

Do original

INTEGRATED ELECTRONICS:
Analog and Digital Circuits and Systems

Copyright © 1972 by McGraw-Hill, Inc.

Copyright © 1981 da Editora McGraw-Hill do Brasil

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, guardada pelo sistema "retrieval" ou transmitida de qualquer modo ou por qualquer outro meio, seja este eletrônico, mecânico, de fotocópia, de gravação, ou outros, sem prévia autorização por escrito da Editora.

Editor: Laércio Bento

Coordenadora de Revisão: Daisy Pereira Daniel

Supervisor de Produção: Edson Sant'Anna

CIP-Brasil, Catalogação-na-Fonte
Câmara Brasileira do Livro, SP

Millman, Jacob. 1911 -

M594 e Eletrônica: dispositivos e circuitos / Jacob Millman,
v. 1 Christos C. Halkias; tradutor Elédio José Robalinho;
revisor técnico Paulo Elyof Meirelles Villela. - São Paulo:
McGraw-Hill do Brasil, 1981.

Bibliografia.

1. Aparelhos e dispositivos eletrônicos 2. Circuitos eletrônicos 3. Circuitos integrados 4. Eletrônica I. Halkias, Christos C. II. Título.

CDD - 621.381
- 621.3815
- 621.38173

80-1438

Índices para catálogo sistemático

1. Circuitos eletrônicos: Engenharia eletrônica 621.3815
2. Circuitos integrados: Microeletrônica 621.38173
3. Dispositivos: Engenharia eletrônica 621.3815
4. Eletrônica: Engenharia 621.381.

Sumário

Capítulo 11 O Transistor em Altas Frequências, 413

- 11.1 O modelo π -híbrido de um transistor na configuração emissor comum, 413
- 11.2 Condutâncias do π -híbrido, 414
- 11.3 As capacitâncias do π -híbrido, 418
- 11.4 Validade do modelo π -híbrido, 420
- 11.5 Variação dos parâmetros π -híbridos, 420
- 11.6 O ganho de corrente de curto-circuito para EC, 421
- 11.7 Ganho de corrente com carga resistiva, 424
- 11.8 Resposta de um amplificador de um estágio com transistor em EC, 426
- 11.9 O produto ganho-largura de banda, 430
- 11.10 Seguidor de emissor em altas frequências, 432
Referências, 435
Exercícios de Revisão, 435

Capítulo 12 Amplificadores com Múltiplos Estágios, 436

- 12.1 Classificação de amplificadores, 436
- 12.2 Distorção em amplificadores, 437
- 12.3 Resposta em frequência de um amplificador, 438
- 12.4 Desenhos de Bode, 441
- 12.5 Resposta de um amplificador a uma forma de onda discreta, 446
- 12.6 Banda passante de estágios ligados em cascata, 446
- 12.7 O amplificador com acoplamento RC, 451
- 12.8 Resposta em baixa frequência de um estágio com acoplamento RC, 452

- 12.9 Efeito de um capacitor, ligado em paralelo com a resistência de emissor, na resposta em baixa frequência, 454
- 12.10 Resposta em alta frequência de dois estágios transistorizados EC em cascata, 458
- 12.11 Amplificador em altas frequências com configuração EC e com múltiplos estágios em cascata, 461
- 12.12 Ruído, 464
 - Referências, 468
 - Exercícios de Revisão, 469

Capítulo 13 Amplificadores Realimentados, 471

- 13.1 Classificação dos amplificadores, 471
- 13.2 O conceito de realimentação, 473
- 13.3 Ganho de transferência com realimentação, 476
- 13.4 Características gerais dos amplificadores com realimentação negativa, 479
- 13.5 Resistência de entrada, 482
- 13.6 Resistência de saída, 485
- 13.7 Método de análise de um amplificador realimentado, 487
- 13.8 Realimentação série de tensão, 488
- 13.9 Par com realimentação série de tensão, 492
- 13.10 Realimentação série de corrente, 494
- 13.11 Realimentação paralela de corrente, 499
- 13.12 Realimentação paralela de tensão, 503
 - Referências, 507
 - Exercícios de Revisão, 507

Capítulo 14 Osciladores e Estabilidade, 509

- 14.1 Efeito de realimentação sobre a banda passante do amplificador, 509
- 14.2 Função de transferência de duplo pólo com realimentação, 513
- 14.3 Função de transferência para amplificador de três pólos com realimentação, 519
- 14.4 Análise aproximada de um amplificador realimentado de múltiplos pólos, 520
- 14.5 Resposta em frequência de amplificador realimentado com tensão paralela, 521
- 14.6 Amplificador realimentado com corrente série – Resposta em frequência, 525
- 14.7 Par de amplificadores realimentados com corrente paralela – Resposta em frequência, 527
- 14.8 Par de amplificadores realimentados por tensão série – Resposta em frequência, 531
- 14.9 Estabilidade, 533
- 14.10 Margens de ganho e de fase, 536
- 14.11 Compensação, 537
- 14.12 Compensação por pólo dominante, 539

- 14.13 Compensação por pólo-zero, 540
- 14.14 Compensação pela modificação da rede β , 541
- 14.15 Osciladores senoidais, 544
- 14.16 Oscilador de deslocamento de fase, 547
- 14.17 Osciladores de circuito ressonante, 549
- 14.18 Forma geral de circuito oscilador, 551
- 14.19 Oscilador com ponte de Wien, 553
- 14.20 Osciladores a cristal, 556
- 14.21 Estabilidade de frequência, 557
 - Referências, 559
 - Exercícios de Revisão, 559

Capítulo 15 Amplificadores Operacionais, 561

- 15.1 O amplificador operacional básico, 561
- 15.2 O amplificador diferencial, 565
- 15.3 O amplificador diferencial com emissores acoplados, 566
- 15.4 Características de transferência de um amplificador diferencial, 570
- 15.5 Exemplo de um amplificador operacional em C.I., 571
- 15.6 Tensões e correntes de deslocamento, 576
- 15.7 Desvio com a temperatura da corrente e tensão de deslocamento, 579
- 15.8 Medida dos parâmetros de um amplificador operacional, 580
- 15.9 Resposta em frequência dos amplificadores operacionais, 583
- 15.10 Compensação por pólo dominante, 585
- 15.11 Compensação por pólo-zero, 587
- 15.12 Compensação por avanço de fase, 590
- 15.13 Resposta ao degrau dos amplificadores operacionais, 592
 - Referências, 593
 - Exercícios de Revisão, 593

Capítulo 16 Circuitos Integrados Formando Sistemas Analógicos, 595

- I. SISTEMAS ANALÓGICOS LINEARES, 595
 - 16.1 Aplicações básicas com amplificador operacional, 595
 - 16.2 Amplificadores diferenciais c.c., 598
 - 16.3 Amplificador estável com acoplamento c.a., 599
 - 16.4 Integração e diferenciação analógica, 601
 - 16.5 Computação eletrônica analógica, 604
 - 16.6 Filtros ativos, 605
 - 16.7 Filtros ativos ressonantes passa-banda, 611
 - 16.8 Equalizador de atraso, 615
 - 16.9 Circuito amplificador integrado sintonizado, 616
 - 16.10 Um amplificador de vídeo cascode, 622

II. SISTEMAS ANALÓGICOS NÃO-LINEARES, 625

- 16.11 Comparadores, 625
- 16.12 Circuitos de amostragem e de retenção, 627
- 16.13 Conversor c.a./c.c. de precisão, 628
- 16.14 Amplificadores logarítmicos, 630
- 16.15 Geradores de forma de onda, 635
- 16.16 Comparador regenerativo (“Schmitt Trigger”), 639
- 16.17 Lógica de emissor acoplado (LEA), 642
 - Referências, 647
 - Exercícios de Revisão, 647

Capítulo 17 Sistemas Digitais Construídos a Partir de Circuitos Integrados Básicos, 647

I. SISTEMAS DIGITAIS COMBINACIONAIS, 650

- 17.1 Conjuntos de portas padrões, 650
- 17.2 Somadores binários, 652
- 17.3 Funções aritméticas, 658
- 17.4 Decodificador/demultiplexador, 664
- 17.5 Seletor de dados/multiplexador, 667
- 17.6 Codificador, 668
- 17.7 Memória de apenas leitura (MAL), 671
- 17.8 Aplicações das MALs, 675

II. SISTEMAS DIGITAIS SEQUENCIAIS, 678

- 17.9 Memórias de uma posição, 678
- 17.10 Multivibradores, 680
- 17.11 Registradores de deslocamento, 685
- 17.12 Contadores ondulantes (“ripple”) ou assíncronos, 689
- 17.13 Contadores síncronos, 693
- 17.14 Aplicações dos contadores, 698

III. SISTEMAS DIGITAIS MOS/ILE, 700

- 17.15 Circuitos dinâmicos MOS, 700
- 17.16 Registradores de deslocamento MOS, 702
- 17.17 Memórias de apenas leitura MOS, 705
- 17.18 Memória de acesso randômico (MAR), 707

IV. SISTEMAS D/A e A/D, 713

- 17.19 Conversores digitais-analógicos, 713
- 17.20 Conversor analógico digital, 716

- 17.21 Geradores de caracteres, 718
 - Referências, 722
 - Exercícios de Revisão, 723

Capítulo 18 Circuitos de Potência e Sistemas, 727

- 18.1 Amplificadores em classe A para grandes sinais, 727
- 18.2 Distorção de segunda harmônica, 729
- 18.3 Geração de harmônicas de ordem superior, 731
- 18.4 Amplificador de potência (áudio) acoplado com transformador, 734
- 18.5 Eficiência, 737
- 18.6 Amplificadores “push-pull”, 739
- 18.7 Amplificadores em classe B, 741
- 18.8 Operação em classe AB, 745
- 18.9 Fontes de alimentação regulares, 748
- 18.10 Reguladores de tensão série, 749
- 18.11 Reguladores monolíticos, 755
- 18.12 O diodo de quatro camadas, 756
- 18.13 Características *p-n-p-n*, 759
- 18.14 O retificador controlado de silício, 761
- 18.15 Controle de potência, 764
 - Referências, 770
 - Exercícios de Revisão, 771

Capítulo 19 Física do Dispositivo Semicondutor, 773

- 19.1 Distribuição da energia dos elétrons em um metal, 773
- 19.2 A função Fermi-Dirac, 775
- 19.3 Densidade de estados, 777
- 19.4 Emissão de elétrons de um metal, 779
- 19.5 Concentração de portadores em um semicondutor intrínseco, 782
- 19.6 Nível de Fermi em um semicondutor contendo impurezas, 785
- 19.7 Estrutura de bandas de uma junção *p-n* em circuito aberto, 786
- 19.8 Diodo túnel, 789
- 19.9 Equações básicas do semicondutor, 792
- 19.10 A equação volt-ampère do diodo, 795
- 19.11 Dependência com a temperatura da característica *p-n*, 797
- 19.12 Capacitância dinâmica de difusão, 798
- 19.13 As correntes em um transistor, 800
- 19.14 O alfa do transistor, 802
- 19.15 Análise das regiões de corte e saturação do transistor, 803
 - Referências, 806
 - Exercício de Revisão, 806

Apêndice A, 808
Apêndice B, 809
Apêndice, C-2, 810

Índice Analítico, 872

CAPÍTULO 11

O Transistor em Altas Frequências

Em baixas frequências, assumimos que o transistor responde instantaneamente às mudanças de tensão e corrente na entrada. Realmente isto não ocorre, pois o mecanismo do transporte de portadores de carga do emissor para o coletor é, essencialmente, devido à difusão. Assim, para determinarmos como o transistor se comporta em altas frequências, é necessário examinarmos este mecanismo de difusão em maiores detalhes. Tal análise¹ é complicada e as equações resultantes são semelhantes àquelas obtidas para a linha de transmissão com perdas. O modelo baseado nas equações da linha de transmissão poderia ser muito preciso, mas, infelizmente, o circuito equivalente resultante é muito complicado na prática; assim, é necessário fazer algumas aproximações. Naturalmente, quanto maior a aproximação, maior será a simplicidade do circuito resultante. O modelo π -híbrido, desenvolvido neste capítulo, apresenta um compromisso razoável entre a precisão e simplicidade. Utilizando este modelo, faremos uma análise detalhada de um estágio amplificador que contém apenas um transistor na configuração emissor comum.

11.1. MODELO π -HÍBRIDO DE UM TRANSISTOR NA CONFIGURAÇÃO EMISSOR COMUM²

Enfatizamos no Capítulo 8 que o circuito emissor comum é a configuração prática mais importante; assim, examinaremos um modelo EC que será válido em altas frequências. Este circuito, chamado *modelo π -híbrido* ou *modelo de Giacoletto*, é indicado na Fig. 11.1. Análises de circuitos utilizando este modelo não apresentam dificuldades, mostrando resultados que estão em excelente concordância com a experiência em todas as frequências em que o transistor apresenta uma amplificação razoável. Além disto, os componentes resistivos neste circuito podem ser obtidos a partir dos parâmetros h em baixas frequências. Todos os parâmetros (resistências e capacitâncias) foram considerados como sendo independentes das frequências; podem variar com o ponto de operação quiescente, mas em determinada polarização são razoavelmente constantes para pequenos sinais.