

## Opis

Po dwudziestu pięciu latach nowe, gruntownie zmienione polskie wydanie cieszącej się ogromnym powodzeniem „Sztuki elektroniki”, powszechnie uznanej za najlepszy podręcznik, a zarazem vademecum projektowania analogowych i cyfrowych układów elektronicznych. Poprzednie wydania tej książki, przetłumaczono na osiem języków i trafiły do ponad miliona nabywców na całym świecie. Sztuki elektroniki autorzy uczą, pokazując metody stosowane w praktyce przez inżynierów projektantów układów elektronicznych. Połączenie podstawowych praw, zasad opartych na doświadczeniu oraz niematematycznego ujęcia tematu ułatwia Czytelnikom zrozumienie, dlaczego i jak dany układ działa.

Paul Horowitz jest profesorem fizyki i elektroniki na Uniwersytecie Harvarda. Tam w 1974 roku zapoczątkował kurs elektroniki laboratoryjnej, z którego wyłoniła się „Sztuka elektroniki”. Oprócz projektowania układów i przyrządów elektronicznych prowadzi badania w dziedzinie astrofizyki obserwacyjnej, mikroskopii rentgenowskiej oraz interferometrii optycznej. Jest jednym z pionierów poszukiwań inteligentnych form życia pozaziemskiego (projekt SETI). Napisał około 200 artykułów i sprawozdań naukowych, zaprojektował wiele przyrządów badawczych i fotograficznych, jest konsultantem licznych przedsiębiorstw przemysłowych oraz instytucji państwowych,

Winfield Hill to prawdziwy guru w dziedzinie projektowania układów elektronicznych. Po przerwaniu studiów na kierunku Fizyka chemiczna na Uniwersytecie Harvarda i uzyskaniu tytułu inżyniera elektryka rozpoczął karierę inżynierską w Centrum Projektowania Układów Elektronicznych na tym uniwersytecie. Po latach zgłębiania arkanów elektroniki na Harvardzie założył firmę Sea Data Corporation, w której projektował przyrządy na potrzeby oceanografii fizycznej. W 1988 rozpoczął pracę w Rowland Institute for Science, który w 2003 roku połączył się z Uniwersytetem Harvarda. Jako dyrektor Laboratorium Elektroniki tego instytutu zaprojektował około 500 przyrządów naukowych. Ostatnio zajmuje się między innymi układami wysokonapięciowymi, pracującymi w zakresie częstotliwości radiowych, silnopięciowymi układami impulsowymi, wzmacniaczami niskoszumowymi oraz generatorami impulsowymi z tranzystorami MOS.

Książka ani w całości, ani we fragmentach nie może być skanowana, kserowana, powielana bądź rozpowszechniana za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, w tym również nie może być umieszczana ani rozpowszechniana w postaci cyfrowej zarówno w Internecie, jak i w sieciach lokalnych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

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. Wtórnik emiterowy jako stabilizator 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 przeciwobne /	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 zubożonym kanałem / 299
  - 3.6.3. Równoległe łączenie MOS-ów / 303
  - 3.6.4. Przebiecie 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 czwórnik 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 M $\Omega$ , 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  $e_n$  / 685
  - 8.3.2. Widmowa gęstość prądu szumu  $i_n$  / 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  $e_n$  z wykresów współczynnika szumu  $F$  / 695
  - 8.4.1. Krok 1: zależność  $F$  od  $I_C$  / 695
  - 8.4.2. Krok 2: zależność  $F$  od  $R_{syg}$  / 696
  - 8.4.3. Krok 3: obliczanie  $e_n$  / 696
  - 8.4.4. Krok 4: widmo napięcia szumu  $e_n$  / 697
  - 8.4.5. Widmo prądu szumu  $i_n$  / 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  $e_n$  i  $i_n$  / 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 złączonego tranzystora polowego / 722
- 8.6.2. Prąd szumu złączonego 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  $e_nC$  / 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  $fA/\sqrt{("HZ" )}$  / 811
  - 8.13.8. Szumowe różnice / 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

Spis treści części 2

Spis tablic / 12

## ROZDZIAŁ 9

Przetwarzanie i stabilizacja napięcia / 13

9.1. Samouczek: od diody Zenera do liniowego stabilizatora szeregowego / 14

9.1.1. Dodajemy sprzężenie zwrotne / 16

9.2. Podstawowe układy liniowych stabilizatorów napięcia z klasycznym elementem 723 / 18

9.2.1. Stabilizator napięcia typu 723 / 19

9.2.2. Kilka słów na obronę surowo ocenianego układu 723 / 21

9.3. Całkowicie scalone liniowe stabilizatory napięcia / 22

9.3.1. Klasyfikacja liniowych scalonych stabilizatorów napięcia / 22

9.3.2. Stabilizatory trzykońcówkowe o ustalonym napięciu wyjściowym / 22

9.3.3. Stabilizatory trzykońcówkowe o ustawialnym napięciu wyjściowym / 25

9.3.4. Stabilizator typu 317: wskazówki dla użytkownika / 27

9.3.5. Przykładowe układy z wykorzystaniem stabilizatora typu 317 / 33

9.3.6. Stabilizatory o zmniejszonym minimalnym napięciu we-wy / 36

9.3.7. Stabilizatory o prawdziwie małym minimalnym napięciu we-wy / 37

9.3.8. Stabilizatory 3-końcówkowe z wbudowanym źródłem prądu wzorcowego / 38

9.3.9. Porównanie minimalnych napięć we-wy różnych stabilizatorów / 39

9.3.10. Przykład stabilizatora dwunapięciowego / 47

9.3.11. Wybór stabilizatora liniowego / 48

9.3.12. Osobliwości stabilizatorów liniowych / 49

9.3.13. Filtracja szumu i tętnień / 54

- 9.3.14. Źródła prądowe / 55
- 9.4. Projektowanie z uwzględnieniem mocy i ciepła / 59
  - 9.4.1. Tranzystory mocy i rozpraszanie ciepła / 60
  - 9.4.2. Obszar bezpiecznej pracy / 65
- 9.5. Od gniazda sieciowego do wyjścia zasilacza niestabilizowanego / 66
  - 9.5.1. Elementy sieciowe / 67
  - 9.5.2. Transformator sieciowy / 70
  - 9.5.3. Elementy obwodu stałoprądowego zasilacza / 72
  - 9.5.4. Zasilacz niestabilizowanych napięć symetrycznych – test prawdy na stole laboratoryjnym! / 74
  - 9.5.5. Zasilacze liniowe kontra zasilacze impulsowe: tętnienia i zakłócenia / 75
- 9.6. Stabilizatory impulsowe i przetwornice napięcia stałego / 76
  - 9.6.1. Stabilizatory liniowe kontra stabilizatory impulsowe / 76
  - 9.6.2. Topologie przetwornic impulsowych / 78
  - 9.6.3. Bezcewkowe przetwornice impulsowe / 79
  - 9.6.4. Przetwornice z cewkami: topologie podstawowe bez izolacji we-wy / 85
  - 9.6.5. Przetwornica obniżająca napięcie / 91
  - 9.6.6. Przetwornica podwyższająca napięcie / 101
  - 9.6.7. Przetwornica odwracająca napięcie / 102
  - 9.6.8. Uwagi na temat przetwornic impulsowych bez izolacji we-wy / 103
  - 9.6.9. Tryby pracy stabilizatorów impulsowych: napięciowy i prądowy / 107
  - 9.6.10. Przetwornice impulsowe z transformatorami: informacje podstawowe / 109
  - 9.6.11. Przetwornica zaporowa / 109
  - 9.6.12. Przetwornica przepustowa / 112
  - 9.6.13. Przetwornice mostkowe / 113
- 9.7. Sieciowe przetwornice impulsowe / 115
  - 9.7.1. Stopień wejściowy przetwarzający napięcie przemiennie na napięcie stałe / 116

- 9.7.2. Stopień przetwarzania napięcia stałego na napięcie stałe / 118
- 9.8. Przykład rzeczywistego sieciowego impulsowego stabilizatora napięcia / 122
  - 9.8.1. Sieciowe stabilizatory impulsowe: obraz ogólny / 122
  - 9.8.2. Sieciowe stabilizatory impulsowe: sposób działania – opis ogólny / 123
  - 9.8.3. Sieciowe stabilizatory impulsowe: sposób działania – opis szczegółowy / 126
  - 9.8.4. Projekt wzorcowy / 131
  - 9.8.5. Podsumowanie: ogólne uwagi na temat sieciowych zasilaczy impulsowych / 132
  - 9.8.6. Kiedy stosować zasilacze impulsowe / 133
- 9.9. Inwertery i wzmacniacze impulsowe / 133
- 9.10. Wzorce napięcia / 135
  - 9.10.1. Diody Zenera / 135
  - 9.10.2. Wzorzec napięcia z tranzystorów bipolarnych / 144
  - 9.10.3. Wzorzec napięcia z JFET-ów / 146
  - 9.10.4. Wzorzec napięcia z tranzystorem MOS / 147
  - 9.10.5. Trzykońcówkowe precyzyjne wzorce napięcia / 147
  - 9.10.6. Szum wzorców napięcia / 148
  - 9.10.7. Wzorce napięcia: uwagi dodatkowe / 150
- 9.11. Komercyjne moduły zasilające / 152
- 9.12. Magazynowanie energii: baterie i kondensatory / 154
  - 9.12.1. Charakterystyki ogniw, baterii i akumulatorów / 155
  - 9.12.2. Wybór baterii lub akumulatora / 157
  - 9.12.3. Magazynowanie energii w kondensatorach / 157
- 9.13. Zasilacze: tematy dodatkowe / 160
  - 9.13.1. Zabezpieczenia nadnapięciowe / 160
  - 9.13.2. Poszerzanie zakresu napięć wejściowych / 164
  - 9.13.3. Ograniczanie prądu wyjściowego przez jego redukcję / 165
  - 9.13.4. Zewnętrzny tranzystor szeregowy / 167

9.13.5. Stabilizatory wysokonapięciowe / 168

Podsumowanie rozdziału 9 / 172

## ROZDZIAŁ 10

Technika cyfrowa / 179

10.1. Podstawy techniki cyfrowej / 179

10.1.1. Dyskretne czy analogowe? / 179

10.1.2. Stany logiczne / 180

10.1.3. Kody liczbowe / 182

10.1.4. Bramki i tablice prawdy / 186

10.1.5. Bramki z elementów dyskretnych / 189

10.1.6. Przykłady układów z bramkami / 190

10.1.7. Miejsce symbolu negacji stanu / 192

10.2. Scalone układy cyfrowe: CMOS i bipolarne (TTL) / 193

10.2.1. Wykaz powszechnie stosowanych bramek / 195

10.2.2. Budowa bramek scalonych / 196

10.2.3. Charakterystyki układów CMOS i bipolarnych (TTL) / 197

10.2.4. Układy z wyjściem trójstanowym i układy z otwartym kolektorem / 200

10.3. Układy kombinacyjne / 204

10.3.1. Tożsamości logiczne / 204

10.3.2. Minimalizacja i tablice Karnaugh'a / 205

10.3.3. Scalone układy kombinacyjne / 206

10.4. Układy sekwencyjne / 212

10.4.1. Układy z pamięcią: przerzutniki / 212

10.4.2. Przerzutniki synchroniczne / 213

10.4.3. Połączenie przerzutników i bramek: układy sekwencyjne / 218

10.4.4. Synchronizator / 222

10.4.5. Przerzutnik monostabilny /	224
10.4.6. Wytwarzanie pojedynczych impulsów za pomocą przerzutników i liczników /	225
10.5. Scalone układy sekwencyjne /	226
10.5.1. Zatraski i rejestry /	226
10.5.2. Liczniki /	227
10.5.3. Rejestry przesuujące /	231
10.5.4. Programowalne układy cyfrowe /	233
10.5.5. Różnorodne funkcje sekwencyjne /	234
10.6. Kilka typowych układów cyfrowych /	236
10.6.1. Licznik modulo n: przykład zależności czasowych /	236
10.6.2. Sekwencyjny układ sterowania wyświetlaczami LED /	239
10.6.3. Generator o programowalnej liczbie impulsów /	241
10.7. Projektowanie mikromocowych układów cyfrowych /	243
10.7.1. Utrzymanie niskiego poziomu mocy wydzielanej w układzie CMOS /	243
10.8. „Choroby” układów cyfrowych /	245
10.8.1. Problemy statyczne /	245
10.8.2. Problemy dynamiczne /	246
10.8.3. Wrodzone wady układów TTL i CMOS /	249
Ćwiczenia dodatkowe do rozdziału 10 /	253
Podsumowanie rozdziału 10 /	254

## ROZDZIAŁ 11

### Programowalne układy cyfrowe / 258

#### 11.1. Krótki rys historyczny / 258

#### 11.2. Sprzęt / 260

##### 11.2.1. Podstawowy układ rodziny PAL / 260

##### 11.2.2. Układy PLA / 263

- 11.2.3. Układy FPGA / 263
- 11.2.4. Pamięć konfiguracji / 265
- 11.2.5. Inne układy PLD / 266
- 11.2.6. Oprogramowanie / 266
- 11.3. Przykład: generator pseudolosowych bajtów / 266
  - 11.3.1. Sposób wytwarzania pseudolosowych bajtów / 267
  - 11.3.2. Realizacja za pomocą układów standardowych / 268
  - 11.3.3. Realizacja za pomocą układu programowalnego / 269
  - 11.3.4. Układ programowalny – tekstowe wprowadzanie danych (HDL) / 272
  - 11.3.5. Realizacja z użyciem mikrokontrolera / 277
- 11.4. Rady / 283
  - 11.4.1. Wybór technologii / 283
  - 11.4.2. Wybór z punktu widzenia potrzeb użytkownika / 284
- Podsumowanie rozdziału 11 / 286

## ROZDZIAŁ 12

- Transmisja sygnałów cyfrowych / 290
  - 12.1. Łączenie się z układami CMOS i TTL / 290
    - 12.1.1. Chronologia układów cyfrowych – krótki zarys historyczny / 290
    - 12.1.2. Charakterystyki wejściowe i wyjściowe / 296
    - 12.1.3. Łączenie ze sobą układów cyfrowych z różnych rodzin / 301
    - 12.1.4. Sterowanie wejściami układów cyfrowych / 305
    - 12.1.5. Zabezpieczanie wejść układów cyfrowych / 308
    - 12.1.6. Kilka uwag na temat obwodów wejściowych układów cyfrowych / 311
    - 12.1.7. Komparatory i wzmacniacze operacyjne jako źródła sygnałów wejściowych układów cyfrowych / 312
  - 12.2. Dygresja: obserwacja sygnałów cyfrowych / 315
  - 12.3. Komparatory / 316

- 12.3.1. Wyjścia / 316
- 12.3.2. Wejścia / 320
- 12.3.3. Inne parametry / 326
- 12.3.4. Inne przestrogi / 327
- 12.4. Łączenie układów cyfrowych z zewnętrznymi obciążeniami / 328
  - 12.4.1. Obciążenie zasilane dodatnim napięciem: sterowanie bezpośrednie / 328
  - 12.4.2. Obciążenie zasilane dodatnim napięciem: sterowanie pośrednie / 332
  - 12.4.3. Obciążenie zasilane ujemnym napięciem lub napięciem przemiennym / 334
  - 12.4.4. Zabezpieczanie kluczy mocy / 336
  - 12.4.5. Sprzęganie układów NMOS LSI / 340
- 12.5. Elementy optoelektroniczne: źródła światła / 344
  - 12.5.1. Diody LED: kontrolki i inne zastosowania / 344
  - 12.5.2. Diody laserowe / 352
  - 12.5.3. Wyświetlacze / 354
- 12.6. Elementy optoelektroniczne: detektory / 359
  - 12.6.1. Fotodiody i fototranzystory / 359
  - 12.6.2. Fotopowielacze / 361
- 12.7. Transoptory i przekaźniki / 362
  - 12.7.1. Transoptory z fototranzystorem na wyjściu (I) / 364
  - 12.7.2. Transoptory z wyjściem cyfrowym (II) / 365
  - 12.7.3. Transoptory – sterowniki MOS-ów i IGBT-ów (III) / 366
  - 12.7.4. Transoptory do zastosowań analogowych (IV) / 367
  - 12.7.5. Przekaźniki półprzewodnikowe z tranzystorem na wyjściu (V) / 369
  - 12.7.6. Przekaźniki półprzewodnikowe z tyrystorem/triakiem na wyjściu (VI) / 371
  - 12.7.7. Transoptory z wejściem przemiennoprądowym (VII) / 372
  - 12.7.8. Przerwyacze optyczne / 373
- 12.8. Optoelektronika: światłowodowe łącza cyfrowe / 374



- 12.8.1. TOSLINK / 374
- 12.8.2. Versatile Link / 376
- 12.8.3. Moduły do światłowodów szklanych ze złączami SC/ST / 377
- 12.8.4. Całkowicie scalone moduły nadawczo-odbiorcze do szybkiej transmisji światłowodowej / 378
- 12.9. Sygnały cyfrowe a długie przewody / 379
  - 12.9.1. Połączenia lokalne / 379
  - 12.9.2. Połączenia między płytkami / 381
- 12.10. Transmisja sygnałów cyfrowych za pośrednictwem kabli / 382
  - 12.10.1. Kable współosiowe (koncentryczne) / 382
  - 12.10.2. Właściwy sposób transmisji (I): dopasowanie falowe na końcu kabla / 384
  - 12.10.3. Kable symetryczne / 390
  - 12.10.4. RS-232 / 399
  - 12.10.5. Podsumowanie / 401
- Podsumowanie rozdziału 12 / 403

## ROZDZIAŁ 13

Na styku techniki analogowej i techniki cyfrowej / 410

- 13.1. Kilka uwag wstępnych / 411
  - 13.1.1. Podstawowe parametry przetworników C/A i A/C / 411
  - 13.1.2. Kody / 411
  - 13.1.3. Błędy przetwarzania / 411
  - 13.1.4. Przetworniki autonomiczne kontra wbudowane / 412
- 13.2. Przetworniki cyfrowo-analogowe (C/A) / 413
  - 13.2.1. Przetworniki C/A z łańcuchem oporników / 413
  - 13.2.2. Przetworniki C/A z drabinką R-2R / 414
  - 13.2.3. Przetworniki C/A z przetaczaniem prądów / 416
  - 13.2.4. Mnożące przetworniki C/A / 416

- 13.2.5. Wytwarzanie napięcia wyjściowego / 417
- 13.2.6. Sześć przetworników C/A / 419
- 13.2.7. Przetworniki C/A sigma-delta / 422
- 13.2.8. Modulator szerokości impulsów jako przetwornik cyfrowo - analogowy / 422
- 13.2.9. Przetworniki częstotliwość - napięcie / 425
- 13.2.10. Mnożący eliminator impulsów / 425
- 13.2.11. Wybór przetwornika cyfrowo - analogowego / 426
- 13.3. Przykładowe układy z przetwornikami C/A / 426
  - 13.3.1. Laboratoryjne źródło napięcia stałego ogólnego przeznaczenia / 426
  - 13.3.2. Ośmiokanałowe źródło napięcia / 432
  - 13.3.3. Nanoamperowe bipolarne źródło prądowe o szerokim zakresie napięcia wyjściowego / 432
  - 13.3.4. Precyzyjny sterownik cewki / 435
- 13.4. Nieliniowość przetworników C/A / 438
- 13.5. Przetworniki analogowo - cyfrowe (A/C) / 439
  - 13.5.1. Digitalizacja: aliasing, częstotliwość próbkowania i głębokość próbkowania / 439
  - 13.5.2. Sposoby przetwarzania analogowo - cyfrowego / 442
- 13.6. Przetworniki A/C – grupa I: przetworniki równoległe („flash”) / 443
  - 13.6.1. Zmodyfikowane przetworniki równoległe / 446
  - 13.6.2. Sterowanie przetwornikami A/C: równoległymi, składankowymi i RF / 448
  - 13.6.3. Przykład przetwornika równoległego z próbkowaniem podpasmowym / 450
- 13.7. Przetworniki A/C – grupa II: przetworniki kompensacyjne / 451
  - 13.7.1. Przykład prostego kompensacyjnego przetwornika A/C / 456
  - 13.7.2. Odmiany przetworników kompensacyjnych / 457
  - 13.7.3. Przykład układu przetwarzania A/C / 457
- 13.8. Przetworniki A/C – grupa III: przetworniki całkujące / 460
  - 13.8.1. Przetwarzanie napięcia na częstotliwość / 460
  - 13.8.2. Metoda jednokrotnego całkowania / 461

- 13.8.3. Metody oparte na równoważeniu ładunków / 461
- 13.8.4. Metoda dwukrotnego całkowania / 462
- 13.8.5. Dygresja: klucze analogowe w układach przetwarzania sygnałów / 463
- 13.8.6. Projekty mistrzów: światowej klasy przetworniki A/C z wielokrotnym całkowaniem firmy Agilent / 467
- 13.9. Przetworniki A/C – grupa IV: przetworniki sigma-delta / 471
  - 13.9.1. Prosty przetwornik sigma-delta do naszego monitora dawki promieniowania UV / 471
  - 13.9.2. Demistyfikacja przetwornika sigma-delta / 473
  - 13.9.3. Analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe przetworniki sigma-delta / 474
  - 13.9.4. Proces przetwarzania sigma-delta / 474
  - 13.9.5. Dygresja: kształtowanie widma szumu / 481
  - 13.9.6. Konkluzja / 482
  - 13.9.7. Symulacja / 484
  - 13.9.8. A co z przetwornikami C/A? / 485
  - 13.9.9. Zalety i wady nadpróbkujących przetworników sigma-delta / 486
  - 13.9.10. Sygnały spoczynkowe / 487
  - 13.9.11. Kilka przykładów zastosowań przetworników sigma-delta / 489
- 13.10. Przetworniki A/C: wybór i kompromisy / 495
  - 13.10.1. Przetworniki sigma-delta i ich konkurencja / 495
  - 13.10.2. Przetworniki A/C próbkujące kontra uśredniające: szum / 498
  - 13.10.3. Mikromocowe przetworniki A/C / 499
- 13.11. Kilka niezwykłych przetworników A/C i C/A / 500
  - 13.11.1. ADE7753: wielofunkcyjny układ scalony do pomiaru mocy pobieranej z sieci energetycznej / 501
  - 13.11.2. AD7873: digitalizer ekranu dotykowego / 504
  - 13.11.3. AD7927: przetwornik A/C z sekwencerem / 505
  - 13.11.4. AD7730: podsystem do precyzyjnych pomiarów mostkowych / 505
- 13.12. Przykłady systemów przetwarzania A/C / 507

- 13.12.1. Multipleksowany 16-kanałowy system zbierania danych / 507
- 13.12.2. Wielokanałowy system równoległego zbierania danych z przetwornikami kompensacyjnymi / 511
- 13.12.3. Wielokanałowy system równoległego zbierania danych z przetwornikami sigma-delta / 514
- 13.13. Pętla fazowa / 518
  - 13.13.1. Wprowadzenie / 518
  - 13.13.2. Podzespoły pętli fazowej / 520
  - 13.13.3. Projektowanie pętli fazowej / 524
  - 13.13.4. Projektowanie powielacza częstotliwości / 524
  - 13.13.5. Zaskok pętli fazowej i jej pozostawanie w stanie synchronizmu / 529
  - 13.13.6. Niektóre zastosowania pętli fazowej / 531
  - 13.13.7. Podsumowanie: jak pętla fazowa tłumi szum i jitter / 543
- 13.14. Generatory sekwencji pseudolosowych i generatory szumu / 544
  - 13.14.1. Cyfrowa generacja szumu / 544
  - 13.14.2. Rejestry liniowe / 544
  - 13.14.3. Wytwarzanie szumu analogowego z ciągów maksymalnie długich / 547
  - 13.14.4. Widmo mocy ciągu pseudolosowego / 547
  - 13.14.5. Filtracja dolnoprzepustowa / 550
  - 13.14.6. Podsumowanie / 552
  - 13.14.7. Generatory szumu wytwarzające sygnał prawdziwie losowy / 554
  - 13.14.8. Hybrydowy filtr cyfrowy / 555
- Podsumowanie rozdziału 13 / 556

## ROZDZIAŁ 14

- Komputery, kontrolery i łącza do transmisji danych / 562
  - 14.1. Architektura komputera: procesor i magistrala / 563
    - 14.1.1. Procesor (CPU) / 564

- 14.1.2. Pamięć / 565
- 14.1.3. Pamięć masowa / 565
- 14.1.4. Grafika, sieć komputerowa, sterowniki łącz równoległych i szeregowych / 566
- 14.1.5. Układy wejścia/wyjścia czasu rzeczywistego / 566
- 14.1.6. Magistrala / 566
- 14.2. Zbiór instrukcji komputera / 567
- 14.2.1. Język symboliczny i język maszynowy / 567
- 14.2.2. Uproszczony zbiór instrukcji procesorów rodziny x86 / 568
- 14.2.3. Przykład programowania / 572
- 14.3. Sygnały magistrali i sposoby łączenia się z nią / 573
- 14.3.1. Podstawowe sygnały magistrali: dane, adresy, sygnały strobulujące / 573
- 14.3.2. Programowa obsługa wejścia/wyjścia: wysyłanie danych / 574
- 14.3.3. Programowanie wektorowego wyświetlacza XY / 577
- 14.3.4. Programowa obsługa wejścia/wyjścia: przyjmowanie danych / 578
- 14.3.5. Programowa obsługa wejścia/wyjścia: rejestry stanu / 579
- 14.3.6. Programowalny układ we/wy: rejestr rozkazów / 582
- 14.3.7. Przerwania / 583
- 14.3.8. Obsługa przerw / 584
- 14.3.9. Uogólnienie metody przerw / 587
- 14.3.10. Bezpośredni dostęp do pamięci / 591
- 14.3.11. Zestawienie sygnałów 8-bitowej magistrali PC104/ISA / 593
- 14.3.12. Magistrala PC104 we wbudowywanym komputerze jednopłytkowym / 595
- 14.4. Rodzaje pamięci / 596
- 14.4.1. Pamięci ulotne i nieulotne / 597
- 14.4.2. Statyczne i dynamiczne pamięci RAM / 597
- 14.4.3. Statyczna pamięć RAM (SRAM) / 598
- 14.4.4. Pamięć DRAM / 601

- 14.4.5. Pamięć nieulotna / 605
- 14.4.6. Pamięci półprzewodnikowe: podsumowanie / 611
- 14.5. Inne magistrale i łącza do transmisji danych: ogólny zarys / 612
- 14.6. Magistrale i łącza równoległe / 616
  - 14.6.1. Magistrala równoległa między podzespołami elektronicznymi – przykład / 616
  - 14.6.2. Szybkie łącza równoległe między elementami elektronicznymi – dwa przykłady / 617
  - 14.6.3. Inne równoległe magistrale komputerowe / 618
  - 14.6.4. Równoległe magistrale i łącza peryferyjne / 619
- 14.7. Magistrale i łącza szeregowo / 620
  - 14.7.1. SPI / 621
  - 14.7.2. Dwuprzewodowa magistrala I2C („TWI”) / 622
  - 14.7.3. Szeregowo magistrala jednoprzewodowa („1-wire”) / 625
  - 14.7.4. JTAG / 625
  - 14.7.5. Precz z linią sygnału zegarowego: można go odtworzyć z ciągu danych / 626
  - 14.7.6. SATA, eSATA i SAS / 627
  - 14.7.7. PCI Express / 627
  - 14.7.8. Asynchroniczne magistrale szeregowo (RS232, RS485) / 628
  - 14.7.9. Kodowanie Manchester / 631
  - 14.7.10. Kodowanie bifazowe / 631
  - 14.7.11. RLL w ciągach binarnych: przetykanie bitami / 634
  - 14.7.12. Kodowanie RLL: 8b/10b i inne / 634
  - 14.7.13. USB / 635
  - 14.7.14. FireWire / 636
  - 14.7.15. Magistrala CAN (Controller Area Network) / 636
  - 14.7.16. Ethernet / 640
- 14.8. Formaty liczb / 641
  - 14.8.1. Liczby całkowite / 641

14.8.2. Liczby zmiennoprzecinkowe / 641

Podsumowanie rozdziału 14 / 644

## ROZDZIAŁ 15

Mikrokontrolery / 649

15.1. Wstęp / 649

15.2. Projekt 1: monitor promieniowania UV (V) / 650

15.2.1. Realizacja z użyciem mikrokontrolera / 651

15.2.2. Program mikrokontrolera („firmware”) / 653

15.3. Przegląd popularnych rodzin mikrokontrolerów / 657

15.3.1. Wewnętrzne układy peryferyjne / 659

15.4. Projekt 2: układ sterowania zasilaniem urządzeń sieciowych / 660

15.4.1. Realizacja za pomocą mikrokontrolera / 661

15.4.2. Program mikrokontrolera / 663

15.5. Projekt 3: syntezytor częstotliwości / 664

15.5.1. Program mikrokontrolera / 667

15.6. Projekt 4: układ sterujący temperaturą / 670

15.6.1. Sprzęt / 670

15.6.2. Pętla sterowania / 676

15.6.3. Program mikrokontrolera / 677

15.7. Projekt 5: układ stabilizacji platformy pojazdu dwukołowego / 679

15.8. Scalone układy peryferyjne dla mikrokontrolerów / 680

15.8.1. Układy peryferyjne łączone bezpośrednio z mikrokontrolerem / 682

15.8.2. Układy peryferyjne z łączem SPI / 685

15.8.3. Układy peryferyjne z łączem I2C / 688

15.8.4. Kilka ważnych ograniczeń sprzętowych / 690

15.9. Środowisko uruchomieniowe / 691

15.9.1. Oprogramowanie / 691

15.9.2. Ograniczenia związane z programowaniem w czasie rzeczywistym / 693

15.9.3. Sprzęt / 695

15.9.4. Projekt Arduino / 698

15.10. Na zakończenie / 699

15.10.1. O kosztach sprzętu i oprogramowania / 699

15.10.2. Kiedy używać mikrokontrolerów / 700

15.10.3. Jak wybrać mikrokontroler / 701

15.10.4. Uwaga na odchodnym / 701

Przegląd rozdziału 15 / 702

## DODATEK A

Powtórka z matematyki / 705

A.1. Trygonometria, funkcje wykładnicze i logarytmiczne / 705

A.2. Liczby zespolone / 705

A.3. Obliczanie pochodnych (rachunek różniczkowy) / 707

A.3.1. Pochodne niektórych popularnych funkcji / 708

A.3.2. Kilka reguł na obliczanie pochodnych funkcji złożonych / 708

A.3.3. Obliczanie pochodnych: kilka przykładów / 708

## DODATEK B

Jak rysować schematy / 709

B.1. Zasady ogólne / 709

B.2. Reguły / 709

B.3. Wskazówki / 710

B.4. Prosty przykład / 710



## DODATEK C

### Oporniki / 712

C.1. Szczypta historii / 712

C.2. Dostępne wartości rezystancji / 712

C.3. Znakowanie oporników / 713

C.4. Typy oporników / 713

C.5. Komedia omyłek / 715

## DODATEK D

### Twierdzenie Thévenina / 716

D.1. Dowód / 716

D.1.1. Dwa przykłady: dzielnik napięcia i quasi-dzielnik napięcia / 717

D.2. Twierdzenie Nortona / 717

D.3. Jeszcze jeden przykład / 717

D.4. Twierdzenie Millmana / 718

## DODATEK E

### Filtry LC o charakterystyce Butterwortha / 719

E.1. Filtr dolnoprzepustowy / 719

E.2. Filtr górnoprzepustowy / 720

E.3. Przykłady filtrów / 720

## DODATEK F

### Proste obciążenia / 723

F.1. Przykład / 723

F.2. Elementy o trzech końcówkach / 724

F.3. Elementy nieliniowe / 724

## DODATEK G

Charakterograf / 726

## DODATEK H

Linie transmisyjne i dopasowywanie impedancji / 727

H.1. Niektóre właściwości linii transmisyjnych / 727

H.1.1. Impedancja charakterystyczna (falowa) / 727

H.1.2. Impulsowe sterowanie linią transmisyjną z różnym obciążeniem jej końca / 729

H.1.3. Sinusoidalne sterowanie linią transmisyjną z różnym obciążeniem jej końca / 733

H.1.4. Straty w liniach transmisyjnych / 734

H.2. Dopasowywanie impedancji / 735

H.2.1. Szerokopasmowe rezystorowe układy dopasowujące / 736

H.2.2. Tłumik rezystorowy / 737

H.2.3. Szerokopasmowe (bezstratne) transformatorowe układy dopasowujące / 737

H.2.4. Wąskopasmowe (bezstratne) reaktancyjne układy dopasowujące / 739

H.3. Linie opóźniające i układy formowania impulsów z elementów o parametrach skupionych / 740

H.4. Epilog: wyznaczanie impedancji falowej linii transmisyjnej / 741

H.4.1. Metoda pierwsza: linia obciążona opornikiem o rezystancji równej impedancji falowej / 741

H.4.2. Metoda druga: linia o nieskończonej długości / 742

H.4.3. Postscriptum: linie opóźniające z elementów dyskretnych / 742

## DODATEK I

Telewizja: krótkie wprowadzenie / 746

I.1. Telewizja: wizja + fonja / 746

I.1.1. Fonia / 746

I.1.2. Wizja / 747

I.2. Łączenie i przesyłanie wizji + fonii: modulacja / 749

- I.3. Rejestrowanie analogowych programów telewizyjnych / 752
- I.4. Telewizja cyfrowa: co to takiego? / 752
- I.5. Telewizja cyfrowa: rozsiewcza i kablowa / 755
- I.6. Bezpośrednia telewizja satelitarna / 756
- I.7. Transmisja strumieniowa cyfrowego sygnału wizyjnego za pośrednictwem internetu / 759
- I.8. Cyfrowa telewizja kablowa: usługi premium i dostęp warunkowy / 760
  - I.8.1. Cyfrowa telewizja kablowa: wideo na życzenie / 760
  - I.8.2. Cyfrowa telewizja kablowa: transmisje kluczowane / 761
- I.9. Rejestrowanie cyfrowych programów telewizyjnych / 761
- I.10. Wyświetlacze obrazu telewizyjnego / 762
- I.11. Łącza wizyjne: analogowe (sygnału zespolonego, sygnałów składowych) i cyfrowe (HDMI/DVI, DisplayPort) / 763

#### DODATEK J

Elementarz programu SPICE: jak uruchomić bezpłatny ICAP/4 demo / 767

- J.1. Instalacja programu ICAP SPICE / 767
- J.2. Wprowadzanie schematu / 767
- J.3. Symulacje / 767
  - J.3.1. Wprowadzenie schematu / 768
  - J.3.2. Symulacja: analiza częstotliwościowa (małosygnałowa) / 768
  - J.3.3. Symulacja: analiza stanów przejściowych (przebiegi napięcia wejściowego i wyjściowego) / 769
- J.4. Kilka uwag końcowych / 770
- J.5. Przykład wykorzystania programu SPICE: badanie zniekształceń nieliniowych wzmacniacza / 770
- J.6. Dodawanie elementów do bazy danych / 770

#### DODATEK K

„Gdzie można kupić te wszystkie dobra elektroniczne?” / 771

#### DODATEK L

Przyrządy i narzędzia laboratoryjne / 773

DODATEK M

Katalogi, czasopisma, dane techniczne elementów / 775

DODATEK N

Lektury uzupełniające i bibliografia / 777

DODATEK O

Oscyloskop / 782

O.1. Oscyloskop analogowy / 782

O.1.1. Tor odchylenia pionowego / 782

O.1.2. Tor odchylenia poziomego / 784

O.1.3. Wyzwalanie / 784

O.1.4. Wskazówki dla początkujących / 784

O.1.5. Sondy / 785

O.1.6. Masa (uziemiaenie) oscyloskopu / 786

O.1.7. Inne cechy oscyloskopu / 786

O.2. Oscyloskop cyfrowy / 787

O.2.1. Różnice między oscyloskopem cyfrowym a oscyloskopem analogowym / 788

O.2.2. Kilka ostrzeżeń / 790

DODATEK P

Skróty i skrótowce / 792