# Sztuka elektroniki,

Autor: Paul Horowitz, Winfield Hill

**Spis treści części 1**

Spis tablic / 12
Przedmowa / 13
Przedmowa do drugiego wydania angielskiego / 16
Przedmowa do pierwszego wydania angielskiego / 18

**ROZDZIAŁ 1**
Podstawy / 21
1.1. Wprowadzenie / 21
1.2. Napięcie, prąd i rezystancja / 22
1.2.1. Napięcie i prąd / 22
1.2.2. Zależność między napięciem i prądem: oporniki / 23
1.2.3. Dzielniki napięcia / 28
1.2.4. Źródła napięciowe i prądowe / 29
1.2.5. Układ równoważny Thévenina / 31
1.2.6. Rezystancja małosygnałowa / 35
1.2.7. Przykład: „Jest za gorąco!” / 36
1.3. Sygnały / 37
1.3.1. Sygnały sinusoidalne / 37
1.3.2. Amplitudy sygnałów i decybele / 38
1.3.3. Inne sygnały / 39
1.3.4. Poziomy logiczne / 41
1.3.5. Źródła sygnałów / 41
1.4. Kondensatory i układy prądu przemiennego / 42
1.4.1. Kondensatory / 42
1.4.2. Układy RC: zależność U i I od czasu / 46
1.4.3. Układy różniczkujące / 51
1.4.4. Układy całkujące (integratory) / 52
1.4.5. Nic nie jest doskonałe… / 54
1.5. Cewki indukcyjne i transformatory / 54
1.5.1. Cewki indukcyjne / 54
1.5.2. Transformatory / 57
1.6. Diody i układy z diodami / 58
1.6.1. Diody / 58
1.6.2. Prostowanie / 59
1.6.3. Filtrowanie napięć wyjściowych zasilaczy sieciowych / 60
1.6.4. Układy prostowników stosowane w zasilaczach sieciowych / 61

1.6.5. Stabilizatory / 63
1.6.6. Układowe zastosowania diod / 64
1.6.7. Obciążenie indukcyjne i zabezpieczenie diodowe / 67
1.6.8. Mały przerywnik: coś dobrego o cewkach / 69
1.7. Impedancja i reaktancja / 69
1.7.1. Analiza częstotliwościowa układów reaktancyjnych / 71
1.7.2. Reaktancja cewki indukcyjnej / 74
1.7.3. Napięcie i prąd jako liczby zespolone / 75
1.7.4. Reaktancje kondensatorów i cewek / 76
1.7.5. Uogólnione prawo Ohma / 76
1.7.6. Moc w układach reaktancyjnych / 77
1.7.7. Uogólniony dzielnik napięcia / 79
1.7.8. Filtry górnoprzepustowe RC / 79
1.7.9. Filtry dolnoprzepustowe RC / 81
1.7.10. Różniczkujące i całkujące układy RC w dziedzinie częstotliwości / 82
1.7.11. Cewki kontra kondensatory / 82
1.7.12. Wykresy wskazowe / 83
1.7.13. „Bieguny” i decybele na oktawę / 83
1.7.14. Obwody rezonansowe / 84
1.7.15. Filtry LC / 86
1.7.16. Inne zastosowania kondensatorów / 87
1.7.17. Uogólnione twierdzenie Thévenina / 87
1.8. Składamy wszystko razem – radio AM / 87
1.9. Inne elementy pasywne / 89
1.9.1. Elementy elektromechaniczne: przełączniki / 89
1.9.2. Elementy elektromechaniczne: przekaźniki / 92
1.9.3. Złącza / 92
1.9.4. Wskaźniki / 96
1.9.5. Elementy regulowane / 97
1.10. Uwaga na pożegnanie: mylące oznakowania i mikroskopijne elementy / 99
1.10.1. Montaż powierzchniowy: radości i smutki / 99
Podsumowanie rozdziału 1 / 102

**ROZDZIAŁ 2**
Tranzystory bipolarne / 106
2.1. Wprowadzenie / 106
2.1.1. Pierwszy model tranzystora: wzmacniacz prądowy / 107
2.2. Kilka podstawowych układów z tranzystorami / 108
2.2.1. Klucz tranzystorowy / 108
2.2.2. Przykłady układów przełącznikowych / 113
2.2.3. Wtórnik emiterowy / 117
2.2.4. Wtórniki emiterowe jako stabilizatory napięcia / 121
2.2.5. Ustalanie punktu pracy wtórnika emiterowego / 122
2.2.6. Źródło prądowe / 125

2.2.7. Wzmacniacz ze wspólnym emiterem / 128
2.2.8. Wtórnikowy układ symetryzujący / 129
2.2.9. Transkonduktancja / 130
2.3. Model Ebersa-Molla a podstawowe układy tranzystorowe / 132
2.3.1. Poprawiony model tranzystora: wzmacniacz transkonduktancyjny / 132
2.3.2. Konsekwencje modelu Ebersa-Molla: praktyczne reguły projektowe / 133
2.3.3. O wtórniku emiterowym jeszcze raz / 135
2.3.4. Wzmacniacz ze wspólnym emiterem jeszcze raz / 136
2.3.5. Ustalanie punktu pracy wzmacniacza ze wspólnym emiterem / 139
2.3.6. Dygresja: tranzystor doskonały / 144
2.3.7. Lustra prądowe / 145
2.3.8. Wzmacniacze różnicowe / 147
2.4. Wybrane podzespoły wzmacniaczy / 152
2.4.1. Wyjściowe stopnie przeciwsobne / 152
2.4.2. Połączenie Darlingtona / 156
2.4.3. Bootstrap (kompensacja napięcia sygnału) / 159
2.4.4. Podział prądu między tranzystory bipolarne połączone równolegle / 160
2.4.5. Pojemności i efekt Millera / 161
2.4.6. Tranzystory polowe / 163
2.5. Ujemne sprzężenie zwrotne / 164
2.5.1. Wstęp do teorii sprzężenia zwrotnego / 164
2.5.2. Równanie na wzmocnienie / 165
2.5.3. Wpływ sprzężenia zwrotnego na parametry wzmacniacza / 166
2.5.4. Dwa ważne detale dotyczące układów ze sprzężeniem zwrotnym / 170
2.5.5. Dwa przykłady wzmacniaczy tranzystorowych ze sprzężeniem zwrotnym / 171
2.6. Kilka typowych układów tranzystorowych / 174
2.6.1. Stabilizator napięcia / 174
2.6.2. Układ stabilizacji temperatury / 175
2.6.3. Prosty tranzystorowo-diodowy układ logiczny / 175
Podsumowanie rozdziału 2 / 177

**ROZDZIAŁ 3**
Tranzystory polowe / 185
3.1. Wprowadzenie / 185
3.1.1. Właściwości tranzystorów polowych / 186
3.1.2. Rodzaje tranzystorów polowych / 189
3.1.3. Ogólne właściwości tranzystorów polowych / 191
3.1.4. Charakterystyki FET-ów / 193
3.1.5. Rozrzut produkcyjny parametrów tranzystora polowego / 195
3.1.6. Podstawowe układy z FET-ami / 197
3.2. Układy liniowe z tranzystorami polowymi / 198
3.2.1. Zestaw reprezentatywnych JFET-ów: krótki przegląd / 198
3.2.2. JFET-owe źródła prądowe / 200
3.2.3. Wzmacniacze z FET-ami / 205

3.2.4. Wzmacniacze różnicowe / 214
3.2.5. Generatory / 219
3.2.6. Wtórniki źródłowe / 219
3.2.7. FET-y jako oporniki o zmiennej rezystancji / 226
3.2.8. Prąd bramki tranzystorów polowych / 228
3.3. Więcej o JFET-ach / 231
3.3.1. Charakterystyki przejściowe JFET-ów / 232
3.3.2. Charakterystyki wyjściowe: konduktancja wyjściowa / 234
3.3.3. Zależność transkonduktancji od prądu drenu / 235
3.3.4. Zależność transkonduktancji od napięcia drenu / 237
3.3.5. Pojemności JFET-ów / 237
3.3.6. Dlaczego wzmacniacze z JFET-ami (a nie z MOS-ami)? / 238
3.4. FET-y jako klucze / 238
3.4.1. FET-owe klucze analogowe / 239
3.4.2. Niedoskonałości kluczy z FET-ami / 246
3.4.3. Kilka układów z FET-owymi kluczami analogowymi / 255
3.4.4. Klucze MOS w układach cyfrowych / 258
3.5. MOS-y mocy / 261
3.5.1. Duża impedancja, stabilność termiczna / 262
3.5.2. Parametry kluczy MOS mocy / 263
3.5.3. Sterowanie kluczami mocy za pomocą sygnałów cyfrowych / 275
3.5.4. Problemy związane z kluczami MOS mocy / 280
3.5.5. MOS kontra tranzystor bipolarny jako klucz silnoprądowy / 286
3.5.6. Kilka układów z MOS-ami mocy / 288
3.5.7. IGBT-y i inne półprzewodnikowe elementy mocy / 295
3.6. Liniowe zastosowania MOS-ów / 297
3.6.1. Wzmacniacz wysokonapięciowy / 297
3.6.2. Kilka układów z MOS-ami ze zubożanym kanałem / 299
3.6.3. Równoległe łączenie MOS-ów / 303
3.6.4. Przebicie cieplne / 306
Podsumowanie rozdziału 3 / 316

**ROZDZIAŁ 4**
Wzmacniacze operacyjne / 321
4.1. Wprowadzenie w dziedzinę wzmacniaczy operacyjnych – „element doskonały” / 321
4.1.1. Sprzężenie zwrotne i wzmacniacze operacyjne / 322
4.1.2. Wzmacniacze operacyjne / 323
4.1.3. Złote reguły / 324
4.2. Podstawowe układy ze wzmacniaczami operacyjnymi / 324
4.2.1. Wzmacniacz odwracający / 324
4.2.2. Wzmacniacz nieodwracający / 325
4.2.3. Wtórnik napięciowy / 326
4.2.4. Wzmacniacz różnicy napięć / 326
4.2.5. Źródła prądowe / 327

4.2.6. Wzmacniacze całkujące (integratory) / 331
4.2.7. Ważne zalecenia dotyczące układów ze wzmacniaczami operacyjnymi / 332
4.3. Inne układy ze wzmacniaczami operacyjnymi / 333
4.3.1. Układy liniowe / 333
4.3.2. Układy nieliniowe / 339
4.3.3. Generator fali trójkątnej / 343
4.3.4. Układ do testowania napięcia zaciskającego kanał / 344
4.3.5. Generator impulsów o regulowanej szerokości / 346
4.3.6. Aktywny filtr dolnoprzepustowy / 347
4.4. Szczegółowy przegląd właściwości wzmacniacza operacyjnego / 347
4.4.1. Parametry rzeczywistych wzmacniaczy operacyjnych / 349
4.4.2. Wpływ niedoskonałości wzmacniacza operacyjnego na parametry układu / 361
4.4.3. Przykład: miliwoltomierz o dużej czułości / 367
4.4.4. Impedancja wyjściowa źródła prądowego a szerokości pasma i SR wzmacniacza operacyjnego / 369
4.5. Analiza wybranych układów ze wzmacniaczami operacyjnymi / 369
4.5.1. Aktywny detektor szczytowy / 369
4.5.2. Układ próbkująco-pamiętający / 371
4.5.3. Ogranicznik aktywny / 372
4.5.4. Przetwornik wartości bezwzględnej / 373
4.5.5. Wzmacniacz całkujący z bliska / 374
4.5.6. Układowe rozwiązanie problemu upływności FET-a / 376
4.5.7. Wzmacniacze różniczkujące / 377
4.6. Zasilanie wzmacniacza operacyjnego pojedynczym napięciem / 378
4.6.1. Ustalanie punktu pracy jednonapięciowych wzmacniaczy operacyjnych pracujących jako wzmacniacze napięć zmiennych / 379
4.6.2. Obciążenia pojemnościowe / 383
4.6.3. „Jednonapięciowe” wzmacniacze operacyjne / 384
4.6.4. Przykład: generator przestrajany napięciem / 386
4.6.5. Realizacja generatora: montaż przewlekany kontra powierzchniowy / 388
4.6.6. Detektor przejścia przez zero / 390
4.6.7. Tablica z parametrami wzmacniaczy operacyjnych / 391
4.7. Inne rodzaje wzmacniaczy i wzmacniaczy operacyjnych / 391
4.8. Kilka typowych układów ze wzmacniaczami operacyjnymi / 392
4.8.1. Wzmacniacz laboratoryjny ogólnego przeznaczenia / 392
4.8.2. Układ do wykrywania zwarć / 396
4.8.3. Wzmacniacz sygnału z czujnika prądu / 398
4.8.4. Całkujący monitor dawki promieniowania UV / 400
4.9. Kompensacja częstotliwościowa wzmacniaczy ze sprzężeniem zwrotnym / 403
4.9.1. Zależność wzmocnienia i przesunięcia fazy od częstotliwości / 404
4.9.2. Metody częstotliwościowej kompensacji wzmacniaczy / 405
4.9.3. Charakterystyki częstotliwościowe czwórnika sprzężenia zwrotnego / 408
Podsumowanie rozdziału 4 / 413

**ROZDZIAŁ 5**

Układy precyzyjne / 419
5.1. Metody projektowania precyzyjnych układów ze wzmacniaczami operacyjnymi / 420
5.1.1. Precyzja a dynamika układu / 420
5.1.2. Bilans błędów / 420
5.2. Przykład: miliwoltomierz jeszcze raz / 421
5.2.1. Wyzwanie: 10 mV, 1%, 10 MΩ, zasilanie pojedynczym napięciem 1,8 V / 421
5.2.2. Rozwiązanie: precyzyjne źródło prądowe ze wzmacniaczem operacyjnym z grupy RRIO / 422
5.3. Wnioski: bilans błędów, brakujące parametry / 425
5.4. Inny przykład: precyzyjny wzmacniacz z zerowaniem napięcia wyjściowego / 426
5.4.1. Opis układu / 427
5.5. Bilans błędów układu precyzyjnego / 429
5.5.1. Bilans błędów / 429
5.6. Błędy wprowadzane przez elementy bierne / 430
5.6.1. Oporniki ustalające wzmocnienie / 431
5.6.2. Kondensator pamięciowy / 431
5.6.3. Przełącznik uruchamiający proces zerowania / 433
5.7. Błędy wprowadzane przez obwód wejściowy wzmacniacza / 434
5.7.1. Impedancja wejściowa / 434
5.7.2. Wejściowy prąd polaryzacji / 434
5.7.3. Wejściowe napięcie niezrównoważenia / 437
5.7.4. Tłumienie sygnału wspólnego / 440
5.7.5. Tłumienie zmian napięć zasilających / 440
5.7.6. Wzmacniacz z zerowaniem napięcia wyjściowego: błędy wejściowe / 440
5.8. Błędy wprowadzane przez obwód wyjściowy wzmacniacza / 442
5.8.1. Szybkość zmian napięcia wyjściowego: rozważania ogólne / 442
5.8.2. Szerokość pasma a czas ustalania odpowiedzi / 444
5.8.3. Zniekształcenia przejścia oraz impedancja wyjściowa / 448
5.8.4. Bufory dużej mocy o wzmocnieniu 1 V/V / 449
5.8.5. Błąd wzmocnienia / 449
5.8.6. Nieliniowość wzmocnienia / 450
5.8.7. Błąd fazy i „aktywna kompensacja” fazy / 452
5.9. Wzmacniacze operacyjne RRIO: dobre, złe i paskudne / 454
5.9.1. Kłopoty ze stopniem wejściowym / 454
5.9.2. Kłopoty ze stopniem wyjściowym / 456
5.10. Wybór precyzyjnego wzmacniacza operacyjnego / 459
5.10.1. „Siedem precyzyjnych wzmacniaczy operacyjnych” / 459
5.10.2. Liczba wzmacniaczy w obudowie / 466
5.10.3. Napięcie zasilania, zakres napięć wejściowych / 467
5.10.4. Praca z pojedynczym napięciem zasilania / 467
5.10.5. Napięcie niezrównoważenia / 468
5.10.6. Napięcie szumu / 469
5.10.7. Prąd polaryzacji / 471

5.10.8. Prąd szumu / 473
5.10.9. CMRR i PSRR / 475
5.10.10. GBW, fT, SR i „m” oraz czas ustalania odpowiedzi / 476
5.10.11. Zniekształcenia nieliniowe / 477
5.10.12. „Dwa z trzech to nie jest źle”: tworzenie doskonałego wzmacniacza operacyjnego / 480
5.11. Wzmacniacze z autozerowaniem (z przerywaczową stabilizacją zera) / 482
5.11.1. Właściwości wzmacniaczy operacyjnych z autozerowaniem / 483
5.11.2. Kiedy użyć wzmacniacza operacyjnego z autozerowaniem / 487
5.11.3. Wybieranie wzmacniacza z autozerowaniem / 487
5.11.4. Różności na temat autozerowania / 492
5.12. Projekty mistrzów: multimetry cyfrowe o dużej dokładności firmy Agilent / 494
5.12.1. To jest niewykonalne! / 495
5.12.2. Błąd – to jest wykonalne! / 495
5.12.3. Schemat blokowy: prosta architektura układu / 495
5.12.4. Stopień wejściowy 6,5-cyfrowego multimetru 34401A / 496
5.12.5. Stopień wejściowy 7,5-cyfrowego multimetru 34420A / 498
5.13. Wzmacniacze różnicy napięć, różnicowe i pomiarowe: wprowadzenie / 501
5.14. Wzmacniacz różnicy napięć / 503
5.14.1. Podstawowe układy pracy / 503
5.14.2. Kilka zastosowań / 505
5.14.3. Więcej o niektórych parametrach / 509
5.14.4. Odmiany układowe / 514
5.15. Wzmacniacz pomiarowy / 516
5.15.1. Pierwszy (lecz naiwny) pomysł / 516
5.15.2. Klasyczny wzmacniacz pomiarowy z trzema wzmacniaczami operacyjnymi / 517
5.15.3. Rozważania na temat stopnia wejściowego / 518
5.15.4. Wzmacniacz pomiarowy własnej konstrukcji / 521
5.15.5. Wariacje na temat skutecznej ochrony wejścia / 523
5.16. Rozmaitości o wzmacniaczach pomiarowych / 524
5.16.1. Prąd wejściowy i szum / 525
5.16.2. Tłumienie sygnału wspólnego / 525
5.16.3. Impedancja źródła a CMRR / 529
5.16.4. EMI i ochrona wejścia / 533
5.16.5. Usuwanie napięcia niezrównoważenia i maksymalizacja CMRR / 533
5.16.6. Dołączanie obciążenia / 534
5.16.7. Polaryzacja wejść wzmacniacza / 534
5.16.8. Zakres napięć wyjściowych / 534
5.16.9. Przykład zastosowania: źródło prądowe / 534
5.16.10. Inne konfiguracje / 535
5.16.11. Wzmacniacze pomiarowe przerywaczowe i z autozerowaniem / 538
5.16.12. Wzmacniacze pomiarowe o programowalnym wzmocnieniu / 538
5.16.13. Wytwarzanie wyjściowego sygnału różnicowego / 541
5.17. Wzmacniacze w pełni różnicowe / 541

5.17.1. Wzmacniacze różnicowe: pojęcia podstawowe / 549
5.17.2. Przykład zastosowania wzmacniacza różnicowego: szerokopasmowe łącze analogowe / 552
5.17.3. Przetworniki A/C z wejściem różnicowym / 552
5.17.4. Dopasowanie impedancji / 556
5.17.5. Kryteria wyboru wzmacniacza różnicowego / 557
Podsumowanie rozdziału 5 / 562

**ROZDZIAŁ 6**
Filtry / 567
6.1. Wprowadzenie / 567
6.2. Filtry pasywne / 567
6.2.1. Charakterystyki częstotliwościowe filtrów RC / 567
6.2.2. O doskonałych właściwościach filtrów LC / 570
6.2.3. Kilka prostych przykładów / 570
6.2.4. Filtry aktywne: przegląd / 575
6.2.5. Podstawowe parametry filtrów / 578
6.2.6. Rodzaje filtrów / 580
6.2.7. Realizacje filtrów / 586
6.3. Układy filtrów aktywnych / 586
6.3.1. Układy ZNSN / 588
6.3.2. Projektowanie filtrów ZNSN za pomocą uproszczonej tablicy / 588
6.3.3. Filtry modelujące zmienne stanu / 592
6.3.4. Filtry z czwórnikiem podwójne T / 597
6.3.5. Filtry wszechprzepustowe / 598
6.3.6. Filtry z przełączanymi kondensatorami / 599
6.3.7. Cyfrowe przetwarzanie sygnałów / 603
6.3.8. Rozmaitości na temat filtrów / 607
Podsumowanie rozdziału 6 / 608

**ROZDZIAŁ 7**
Generatory i układy czasowe / 611
7.1. Generatory / 611
7.1.1. Ogólnie o generatorach / 611
7.1.2. Generatory relaksacyjne / 611
7.1.3. 555 – klasyczny czasowy układ scalony / 615
7.1.4. Inne scalone generatory relaksacyjne / 620
7.1.5. Generatory sygnału sinusoidalnego / 625
7.1.6. Generatory kwarcowe / 635
7.1.7. Większa stałość częstotliwości: generatory TCXO, OCXO i jeszcze lepsze / 645
7.1.8. Synteza częstotliwości: DDS i PLL / 646
7.1.9. Generatory kwadraturowe / 649
7.1.10. Drżenie okresu generatora (jitter) / 653
7.2. Układy czasowe / 654

7.2.1. Impulsy wyzwalane skokiem napięcia / 654
7.2.2. Przerzutniki monostabilne / 658
7.2.3. Przykład zastosowania przerzutników monostabilnych: układ ograniczania szerokości impulsu i współczynnika wypełnienia / 664
7.2.4. Układy czasowe z licznikami cyfrowymi / 665
Podsumowanie rozdziału 7 / 670

**ROZDZIAŁ 8**
Elementy i układy niskoszumowe / 674
8.1. „Szum" / 675
8.1.1. Szum cieplny (Johnsona, Nyquista) / 676
8.1.2. Szum śrutowy / 677
8.1.3. Szum typu 1/f (szum migotania, szum strukturalny) / 678
8.1.4. Szum wybuchowy / 679
8.1.5. Szum o ograniczonym pasmie / 680
8.1.6. Zakłócenia / 681
8.2. Stosunek sygnał-szum oraz współczynnik szumu / 681
8.2.1. Widmowa gęstość mocy szumu i szerokość pasma / 681
8.2.2. Stosunek sygnał-szum / 682
8.2.3. Współczynnik szumu / 682
8.2.4. Temperatura szumowa / 683
8.3. Szum wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym / 684
8.3.1. Widmowa gęstość napięcia szumu en / 685
8.3.2. Widmowa gęstość prądu szumu in / 687
8.3.3. Napięcie szumu tranzystora bipolarnego jeszcze raz / 689
8.3.4. Przykład prostego projektu: głośnik jako mikrofon / 691
8.3.5. Szum śrutowy w źródłach prądowych i wtórnikach emiterowych / 692
8.4. Wyznaczanie en z wykresów współczynnika szumu F / 695
8.4.1. Krok 1: zależność F od IC / 695
8.4.2. Krok 2: zależność F od Rsyg / 696
8.4.3. Krok 3: obliczanie en / 696
8.4.4. Krok 4: widmo napięcia szumu en / 697
8.4.5. Widmo prądu szumu in / 697
8.4.6. Gdy nie masz możliwości wyboru punktu pracy układu / 698
8.5. Projektowanie układów niskoszumowych z tranzystorami bipolarnymi / 698
8.5.1. Przykład obliczenia współczynnika szumu / 699
8.5.2. Wykreślanie napięcia szumu wzmacniacza dla danych en i in / 700
8.5.3. Rezystancja szumowa / 700
8.5.4. Wykresy jako sposób porównania właściwości szumowych układów / 701
8.5.5. Niskoszumowe wzmacniacze z tranzystorami bipolarnymi: dwa przykłady / 702
8.5.6. Minimalizowanie szumu: tranzystory bipolarne, FET-y i transformatory / 704
8.5.7. Przykład projektu: przedwzmacniacz – „detektor błyskawic" za 40 centów / 704
8.5.8. Wybór niskoszumowego tranzystora bipolarnego / 708
8.5.9. Wyzwanie projektowe: ekstremalnie niskoszumowy beztransformatorowy

przedwzmacniacz do mikrofonu wstęgowego / 717
8.6. Projektowanie układów niskoszumowych z JFET-ami / 721
8.6.1. Napięcie szumu złączowego tranzystora polowego / 722
8.6.2. Prąd szumu złączowego tranzystora polowego / 727
8.6.3. Przykład projektu: niskoszumowy szerokopasmowy wzmacniacz hybrydowy z JFET-ami / 728
8.6.4. Projekty mistrzów: niskoszumowy przedwzmacniacz SR560 / 730
8.6.5. Wybieranie JFET-ów do układów niskoszumowych / 733
8.7. Pojedynek między tranzystorami bipolarnymi a tranzystorami polowymi przedstawiony na wykresach / 735
8.7.1. Szum tranzystorów MOS / 737
8.8. Szumy we wzmacniaczu różnicowym i we wzmacniaczu ze sprzężeniem zwrotnym / 738
8.9. Szum w układach ze wzmacniaczami operacyjnymi / 739
8.9.1. Przewodnik po tablicy 8.3: wybieranie niskoszumowych wzmacniaczy operacyjnych / 739
8.9.2. Współczynnik tłumienia zmian napięcia zasilającego / 762
8.9.3. Podsumowanie: wybór niskoszumowego wzmacniacza operacyjnego / 762
8.9.4. Niskoszumowe wzmacniacze pomiarowe i wzmacniacze wizyjne / 763
8.9.5. Niskoszumowe hybrydowe wzmacniacze operacyjne / 763
8.10. Transformatory sygnałowe / 765
8.10.1. Niskoszumowy wzmacniacz szerokopasmowy z transformatorem w obwodzie sprzężenia zwrotnego / 766
8.11. Szum we wzmacniaczach transimpedancyjnych / 767
8.11.1. Problem ze stabilnością: podsumowanie / 768
8.11.2. Szum wejściowy wzmacniacza / 768
8.11.3. Problem szumu enC / 769
8.11.4. Szum wzmacniacza transrezystancyjnego / 770
8.11.5. Przykład: szerokopasmowy JFET-owy wzmacniacz sygnału z fotodiody / 771
8.11.6. Szum kontra wzmocnienie we wzmacniaczu transimpedancyjnym / 773
8.11.7. Ograniczanie pasma sygnału wyjściowego wzmacniacza transimpedancyjnego / 774
8.11.8. Kompozytowe wzmacniacze transimpedancyjne / 775
8.11.9. Redukcja pojemności źródła sygnału techniką bootstrapowania / 779
8.11.10. Separacja pojemności źródła sygnału za pomocą układu ze wspólną bazą / 781
8.11.11. Wzmacniacz transimpedancyjny z pojemnościowym sprzężeniem zwrotnym / 786
8.11.12. Przedwzmacniacz skaningowego mikroskopu tunelowego / 786
8.11.13. Osprzęt do testowania przydatny do kompensacji i kalibracji / 789
8.11.14. Uwaga końcowa / 789
8.12. Pomiary parametrów szumowych i generatory szumu / 789
8.12.1. Pomiary bez użycia generatora szumu / 790
8.12.2. Przykład: układ do pomiaru parametrów szumowych tranzystora bipolarnego / 791
8.12.3. Pomiary z użyciem generatora szumu / 791
8.12.4. Generatory szumu i generatory sygnałowe / 794
8.13. Ograniczanie szerokości pasma oraz pomiary wartości skutecznej napięcia / 798
8.13.1. Ograniczanie szerokości pasma / 798

8.13.2. Obliczanie pasmowego napięcia szumu / 801
8.13.3. Asymetryczna filtracja niskoczęstotliwościowego szumu wzmacniacza operacyjnego / 803
8.13.4. Wyznaczanie częstotliwości granicznej 1/f / 804
8.13.5. Pomiar napięcia szumu / 806
8.13.6. Pomiar prądu szumu / 808
8.13.7. Inny sposób: zmontuj własny przyrząd pracujący w zakresie pojedynczych fA/√("HZ" ) / 811
8.13.8. Szumowe rozmaitości / 814
8.14. Poprawa stosunku S/N przez zmniejszenie szerokości pasma / 815
8.14.1. Detekcja synchroniczna / 816
8.15. Szum zasilacza / 819
8.15.1. Powielacz pojemności / 820
8.16. Zakłócenia, ekranowanie i uziemianie / 821
8.16.1. Sygnały zakłócające / 821
8.16.2. Problem mas / 825
8.16.3. Problem mas przy łączeniu przyrządów ze sobą / 826
Ćwiczenia dodatkowe do rozdziału 8 / 833
Podsumowanie rozdziału 8