

Spis treści

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Spis tablic</b>                                               | <b>12</b> |
| <b>Przedmowa</b>                                                 | <b>13</b> |
| <b>Przedmowa do drugiego wydania angielskiego</b>                | <b>16</b> |
| <b>Przedmowa do pierwszego wydania angielskiego</b>              | <b>18</b> |
| <b>ROZDZIAŁ 1 Podstawy</b>                                       | <b>21</b> |
| 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 (rezystory) | 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**

|                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tranzystory bipolarne</b>                              | <b>106</b> |
| 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 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 przeciwsołbne                                   | 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**

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Tranzystory polowe</b>                                  | <b>185</b> |
| 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. Wtórники 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. Przebiecie cieplne                                      | 306 |
| Podsumowanie rozdziału 3                                       | 316 |

## **ROZDZIAŁ 4**

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Wzmacniacze operacyjne</b>                                                   | <b>321</b> |
| 4.1. Wprowadzenie w dziedzinę wzmacniaczy operacyjnych<br>- „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 nie zrównoważenia                                            | 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 nie zrównoważenia                                                     | 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, $f_T$ , 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 przerywaczowi 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 AC z wejściem różnicowym   | 552 |
| 5.17.4. Dopasowanie impedancji                  | 556 |
| 5.17.5. Kryteria wyboru wzmacniacza różnicowego | 557 |
| Podsumowanie rozdziału 5                        | 562 |

## **ROZDZIAŁ 6**

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Filtry</b>                                                    | <b>567</b> |
| 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**

|                                                                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Generator i układy czasowe</b>                                                                                            | <b>611</b> |
| 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**

|                                                                                                                 |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Elementy i układy niskoszumowe</b>                                                                           | <b>674</b> |
| 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 paśmie                                                                               | 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 beztransformatory 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                                                      | 724 |
| 8.6.3. Przykład projektu: niskoszumowy szerokopasmowy wzmacniacz<br>hybrydowy z JFET-ami               | 725 |
| 8.6.4. Projekty mistrzów: niskoszumowy przedwzmacniacz SR560                                           | 727 |
| 8.6.5. Wybieranie JFET-ów do układów niskoszumowych                                                    | 730 |
| 8.7. Pojedynek między tranzystorami bipolarnymi a tranzystorami<br>polowymi przedstawiony na wykresach | 735 |
| 8.7.1. Szum tranzystorów MOS                                                                           | 737 |
| 8.8. Szumy we wzmacniaczu różnicowym i we wzmacniaczu<br>ze sprzężeniem zwrotnym                       | 738 |
| 8.9. Szum w układach ze wzmacniaczami operacyjnymi                                                     | 739 |
| 8.9.1. Przewodnik po tablicy 8.3: wybieranie niskoszumowych<br>wzmacniaczy operacyjnych                | 739 |
| 8.9.2. Współczynnik tłumienia zmian napięcia zasilającego                                              | 761 |
| 8.9.3. Podsumowanie: wybór niskoszumowego wzmacniacza<br>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<br>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 $e_n C$                                                                          | 769 |
| 8.11.4. Szum wzmacniacza transrezystancyjnego                                                          | 770 |
| 8.11.5. Przykład: szerokopasmowy JFET-owy wzmacniacz sygnału<br>z fotodiody                            | 771 |
| 8.11.6. Szum kontra wzmocnienie we wzmacniaczu<br>transimpedancyjnym                                   | 773 |
| 8.11.7. Ograniczanie pasma sygnału wyjściowego wzmacniacza<br>transimpedancyjnego                      | 774 |
| 8.11.8. Kompozytowe wzmacniacze transimpedancyjne                                                      | 775 |
| 8.11.9. Redukcja pojemności źródła sygnału techniką<br>bootstrapowania                                 | 779 |
| 8.11.10. Separacja pojemności źródła sygnału za pomocą układu<br>ze wspólną bazą                       | 781 |
| 8.11.11. Wzmacniacz transimpedancyjny z pojemnościowym<br>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<br>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 rozmaitości                                                                   | 814 |
| 8.14. Poprawa stosunku SN 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                                                                      | 834 |

oprac. BPK