombinacyjnych za pomocą multiplekserów	313
11.3.	Złożone układy kombinacyjne	313
11.3.1.	Implementacja za pomocą bloków funkcjonalnych	313
11.3.2.	ALU	314
11.3.3.	Układy programowalne	315
11.3.4.	Hazard	315
11.3.5.	Kontrola parzystości	316
Rozdział 12.	Układy sekwencyjne	319
12.1.	Przerzutniki	319
12.1.1.	Jak zapamiętać?	319
12.1.2.	Przerzutnik RS	321
12.1.3.	Tłumienie drgań styków	323
12.1.4.	Przerzutniki synchroniczne	324
12.1.5.	Przerzutnik JK	325
12.1.6.	Przerzutnik D	327
12.1.7.	Przekształcanie przerzutników	327
12.2.	Pamięci	330
12.2.1.	Rejestry	330
12.2.2.	Pamięci o swobodnym dostępie	331
12.2.3.	Klasyfikacja pamięci	332
12.3.	Liczniki	333
12.3.1.	Liczniki asynchroniczne	333
12.3.2.	Liczniki synchroniczne	335
12.3.3.	Projektowanie liczników	335

12.4. Ogólna charakterystyka układów sekwencyjnych	338
Rozdział 13. Systemy wbudowane	341
13.1. Charakterystyka systemów wbudowanych	341
13.1.1. Architektura systemów wbudowanych	341
13.1.2. Układy mikroprocesorowe	343
13.1.3. Dwie główne metody programowania systemów wbudowanych . . .	344
13.2. Przycisk maszynowy	346
13.2.1. Przykład Arduino	347
13.2.2. Przykład Raspberry Pi	348
13.3. Analogowy świat	350
13.3.1. Przetworniki AD i DA	350
13.3.2. Sterowanie jasnością świecenia diody	351
Indeks	353

Rozdział 6

Tranzystory bipolarne

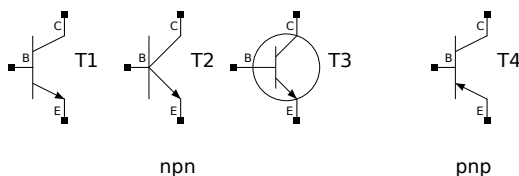
Gdyby chcieć zdefiniować minimum wiadomości potrzebnych technikowi, żeby mógł nosić miano elektronika, to konieczne jest włączenie do jego zasobów wiedzy o elementach sterowanych. Obecnie, po zmierzchu techniki lampowej, synonimem sterowanego elementu jest tranzystor bipolarny. Wprawdzie katalog innych sterowanych (i nie tylko półprzewodnikowych) elementów jest bardzo bogaty, ale bez tego jednego elementu dzisiejsza elektronika nie istnieje. Nawet mówiąc tranzystor i nie precyzując jego rodzaju, domyślnie uważa się, że jest to właśnie tranzystor bipolarny.

Tranzystor jest elementem magicznym, ale pomimo prostoty jego działania w najprostszym modelu uważa się, że próg wejścia do jego zrozumienia jest wysoki. Wynika to, jak mi się wydaje, z chęci przekazu zbyt wielu w początkowej fazie nauki i zbyt uogólnionych informacji na jego temat. Nie sprzyja też, szczególnie w starszych podręcznikach, przematematyzowanie modelu oraz zbyt duża ścisłość, która nie tylko, że jest niepotrzebna, ale też w niektórych przypadkach szkodliwa.

Dlatego w tym podręczniku omówiony zostanie tylko najbardziej podstawowy model działania tranzystora bipolarnego, wystarczający w zupełności w początkowej fazie nauki, a pozwalający jednocześnie na przeanalizowanie większości układów spotykanych w praktyce. Niektóre ważne zagadnienia, aby nie zaciemnić głównego przekazu, takie jak na przykład dryft temperaturowy, zostaną pominięte. Jednakże po nabraniu biegłości w posługiwaniu się prostymi modelami łatwiej jest, korzystając z literatury bardziej zaawansowanej, nadrobić braki, niż przebijać się od początku przez wszystkie niuanse działania tranzystorów.

6.1. Podstawowy model tranzystora

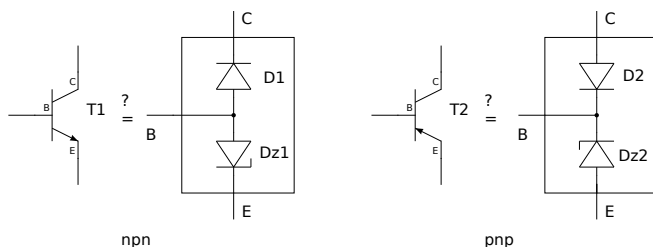
Tranzystor bipolarny jest elementem trójkońcówkowym o wyprowadzeniach noszących nazwy: baza (B), kolektor (C) i emiter (E) oraz występuje w dwóch, tak zwanych typach przewodnictwa: npn i pnp. Najczęściej używane symbole tranzystorów na schematach elektronicznych przedstawiono na rysunku 6.1. Ponieważ w podręczniku korzystać będziemy z symbolu bez kółka i z rozsuniętymi kolektorem i emitern, to tylko taki symbol znajduje się na rysunku 6.1 dla tranzystora pnp. W anglojęzycznej literaturze i schematach zamiast wielką literą „T” tranzystory oznaczają się literą „Q”.



Rysunek 6.1. Symbole tranzystorów bipolarnych na schematach

6.1.1. Tranzystor dwójnikowo

Fizycznie tranzystor bipolarny składa się z trzech warstw półprzewodników o przeciwnym typie przewodnictwa (n oraz p) ułożonych naprzemiennie, czyli n-p-n lub p-n-p. Nazwa tranzystora wywodzi się stąd, że trzy warstwy tworzą dwa złącza. Baza połączona jest ze środkową warstwą, a kolektor i emiter ze skrajnymi. Z faktu, że omawiana w rozdziale 5 dioda jest pojedynczym złączem p-n, można wywnioskować, że tranzystor bipolarny, tak jak na rysunku 6.2, stanowić będzie dwie diody. I rzeczywiście, wyznaczając statyczne charakte-



Rysunek 6.2. Efekt wyznaczania charakterystyk tranzystora pomiędzy parami wyprowadzeń

rystyki prądowo-napięciowe pomiędzy każdymi parami wyprowadzeń, można wywnioskować taką wewnętrzną budowę tranzystora. Gdyby tranzystor wykazywał symetrię budowy względem bazy, to diody te byłyby identyczne, a rozróżnienie pomiędzy kolektorem i emiterem nie miałoby sensu. Okazuje się jednak, że złącze BE, nawet w takim dwójnikowym badaniu, zachowuje się nie jak zwykła dioda, ale jak dioda Zenera, co także uwidoczniło na rysunku 6.2. Gdyby chcieć ją wykorzystać, to miałyby ona jednak ograniczone zastosowanie w układach stabilizacji napięcia, bo wartość napięcia przebicia takiej diody nie jest ściśle określona i zależy nie tylko od typu tranzystora, ale także od producenta, a nawet konkretnego egzemplarza tranzystora. Wartość tego napięcia zamyka się zazwyczaj w przedziale od 5 V do 12 V.

Pytajnik nad znakiem równości na rysunku 6.2 oznacza, że można złącza tranzystora wykorzystywać jako diody lub diody Zenera, ale nie działa to w drugą stronę

— z dyskretnych diod nie da się złożyć działającego tranzystora, co oznacza, że nie wolno tych układów utożsamiać.

6.1.2. Najprostszy tranzystor

Opis działania tranzystora w najprostszym modelu przedstawimy z wykorzystaniem tranzystora npn. Jest to o tyle uzasadnione, że tranzystory npn:

- mają przeważnie lepsze parametry od swoich bliźniaków przeciwnego typu,
- są bardziej powszechne w użyciu,
- są bardziej naturalne w układach zasilanych dodatnim napięciem względem masy.

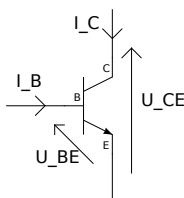
Do analizy większości układów z tranzystorami bipolarnymi npn wystarczające jest zrozumienie poniższej reguły.

Jeżeli do zacisków C i E tranzystora przyłożymy napięcie U_{CE} w taki sposób, że potencjał kolektora będzie wyższy niż emitera, to do kolektora nie wpłynie żaden prąd $I_C = 0$. Jeżeli jednak spolaryzujemy złącze (diodę) BE w kierunku przewodzenia, tak że wywołamy niezerowy prąd I_B , to wówczas w obwodzie kolektora popłynie prąd

$$I_C = \beta I_B, \quad (6.1)$$

o wartości niezależnej od napięcia U_{CE} .

Zapewnienie powyższych warunków, tak aby spełniona była zależność (6.1) definiuje aktywny stan pracy tranzystora (rysunek 6.3), z wyjątkiem sytuacji, w której $I_B = 0$ oraz $I_C = 0$, nazywanej stanem odcięcia lub czasami zatkania.



Rysunek 6.3. Rozkład napięć i przepływ prądów w tranzystorze npn

Dla tranzystora pnp wszystkie rozważania pozostaną słuszne, z tym że należy wszystkie znaki prądów i napięć zamienić na przeciwne w stosunku do npn.

Stała β jest charakterystycznym parametrem danego tranzystora, noszącym nazwę wzmocnienia prądowego i jest rzędu 100 A/A. Nie jest to jednak parametr uniwersalny. Najbardziej zależny jest od modelu tranzystora, ale nawet dla tranzystorów tego samego producenta i z tej samej serii może wykazywać bardzo duży rozrzut, nawet większy niż 20%. Najczęściej w katalogach podawana

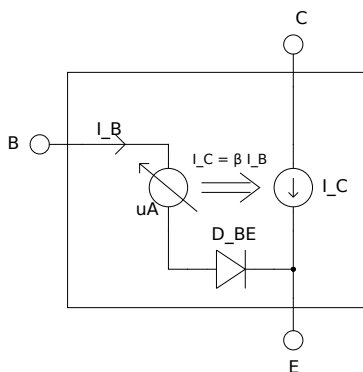
jest najniższa, gwarantowana wartość. Rozrzut wzmocnienia prądowego dla tranzystorów różnego typu jest ogromny: od kilku A/A do 1000 A/A, ale w praktyce bardzo rzadko przekracza się granice 40 – 200, a najbardziej typową wartość 100 A/A przyjmuje się w zadaniach, o ile nie podano inaczej.

Alternatywnymi oznaczeniami wzmocnienia prądowego tranzystora, spotykanymi w literaturze i katalogach, są mające oparcie w równaniach czwórnikowych h_{21E} , h_{21e} , h_{FE} oraz h_{fe} . Litera „E” oraz „e” oznacza, że parametr hybrydowy odnosi się do układu wspólnego emitera, a wielkość litery do mało- lub wielkosygnałowości tego parametru. Niezależnie od użytego symbolu w prezentowanym modelu wszystkie te nazwy są synonimiczne.

Charakterystykę złącza baza-emiter można modelować dowolną krzywą poznaną w rozdziale 5. Najczęściej jednak w obliczeniach przyjmuje się model z rysunku 5.16 B, dla którego w stanie przewodzenia na złączu BE jest stałe napięcie rzędu 0,6 V. Zakłada się przy tym, że na charakterystykę $I_B(U_{BE})$ nie mają wpływu prąd kolektora oraz napięcie kolektor-emiter.

Szytywne powiązanie w obszarze aktywnym pracy tranzystora prądów bazy i kolektora stanowi sedno jego działania. Można wówczas małymi prądami bazy sterować znacznie (β -krotnie) większymi prądami kolektora.

W świetle tego, co zostało powiedziane, tranzystor w obszarze aktywnym można sobie wyobrażać jako źródło prądowe umieszczone w obwodzie kolektora. Jest to źródło sterowane, co oznacza, że wartość jego prądu jest ściśle powiązana z prądem bazy zależnością (6.1). Zobrazowano to na rysunku 6.4, gdzie dla uwydatnienia tego faktu w bazie oprócz zwykłej diody prostowniczej umieszczono miernik prądu, gdzie jakaś wewnętrzna „inteligencja”, mierząc prąd bazy, dostosowuje wartość prądu kolektora do odpowiedniego poziomu.

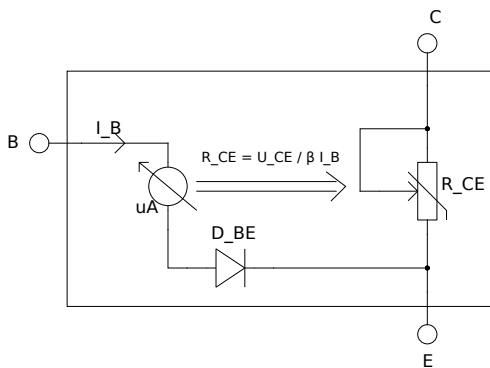


Rysunek 6.4. Schemat zastępczy tranzystora npn

Należy jednak podkreślić, że umieszczane często w schematach zastępczych tranzystora źródła prądowe nie są rzeczywistymi źródłami. Nie można z nich zasilać zewnętrznych obciążeń bez właściwego zewnętrznego zasilania. Gdyby

źródło z rysunku 6.4 było sztywne¹, to umieszczając szeregowo z nim dowolny rezystor odpowiednio dużej wartości, można by było otrzymać na nim dowolnie duże napięcie. Jest to zachowanie niefizyczne. Jako że źródło jest jedynie umowne, to niemożliwe jest otrzymanie w układzie napięć wyższych niż zasilające. Gdy napięcie U_{CE} staje się z różnych przyczyn mniejsze niż kilka dziesiątych wolta (w praktyce przyjmuje się 0,1 V do 0,3 V), a w naszym uproszczonym modelu 0 V, to wówczas proporcja 6.1 przestaje być prawdziwa i prąd kolektora zmniejsza się, tak aby zapewnić fizycznie zgodne z prawami elektrotechniki warunki pracy wymuszone zewnętrznymi elementami. Stan taki nazywa się stanem nasycenia.

Równoważnie, i czasami łatwiej, można sobie wyobrazić tranzystor jako element, który w układzie zastępczym zamiast źródła prądowego posiada bierny, nieliniowy element sterowany, oznaczony na rysunku 6.5 jako R_{CE} . Taki model nie wykazuje niefizyczności poprzedniego modelu, jeżeli tylko zastrzeżemy, że niemożliwy jest stan pracy z ujemnymi rezystancjami statycznymi. Wadą tego modelu jest to, że rezystancja R_{CE} dla tranzystora z określonym wzmocnieniem prądowym jest funkcją dwóch wielkości — prądu bazy i napięcia kolektor-emiter, a nie jednego, jak w przypadku źródła prądowego.



Rysunek 6.5. Alternatywny schemat zastępczy tranzystora npn

Łatwo zauważyć, że prąd wypływający z emitera jest równy

$$I_E = I_C + I_B, \quad (6.2)$$

zatem warunek (6.1) jest równoważny

$$I_E = (\beta + 1)I_B \approx \beta I_B. \quad (6.3)$$

Zważywszy na bardzo duży rozrzut parametru β , nawet w odniesieniu do różnych egzemplarzy tego samego tranzystora wyprodukowanego w jednej serii,

¹ W elektronice przymiotnika „sztywny” używa się często dla podkreślenia niezależności jakiegoś parametru od zewnętrznych warunków pracy.

zastosowana aproksymacja w równaniu (6.3) ma dużo głębszy sens niż tylko zwykłego przybliżenia. Zasadniczo niestosowanie go prowadzić może do niepotrzebnej komplikacji obliczeń, przy zachowaniu jedynie pozorów ścisłości. Uwzględnianie efektów pomijalnych w stosunku do innych aspektów działania układów można nawet uznać za błędne. W powyższym przypadku napisanie $\beta + 1$ zamiast β nie stanowi jakiegoś wielkiego wysiłku, jednakże gdyby $\beta + 1$ znalazło się w mianowniku jakiegoś wyrażenia, co jest częste w rozważaniach teoretycznych, to pozostawienie go w takim stanie może znacząco skomplikować obliczenia oraz utrudnić analizę działania układu. Wzory bowiem należy nie tylko umieć napisać, ale należy je przede wszystkim rozumieć.

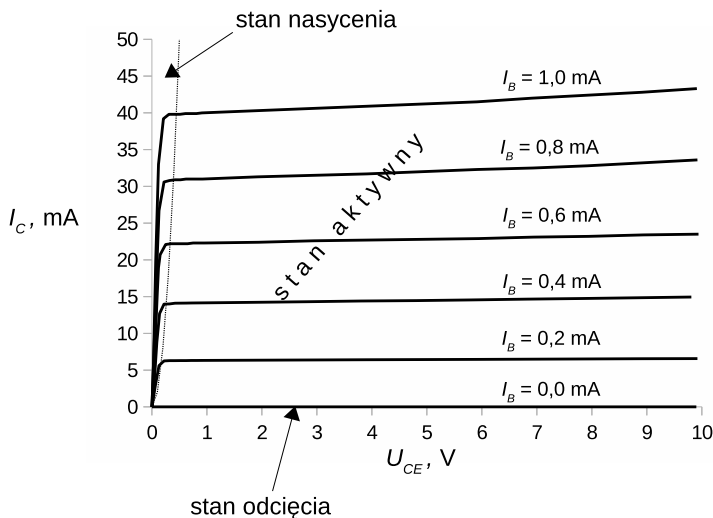
6.1.3. Charakterystyki statyczne tranzystorów

We wcześniejszych rozdziałach powiedziane było, że do pełnego określenia właściwości statycznych każdego dwójnika wystarczająca jest znajomość charakterystyki prądowo-napięciowej tego elementu. W przypadku elementów o trzech zaciskach sprawa nieco się komplikuje. Omawianie tranzystora rozpoczęliśmy od omówienia zasady pracy, ale jego właściwości także można równoważnie, a nawet pełniej definiować przy użyciu charakterystyk.

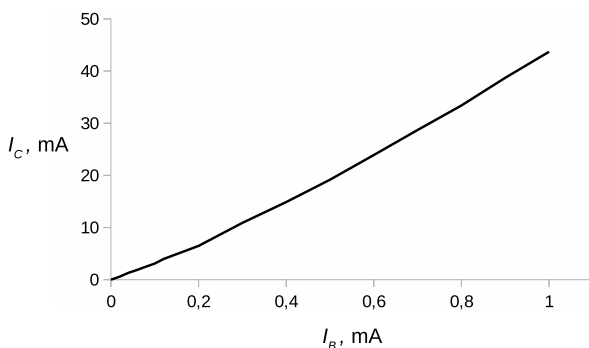
Jeżeli do dyspozycji mamy trzy elektrody (E,B,C), to możemy wybrać dwie dowolne i dla nich podać charakterystykę prądowo-napięciową w funkcji napięcia lub prądu na trzeciej elektrodzie. Tak otrzymany wykres niestety będzie trójwymiarowy, co dosyć trudno jest przedstawić na płaszczyźnie. Jeszcze trudniej z takiego wykresu coś odczytać lub zinterpretować. Dlatego w praktyce zamiast rysować wykresy trójwymiarowe, rysuje się tak zwane rodziny charakterystyk. Są to wykresy dwuwymiarowe zawierające charakterystyki prądowo-napięciowe pomiędzy dwoma elektrodami dla kilku wybranych napięć lub prądów trzeciej elektrody. Parę zacisków spośród trzech można wybrać na trzy sposoby, co przy uwzględnieniu sygnału napięciowego lub prądowego na trzecim daje sześć, na szczęście zależnych od siebie, rodzin charakterystyk. W praktyce do zrozumienia działania tranzystora wystarczająca i najważniejsza jest tylko jedna tak zwana charakterystyka wyjściowa $I_C(U_{CE})$ dla określonych prądów bazy I_B , którą wraz z wejściową $I_B(U_{BE})$ można w praktyce uznać za statyczną definicję danego tranzystora.

Na rysunku 6.6 przedstawiono wyjściową charakterystykę tranzystora mocy BD354. Charakterystyką uzupełniającą, którą jednak można wyznaczyć precyzyjnie na podstawie charakterystyki wyjściowej, jeżeli tylko dysponujemy rodziną dla wielu wartości prądów bazy, jest $I_C(I_B)$ dla ustalonego napięcia pracy U_{CE} , którą dla tranzystora BD354 przedstawiono na rysunku 6.7. Jest to tak zwana charakterystyka przejściowa.

Podanie charakterystyk tranzystora daje pełniejszy obraz niż prosta definicja zaprezentowana w podsekcji 6.1.2, ale ma tę niedogodność, że wszelka analiza musi zostać przeprowadzona w sposób graficzny. Posługując się zaprezentowanym uproszczonym modelem, przeważnie szybko i prosto można przeanalizować działanie układu. Pozostaje jednak pytanie, na ile poprawny jest model, czyli w jakim zakresie akceptowalne są przyjęte przybliżenia. Warto zatem nanieść



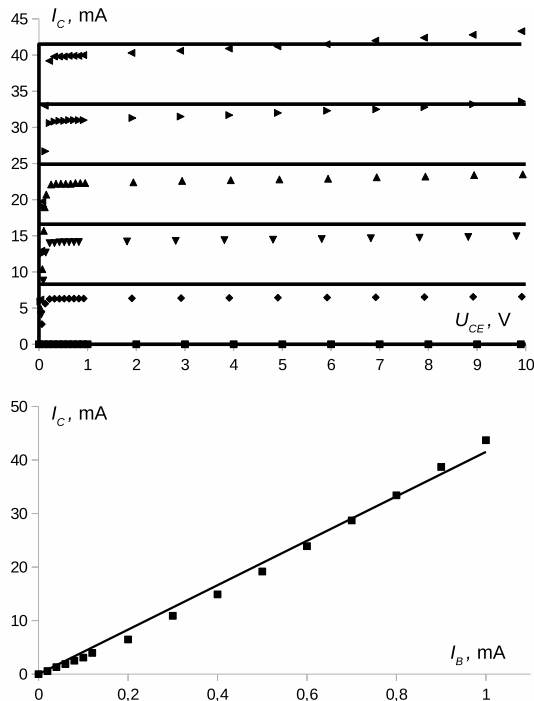
Rysunek 6.6. Rodzina charakterystyk $I_C(U_{CE})$ dla $I_B = \text{const}$ tranzystora BD354 (opracowanie własne)



Rysunek 6.7. Charakterystyka $I_C(I_B)$ tranzystora BD354 dla $U_{CE} = 10$ V (opracowanie własne)

charakterystyki wynikające z modelu na rzeczywiste charakterystyki przykładowego, rzeczywistego tranzystora, bo kilka zdań definiujących model w podsekcji 6.1.2 jest wystarczające do odtworzenia wyidealizowanych charakterystyk tranzystora. Na rysunku 6.8 liniami ciągłymi pokazano teoretyczne charakterystyki na tle punktów pomiarowych tranzystora BD354.

Wynikająca z modelu niezależność prądu kolektora od napięcia kolektor-emiter w stanie aktywnym powoduje, że rodzina $I_C(U_{CE})$ stanowi zespół równo nachylenych poziomych półprostych, zaś charakterystyka $I_C(I_B)$, zgodnie ze wzorem (6.1), jest półprostą przecinającą początek układu (I_B, I_C). Jak widać, model ten dobrze pasuje do danych eksperymentalnych. Co więcej, dosyć prosto można go



Rysunek 6.8. Zestawienie modelowych i rzeczywistych charakterystyk statycznych tranzystora BD354 (opracowanie własne)

uzupełniać i poprawiać, o ile jest to konieczne w danych zastosowaniach. Poziome części charakterystyk $I_C(U_{CE})$ z rysunku 6.8 mogłyby być jeszcze lepiej dopasowane do doświadczalnie zdjętych charakterystyk, ale zachowano równoodległość wynikającą z proporcjonalności $I_C = \beta I_B$.

6.1.4. Stany pracy tranzystora

Na rysunku 6.6 zaznaczono warunki dla prądów i napięć w tranzystorze definiujące stany pracy, które ze względu na taką interpretację graficzną noszą często nazwę obszarów pracy. Proporcjonalność pomiędzy prądem kolektora i bazy określa stan aktywny oraz dla zerowego prądu bazy także stan odcięcia. Stanem odcięcia oprócz poziomej półprostej $I_C = 0$ dla $I_B = 0$ definiuje się także pracę we wszystkich innych polaryzacjach tranzystora, czyli w innych zakresach niż pierwsza ćwiartka układu współrzędnych (U_{CE}, I_C) .

Praca przy prądzie kolektora mniejszym niż βI_B odpowiada stanowi nasycenia. W naszym prostym modelu stanowi on pionowy odcinek na charakterystyce $I_C(U_{CE})$ o początku w $(0, 0)$ i końcu w $(0, \beta I_B)$. W układach przełączających, w których często tranzystor przebywa tylko w stanach odcięcia i nasycenia,

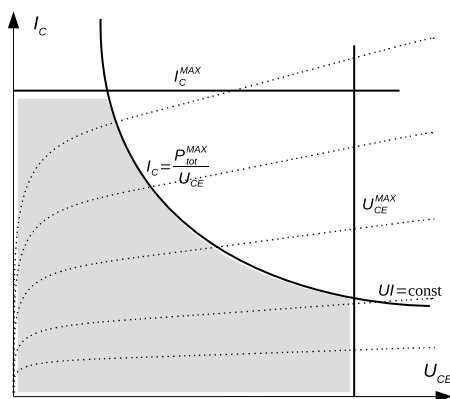
a pracujących przy małych napięciach, czasami w nasyceniu konieczna będzie korekta modelu uwzględniająca napięcie na przewodzącym tranzystorze, wynoszące około 0,2 V, chociaż jak widać z charakterystyk, nie jest to wartość uniwersalna.

6.1.5. Ważne parametry tranzystora

Szukając rezystora, jeżeli nie zdefiniowaliśmy jakichś szczególnych warunków, określamy w pierwszej kolejności rezystancję, a następnie moc strat. Z tranzystorami sprawa jest dużo bardziej złożona, ponieważ posiadają one jedynie nazwy literowo-cyfrowe (BC107, 2N3055, ...), a liczba dostępnych typów jest liczona w tysiącach. Sama nazwa zaś nie niesie ze sobą żadnych (z małymi wyjątkami) informacji o ich parametrach. Według przedstawionego modelu wszystkie tranzystory są takimi samymi elementami różniącymi się jedynie wzmocnieniem prądowym. W rozważaniach teoretycznych jest to zdanie w dużej mierze prawdziwe, ale w praktyce dobór tranzystora do określonego zastosowania lub zamiennika może być dosyć trudnym zadaniem, bo oprócz typu (nnp, pnp) oraz wzmocnienia prądowego β tranzystory charakteryzuje cała gama parametrów istotnych z punktu widzenia aplikacyjnego.

Oprócz wzmocnienia prądowego, na rozrzut którego powinien być odporny dobrze zaprojektowany układ, ważne są przede wszystkim parametry dopuszczalne, których przekroczenie spowoduje trwałe uszkodzenie tranzystora. Do najważniejszych z nich należą maksymalne: prąd kolektora, napięcie kolektor-emiter oraz moc strat. Ostatnie wymienione parametry definiują charakterystyczny dopuszczalny obszar pracy tranzystora wyróżniony na rysunku 6.9 szarym kolorem. Krzywa mocy jest hiperbolą wyznaczoną równaniem $U_{CE}I_C = \text{const}$, czyli

$$I_C = \frac{P_{\text{tot}}^{\text{MAX}}}{U_{CE}}. \quad (6.4)$$



Rysunek 6.9. Obszar pracy tranzystora określony przez dopuszczalne parametry I_C^{MAX} , U_{CE}^{MAX} oraz $P_{\text{tot}}^{\text{MAX}}$

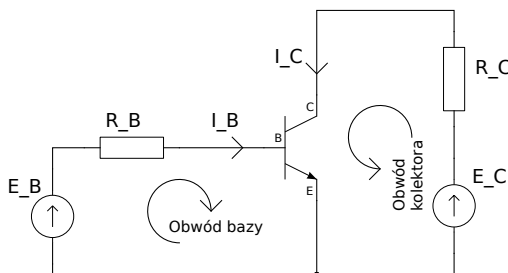
Warto podkreślić, że moc strat, jaką można rozproszyć na tranzystorze, zależy nie tylko od modelu tranzystora, ale przede wszystkim od zastosowanego radiatora, czyli zewnętrznego elementu odprowadzającego ciepło.

6.2. Najprostsze układy tranzystorowe

Wypośażeni w wiedzę z poprzedniej sekcji, prezentującej tranzystor jako element elektroniczny, postaramy się rozważyć zachowanie tranzystora w konkretnych prostych obwodach.

6.2.1. Obwód bazy i kolektora

Żeby osiągnąć odpowiedni punkt na charakterystykach statycznych, należy tranzystor odpowiednio zasilic. Z poprzednich rozważań wynika, że tranzystor potrafi sterować β -krotnie większym prądem kolektora za pomocą prądu bazy. Przeanalizujemy zatem zasilanie obwodów zawierających bazę oraz osobno kolektor z dwóch rzeczywistych źródeł napięcia (rysunek 6.10) o siłach elektromotorycznych równych odpowiednio E_B i E_C .



Rysunek 6.10. Zasilanie obwodów bazy i kolektora

W naszym prostym modelu, nieuwzględniającym efektu oddziaływania obwodu kolektora na obwód bazy, prąd I_B może być wyznaczony jako

$$I_B = \frac{E_B - U_{BE}}{R_B} \approx \frac{E_B - 0,6 \text{ V}}{R_B}, \quad (6.5)$$

a prąd kolektora

$$I_C = \beta I_B. \quad (6.6)$$

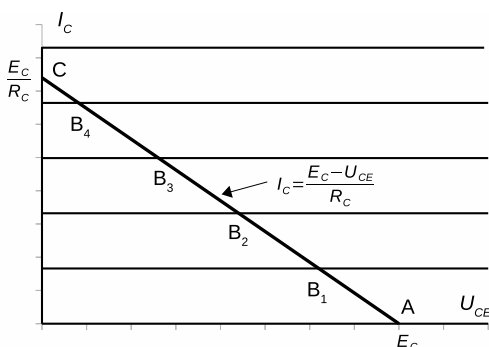
Napięcie kolektor-emiter wyniesie w takim wypadku

$$U_{CE} = E_C - I_C R_C, \quad (6.7)$$

z tym zastrzeżeniem, że nie może ono być ujemne. Kończy to analizę tego obwodu w stanie aktywnym pracy tranzystora, bo wyznaczaliśmy właśnie wszystkie prądy i napięcia w obwodzie.

Pouczająca może być także analiza graficzna działania układu. Podobnie jak dla innych elementów obciążających rzeczywiste źródło napięcia, można rozważać obciążenie, jakie stanowi tranzystor pomiędzy kolektorem i emiterem dla źródła E_C z rezystancją wewnętrzną R_C . Na rysunku 6.11 przedstawiono przecięcie prostej obciążenia takiego źródła z rodziną charakterystyk wyjściowych idealnego tranzystora. Punkt pracy wyznaczają odpowiednie punkty przecięcia na wykresie:

- A, gdy $I_B = 0$ w stanie odcięcia,
- B_i dla $I_{Bi} > 0$ w stanie aktywnym,
- C w stanie nasycenia, gdy prąd kolektora wynikający z równania $I_C = \beta I_B$ jest na tyle duży, że prosta obciążenia nie przecina poziomej części charakterystyki wyjściowej tranzystora.



Rysunek 6.11. Prosta obciążenia obwodu kolektora

Na podstawie analizy graficznej można łatwo dojść do wniosku, że warunkiem wejścia w stan nasycenia jest równość

$$I_C = \frac{E_C}{R_C}, \quad (6.8)$$

i jest to prąd graniczny, dla którego napięcie na tranzystorze modelowym jest równe zero (w praktyce bliskie zero), a całe napięcie E_C odkłada się na rezystorze R_C . Zatem można stwierdzić, że tranzystor nasyci się, gdy prąd bazy

$$I_B > \frac{1}{\beta} \frac{E_C}{R_C}. \quad (6.9)$$

Można też zauważyć, że rozłożenie punktów B_i dla równomiernie rozłożonych prądów bazy jest także równomierne zarówno dla prądów kolektora, co wprost wynika z modelu, jak i dla napięć kolektor-emiter, ponieważ

$$U_{CE}(I_B) = -I_C R_C + E_C = (-\beta R_C) I_B + E_C, \quad (6.10)$$

co jest równaniem prostej o ujemnym współczynniku kierunkowym.

6.2.2. Uwagi odnośnie do indeksowania napięć i prądów

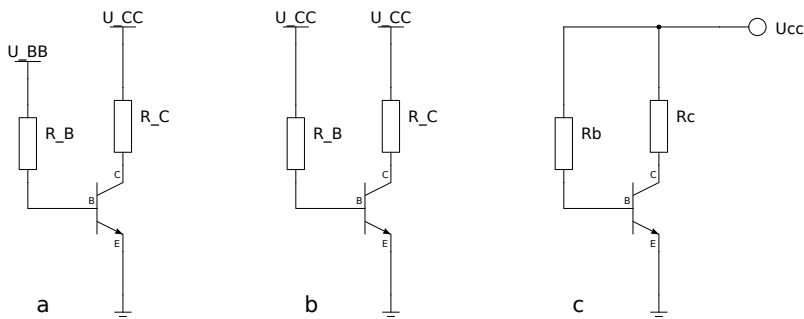
W poprzednich podsekcjach użyliśmy, zresztą oczywistych intuicyjnie, indeksów dla prądów, napięć i rezystorów występujących w odpowiednich miejscach obwodu. O ile dla prądów i rezystorów indeksowanie jest oczywiste, o tyle dla napięć w układzie mogą pojawić się zarówno indeksy dwu-, jak i jednoliterowe. Litera E, B i C oznaczają obwody lub gałęzie powiązane bezpośrednio lub pośrednio z zaciskami emitera, bazy lub kolektora tranzystora.

Dwuliterowe indeksy przy napięciach U_{AB} wskazują na różnicę potencjałów pomiędzy punktami A oraz B obwodu, przy czym pierwsza litera określa punkt o potencjale wyższym. Indeksy złożone z pojedynczej litery oznaczają napięcie w danym punkcie względem określonego potencjału masy. Zdwojenie litery, na przykład U_{CC} , U_{BB} , oznacza napięcie zasilające część układu powiązaną z odpowiednim zaciskiem i nie musi to być zasilanie bezpośrednie. Czasami na niektórych schematach zamiast litery U używa się litery V, ale nie powinno to prowadzić do nieporozumień, jeżeli rozumiemy, że jest to potencjał względem masy. Za błędny natomiast można uznać zapis V_{BE} , chociaż jest on używany czasami w literaturze angielskiej.

Napięcie U_{CC} na tyle często pojawia się w układach elektroniki, że zaczęło być używane jako synonim dodatniego napięcia zasilania nawet w układach niewykonanych techniką bipolarną. Podobnie U_{EE} nie zawsze poprawnie utożsamiane jest z ujemnym napięciem zasilającym.

Pewną trudność w formatowaniu indeksów można napotkać w komputerowym wspomaganiu projektowania. Ponieważ atrybuty elementów często są nie tylko zwykłymi etykietami, ale mogą mieć także znaczenie składniowe. W takim wypadku muszą być zapamiętywane jako zwykły tekst. Tak jest w wykorzystywanym w tym podręczniku pakiecie gEDA lub jego następcy Lepton-EDA. Aby uzyskać indeks w formatowaniu tekstu, należy do jednej nazwy przypisać dwa atrybuty, co jest dosyć kłopotliwe. Dlatego istnieją pewne uproszczenia i notacje pozwalające symulować w czystym tekście użycie indeksu. Powszechnie przyjęto w informatyce, co wykorzystywane już było we wcześniejszych schematach, że indeks dolny następuje po znaku podkreślnika (podłogi) „_”, a indeks górny po znaku „^”. Daje to jednak rozwleczoneą i nieczytelną notację, dlatego często w tekście maszynowym użytym przez elektroników indeksy zapisuje się małymi literami. Przykładowo: zamiast U_{BE} można pisać Ube lub Rc zamiast R_C itp. Cyfry w indeksach pozostawia się bez zmian, choć czasami małe „o” może udawać „0”. Taka notacja ma jednak tę niedogodność, że kłóci się z przyjętą wcześniej konwencją o użyciu w elektrotechnice wielkich i małych liter. Mimo to we wzorach w tekście nadal będziemy używać prawidłowej formy indeksowania innej niż na schematach.

Przy tak określonych oznaczeniach schemat z rysunku 6.11 przyjmie formę 6.12 a). Nic nie stoi na przeszkodzie, aby $U_{BB} = U_{CC}$, co oznacza, że nie ma konieczności zasilania obwodów bazy i kolektora z dwóch różnych, niezależnych źródeł. Prezentuje to rysunek 6.12 b). Dodatkowo schemat a) sugeruje, poprzez umieszczenie zasilania bazy i kolektora na różnych poziomach, że $U_{BB} < U_{CC}$. Schemat 6.12 c) jest równoważny b), z tym że użyto na nim innej formy indeksowania (małymi literami).

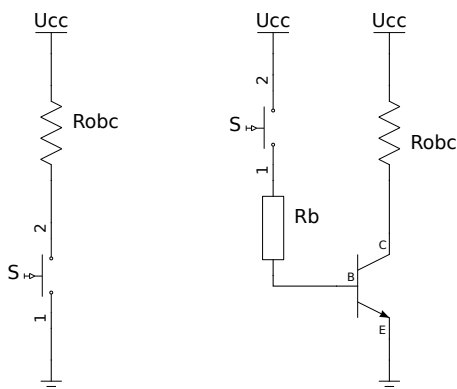


Rysunek 6.12. Przykłady oznaczania napięć i rezystorów w obwodach z tranzystorami

Analizując układy pochodzące z różnych źródeł, należy wyrobić w sobie odporność na wielorakość notacji i symboliki, której też nieraz już doświadczyliśmy.

6.2.3. Sterowanie obciążeniem

Zwiększenie β -krotne prądu kolektora względem bazy pozwala na sterowanie bezstykowe dużymi obciążeniami za pomocą małych prądów. Rozważmy układy z rysunku 6.13.

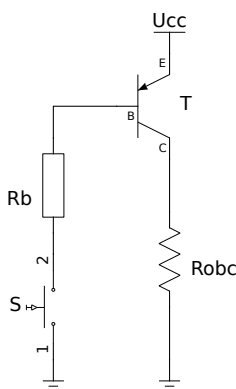


Rysunek 6.13. Sterowanie obciążeniem za pomocą wyłącznika

Z lewej strony rysunku włączanie obciążenia następuje bezpośrednio przy użyciu wyłącznika S . Jeżeli obciążenie jest duże (mała rezystancja), to przerywanie i włączanie dużych prądów powoduje przyspieszenie zużycia styków wyłącznika. Jego żywotność można znacząco wydłużyć, stosując układ z tranzystorem, taki jak na przykład z prawej strony rysunku 6.13. Wówczas można β -krotnie zmniejszyć prąd płynący przez wyłącznik.

Po dobraniu rezystora R_B tak, aby tranzystor był przełączany pomiędzy stanami odcięcia i aktywnym, prąd płynący przez obciążenie jest niezależny od jego rezystancji i wynosi $I_C = \beta(U_{CC} - 0,6\text{ V})/R_B$. Można to uznać za zaletę, jednak w praktyce obciążenia są sterowane napięciowo. Ponadto układ jest silnie β -zależny i po zmianie tranzystora zmieni się także wartość prądu obciążenia, co pociągnie za sobą konieczność korekty rezystora R_B . Znacznie lepiej tak dobrać jego wartość, aby po włączeniu wyłącznika przez bazę popłynął na tyle duży prąd, aby układ wszedł w stan nasycenia. Wtedy na obciążeniu napięcie będzie bliskie napięciu U_{CC} , a układ będzie mniej czuły na zmianę tranzystora. Nieco jednak zwiększymy prąd płynący przez wyłącznik, nie wykorzystując w pełni możliwości wzmacniających tranzystora.

Układ 6.13 bez tranzystora ma tę przewagę, że przyłączony do masy wyłącznik można zamienić miejscami z obciążeniem, uzyskując tym samym efekt przyłączenia do masy R_{obc} . Żeby taką funkcjonalność osiągnąć, w układzie z tranzystorem najprostszym rozwiązaniem, a zarazem niewymagającym nowej analizy, jest zastosowanie tranzystora pnp (rysunek 6.14). Uzyskujemy taką przewagę, że teraz jednocześnie z masą pracują zarówno wyłącznik, jak i obciążenie.



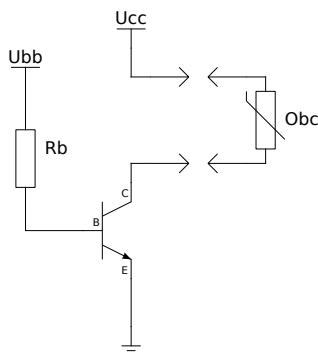
Rysunek 6.14. Sterowanie obciążeniem z wykorzystaniem tranzystora pnp

6.2.4. Tranzystorowe źródło prądowe

Gdy zapewni się w układzie 6.12 a) stabilne zasilanie bazy, prąd w obwodzie kolektora będzie miał w obszarze aktywnym stałą, niezależną od napięcia zasilającego U_{CC} oraz obciążenia wartość

$$I_C = \beta \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B}. \quad (6.11)$$

Realizację układową tej koncepcji prezentuje rysunek 6.15.



Rysunek 6.15. Tranzystorowe źródło prądowe

Równie dobrze bazę można zasilić z tego samego źródła, co kolektor, ale utracimy niezależność prądu kolektora od napięcia zasilającego. Jeżeli jednak napięcie U_{CC} jest stabilne, to nie stanowi to poważnego problemu.

Często o układach takich jak ten, w których obciążenie nie jest podłączone do masy, ale do dodatniego bieguna zasilania, mówi się (niezbyt poprawnie) pochłaniacze prądu. Podobnie jak poprzednio można, korzystając z właściwości tranzystora pnp, zmodyfikować układ w taki sposób, aby przyłączać obciążenie do masy. Wadą takiego układu jest β -zależność. Lepsze układy źródeł prądowych omówione zostaną w rozdziale 7.

Źródła prądowe odgrywają w elektronice bardzo ważną rolę. Na przykład znacznie wygodniej i bezpieczniej jest zasilac diody LED ze źródła prądowego. Wynika to ze stromości charakterystyki prądowo-napięciowej diody i odpowiedniości pomiędzy natężeniem prądu i natężeniem świecenia. W technice pomiarowej dzięki źródłom prądowym można prosto przetwarzać pojemność albo rezystancję na napięcie w sposób liniowy, co bez źródeł prądowych jest bardzo trudne do wykonania. Wynika to z faktu, że napięcie na kondensatorze ładowanym stałym prądem rośnie liniowo, a napięcie na rezystorze wynosi wprost IR .

6.3. Wzmacniacz tranzystorowy

Do tej pory udało się zbudować kilka funkcjonalnych układów, wykorzystując pewne własności tranzystora i wychodząc od jednego podstawowego obwodu. Jednak jako element aktywny układów elektroniki pełne wykorzystanie jego właściwości powinno zapewnić możliwość budowy wzmacniaczy liniowych napięć i/lub prądów, czyli wzmacniaczy mocy. W ogólności charakterystyki tranzystora są silnie nieliniowe, dlatego niemożliwe jest zbudowanie na pojedynczym tranzystorze wzmacniacza wielkosygnałowego. Z drugiej strony duże obszary charakterystyk, które można aproksymować odcinkami prostoliniowymi, powodują, że

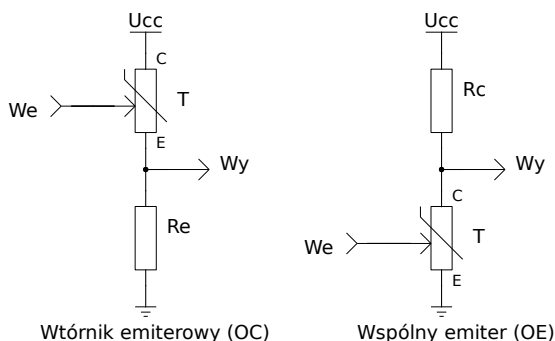
dla małosygnałowych wzmacniaczy tranzystorowych dostępne mogą być bardzo duże amplitudy sygnałów.

6.3.1. Układy pracy tranzystora

Zbudowanie czwórnika na bazie trójkońcówkowego elementu, jakim jest tranzystor, jest możliwe tylko w przypadku, gdy jedna z elektrod jest wspólna dla wejścia i wyjścia. Dysponując emiterem, bazą i kolektorem, można w ten sposób utworzyć sześć kombinacji, z czego tylko połowa ma właściwości wzmacniające. W zależności od tego, która elektroda jest uwspólniona, układy czwórników wzmacniających z tranzystorem noszą nazwy: wspólnego emitera, oznaczanego skrótowo OE, wspólnej bazy (OB) i wspólnego kolektora (OC).

Wiele podręczników, dążąc do ogólności, omawia równorzędnie i równocześnie wszystkie te układy często w bardzo sformalizowany sposób. Może to być skuteczne dla osób dobrze przygotowanych elektrotechnicznie i wyposażonych w odpowiedni aparat matematyczny. W tym podręczniku pominięto opis układu o wspólnej bazie ze względu na jego sporadyczne użycie. Dlatego wiedza po przeczytaniu tego podręcznika wymagać będzie uzupełnienia po napotkaniu układu OB, na przykład we wzmacniaczach wielkiej częstotliwości. Dodatkowo wprowadzenie odpowiedniego zasilania umieszczającego tranzystor w wymaganym dla wzmacniacza punkcie pracy powoduje, że nie przypominają one swoich niezasilanych pierwowzorów. Dlatego częściej układ wspólnego kolektora, w którym trudno jest dopatrzyć się wspólnej elektrody, nazywany jest po prostu wtórnikiem emiterowym.

Najprościej właściwości wzmacniające tranzystora można analizować w układach czwórników, w których końcówki C-E tranzystora stanowią sterowany „rezystor” w dzielniku napięcia. Taki dzielnik można skonstruować na dwa sposoby pokazane na rysunku 6.16. Zmiana dynamicznej rezystancji r_{CE} będącej skutkiem sterowania bazą tranzystora spowoduje zmianę napięcia na wyjściu dzielnika.



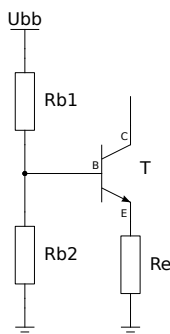
Rysunek 6.16. Dwa podstawowe układy pracy wzmacniaczy małosygnałowych z pojedynczym tranzystorem bipolarnym

6.3.2. Ustalenie punktu pracy

Praca małosygnałowa wzmacniacza wymaga ustalenia stałoprądowych warunków pracy układu. Najczęściej w celu zapewnienia jak największych amplitud napięcia wyjściowego punkt pracy projektuje się tak, aby stały potencjał wyjścia znajdował się mniej więcej w połowie napięcia zasilającego. Nie może to jednak być ogólną zasadą, bo o ułożeniu układu w odpowiednim punkcie pracy mogą decydować inne czynniki, takie jak na przykład: asymetria sygnału wejściowego, optymalizacja liniowego zakresu pracy, minimalizacja spoczynkowej mocy rozpraszanej na tranzystorze itp.

Można zaproponować wiele układów wstępnego zasilania tranzystora. Na przykład zasilanie obwodów bazy i kolektora z rysunku 6.10 daje napięcie kolektor-emiter wyrażone wzorem (6.10), które przy zadanym napięciu zasilającym E_C daje się ustalić poprzez dobór rezystora R_C oraz prądu bazy określonego wzorem (6.5) regulowanym wartością rezystora R_B . Zatem punkt pracy przy ustalonych napięciach zasilających może być ściśle określony przez dobór dwóch rezystorów R_B oraz R_C . Układ taki ma jednak bardzo niedobłą cechę, ponieważ we wzorze (6.10) występuje wzmocnienie prądowe β tranzystora. Projektując układ, nie jesteśmy w stanie przewidzieć nawet w przybliżeniu, jaką wartość będzie miał ten parametr dla konkretnego tranzystora wyjętego z pudełka. Spowoduje to, że nie będzie możliwe precyzyjne ustalenie punktu pracy, a po wymianie tranzystora konieczna będzie korekta wartości co najmniej jednego rezystora.

Jest kilka układów ustalających punkt pracy tranzystora pozbawionych (minimalizujących wpływ) tej negatywnej cechy. Najpopularniejszym z nich i w dodatku uniwersalnym jest układ tak zwanego potencjometrycznego zasilania bazy (rysunek 6.17).



Rysunek 6.17. Ustalenie punktu pracy potencjometrycznym zasilaniem obwodu bazy tranzystora

Potencjał bazy określa dzielnik złożony z rezystorów R_{B1} i R_{B2}

$$U_B = U_{BB} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, \quad (6.12)$$

z tym warunkiem, że prąd płynący przez rezystory R_{Bi} znacząco przewyższa prąd bazy I_B . Wiadomo także, że potencjał emitera będący jednocześnie napięciem na rezystorze R_E jest o U_{BE} , czyli około 0,6 V, niższy niż potencjał bazy

$$U_E = U_B - U_{BE}. \quad (6.13)$$

Stąd łatwo jest obliczyć prąd kolektora

$$I_C \approx I_E = \frac{U_E}{R_E}. \quad (6.14)$$

Znając natężenie prądu I_C , można określić wszystkie napięcia w obwodzie kolektora, który na schemacie 6.17 celowo pozostał otwarty dla zachowania ogólności rozważań.

W praktyce punkt pracy dobiera się odwrotnie, wychodząc od założonego potencjału emitera lub kolektora w zależności od wybranej konfiguracji wzmacniacza oraz od spoczynkowego prądu kolektora. Napięcie emitera ustalamy wprost dzielnikiem R_{B1} , R_{B2} , natomiast kolektora z zależności

$$U_C = U_{CC} - I_C R_C. \quad (6.15)$$

Warto zauważyć, że układ jest niezależny, przynajmniej w tym prostym modelu, od parametru β , a jeżeli nawet jest w rzeczywistych układach, to wpływ ten jest minimalny. Jest to zasługa sprzężenia zwrotnego uzyskanego przez zastosowanie rezystora w emiterze. Oprócz tego, że to on ustala prąd kolektora (emitera), to jeszcze stabilizuje punkt pracy. Zwiększenie prądu kolektora powoduje także zwiększenie napięcia U_E i tym samym zmniejszenie U_{BE} , co finalnie skutkuje ograniczaniem prądu kolektora.

6.3.3. Wtórnik emiterowy

Podstawowy układ wtórnika emiterowego przedstawiono na rysunku 6.18. Zakładając, że ustalony jest punkt pracy, łatwo jest zauważyć, że napięcie wyjściowe jest równe napięciu wyjściowemu pomniejszonemu o spadek na przewodzącym złączu baza-emiter

$$U_{wy} = U_{we} - 0,6 \text{ V}. \quad (6.16)$$

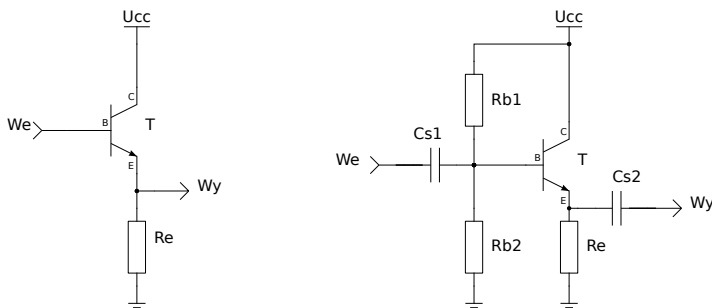
Przechodząc do przyrostów, a tym samym do wielkości małosygnałowych, gdzie stałe wartości nie grają roli, można napisać

$$u_{wy} = u_{we}. \quad (6.17)$$

Stąd pochodzi nazwa, gdyż wzmocnienie napięciowe układu wynosi 1 V/V.

Nie oznacza to jednak, że układ jest bezużyteczny. Zauważmy, że rezystancję wyjściową układu stanowi na mocy twierdzenia Thevenina rezystancja dzielnika złożonego z wyprowadzeń C-E tranzystora oraz rezystora R_E . Rezystancja wejściowa natomiast jest równa stosunkowi przyrostu napięcia wejściowego do przyrostu wejściowego prądu, co dla małosygnałowych wielkości przyjmuje formę

$$r_{we} = \frac{u_{we}}{i_{we}} = \frac{u_{wy}}{i_B}. \quad (6.18)$$



Rysunek 6.18. Podstawowy układ wtórnika emiterowego oraz układ OC z ustaleniem punktu pracy i kondensatorami sprzęgającymi

Ponieważ jednak

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} \approx \frac{i_E}{\beta}, \quad (6.19)$$

a

$$u_{wy} = u_E = i_E R_E, \quad (6.20)$$

to równanie (6.18) przyjmie postać

$$r_{we} = \frac{i_E R_E}{i_E / \beta} = \beta R_E. \quad (6.21)$$

Układ 6.18 z prawej strony jest przykładem kompletnego, małosygnałowego wtórnika napięciowego. Kondensatory C_{S1} i C_{S2} podkreślają jego małosygnałowy charakter, odseparowując składową stałą punktu pracy od właściwego sygnału. Tworzą one wraz z rezystancją wejściową (C_{S1}) oraz rezystancją wyjściową i obciążeniem (C_{S2}) filtry górnoprzepustowe. Sposób doboru wartości pojemności tych kondensatorów został opisany w 4.5.9.

6.3.4. Układ wspólnego emitera

Podstawowy układ wspólnego emitera przedstawiono na rysunku 6.19 z lewej strony. Podobnie jak w układzie OC, tak i tu założymy, że ustalone są warunki stałoprądowe pracy tranzystora. Wówczas napięcie kolektora będące napięciem wyjściowym wzmacniacza można obliczyć z warunku

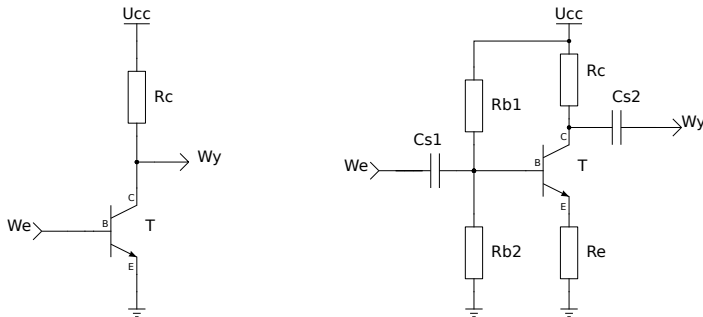
$$U_{wy} = U_{CC} - I_C R_C, \quad (6.22)$$

co dla małosygnałowych wielkości przyjmie postać

$$u_{wy} = -i_C R_C = -\beta i_B R_C. \quad (6.23)$$

Zmiany napięcia wejściowego można powiązać ze zmianami prądu bazy w następującej relacji

$$i_B = \frac{u_B}{r_{BE}} = \frac{u_{we}}{r_{BE}}, \quad (6.24)$$



Rysunek 6.19. Podstawowy układ wspólnego emitera oraz układ OE z ustaleniem punktu pracy i kondensatorami sprzęgającymi

zatem małosygnałowe wzmocnienie napięciowe układu będzie równe:

$$k_u = \frac{u_{wy}}{u_{we}} = -\beta \frac{R_C}{r_{BE}}. \quad (6.25)$$

Pojawia się jednak problem, bo w naszych najprostszych modelach przewodzenia diody złącza B-E rezystancja dynamiczna jest albo zerowa, albo bardzo mała, co powoduje, że wzmocnienie napięciowe układu OE może być ogromne. Nie jest to jednak powód do nadmiernego optymizmu. Pomijając fakt możliwości szybkiego wyjścia poza zakres aktywny i utratę liniowości wzmacniacza, to układ ten posiada też inne niekorzystne cechy. Żeby je zrozumieć, trzeba sobie uświadomić, że odcinkowy model przewodzącej diody nie jest w tym przypadku adekwatny do sytuacji, a rezystancja dynamiczna r_{BE} szybko maleje wraz ze wzrostem U_{BE} . Oznacza to, że wzmocnienie zależy od prądu wstępnie polaryzującego bazę, a układ będzie czuły na duże amplitudy u_{BE} . W rezultacie duże wzmocnienie przypłacimy niepotrzebnymi nieliniowościami. Układ taki będzie poprawnie pracował tylko dla bardzo małych amplitud napięcia wejściowego oraz będzie wykazywał bardzo małą rezystancję wejściową, przez co będzie znacząco obciążał poprzedzający stopień. Z powyższych powodów nie należy stosować takiego układu bez rezystora emiterowego lub innego układu, nieopisanego w tym podręczniku, zapewniającego ujemne sprzężenie zwrotne ustalające wzmocnienie układu.

Wprowadzenie rezystora R_E tak jak na rysunku 6.19 z prawej strony redukuje te problemy. Dla tego układu pozostaje prawdziwa, jak poprzednio, równość

$$u_{wy} = -i_c R_C, \quad (6.26)$$

ale też, z tych samych przyczyn jak w układzie OC, zachodzi

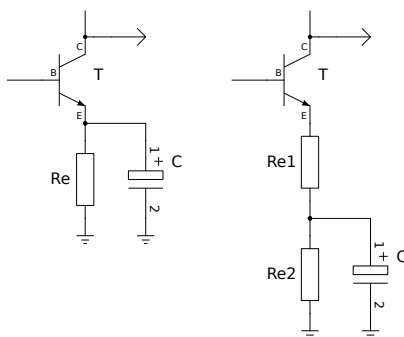
$$u_{we} = u_E \approx i_C R_E. \quad (6.27)$$

Dlatego dzieląc stronami równania (6.26) i (6.27), otrzymujemy

$$k_u = \frac{u_{wy}}{u_{we}} = -\frac{R_C}{R_E}. \quad (6.28)$$

Jak widać, układ z R_E ma bardzo dobrą cechę β -niezależności. Znak minus w wyrażeniach na wzmacnienie oznacza, że układ OE jest układem odwracającym fazę sygnału. Inaczej mówiąc, wzrostom napięcia wejściowego odpowiadają k_u -krotnie większe spadki napięcia wyjściowego i odwrotnie.

Jak widać, rezystor emiterowy posiada potrójną funkcję, bo oprócz ustalenia i stabilizacji punktu pracy uczestniczy także w określeniu wzmacnienia wzmacniacza ze wspólnym emiterem. Jeżeli chcemy uzyskać duże wzmacnienia napięć wejściowych o bardzo małych amplitudach, to funkcje związane z określeniem punktu pracy można całkowicie lub częściowo rozdzielić od roli ustalania wzmacnienia. Na rysunku 6.20 pokazano układy całkowicie (z lewej strony) lub częściowo (z prawej) zwierające składową zmienną w obwodzie emitera do masy układu. W takim wypadku rezystor emiterowy nie ustala wzmacnienia małosygnałowego, pozwalając na jego maksymalizację.



Rysunek 6.20. Zmniejszanie wpływu emiterowego sprzężenia dla zmiennej składowej sygnału

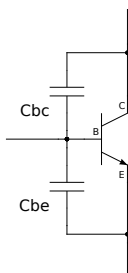
6.4. Tranzystor dynamicznie

Nawet przybliżona analiza tranzystorowych układów wielkiej częstotliwości wykracza poza ramy elektroniki dla początkujących, dlatego sekcja ta stanowi jedynie sygnalizację zagadnień z tym związanych.

Do tej pory nawet dla zmiennych w czasie sygnałów tranzystor traktowaliśmy kwazistatycznie, to znaczy, że zmiany sygnałów były na tyle wolne, a tranzystor na tyle „szybki”, że podczas analizy układów w każdym momencie możliwe było skorzystanie z charakterystyk statycznych. Wraz ze wzrostem częstotliwości, szybkości przełączeń czy zmian sygnału konieczne stało się uwzględnianie coraz to nowych poprawek do stosowanych modeli. Wymuszone jest to pasożytniczymi pojemnościami i indukcyjnościami nieodłącznie występującymi w tranzystorze oraz jego otoczeniu.

6.4.1. Pojemności złączowe

Każde złącze pn stanowi swego rodzaju kondensator, którego pojemność silnie zależy od napięcia na tym złączu. Efekt ten wykorzystywany jest w specjalnych diodach pojemnościowych warikapach i waraktorach do napięciowego przestrajania obwodów rezonansowych. Tranzystory posiadają dwa złącza, dlatego nie są wolne od pasożytniczych pojemności, pomimo że ich konstrukcja jest ukierunkowana na minimalizację tego efektu. Pojemności złączowe mogą wahać się od ułamków pikofaradów dla tranzystorów w.cz. do kilkudziesięciu pikofaradów dla tranzystorów mocy m.cz. Widać stąd, że częstotliwość graniczna pracy tranzystora jest dodatkowym parametrem silnie zależnym od jego typu. Uwzględnienie pojemności złączowych tranzystora prezentuje rysunek 6.21. Jest to pierwsza i najbardziej istotna poprawka do statycznego modelu tranzystora.



Rysunek 6.21. Tranzystor z uwzględnieniem pojemności złączy BC i BE

6.4.2. Efekt Millera*

Aby uzmysłowić sobie trudności związane z istnieniem pasożytniczych pojemności złączowych, trzeba wziąć pod uwagę, że impedancje wejściowe i wyjściowe tranzystorowych stopni wzmacniających są funkcją nie tylko tych pojemności, ale też zależą od zastosowanej konfiguracji wzmacniacza. Analizując właściwości układu OC, stwierdziliśmy, że impedancja w emiterze jest widziana od strony wejścia jako β razy większa. W układzie OE rolę ujemnego sprzężenia, tym razem kolektorowego, pełni kondensator C_{BC} , dlatego od strony wejścia ta pojemność widziana będzie jako $|k_u|$ -krotnie większa. Wypadkowa pojemność wejściowa widziana pomiędzy bazą a masą układu będzie wynosiła

$$C_{we} \approx C_{BE} + |k_u| C_{BC} \quad (6.29)$$

i wraz z rezystancją wejściową tworzyła filtr dolnoprzepustowy. Efekt ten nie jest tak widoczny w układzie OC, a nie występuje w ogóle w układzie ze wspólną bazą. Dlatego chcąc uzyskać duże wzmocnienie napięciowe w układach wielkiej częstotliwości, stosuje się właśnie układ OB. Istnieją też inne, na tym etapie trudne do zrozumienia, metody redukcji efektu Millera wykorzystujące więcej niż jeden tranzystor. Zatem częstotliwości graniczne wzmacniacza silnie zależą nie tylko

od właściwości danego tranzystora, ale także od zewnętrznych połączeń i zastosowanego układu pracy.

6.5. Parowanie tranzystorów

Pojęcie parowania, jak wskazuje sama nazwa, polega na dobieraniu elementów w pary z większej ich liczby pod względem zgodności jakichś wybranych parametrów. Parowanie dotyczy nie tylko tranzystorów, ale także innych komponentów elektronicznych. Najczęściej jednak nazwa ta kojarzona jest z tranzystorami ze względu na rozrzut parametrów, szczególnie wzmocnienia prądowego, jaki one wykazują. Najczęstszym celem parowania jest uzyskanie znacząco większej dokładności niż wynikająca z tolerancji elementu albo dobór parametrów pod względem współpracy komponentów.

Przykładowo chcemy zbudować dzielnik napięcia składający się z dwóch jednakowych rezystorów, czyli dokładnie połowiający napięcie, ale dysponujemy rezystorami pięcioprocentowymi. Wówczas tolerancja tłumienia δk_U takiego dzielnika wyniesie też około 5%. Dysponując omomierzem o lepszej niż 5% dokładności, o co dzisiaj nietrudno, oraz dużą liczbą takich samych rezystorów, można wybrać dwa najbardziej zbliżone i uzyskać tolerancję zbliżoną do klasy omomierza.

W sprzedaży czasami można spotkać już sparowane elementy — tranzystory, lampy, termistory itp. — czyli takie, które z zasady wykazują rozrzut, a w układach, w których mają być zastosowane, wymagana jest dokładna zgodność pewnych charakterystyk tych elementów. Jasne jest, że parowane elementy są znacznie droższe od swoich seryjnych odpowiedników, tym droższe, im większej zgodności oczekujemy, bo do ich wyodrębnienia odrzucona została znaczna ilość niespełniających wymagań komponentów.

Pojęcie parowania pomimo nazwy może dotyczyć także doboru większej niż dwa liczby elementów, a także doboru pojedynczego, ale spełniającego konkretne wymagania elementu.

Indeks

Wykaz skrótów indeksu:

<i>inf.</i>	termin informatyczny
<i>jedn.</i>	symbol jednostki
<i>log.</i>	logiczny
<i>pot.</i>	potocznie
<i>zob.</i>	zobacz

0 (*log.*), 283, 286, 294, 296
1 (*log.*), 283, 286, 294, 296
1 z n, kod, 289, 290, 311, 333
4000, *zob.* seria, 4000
555, *zob.* układ, czasowy 555
7400, *zob.* seria, 7400
78XX, *zob.* stabilizator, 78XX
79XX, *zob.* stabilizator, 79XX

A

A (*jedn.*), 36, 43
A, klasa wzmacniacza, 213
AB, klasa wzmacniacza, 215
AD, 342, 350
adres, 310, 312, 313, 331
Aiken, kod, 288
akceptor, 152
akumulator, 63
albo (*log.*), 295
algebra Bool'a, 296
 łączność, 296, 298
 prawa De Morgana, 297
 przemienność, 296
 rozdzielność
 alternatywy względem koniunkcji, 296
 koniunkcji względem alternatywy, 296
 tożsamości, 296
alternatywa, 294
ALU, 314
AM, 102
amper, 36, 43
amperomierz, 78, 79
 rzeczywisty, 78
amplituda, 93, 95, 97
analiza
 Fouriera, 24, 103
 harmoniczna, 203
 matematyczna, 17
AND, *zob.* bramka, AND
anoda, 153
aproksymacja, 23
 prosta, 23, 148, 150

 wielomianem, 24
architektura
 systemu, 286
 wbudowanego, 341
 von Neumana, 343
Arduino, 345–347
 język C/C++, 345, 347
 poziomy napięcie, 348
 programowanie, 345, 347
 przetwornik AD, 350
 rezystor pull-down, 347
Arduino-IDE, 345
Arithmertic Logic Unit, 314
asymptotyka, 128

B

B (bajt), 286
b (bit), 286
B (*jedn.*), 90
B, klasa wzmacniacza, 213
bajt, 286
Base, 232
bateria, 63
baza (B), 175, 180
BCD, kod, 288
bel, 90
BiCMOS, 303
bit, 286
 najbardziej znaczący, 286, 290, 334
 najmniej znaczący, 286, 289, 334
 zapisu, 331
 znaku, 290, 292
błąd graniczny, *zob.* niepewność, maksymalna
Body, 232
Bool, algebra, 296
bramka, 283, 293
 AND, 295, 297
 symbol, 295
 czas propagacji, 300
 częstotliwość graniczna, 300
 dwuwęściowa, 294
 moc strat, 300

- NAND, 295, 297, 302, 309, 313
 - symbol, 295
- NOR, 295, 297
 - symbol, 295
- NOT, 293, 294, 297
- obciążalność, 300, 311, 314
- OR, 294, 297
 - symbol, 295
- pośrednicząca, 293
- tożsamościowa
 - symbol, 293
 - tablica stanów, 293
- tranzystora unipolarnego (B), 230
- wielowejściowa, 298
- XNOR, 295
- XOR, 295
- bufor, 293, 311
- C**
- C, zegar, 304, 324
- całka, 17
 - interpretacja fizyczna, 17
 - interpretacja geometryczna, 17, 19, 20
 - nieoznaczona, 23
 - obliczanie, 20
 - oznaczona, 19
 - Riemana, 19
- całkowanie, 17, 19, 22, 23
- cecha liczby zmiennoprzecinkowej, 292
- cewka, 107, 109, 112, 121
 - budowa, 107
 - dopuszczalny prąd, 111
 - energia, 123
 - magnesowanie, 115
 - relacje fazowe, 117, 118
 - roz magnesowanie, 115
 - rzeczywista, 111
 - stratność, 111
 - symbol, 108, 111
 - zgromadzona energia, 109
- charakterystyka
 - fazowa, 104
 - kwazistacjonarna, 55
 - nieciągła, 143
 - nieliniowa, 142, 260
 - aproxymacja, 147
 - aproxymacja prosta, 148
 - obciążenia, 69, 148
 - prądowo-napięciowa, 39, 55, 142
 - diody elektroluminescencyjnej, 158
 - diody półprzewodnikowej, 153
 - diody tunelowej, 161
 - diody Zenera, 160
 - elementu nieliniowego, 142, 260
 - rezystora, 39
 - przejściowa
 - tranzystora bipolarnego, 180, 181
 - tranzystora unipolarnego, 233, 234, 236
 - przenoszenia filtru, *zob.* transmisja, mocy statyczna, 141, 142
 - styczna w punkcie, 150
 - wejściowa tranzystora bipolarnego, 180
 - wyjściowa
 - tranzystora bipolarnego, 180, 181
 - tranzystora unipolarnego, 232, 233, 235, 236
 - źródła, 69, 70
 - z nieciągłą pochodną, 143
 - ciąg Renarda, 51
 - CLK, 304, 324
 - CMOS, 246, 302, 303
 - CMRR, 210, 211, 267
 - COM, 136
 - Common Mode Rejection Ratio, *zob.* CMRR
 - Complementary MOS, *zob.* CMOS
 - CPU, 343
 - czas
 - narastania/opadania sygnału, 97
 - propagacji bramki, 300, 304
 - częstość, 95
 - kołowa, 95
 - częstotliwość, 95, 97
 - graniczna, 196
 - dolna, 126, 128, 130, 134
 - górna, 126
 - wzmacniacza operacyjnego, 268
 - kołowa, 95
 - progowa wzmacniacza operacyjnego, 268
 - rezonansowa, 120
 - czujnik, 342
 - czwórnik, 74, 86, 149
 - liniowy, 87
 - parametry
 - admitancyjne, 87
 - hybrydowe (mieszane), 87
 - hybrydowe odwrotne, 88
 - impedancyjne, 87
 - łańcuchowe (transmisyjne), 88
 - łańcuchowe odwrotne, 88
 - czwórniki, połączenie kaskadowe, 88, 90
 - D**
 - D, klasa wzmacniacza, 248
 - DA, 350
 - Darlington, 202, 203, 253
 - dB, 90
 - dBm, 90
 - dB μ V, 90
 - dBu, 91
 - dBV, 90
 - Debian, 345
 - dec, 131
 - decybel, 90
 - defekt struktury, 152
 - definicja operacyjna, 30
 - dekada, 131

- dekoder, 290, 311
 - priorytetowy, 313
 - demodulacja amplitudowa, 168
 - demultiplekser, 310, 312
 - symbol, 310
 - detektor, 167, 168
 - amplitudy, 168, 169
 - szczytowy, 168
 - dielektryk, 107, 109, 110
 - dielektryki, 34
 - dioda
 - anoda, 153
 - częstotliwość graniczna, 156
 - detekcyjna, 156
 - dopuszczalne napięcie wsteczne, 156
 - dopuszczalny prąd przewodzenia, 156
 - elektroluminescencyjna, 157
 - napięcie światła, 158
 - Gunna, 163
 - katoda, 153
 - kierunek
 - przewodzenia, 155
 - zaporowy, 155
 - krzemowa, 155
 - moc strat, 156
 - pn, 153
 - pojemnościowa, 163, 196
 - pojemność złącza, 156
 - półprzewodnikowa, 152, 153, 261
 - charakterystyka prądowo-napięciowa, 153
 - modelowanie charakterystyk, 154
 - symbol, 153
 - prąd wsteczny, 153
 - prostownicza, 153, 156, 261
 - rezystancja dynamiczna, 155
 - Schottky'ego, 163, 302
 - szybkość, 156
 - świecąca, 157
 - zabezpieczająca, 232
 - Zenera, 159, 176, 200
 - napięcie przebicia, 160
 - dokładność pomiaru, 77
 - domieszkowanie półprzewodników, 152
 - donor, 152
 - dopasowanie
 - mocy, 76
 - napięciowe, 75
 - dren (D), 230
 - dryft temperaturowy, 151, 175
 - dwójka licząca, 333
 - dwójnik, 55
 - liniowy, 86
 - nieliniowy, 141
 - dystribucja Diraca, 106
 - dzielnik napięcia, 58, 67, 149, 150, 202
 - impedancyjny, 122
 - małosygnałowy, 151
 - nieobciążony, 58
 - obciążony, 60
 - regulowany, 59
 - z diodą
 - prostowniczą, 156
 - tunelowa, 161, 162
 - Zenera, 160, 203
 - Zenera, zwiększanie obciążalności, 203
 - zwiększanie obciążalności, 202, 203
 - dziura, 30, 152
- E**
- EEPROM, 332
 - efekt Millera, 196, 219
 - Electrically Erasable PROM, 332
 - Electrically PROM, 332
 - elektromagnes, 136
 - elektron, 30, 34
 - elektronika
 - cyfrowa, definicja, 283
 - definicja, 29, 47, 141, 175, 283
 - element
 - bierny, 107, 121, 124, 135, 299
 - czynny, 141, 299
 - liniowy, 107
 - nieliniowy, 50, 141, 144, 260
 - bierny, 144
 - sterowany, 141, 175, 229
 - emiter (E), 175, 180
 - energia
 - cewki, 109
 - kondensatora, 108
 - potencjalna pola elektrycznego, 32
 - EPROM, 332
- F**
- F (*jedn.*), 108
 - fala nośna, 102, 169
 - częstotliwość, 169
 - FALSE, 286
 - fałsz (*log.*), 286, 294
 - farad, 108
 - faza, 95, 96
 - sygnału, 75
 - ferrimagnetyk, 111
 - ferromagnetyk, 111
 - ferryt, 111
 - FET, 229
 - Field-Effect Transistor, *zob.* FET
 - filtr, 125
 - aktywny, 125
 - bierny, 125
 - dolnoprzepustowy, 125, 127, 267
 - transmisja, 127
 - górno-
przepustowy, 125, 129, 134
 - transmisja, 129
 - pierwszego rzędu, 130, 267
 - rzędu, 130, 267

selektywność, 130
 środkowoprzepustowy, 125
 środkowozaporowy, 125
 flash, 333
 FM, 102
 fotodioda, 145
 fotoogniwo, 145
 funkcja
 delta Diraca, 106
 logiczna, 292, 305
 albo, 295
 alternatywa, 294
 AND (i), 295, 296
 iloczyn, 295
 implementacja z wykorzystaniem
 PLD, 315
 implementacja za pomocą bramek, 309
 implementacja za pomocą bramek
 NAND, 309
 koniunkcja, 295
 NOT (nie), 293, 296
 optymalizacja, 307
 OR (lub), 294, 296
 suma, 294
 tablica stanów, 292
 tożsamość, 293
 zapis algebraiczny, 292
 pierwotna, 22
 funktor, *zob.* bramka

G

gałąź, 48, 80
 gEDA, 43, 47, 186
 General Purpose In Out, 345
 generator, 219, 276
 Colpittsa, 220
 Hartleya, 220
 LC, 220
 Meissnera, 220
 RC, 220
 relaksacyjny, 143, 221
 stabilizowany kwarcowo, 276
 sygnałowy, 94
 sygnału harmonicznego, 220, 276
 sygnału prostokątnego, 222, 276, 278
 z przerzutnikiem Schmitta, 226
 z przerzutnikiem Schmitta, okres
 drgań, 227
 trójkąciówkowy, 276
 warunek fazowy, 220
 z układem czasowym 555, 278
 GND, 64
 goldpin, 49, 345
 GPIO, 345
 gradient, 33
 granica funkcji, 18
 Gray, kod, 289
 ground, *zob.* potencjał, ziemi

H

H (*jedn.*), 109
 harmoniczna, 103, 104, 172
 hazard, 315, 321
 henr, 109
 herc, 95
 hermetyzacja, 253
 histereza, 143, 225, 226, 272
 Hz (*jedn.*), 95

I

IDE, 345
 IGFET, 231
 iloczyn (*log.*), 295
 iloraz różnicowy, 18
 impedancja, 120, 124
 zespolona, 122
 impuls, 100
 kształt, 100
 ujemny, 100
 widmo, 106
 indeksowanie napięć i prądów, 186
 indukcyjność, 107, 109, 111
 definicja elektrotechniczna, 112
 pasożytnicza, 132, 141
 solenoidu, 109
 Insulated Gate FET, *zob.* IGFET
 inwerter, 221, 222, 251, 302
 CMOS, 246
 nMOS, 246
 izolatory, 34

J

jednostka
 arytmetyczno-logiczna, 314
 urojona, 25
 język
 C/C++, 345
 programowania, 341
 wysokiego poziomu, 343
 skryptowy, 345
 JFET, 231, 235, 236
 Johnson, kod, 289, 290
 Junction FET, *zob.* JFET

K

kanał
 tranzystora unipolarnego, 230
 wzbogacany, 232
 zubożany, 232
 Karnaugh, tablica, 307
 kaskada, 88, 90
 katoda, 153
 kierunek
 przewodzenia, 155
 zaporowy, 155
 kilo (*inf.*), 287
 Kirchhoff, prawa, *zob.* prawa, Kirchhoffa

- klasa wzmacniacza, 213–215, 248
 - klasyfikacja
 - pamięci, 332
 - sygnałów, 94
 - klistron, 163
 - klucz analogowy, 249–251
 - kod, 289
 - 1 z n, 289, 290, 311, 333
 - 2421, 288
 - 5421, 288
 - Aikena, 288
 - BCD, 288, 314
 - binarny, 289, 290
 - dwójkowy, 289, 305, 311, 313, 333
 - Graya, 289, 307, 308, 315
 - Johnsona, 289, 290, 313
 - konwerter, 290
 - liczbowy, 288
 - pseudopierścieniowy, *zob.* kod, Johnsona
 - wyświetlacz siedmiosegmentowego, 314
 - koder, 290
 - koercja namagnesowania, 111
 - kolektor (C), 175, 180
 - komparator, 268, 269, 305
 - drabinkowy, 270, 305, 313
 - tablica stanów, 270
 - okienkowy, 270
 - tablica stanów, 271
 - kompensacja temperaturowa
 - stopnia mocy, 217
 - kompensacyjny pomiar napięcia, 60
 - kompilacja, 344
 - komplementarność, 214, 246
 - komputer, 342
 - koncentracja ładunków, 38, 152
 - kondensator, 107, 112, 121
 - blokujący, 134
 - budowa, 107
 - ceramiczny, 110
 - dopuszczalne napięcie, 109
 - elektrolityczny, 110
 - energia, 123
 - foliowy, 110
 - ładowanie, 113, 114
 - mikowy, 110
 - płaski, 108
 - polaryzacja napięcia, 110
 - relacje fazowe, 118
 - rozładowanie, 113, 114
 - rzeczywisty, 109
 - sprzęgający, 133
 - stratność, 110
 - symbol, 108
 - tantalowy, 110
 - upływność, 110
 - zgromadzona energia, 108
 - konduktancja, 38, 43, 141
 - dynamiczna, 150
 - małosygnałowa, 150
 - właściwa, 43
 - konduktywność, 39, 43, 152
 - koniunkcja, 295
 - kontrola parzystości, 316
 - konwerter kodów, 290
 - kosinus fi, 124
 - kroskompilator, 344
 - kryterium przenoszenia filtru, 126
 - krzem, 152
 - kwantyzacja odczytu, 77
 - kwazistacjonarność, 55, 93, 195
- L**
- lampa wyładowcza, 143
 - least significant bit, *zob.* bit, najmniej znaczący
 - LED, 157
 - Lepton-EDA, 186
 - liczba
 - dwójkowa, 285–287
 - n-bitowa, 286
 - ułamkowa, 291
 - dziesiętna, 284, 286
 - ósemkowa, 287
 - stałoprzecinkowa, 291, 292
 - szesnastkowa, 287
 - ujemna, kodowanie, 290
 - z przesunięciem, 290
 - z uzupełnieniem do dwóch, 291
 - z uzupełnieniem do jeden, 290
 - znak-moduł, 290
 - zmiennoprzecinkowa, 292
 - cecha (wykładnik), 292
 - mantysa, 292
 - liczba zespolona
 - argument, 26
 - część rzeczywista, 25
 - część urojona, 25
 - interpretacja graficzna, 25
 - jako para, 24
 - jednostka urojona, 25
 - moduł, 26
 - postać
 - algebraiczna, 25
 - kanoniczna, 24
 - trygonometryczna, 26
 - wykładnicza, 27
 - sprzężona, 26
 - liczby zespolone, 24–27
 - dodawanie, 24
 - dzielenie, 27
 - mnożenie, 24, 27
 - licznik, 312, 333
 - asynchroniczny, 333, 334
 - modulo 2, 333
 - modulo n, 333
 - pierścieniowy, 333

programowalny, 336, 337
 synchroniczny, 333, 335, 338
 light-emitting diode, *zob.* LED
 lim, limes, *zob.* granica funkcji
 Linux, 345
 LM317, 273
 LSB, 286, 334

Ł

ładowanie kondensatora, 113, 114
 ładunek, 30, 108, 152
 elektronu, 30, 38, 152, 153
 elektryczny, 30
 znak, 30, 34
 elementarny, 30, 38
 koncentracja, 38
 ruch
 termiczny, 35
 uporządkowany, 36
 ruchliwość, 38
 swobodny, 152
 zasada zachowania, 34, 41
 łączność działań, 296, 298

M

magistrala zasilająca, 64
 magnesowanie cewki, 115
 mantysa liczby zmiennoprzecinkowej, 292
 margines zakłóceń, 299
 masa, 64
 symbol, 65
 materiał magnetyczny, 107
 mega (*inf.*), 287
 metale, 34, 152
 Metal-Oxide Semiconductor FET,
 zob. MOSFET
 miernik, *zob.* przyrząd pomiarowy
 mikrokontroler, 284, 315
 mikroprocesor, 284, 341, 348
 moc
 bierna, 124
 chwilowa, 123
 czynna, 124
 pozorna, 124
 moduł, 124
 zespolona, 124
 strat, 41, 54, 71
 diody, 156
 elementu nieliniowego, 151
 źródeł rzeczywistych, 71
 modelowanie źródeł rzeczywistych, 66
 modulacja
 AM, 102
 amplitudy, 102
 częstotliwości, 102
 fazy, 102
 FM, 102
 PM, 102

PWM, 96, 102, 248, 351
 szerokości impulsu, 96
 MOS, 231
 MOSFET, 231, 232, 235, 236, 244, 245, 249
 most significant bit, *zob.* bit, najbardziej
 znaczący
 mostek, 61
 Graetza, 165, 166
 H, 246, 247, 253
 niezrównoważony, 62
 pomiarowy, 61, 246
 rezystancyjny, 61, 62
 zrównoważony, 62
 MSB, 286, 334
 multimetr, 76
 multiplexer, 310, 312, 313, 331
 dwubitowy, 311
 symbol, 310
 multiwibrator astabilny, 222, 224
 częstotliwość, 224

N

nabla, 33
 nadpalanie styków, 137
 NAND, *zob.* bramka, NAND
 napięcie, 30, 34, 43
 aktywacyjne diody półprzewodnikowej,
 153, 154
 gaśnięcia, 143
 niezrównoważenia wzmacniacza
 operacyjnego, 266
 progowe tranzystora unipolarnego, 236
 symetryczne, 166
 wsteczne diody, 156
 wyjściowe
 dzielnika nieobciążonego, 59
 dzielnika obciążonego, 60
 zapłonu, 143
 Zenera, 160
 zespolone, 121, 122, 124
 źródła obciążonego, 67
 nasycenie namagnesowania, 111
 natężenie
 pola elektrycznego, 31
 prądu, 30, 36, 43
 zespolone, 121, 122, 124
 światła diody elektroluminescencyjnej,
 158
 NC, 49, 136
 negacja, 293, 294
 neonówka, 143
 neutron, 34
 niepewność
 maksymalna, 77
 pomiaru, 77
 NO, 49, 136
 NOC, 49
 NOR, *zob.* bramka, NOR

- normally
 - close, *zob.* NC
 - open, *zob.* NO
- nośna, 102
- NOT, *zob.* bramka, NOT
- notacja zespolona, 121
- NVRAM, 333

- O**
- OB, 190
- obciążalność
 - bramki, 300, 311, 314
 - wyjść, 348, 350
- obciążenie źródła napięcia, 67
- nieliniowe, 146
- obszar
 - aktywny tranzystora bipolarnego, 177, 182, 185, 302
 - liniowy tranzystora unipolarnego, 234, 283
 - nasycenia
 - tranzystora bipolarnego, 179, 182, 185, 283, 302
 - tranzystora unipolarnego, 234, 239
 - odcienia
 - tranzystora bipolarnego, 177, 182, 185
 - tranzystora unipolarnego, 234
 - pracy tranzystora, 182, 283
- obwód, 42, 50, 79
 - bazy, 184
 - drukowany, 49
 - kolektora, 184
 - liniowy, 47, 79, 85, 86
 - magnetyczny, 111, 134
 - nieliniowy, 145
 - rozwiązanie, *zob.* rozwiązywanie obwodów
 - szeregowy RLC, 119
 - wielkiej częstotliwości, 195
- OC, 190, 211
- oct, 131
- oczko, 42, 48, 80
- OD, 241
- odczyt pamięci, 331
- oddziaływanie elektromagnetyczne, 30
- OE, 190
- offset, 99
- ogniwo, 63
- ogranicznik
 - amplitudy, 170
 - napięcia, 170
- ohm, 39, 43
- Ohm, prawo, *zob.* prawo, Ohma
- okładzina (okładka), 107, 109, 110
- okres, 94, 97
- oktawa, 131
- om, 39, 43
- Ω (*jedn.*), 39, 43

- Open Hardware, 348
- operator, 20, 171
 - liniowy, 21
 - różniczkowania, 20
- oporność
 - elektryczna, 43
 - właściwa, 43
- opór elektryczny, 43
- optymalizacja układów kombinacyjnych, 307
- OR, *zob.* bramka, OR
- OS, 243
- oscylloskop, 94

- P**
- PAL, 315
- pamięć, 330
 - asynchroniczna, 332
 - EEPROM, 332
 - EPROM, 332
 - flash, 333
 - masowa, 344
 - NVRAM, 333
 - o dostępie swobodnym, 331
 - operacyjna, 343
 - pojemność, 331
 - PROM, 332
 - przestrzeń adresowa, 331
 - RAM, 332
 - ROM, 332
 - synchroniczna, 332
 - zapis/odczyt, 331
- para komplementarna, 214, 246, 253
- parametr
 - dynamiczny, 150
 - małosygnałowy, 149, 150
 - statyczny, 150
 - wielkosygnałowy, 149, 150
- parowanie
 - elementów, 197, 253
 - tranzystorów, 197, 201
- pin, 48
- plateau, 126
- PLD, 315, 341
 - sekwencyjny, 338
- płytki stykowa, 49
- PM, 102
- pochłaniacz prądu (*pot.*), 189
- pochodna, 17, 150
 - addytywność, 21
 - definicja, 18
 - funkcji elementarnej, 21
 - funkcji złożonej, 22
 - ilorazu, 22
 - interpretacja fizyczna, 17
 - interpretacja geometryczna, 17–19
 - jako funkcja, 20
 - liniowość, 21

- multiplikatywność względem stałej, 21
 - obliczanie, 20, 21
- podłoże (B), 232
- podwajacz napięcia, 169
- pojemność, 107, 109
 - definicja elektrotechniczna, 112
 - elektryczna, 108
 - kondensatora płaskiego, 108
 - pamięci, 331
 - pasożytnicza, 132, 141, 196
 - złącza, 156
 - złączowa, 196
- polaryzacja dielektryka, 34
- polaryzacja złącza, 153
- pole, 30
 - elektromagnetyczne, 30
 - elektrostatyczne, 32
 - elektryczne
 - energia potencjalna, 32
 - natężenie, 31
 - potencjał, 31, 32, 41, 42
 - potencjał zerowy, 33
 - jednorodne, 34, 37
 - potencjalne, 32, 41, 42
- pomiar
 - bezpośredni, 60, 76
 - napięcia, 61, 76
 - kompensacyjny, 60
 - natężenia prądu, 76
 - rezystancji, 76
 - techniczny, 78
 - wielkości elektrycznych, 76
- potencjał
 - masy, 65
 - pola elektrycznego, 31, 32, 35
 - zerowy, 33, 65
 - ziemi, 64
- potencjometr, 54
- powielacz napięcia, 169
- poziom
 - tętnień, 166
 - wzmocnienia, 90
 - zawartości harmonicznych, 173
- pozostałość namagnesowania, 111
- półmostek, 247, 253
- półprzewodnik
 - domieszkowany, 152
 - konduktywność, 152
 - samoistny, 152
 - typu n, 152, 176, 230
 - typu p, 152, 176, 230
- praca w polu elektrycznym, 31, 40
- prawa
 - De Morgana, 297, 309
 - Kirchhoffa, 41, 41, 42, 42, 80, 145
- prawda (log.), 286, 294
- prawo
 - Ohma, 37–39, 41, 51, 78, 141
 - Webera-Fechnera, 159
- prąd, 30, 35, 43
 - drenu niewysterowanego tranzystora, 236, 237, 240, 241
 - kierunek przepływu, 34, 37
 - niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnego, 266
 - polaryzacji wejść wzmacniacza operacyjnego, 266
 - wsteczny diody, 153
 - wyjściowy
 - wzmacniacza operacyjnego, 266
 - zespolony, 121, 122, 124
 - zwarcia źródła, 69, 70, 149
- prądy wirowe, 111
- procesor, 343
 - rozkaz, 343
- program, 342
 - współbieżność, 342
- programator, 344
- Programmable Array Logic, 315
- Programmable Logic Device, 315
- Programmed ROM, 332
- programowanie
 - natywne, 344
 - systemów wbudowanych, 341, 344
- PROM, 332
- prostownik, 163, 168
 - dwupołówkowy, 98, 164, 165
 - jednopołówkowy, 98, 163
- proton, 34
- przebiecie dielektryka, 109
- przebieg sygnału, 93
- przeciwfaza, 121
- przekaznik, 136, 346
- przekładnia transformatora, 135
- przekształcanie źródeł, 69, 83
- przełącznik, 49
 - cyfrowy, 310, 311
- przemienność działań, 296
- przeniesienie
 - bitu, 286, 291
 - cykliczność, 291
- przenikalność
 - elektryczna
 - powietrza, 107
 - próżni, 107, 109
 - względna, 107, 109
 - magnetyczna
 - powietrza, 107
 - próżni, 107, 109
 - względna, 107, 109
- przepięcie, 113, 137, 170
- przepustowość filtru, 125
- przerzutnik, 319
 - asynchroniczny, 321, 322, 333
 - D, 327, 328, 330
 - asynchroniczny, 327

- symbol, 327
 - tablica stanów, 327
 - dwutaktowy, 325
 - JK, 325, 326, 328, 333
 - symbol, 326
 - tablica stanów, 326
 - master-slave, 325
 - RS, 277, 321, 323, 324, 330
 - asynchroniczny, 321, 322
 - dwutaktowy, 325
 - symbol, 321, 324, 325
 - synchroniczny, 324
 - tablica stanów, 322
 - Schmitta, 225, 226, 271
 - histereza, 225, 272
 - napięcie wyłączania, 272
 - napięcie załączania, 272
 - próg wyłączania, 225, 226
 - próg załączania, 225, 226
 - z komparatorem, 271
 - zakres nieczułości, 226
 - synchroniczny, 323, 324
 - T, 328, 333
 - symbol, 328
 - tablica stanów, 328
 - przestrzeń adresowa, 331, 343
 - przetwornik
 - analogowo-cyfrowy, 270, 290, 305, 342, 350
 - czułość próbkowania, 351
 - napięcie odniesienia, 350
 - rozdzielczość, 350
 - szybkość, 350
 - cyfrowo-analogowy, 290, 350, 351
 - drabinkowy, 270
 - liniowy, 171
 - napięcie – prąd, 263
 - nieliniowy, 172
 - pomiarowy, 342
 - prąd – napięcie, 262, 263
 - stałoprądowy, 171
 - sygnału, 171
 - przewodnik naładowany, 35
 - przewodniki, 34
 - przewodność, 43
 - właściwa, 43
 - przewód, 47
 - symbol, 48
 - przecisk, 49
 - maszynowy, 346
 - monostabilny, 346
 - przyrząd pomiarowy, 62, 64
 - analogowy, 77
 - cyfrowy, 77
 - dwuzaciskowy, 76
 - idealny, 79
 - napięcia, 78, 79
 - zmiennego, 99
 - natężenia prądu, 78, 79
 - zmiennego, 99
 - rzeczywisty, 78, 79
 - uniwersalny, 76
 - pull-down, 221
 - pull-up, 222
 - pulsacja, 95, 97, 120
 - Pulse Width Modulation, *zob.* PWM
 - punkt pracy, 151, 160, 190, 199, 239
 - dryft temperaturowy, 151
 - tranzystora bipolarnego, 191, 192
 - tranzystora unipolarnego, 239
 - PWM, 96, 102, 248, 351
 - Python, 345
- R**
- R (reset), 277, 322
 - radiator, 254, 273
 - radioelektronika, 132
 - radiotechnika, 132
 - RAM, 332
 - Random Access Memory, 332
 - Raspberry Pi, 345, 346, 348
 - GPIO, 345
 - obciążalność wyjść, 350
 - poziomy napięcie, 350
 - programowanie, 345, 348
 - Python, 345, 348
 - Raspbian, 345
 - raster, 49
 - rdzeń, 107, 111, 134
 - Read Only Memory, 332
 - reaktancja
 - indukcyjna, 118
 - pojemnościowa, 118
 - zespólna, 121
 - rejestr, 330
 - asynchroniczny, 330
 - przesuwający, 330
 - rewersyjny, 330
 - równoległy, 330, 335
 - synchroniczny, 330
 - szeregowy, 330
 - rekurencja, 289, 335
 - relaksacja, 114
 - Renard, szereg (ciąg), 51
 - reset, 277, 322
 - rezonans napięć, 121
 - rezystancja, 39, 43, 51, 141
 - dren-źródło, 238
 - dynamiczna, 150
 - diody tunelowej, 162
 - ujemna, 143, 162
 - kod barwny (paskowy), 53
 - małosygnałowa, 150
 - obciążenie, 67
 - obciążenie źródła, 69
 - statyczna, 147, 150
 - sterowana, 234

- wejściowa, 74, 75
 - wzmacniacza operacyjnego, 266
- wewnętrzna, 149
 - przyrządu pomiarowego, 78
 - źródła, 66, 67, 71, 74
- wielkosygnałowa, 150
- właściwa, 43
- wyjściowa, 74, 75
 - wzmacniacza operacyjnego, 266
- zapis wartości, 52
- zastępcza, 56
- rezystor, 39, 50, 107, 121, 142
 - emiterowy, 192, 195, 199, 202, 206, 213, 217, 219
 - kod barwny (paskowy), 53
 - moc strat, 54
 - nieliniowy, 50, 141
 - ograniczający prąd diody, 158, 159
 - podciągający, 222
 - pull-down, 221, 347
 - pull-up, 222
 - symbol, 50
 - ściągający, 221
 - tolerancja wartości, 52
 - współczynnik temperaturowy, 54
 - źródłowy, 239, 241
- rezystory, połączenie
 - mieszane, 58
 - równoległe, 57
 - szeregowe, 56
- rezystywność, 39, 43
- RMS, 98
- rodzina charakterystyk, 180, 232
- ROM, 332
- root mean square, *zob.* RMS
- rozdzielczość, 77
 - przyrządu pomiarowego (pomiaru), 77
- rozdzielność
 - alternatywy względem koniunkcji, 296
 - koniunkcji względem alternatywy, 296
- rozkaz procesora, 343
- rozładowanie kondensatora, 113, 114
- rozmagnesowanie cewki, 115
- rozmiar przestrzeni adresowej, 331
- rozwiązywanie obwodów, 79, 145
 - elementarnym składaniem, 84
- metoda
 - praw Kirchhoffa, 80
 - superpozycji, 85
- nieliniowych, 145
 - metoda graficzna, 146
 - metoda praw Kirchhoffa, 145
 - przybliżone, 147
- przez przekształcanie źródeł, 83
- symulacje numeryczne, 13, 145
- z wykorzystaniem twierdzenia
 - Thevenina, 82
- rozwiniecie Taylora, 24
- równanie przestępne, 145
- równowaga źródeł, 72, 73
 - prądu i napięcia, 68, 73, 83
- różniczkowanie, 17, 20
- RPi, 345
- ruch
 - termiczny ładunków, 35
 - uporządkowany ładunków, 36
- ruchliwość, 38, 152
- rząd filtru, 130, 267
- S**
- S (*jedn.*), 38, 43
- S (set), 277, 322
- samoindukcja, 113
- selektywność filtru, 130
- SEM, 40, 66
- separacja galwaniczna, 135, 137
- seria
 - 4000, 301
 - 7400, 300, 323
 - CMOS (C), 303
 - o niskim poborze energii (L), 302
 - pośrednicząca (CT), 303
 - szybka (H), 302
 - z tranzystorami Schottky'ego (S), 302
 - zaawansowana (A), 302
 - zaawansowana z tranzystorami Schottky'ego (F, AS), 302
- set, 277, 322
- Si, 152
- sieć elektroenergetyczna, 137, 163
- siemens, 38, 43, 234
- signal to noise ratio, *zob.* stosunek sygnał/szum
- silnik prądu stałego, 248
- siła elektromotoryczna, 40, 66, 73
- simens, 38, 43
- skala logarytmiczna (decybelowa), 88
- składowa
 - harmoniczna, 103
 - stała, 97, 99, 103, 133
 - usunięcie, 133, 136
- słowo maszynowe, 286, 331
- solenoid, 109
- sprawność wzmacniacza, 213, 214
- sprężenie zwrotne, 217
 - dodatnie, 218, 273
 - dodatnie przerzutnika Schmitta, 226
 - ujemne, 204, 218, 219, 255
 - emiterowe, 219
 - kolektorowe, 219
 - napięciowo-równoległe, 219
 - prądowo-szeregowe, 219
 - źródłowe, 240
 - w układach cyfrowych, 319, 320
- stabilizacja
 - napięcia, 142, 157, 159, 160, 204

- prądu, 142, 262
- punktu pracy, 195, 208, 244
- stabilizator, 159
 - 78XX, 273
 - dopuszczalny prąd wyjściowy, 273
 - moc strat, 274
 - radiator, 273
 - regulacja napięcia wyjściowego, 274
 - zwiększenie obciążalności, 275
 - źródło prądu, 275
 - 79XX, 274
 - komplementarny, 274
 - LM317, 273
 - napięcia, 159, 204, 217
 - scalony, trójkąciowy, 273–275
 - ze sprzężeniem zwrotnym, 204
- stała
 - Boltzmann, 153
 - czasowa, 113, 132
 - członu RC, 113, 264
 - członu RL, 115
- stan
 - 0, 283, 286
 - 1, 283, 286
 - niski, 283, 286, 300
 - niski (L), 269, 283
 - pracy tranzystora, *zob.* obszar, pracy tranzystora
 - rozwarcia źródła, 63, 69, 71, 72
 - wysoki, 283, 286, 300
 - wysoki (H), 269, 283
 - zwarcia źródła, 63, 69, 71, 72
- sterowanie
 - obciążeniem, 187, 221, 244
 - PWM, 248
 - moc strat, 248
 - silnikiem prądu stałego, 248
- stopień końcowy mocy, 211, 213, 215
 - kompensacja temperaturowa, 217
 - sprawność, 213, 214
 - sterowanie, 216
- stosunek sygnał/szum, 101
- stratność
 - cewki, 111
 - kondensatora, 110
- styczna do charakterystyki, 150
- styk, 136
 - nadpalanie, 137
 - normalnie
 - otwarty, 49, 136
 - zamknięty, 49, 136
 - przełączny, 49
 - wspólny, 136
- suma (*log.*), 294
- sumator, 259
- superbeta, 202
- sygnał, 93, 94
 - amplituda, 95
 - cyfrowy, 292
 - deterministyczny, 94
 - faza, 95, 96
 - harmoniczny, 94, 95, 103, 172
 - tłumiony, 100
 - modulowany, 102
 - częstotliwość, 169
 - narastający
 - eksponencjalnie, 100
 - liniowo, 100
 - z ograniczeniem, 100
 - nieokresowy, 94, 100, 106
 - niesinusoidalny, 94
 - nośny, 102
 - okresowy, 94
 - opadający eksponencjalnie, 100
 - periodyczny, *zob.* sygnał, okresowy
 - piłokształtny, 96
 - charakterystyka fazowa, 104
 - widmo amplitudowe, 104
 - poliharmoniczny, 94
 - prostokątny, 96
 - przemienny, 97
 - schodkowy, 100
 - sinusoidalny, 94, 95, 172
 - stochastyczny, 94
 - trójkątny, 96
 - zależność czasowa, 93
- sygnały, klasyfikacja, 94
- system
 - binarny, *zob.* system, dwójkowy
 - dwójkowy, 285–287
 - dziesiętkowy, 284, 285
 - dziesiętny, *zob.* system, dziesiętkowy
 - heksagonalny, *zob.* system, szesnastkowy
 - liczbowy, 284
 - baza (podstawa), 284, 285
 - ósemkowy, 287
 - szesnastkowy, 287
 - szóstkowy, 284
 - wbudowany, 341
 - język programowanie, 341
 - kroskompilator, 344
 - obciążalność wyjść, 348
 - program, 342
 - programowanie, 341
- szereg
 - Fouriera, 103, 104
 - Renarda, 51
 - Taylora, 24, 241
 - wartości, 51
- szpilka, 100, 106, 113, 116
- szum, 94, 101
 - srutowy, 101
 - termiczny, 101
 - widmo, 101
- szybkość narastania napięcia wyjściowego
 - wzmacniacza operacyjnego, 267

- szyna
 adresowa, 343
 danych, 343
- Ś
- środowisko programistyczne zintegrowane, 345
- T
- tablica
 Karnaugh, 307–309
 stanów, 292, 305–308
 komparatora drabinkowego, 270
 komparatora okienkowego, 271
 przerzutnika D, 327
 przerzutnika JK, 326
 przerzutnika RS, 322
 przerzutnika T, 328
- Taylor, rozwinięcie (szereg), 24
- techniczny pomiar rezystancji, 78
- technika cyfrowa, 299
 bipolarna, 299
 DCTL, 301
 DTL, 301
 ECL, 302
 RTL, 301
 TTL, 300–303
 zasilanie, 302
 poziomy napięcie, 299, 300
 unipolarna, 299
 CMOS, 301–303
 zasilanie, 303
- termistor NTC, 152
- tętnienia, 110, 166
 filtrowanie, 167
 kondensator filtrujący, 167
 prostownika
 dwupołwkowego, 167
 jednopołwkowego, 167
- THD, 173
- tłumienie, 74, 88
 amplitudowe, 126
 drgań styków, 323
 mocy, 125
 zespolone, 123
- tłumik, 74, 89, 90, 171
- tolerancja, 52
- total harmonic distortion, *zob.* THD
- tożsamości algebry Bool'a, 296
- tożsamość logiczna, 293
- transformator, 134
 odczepty, 136, 164
 przekładnia, 135
 separacyjny, 135
 sieciowy, 163
 symbol, 136
 z dzielonym uzwojeniem wtórnym, 164
- Transistor Transistor Logic, 301
- transkoder, 290
- transkonduktancja tranzystora unipolarnego, 234
 dynamiczna, 238
- transmisja
 mocy, 125
 napięciowa, 126
 moduł, 127, 129
 zespolona, 127, 129
 sygnału, 126
 szeregowa, 312, 350
- tranzystor, 88, 283
 bipolarny, 175, 229, 239, 299
 baza, 175, 180
 β , 177, 179, 183
 charakterystyka przejściowa, 180, 181
 charakterystyka wyjściowa, 180, 181
 częstotliwość graniczna, 196
 Darlington, 202, 203, 253
 dopuszczalna moc strat, 183
 dopuszczalne napięcie
 kolektor-emiter, 183
 dopuszczalny prąd kolektora, 183
 emiter, 175, 180
 h_{21E} , h_{21e} , h_{FE} , h_{fe} , 178
 kolektor, 175, 180
 npn, 175–177, 183
 obszar aktywny, 177, 182, 185, 239, 302
 obszar nasycenia, 179, 182, 185, 283, 302
 obszar odcięcia, 177, 182, 185, 283
 obszar zatkania (*pot.*), *zob.* tranzystor, bipolarny, obszar odcięcia
 pnp, 175–177, 183
 potencjometryczne zasilanie bazy, 191
 punkt pracy, 191, 192
 schemat zastępczy, 178, 179
 sterowanie obciążeniem, 187, 188
 symbol, 175
 układ wspólnego emitera, 190
 układ wspólnego kolektora, 190
 układ wspólnej bazy, 190
 wzmocnienie prądowe, 177, 179, 183
 zasada działania, 177
- końcowy mocy, 211
- podwójny, 201
- polowy, 229
- Schottky'ego, 302
 symbol, 302
- unipolarny, 229, 230, 239, 283, 299, 302
 bramka, 230
 charakterystyka przejściowa, 233, 234, 236
 charakterystyka wyjściowa, 232, 233, 235, 236
 dopuszczalna moc strat, 239
 dopuszczalne napięcie bramka-źródło, 239

- dopuszczalne napięcie dren-źródło, 239
- dopuszczalny prąd drenu, 239
- dren, 230
- kanał, 230
- ładunki statyczne, 231
- napięcie progowe, 236
- normalnie wyłączony, 232
- normalnie załączony, 232
- obszar liniowy, 234, 283
- obszar nasycenia, 234, 239
- obszar odcięcia, 234
- podłoże, 232
- potencjometryczne zasilanie bramki, 239
- prąd drenu I_{DSS} , 236, 237, 240, 241
- punkt pracy, 239
- rezystancja dren-źródło, 238
- rezystor źródłowy, 239, 241
- symbol, 231
- transkonduktancja, 234, 238
- układ wspólnego drenu, 241
- układ wspólnego źródła, 243
- wysterowanie, 234, 235, 238
- z izolatorem z tlenku metalu, 231
- z izolowaną bramką, 231, 232, 244
- z kanałem n, 230, 245
- z kanałem p, 230, 245
- z kanałem wzbogacanym, 232, 235, 237, 244, 245, 249
- z kanałem zubażanym, 232, 235, 236
- złączowy, 231, 235, 236
- źródło, 230
- tranzystory komplementarne, 214, 246
- TRMS, 99
- TRUE, 286
- TrueRMS, 99
- TTL, 301–303
- twierdzenie
 - Nortona, 73
 - Thevenina, 72, 73, 75, 82, 121, 145, 192
 - dla prądów harmoniczych, 122
- U**
- układ
 - całkujący, 131, 263, 264
 - cyfrowy, 283, 286, 292, 298–300, 341
 - klasyfikacja, 304
 - kombinacyjny, *zob.* układ, kombinacyjny
 - pośredniczący, 303
 - programowalny, 313, 315
 - sekwencyjny, *zob.* układ, sekwencyjny
 - czasowy 555, 276
 - budowa, 276
 - generator sygnału prostokątnego, 278
 - Darlingtona, 202, 203, 253
 - dwustanowy, 221, 229, 283
 - hybrydowy, 253
 - kombinacyjny, 292, 304, 305, 310, 313, 333, 335
 - implementacja z wykorzystaniem PLD, 315
 - implementacja za pomocą bramek, 309
 - implementacja za pomocą bramek NAND, 309
 - optymalizacja, 307
 - programowalny, 313
 - liniowy, *zob.* obwód, liniowy
 - mikroprocesorowy, 341, 343, 348
 - monolityczny, 253
 - odwracający fazę, 75
 - pośredniczący, 269
 - powtarzania prądu, 201
 - programowalny, 315, 341
 - przeciwpięciowy, 138
 - przełączający, 283, 300, 303, 324
 - z tranzystorem bipolarnym, 221, 222
 - z tranzystorem unipolarnym, 244
 - różniczkujący, 131, 263, 264
 - scalony, 253, 294
 - hybrydowy, 253
 - monolityczny, 253
 - sekwencyjny, 304, 319, 320
 - asynchroniczny, 304, 320, 321
 - synchroniczny, 304, 338
 - stabilizacyjny, *zob.* stabilizator sterowania, 342
 - superbeta, 202
 - wejścia/wyjścia, 343
 - wspólnego drenu (OD), 241
 - wspólnego emitera, 193
 - wzmocnienie napięciowe, 193, 195
 - wspólnego emitera (OE), 190
 - wspólnego kolektora (OC), 190, 211
 - wspólnego źródła
 - wzmocnienie napięciowe, 244
 - wspólnego źródła (OS), 243
 - wspólnej bazy (OB), 190
 - wykonawczy, 342
- upływność kondensatora, 110
- uzwojenie
 - pierwotne, 135
 - wtórne, 135
- V**
- V (*jedn.*), 32, 43
- VA (*jedn.*), 124
- var (*jedn.*), 124
- volt, 32, 43
- W**
- war, 124
- waraktor, 196
- wariakap, 196
- wartość

- chwilowa, 93
- międzyszczytowa, 97
- skuteczna, 93, 98
- szczytowa, 97
- średnia, 93, 97
 - sygnału wyprostowanego, 97
- wejście
 - adresowe, 310, 312, 313, 331
 - kasujące (R), 277, 322
 - strobuujące, 311
 - ustawiające (S), 277, 322
 - wzmacniacza operacyjnego
 - nieodwracające, 254, 255
 - odwracające, 254, 255
 - zegarowe, 304, 324, 325, 338
 - wyzwalane stanem, 325
 - wyzwalane zboczem, 325
 - wyzwalanie, 325
 - zliczające, 333
- węzeł, 48, 80
 - symbol, 48
- widmo, 103
 - amplitudowe, 104
 - ciągłe, 106
 - dyskretne, 104, 106
 - impulsu prostokątnego, 106
 - mocy, 104
 - sygnału, 103, 104
 - zespólone, 103, 104
- wielkość mierzona, 77
- wolt, 32, 43
- woltamper, 124
- woltomierz, 60, 78, 79
 - rzeczywisty, 78
- współbieżność, 342
- współczynnik
 - mocy, 124
 - odkształcenia, 173
 - temperaturowy rezystancji, 54
 - tętnień, 166
 - tłumienia składowej wspólnej, 210
 - tłumienia sygnału wspólnego, 267
 - wzmacnienia prądowego tranzystora, 177, 179, 183
 - zawartości harmonicznych, 173
 - zniekształceń
 - intermodulacyjnych, 173
 - nieliniowych, 173
- wtórnik, 75, 89, 90
 - emiterowy, 190, 192, 193, 202, 204
 - z ujemnym zasilaniem, 211
 - napięciowy, 193, 258
 - źródłowy, 241
- wyłącznik, 49, 187, 324
 - bistabilny, 49, 346
 - monostabilny, 49
 - symbol, 49
- wypełnienie sygnału prostokątnego, 96
- wysterowanie tranzystora unipolarnego, 234, 235, 238
- wyświetlacz siedmiosegmentowy, 314
- wzmacniacz, 74, 89, 90, 171
 - klasy A, 213, 248
 - sprawność, 213
 - klasy AB, 215, 248
 - stopień sterujący, 216
 - klasy B, 213, 214, 248
 - sprawność, 214
 - zniekształcenia, 214
 - klasy D, 248
 - logarytmujący, 261
 - mocy, 189
 - o charakterystyce wykładniczej, 261
 - odwracający fazę, 75
 - operacyjny, 254
 - CMRR, 267
 - częstotliwość graniczna, 268
 - częstotliwość progowa, 268
 - idealny, 254, 255
 - napięcie wspólne wejść, 267
 - nieodwracający, 257
 - nieodwracający, wzmacnienie, 257
 - niesymetryczne zasilanie, 264, 265
 - odwracający, 256, 260
 - odwracający, wzmacnienie, 257
 - prąd polaryzacji wejść, 266
 - prąd wyjściowy, 266
 - przetwornik prąd – napięcie, 262
 - realizacja funkcji logarytmicznej, 261
 - realizacja funkcji nieliniowych, 260
 - realizacja funkcji wykładniczej, 261
 - rezystancja wejściowa, 254, 266
 - rezystancja wyjściowa, 254, 266
 - rzeczywisty, 266
 - SR, 267
 - sumator, 259
 - symbol, 254
 - szybkość narastania napięcia
 - wyjściowego, 267
 - ujemne sprzężenie zwrotne, 255
 - układ całkujący, 263, 264
 - układ różniczkujący, 264
 - wejście nieodwracające, 254, 255
 - wejście odwracające, 254, 255
 - wejściowe napięcie
 - niezrównoważenia, 266
 - wejściowy prąd niezrównoważenia, 266
 - współczynnik tłumienia sygnału
 - wspólnego, 267
 - wtórnik napięciowy, 258
 - wzmacniacz różnicowy, 258
 - wzmacnienie, 254, 266
 - zakres napięć wejściowych, 265–267
 - zakres napięć wyjściowych, 265–267
 - źródło prądowe, 262, 263

przeciwsobny, 211, 213–215
różnicowy, 206, 207, 253, 254, 258
 asymetryczny, 208
 CMRR, 210, 211
 współczynnik tłumienia składowej
 wspólnej, 210, 211
 wzmocnienie napięciowe, 208, 209
 ze źródłem prądowym, 210
wielkiej częstotliwości, 190
wzmocnienie, 74, 88
 amplitudowe, 126
 prądowe tranzystora bipolarnego, 177,
 179, 183
 składowej wspólnej, 209
 sygnału różnicowego, 208, 209
 wzmacniacza operacyjnego, 266
wzory przybliżone, 23, 24

X

XNOR, *zob.* bramka, XNOR
XOR, *zob.* bramka, XOR

Z

zabezpieczenie przeciwprzepięciowe
 diodowe, 170
 RC, 138, 170
zacisk, 48
 symbol, 48
zakres pomiaru, 77
zapis pamięci, 331
zasada superpozycji, 85
zasada zachowania energii, 41
zasada zachowania ładunku, 34, 41
zasilanie, 64
 potencjometryczne
 bazy, 191, 199
 bramki, 239
zatrząsk, 327
zbocze sygnału, 97
zegar, 304, 324, 325, 338

zjawisko samoindukcji, 113
złącze, 153
 baza-emiter, 176–178, 192
 baza-kolektor, 176
 metal-półprzewodnik, 302
 metal-półprzewodnik, 163
 pn, 153, 176
 polaryzacja, 230
 w kierunku przewodzenia, 155
 w kierunku zaporowym, 155
zniekształcenia
 nieliniowe, 171
 wzmacniacza klasy B, 214
zwierciadło prądowe, 201, 253
zwój, 107

Ż

źródło
 napięcia
 idealne, 62, 65, 66
 rzeczywiste, 66
 symbol, 63, 65
 prąd zwarcia, 69, 70
 prądu, 262
 idealne, 63, 65
 pochłaniacz (*pot.*), 189
 sterowane, 262, 263
 symbol, 64, 65
 z diodą Zenera, 200
 z tranzystorem, 188, 199
 z tranzystorem pnp, 200
 ze stabilizatorem 78XX, 275
 stan rozwarcia, 63, 69, 71, 72
 stan zwarcia, 63, 69, 71, 72
 sterowane, 178
 tranzystora unipolarnego (S), 230

Ż

żarówka, 137, 142, 221, 222, 244

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

Wkrocz w fascynujący świat elektroniki!

Książka, napisana z myślą o początkujących, powstała na podstawie wykładów i zajęć laboratoryjnych prowadzonych przez autora dla studentów kierunków nielektrycznych. Składa się z trzynastu rozdziałów zgrupowanych w trzech częściach: repetytoria, elektronika analogowa i elektronika cyfrowa.

Pierwszą, powtórkową część publikacji wypełniają niezbędne informacje z matematyki, wykraczające nieco poza program szkoły średniej. Celem jest przypomnienie takich zagadnień jak różniczkowanie, całkowanie, liczby zespolone, a także podstawowej wiedzy o prądzie elektrycznym, by przejść od fundamentalnych pojęć fizyki i elektrodynamiki do tych, które tworzą elementarny język elektrotechniki. Jest tu więc mowa o absolutnych podstawach elektroniki — prawach Kirchhoffa i Ohma w ujęciu zarówno mikro-, jak i makroskopowym.

To, co stanowi trzon drugiej części, czyli omówienie układów zawierających elementy czynne — tranzystory bipolarne i unipolarne, poprzedzono niezbędnymi do pełnego zrozumienia tych zagadnień podstawami elektrotechniki ze szczególną rolą sygnałów zmiennoprądowych i obwodów z elementami nieliniowymi. Nie mogło zabraknąć wstępu do uniwersalnej techniki scalonej, w tym tak ważnych układów ze wzmacniaczami operacyjnymi.

Ostatnia część jest poświęcona elektronice cyfrowej. Oprócz klasycznych układów kombinacyjnych i sekwencyjnych omówiono w niej główne idee i przykłady zastosowania systemów wbudowanych.

W zamyśle Marcina Olszewskiego podręcznik stanowi jedynie wprowadzenie w świat elektroniki. Trudniejsze kwestie autor pozostawił dla dociekliwych jako zadanie domowe.

Dzięki książce między innymi:

- zamienisz pojęcia znane z lekcji fizyki w szkole średniej na język elektrotechniki
- poznasz podstawy elektrotechniki w zakresie niezbędnym do rozumienia elektroniki
- zrozumiesz zasadę działania elementów czynnych i podstawowych układów tranzystorowych
- poznasz zastosowanie uniwersalnej techniki scalonej, w tym wzmacniaczy operacyjnych
- zdobędziesz podstawową wiedzę o pracy układów cyfrowych

Elektronika dla informatyków — od podstaw!

Marcin Olszewski — fizyk, nauczyciel akademicki z wieloletnim stażem. Elektroniką zafascynował się już w technikum, później realizował tę pasję, zarówno prowadząc zajęcia na uczelni, jak i wykonując doświadczenia w laboratorium fizycznym, gdzie znajomość elektroniki okazała się nieoceniona.

Helion



helion.pl



HELION SA
ul. Kościuszki 1c
44-100 Gliwice
tel.: 32 230 98 63
helion@helion.pl

KOD KORZYŚCI
Sięgnij po więcej! ▶



ISBN 978-83-283-8906-9



Cena: 79,00 zł