

Spis treści

Przedmowa	9
Oznaczenia napięć i prądów	11
I. UKŁADY LINIOWE	13
1. Wprowadzenie	15
1.1. Ogólna charakterystyka wzmacniaczy operacyjnych	16
1.2. Definicje parametrów wzmacniaczy operacyjnych	17
1.3. Podstawowe układy ze wzmacniaczami operacyjnymi	22
1.3.1. Wzmacniacz odwracający	23
1.3.2. Wzmacniacz nieodwracający	27
1.3.3. Wtórnik napięcia	29
2. Właściwości układów wzmacniających ze wzmacniaczami operacyjnymi	30
2.1. Wejściowe napięcie i prąd niezrównoważenia wzmacniaczy operacyjnych	31
2.2. Określenie wpływu wejściowego napięcia niezrównoważenia i prądów polaryzacji na napięcie wyjściowe wzmacniacza	35
3. Zerowanie układów ze wzmacniaczami operacyjnymi	43
4. Właściwości wzmacniaczy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym	57
4.1. Schematy blokowe wzmacniaczy	57
4.1.1. Wzmacniacz odwracający	57
4.1.2. Wzmacniacz nieodwracający	59
4.2. Wpływ skończonej wartości wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego na błąd przetwarzania ...	60
4.3. Wpływ zmian wzmocnienia wzmacniaczy operacyjnych i parametrów obwodu sprzężenia zwrotnego na błąd przetwarzania	61
4.3.1. Wzmacniacz odwracający	61
4.3.2. Wzmacniacz nieodwracający	61
4.4. Rezystancja wejściowa wzmacniaczy	63
4.4.1. Wzmacniacz odwracający	63
4.4.2. Wzmacniacz nieodwracający	66
4.5. Rezystancja wyjściowa wzmacniaczy	68
4.5.1. Wzmacniacz odwracający	68
4.5.2. Wzmacniacz nieodwracający	69
5. Charakterystyki amplitudowe i fazowe wzmacniaczy	72
5.1. Charakterystyki logarytmiczne – aproksymacje Bodego	73
5.2. Odwrotne charakterystyki transmitancji obwodu ujemnego sprzężenia zwrotnego	76
6. Charakterystyki częstotliwościowe wzmacniaczy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym	83
6.1. Wzmacniacz opisany równaniem różniczkowym pierwszego rzędu z rezystancyjnym sprzężeniem zwrotnym	83
6.2. Wzmacniacz opisany równaniem różniczkowym drugiego rzędu z rezystancyjnym sprzężeniem zwrotnym	85

6.3.	Wzmacniacz i obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego opisane równaniami różniczkowymi pierwszego rzędu	97
6.4.	Praktyczny sposób wykreślenia charakterystyk amplitudowych ze szczytem rezonansowym	103
6.5.	Właściwości wzmacniaczy w dziedzinie czasu	107
6.6.	Podsumowanie	110
7.	Właściwości wzmacniaczy pracujących w liniowym i nieliniowym obszarze charakterystyk	112
7.1.	Właściwości częstotliwościowe wzmacniaczy pracujących w liniowym obszarze charakterystyk	113
7.2.	Właściwości częstotliwościowe wzmacniaczy pracujących w nieliniowym obszarze charakterystyk	116
7.3.	Podsumowanie	130
8.	Kształtowanie właściwości częstotliwościowych wzmacniaczy	132
8.1.	Korekcja transmitancji sprzężenia zwrotnego	133
8.2.	Korekcja charakterystyki częstotliwościowej przez zmianę impedancji wejściowej wzmacniacza	134
8.3.	Minimalizacja wpływu pojemności wejściowej wzmacniacza operacyjnego na charakterystykę częstotliwościową	136
8.4.	Minimalizacja wpływu pojemności obciążenia wzmacniacza	138
8.4.1.	Wtórnik napięcia	138
8.4.2.	Wzmacniacz odwracający	142
9.	Kształtowanie charakterystyk częstotliwościowych wzmacniaczy operacyjnych	148
9.1.	Korekcja biegunem dominującym	149
9.1.1.	Wzmacniacz operacyjny bez wyprowadzonych końcówek obwodów korekcyjnych	149
9.1.2.	Wzmacniacz operacyjny z wyprowadzonymi końcówkami do układów korekcyjnych	150
9.2.	Korekcja biegunem i zerem	152
9.2.1.	Wzmacniacz operacyjny bez wyprowadzonych końcówek obwodów korekcyjnych	152
9.2.2.	Wzmacniacz operacyjny z wyprowadzonymi końcówkami do układów korekcyjnych	155
9.3.	Korekcja charakterystyki częstotliwościowej w układzie równoległym	163
10.	Współczynnik tłumienia napięć współbieżnych	167
10.1.	Współczynnik tłumienia napięcia współbieżnego $CMRR$ wzmacniacza operacyjnego	168
10.2.	Współczynnik tłumienia napięcia współbieżnego $CMRR_{wo}$ podstawowych układów wzmacniających	170
10.2.1.	Wzmacniacz różnicowy	170
10.2.2.	Wzmacniacz nieodwracający	173
10.2.3.	Wtórnik napięcia	176
10.2.4.	Wzmacniacz odwracający	179
10.3.	Współczynnik tłumienia napięcia współbieżnego $CMRR_{\delta R}$ spowodowany tolerancją rezystorów	181
10.4.	Współczynnik tłumienia napięcia współbieżnego $CMRR_Z$ wzmacniacza różnicowego spowodowany skończoną rezystancją wewnętrzną napięć źródłowych e_1, e_2	183
10.5.	Współczynnik tłumienia napięcia współbieżnego $CMRR_U$ zależny od struktury wzmacniacza	186
10.6.	Współczynnik tłumienia napięcia współbieżnego $CMRR_C$ zależny od parametrów przewodów łączących źródła sygnałów ze wzmacniaczem	192

10.7. Wypadkowy współczynnik tłumienia składowej współbieżnej $CMRR_{wy}$ wzmacniacza	194
10.8. Wypadkowy współczynnik tłumienia składowej współbieżnej $CMRR_{wy}^{1,n}$ łańcucha wzmacniaczy	196
10.8.1. Wypadkowy współczynnik tłumienia składowej współbieżnej wzmacniacza złożonego ze wzmacniaczy różnicowych	196
10.8.2. Wypadkowy współczynnik tłumienia składowej współbieżnej wzmacniacza złożonego ze wzmacniaczy odwracających i nieodwracających	204
10.9. Pomiary współczynnika tłumienia napięcia współbieżnego $CMRR$ wzmacniacza operacyjnego	206
11. Współczynnik tłumienia wpływu zmian napięcia zasilania $SVRR$	214
12. Wzmacniacze różnicowe	217
12.1. Podstawowy wzmacniacz różnicowy	217
12.2. Wzmacniacz różnicowy utworzony ze wzmacniaczy odwracających	221
12.3. Wzmacniacz różnicowy utworzony ze wzmacniaczy nieodwracających	222
13. Wzmacniacze pomiarowe	226
13.1. Podstawowy wzmacniacz różnicowy z wtórnkami napięć	226
13.2. Wzmacniacze pomiarowe ze źródłami prądów	228
13.3. Podsumowanie	237
14. Sumator	237
15. Układy całkujące i różniczkujące	244
15.1. Zasada działania układów całkujących	244
15.2. Błędy układu całkującego	245
15.2.1. Wyjściowe napięcie niezrównoważenia i dryft układu całkującego	246
15.2.2. Błędy układu całkującego spowodowane skończonymi wartościami wzmocnienia, impedancji wejściowej i pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego	248
15.3. Układ proporcjonalno-całkujący	254
15.4. Układ całkujący sygnał prądowy	256
15.5. Układ całkujący napięcie przemiennie	257
15.6. Układy różniczkujące	261
15.7. Zasada działania układów różniczkujących	261
15.8. Błędy układów różniczkujących	263
15.8.1. Wyjściowe napięcie niezrównoważenia i dryft układu różniczkującego	263
15.8.2. Błąd układu różniczkującego spowodowany skończoną szerokością pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego	264
15.9. Praktyczne układy różniczkujące	265
15.10. Podsumowanie	270
16. Rozwiązania układowe wzmacniaczy specjalizowanych	272
16.1. Wzmacniacze z nadążną minimalizacją wyjściowego napięcia niezrównoważenia	272
16.2. Wzmacniacze z barierą izolacyjną	275
16.3. Wzmacniacze transkonduktancyjne	281
16.4. Wzmacniacze transimpedancyjne	283
16.5. Wzmacniacze <i>rail-to-rail</i>	287
17. Wzmacniacze operacyjne zasilane z jednego źródła napięcia	295
18. Szumy w układach liniowych	304
18.1. Podział szumów	305
18.2. Szumy elementów układów elektronicznych	308
18.2.1. Szumy elementów pasywnych	308
18.2.2. Szumy elementów aktywnych	309

18.3. Szumy przetworników	311
18.4. Wartości skuteczne napięć źródeł szumów o składowych różowej, białej i o wielkich częstotliwościach	317
18.5. Wyznaczanie zastępczego źródła szumów cząstkowych	319
18.5.1. Analityczne wyznaczanie zastępczego źródła szumów	320
18.5.2. Graficzno-analityczne wyznaczanie zastępczego źródła szumów	321
18.6. Związek między wartością międzyszczytową a skuteczną szumów	326
18.7. Współczynnik szumów	330
18.7.1. Współczynnik szumów wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego	331
18.8. Współczynnik szumów w układach ze sprzężeniem zwrotnym	335
18.9. Współczynnik szumów wzmacniaczy wielostopniowych	339
19. Zakłócenia w układach ze sprzężeniem zwrotnym	344
20. Błędy dynamiczne wzmacniaczy	345
21. Ocena błędów przetwarzania wzmacniaczy i torów pomiarowych	350
21.1. Błędy przetwarzania wzmacniaczy operacyjnych wyrażone w mierze logarytmicznej	350
21.1.1. Liczba bitów jako miara błędów przetwarzania	350
21.1.2. Błędy przetwarzania wzmacniacza opisanego równaniem różniczkowym pierwszego rzędu z rezystancyjnym sprzężeniem zwrotnym wyrażone w bitach	351
21.2. Błędy przetwarzania torów pomiarowych	357
22. Technologie wytwarzania i właściwości wzmacniaczy operacyjnych	368
22.1. Wzmacniacze operacyjne bipolarne	368
22.2. Wzmacniacze operacyjne BiFET	369
22.3. Wzmacniacze operacyjne CMOS	371
22.4. Wzmacniacze operacyjne BiCMOS	372
23. Minimalizacja wejściowego napięcia niezrównoważenia i korekcja parametrów analogowych układów scalonych	377
II. UKŁADY NIELINIOWE	383
24. Wprowadzenie	385
25. Funkcje odwrotne	386
26. Funkcje uwikłane	388
27. Układy logarytmujące i wykładnicze	392
27.1. Zasada działania	392
27.2. Błędy spowodowane przez elementy układów	397
27.3. Realizacja układu logarytmującego	402
27.4. Realizacja układu opisanego funkcją wykładniczą	404
28. Układy mnożąco-dzielące	406
29. Wielofunkcyjny analogowy przetwornik operacyjny	410
30. Układy mnożące ze sterowanym podziałem prądów	414
30.1. Zasada działania układów mnożących ze sterowanym podziałem prądów	414
30.2. Stosowanie układów mnożących ze sterowanym podziałem prądów	419
31. Układy mnożące z modulacją szerokości i amplitudy impulsów	427
32. Błędy operacji mnożenia i dzielenia sygnałów	432
32.1. Błędy statyczne układu mnożącego	432
32.2. Błędy statyczne układu dzielącego	434
33. Realizacja układów dzielących	436
33.1. Układ dzielący utworzony z układu mnożąco-dzielącego	436
33.2. Układ dzielący utworzony z układu mnożącego i wtórnika napięcia	437
33.3. Układ dzielący utworzony z układu mnożącego i wzmacniacza odwracającego	439

34. Realizacja układów podnoszących do kwadratu	442
34.1. Układ podnoszący do kwadratu utworzony z układu mnożąco-dzielącego	442
34.2. Układ podnoszący do kwadratu utworzony z wielofunkcyjnego układu operacyjnego	443
35. Realizacja układów pierwiastkujących	448
35.1. Układ pierwiastkujący utworzony z układu mnożącego i wzmacniacza operacyjnego	448
35.2. Układ pierwiastkujący utworzony z układu mnożąco-dzielącego	450
35.3. Układ pierwiastkujący utworzony z wielofunkcyjnego układu operacyjnego	451
36. Przetworniki napięcia wartości maksymalnej, średniej i skutecznej	455
36.1. Przetworniki wartości maksymalnej	456
36.2. Przetwornik wartości średniej	461
36.3. Przetworniki wartości skutecznej	465
36.3.1. Przetwornik wartości skutecznej opisany funkcją jawną	465
36.3.2. Przetwornik wartości skutecznej opisany funkcją uwikłaną	467
37. Aproksymacja funkcji nieliniowych	471
37.1. Aproksymacja linią ciągłą	472
37.2. Aproksymacja odcinkami	476
38. Linearyzacja	481
38.1. Linearyzacja przez zmianę konfiguracji mostka	481
38.2. Linearyzacja za pomocą układu mnożącego i sumatora	482
38.3. Linearyzacja za pomocą układu mnożąco-dzielącego i sumatora	483
38.4. Linearyzacja mostka przez zmianę napięcia zasilania	485
38.5. Linearyzacja półmostka przez zmianę prądu zasilania	486
38.6. Podsumowanie	488
39. Układy zamiany współrzędnych	489
39.1. Zamiana współrzędnych prostokątnych na współrzędne biegunowe	489
39.2. Zamiana współrzędnych biegunowych na współrzędne prostokątne	491
40. Wybór współczynników skali	494
41. Zalecenia konstrukcyjne	499
41.1. Zasilanie układów elektronicznych	500
41.2. Układy odsprzęgające obwody zasilania	502
41.3. Ekrany ekwipotencjalne	504
41.4. Ekrany elektromagnetyczne	505
Literatura uzupełniająca	506

Przedmowa

Wzmacniacze są bardzo ważnymi podzespołami układów elektronicznych, automatyki, sterowania i pomiarów. Wzmacniacze w tych układach pełnią funkcję przetworników normujących, wzmacniaczy mocy, regulatorów, układów korekcyjnych, liniowych i nieliniowych układów funkcyjnych i komparatorów. Wzmacniacze są stosowane do wzmacniania sygnałów w szerokim przedziale wartości i spektrum częstotliwości. Od napięć stałych do napięć o skrajnie wielkiej częstotliwości i od napięć na poziomie mikrowoltów do napięć o wartościach setek woltów. Potrzeba przetwarzania sygnałów o bardzo zróżnicowanych, a także o ekstremalnych wartościach wymusza opracowania nowych modeli wzmacniaczy o coraz to lepszych parametrach i nowych właściwościach. Ocenia się, że każdego roku zostaje opracowanych i wdrożonych do produkcji około 1000 modeli wzmacniaczy scalonych. Rozwój wzmacniaczy scalonych jest równie dynamiczny jak rozwój scalonych układów cyfrowych.

Wzmacniacze stosowane w układach pomiarowych są określane jako operacyjne. Nazwa ta pochodzi od pierwszych wzmacniaczy lampowych o sprzężeniu bezpośrednim opracowanych w 1945 r. Wzmacniacze operacyjne umożliwiają prowadzenie z małymi błędami liniowych i nieliniowych operacji matematycznych. Operacji liniowych: dodawania, odejmowania, różniczkowania, całkowania i nieliniowych: mnożenia, dzielenia, pierwiastkowania, potęgowania, logarytmowania i delogarytmowania. Następnie lampy zostały zastąpione tranzystorami, a na początku lat 60. ubiegłego stulecia opracowano scalone wzmacniacze operacyjne o bardzo dobrych parametrach. Te wyróżniające się parametry wynikają z konstrukcji i technologii wykonania wzmacniaczy operacyjnych. Wszystkie elementy wzmacniaczy mają takie same właściwości, ponieważ wykonane są w jednym krysztale półprzewodnika, w jednym procesie technologicznym, charakteryzują się bardzo małymi wymiarami i w związku z tym mają prawie jednakową temperaturę. Olbrzymie postępy w technice układowej, konstrukcyjnej i technologicznej doprowadziły do opracowania wzmacniaczy operacyjnych I, II, III i kolejnych generacji, o coraz lepszych parametrach.

Te znaczące sukcesy technologiczne i układowe wykorzystano podczas opracowania innych podzespołów analogowych.

Wzmacniacze operacyjne są również stosowane w cyfrowych systemach przetwarzania sygnałów (DSP). Dopasowują one poziomy przetwarzanych sygnałów do wejść

analogowych mikrokontrolerów i mikroprocesorów. Bez udziału wzmacniaczy w tych systemach nie można prowadzić cyfrowego przetwarzania sygnałów lub też byłoby realizowane z dużymi błędami.

Wzmacniacze operacyjne pełnią ważną rolę w procesie przetwarzania sygnałów. Implikuje to, że każdy konstruktor powinien znać nie tylko zasady działania, stosowania i właściwości wzmacniaczy operacyjnych, ale powinien mieć umiejętność określania błędów przetworników liniowych i nieliniowych utworzonych ze wzmacniaczy operacyjnych.

Zdaniem autora cel ten spełnia niniejsze opracowanie, w którym czytelnik krok po kroku jest zapoznawany z właściwościami i zasadami stosowania wzmacniaczy operacyjnych, układów wzmacniających, przetworników i analizą tych układów.

Na krajowym rynku wydawniczym wielokrotnie ukazało się kilka doskonałych książek o wzmacniaczach operacyjnych – Z. Kulki i M. Nadachowskiego, W. Tietza i C. Schenka oraz P. Horowitz i W. Hilla. Ostatnio została wydana bardzo dobra pozycja *Wzmacniacze operacyjne*, której autorem jest Piotr Górecki. Książka ta wyróżnia się olbrzymim ładunkiem wiedzy praktycznej i porad konstrukcyjnych, które konstruktor nabywa dopiero po wielu latach praktyki i eksperymentów. Zaletą tej książki, jak we wstępie pisze Autor, jest sprowadzenie do minimum rozważań teoretycznych. Moim zdaniem z tej doskonałej książki mogą skorzystać tylko konstruktorzy o dużej wiedzy teoretycznej, którzy chcą uzupełnić swoje umiejętności praktyczne. Chciałbym, aby moje opracowanie wypełniło tę lukę i w sposób przystępny, prosty i ścisły zapoznało czytelnika z elementarną wiedzą z zakresu teorii wzmacniaczy operacyjnych, przetworników pomiarowych i analizą tych układów.

Autor serdecznie dziękuje Panom recenzentom, prof. dr hab. inż. Jerzemu Jakubcowi i dr hab. inż. Krzysztofowi Pacholskiemu za wnikliwe opracowanie recenzji, wskazanie wielu usterek i wykraczający poza obowiązki recenzenta trud opracowania wielu propozycji zmian, podnoszących walory dydaktyczne książki. Z wielką przyjemnością dziękuję również Panom dr inż. Danielowi Duszy i studentowi Adamowi Lewickiemu za pomoc merytoryczną i techniczną podczas opracowania książki.