

Elettronica Analogica – corso di laurea in Ingegneria Informatica ed Ingegneria dell'Automazione

L'esame consiste in una prova orale, nel corso della quale oltre a discutere domande di teoria, è possibile venga richiesta la soluzione di un semplice esercizio.

Le sedute d'esame vengono svolte contemporaneamente e quelle di Elettronica Generale: si prega pertanto di prendere visione delle date di esame di Elettronica Generale e di avvisare il docente (almeno una settimana prima della seduta) indicando nome, cognome, numero di matricola.

Poiché la verbalizzazione degli esami avverrà esclusivamente in forma elettronica, gli studenti sono tenuti a presentarsi agli esami in possesso del proprio PIN.

Per quanto riguarda il programma, gli studenti possono scegliere fra due opzioni:

Opzione 1: utilizzare il materiale didattico (presentazioni power-point) disponibili sul sito docente per il corso di Elettronica Generale, ed in particolare le lezioni seguenti:

01_Introduzione.pdf

02_Stato_solido.pdf

03_Diodo.pdf

04-MOS.pdf

11-IntroduzioneElettronicaAnalogica.pdf

12-Operazionale.pdf

13-Opamp_non_ideale.pdf

14-BJT.pdf

15-MOS_BJT come ampli.pdf

16-Polarizzazione.pdf

17-Modelli_piccolo_segnaled.pdf

18-Ampli_Elementari.pdf

19-Inseguitori.pdf

20-Risp_freq.pdf

21-Differenziale.pdf

22-Stadi di uscita.pdf

Opzione 2: Utilizzare il testo "Circuiti per la microelettronica" Autori Sedra, Smith, 5° edizione, Edises.

Capitolo 1

Capitolo 2

Capitolo 3: paragrafi da 3.1 a 3.5

Capitolo 4: paragrafi da 4.1 a 4.3

Capitolo 5: paragrafi da 5.1 a 5.3

Capitolo 6

Capitolo 9: paragrafi da 9.1 a 9.3

NOTA: l'indice del libro è riportato di seguito

INDICE GENERALE

- Tabelle xvi
- Note di approfondimento storico xvii
- Prefazione xviii
- Prefazione all'edizione italiana xxiii

PARTE I DISPOSITIVI E CIRCUITI FONDAMENTALI 2

1 Elettronica e semiconduttori 4

- Introduzione 5
- 1.1 I segnali 6
- 1.2 Spettro di frequenza dei segnali 9
- 1.3 Segnali analogici e digitali 12
- 1.4 Amplificatori 15
 - 1.4.1 Amplificazione del segnale 15
 - 1.4.2 Simboli dei circuiti amplificatori 16
 - 1.4.3 Guadagno di tensione 17
 - 1.4.4 Guadagno di potenza e guadagno di corrente 17
 - 1.4.5 Espressione del guadagno in decibel 18
 - 1.4.6 Le alimentazioni dell'amplificatore 18
 - 1.4.7 Saturazione dell'amplificatore 21
 - 1.4.8 Simboli e convenzioni 22
- 1.5 Modelli circuitali degli amplificatori 23
 - 1.5.1 Amplificatori di tensione 23
 - 1.5.2 Amplificatori in cascata 25
 - 1.5.3 Altri tipi di amplificatori 28
 - 1.5.4 Le relazioni tra i quattro modelli di amplificatori 28
 - 1.5.5 Come determinare R_i e R_o 29
 - 1.5.6 Modelli unilaterali 29
- 1.6 Risposta in frequenza degli amplificatori 33
 - 1.6.1 Come si misura la risposta in frequenza degli amplificatori 33
 - 1.6.2 Banda passante dell'amplificatore 34
 - 1.6.3 Calcolo della risposta in frequenza degli amplificatori 34
 - 1.6.4 Reti a singola costante di tempo 35
 - 1.6.5 Classificazione degli amplificatori in base alla risposta in frequenza 41
- 1.7 Semiconduttori intrinseci 44
- 1.8 Semiconduttori drogati 47

- 1.9 La corrente nei semiconduttori 50
 - 1.9.1 Corrente di deriva 50
 - 1.9.2 Corrente di diffusione 53
 - 1.9.3 Relazione tra D ed μ 56
- 1.10 La giunzione pn 56
 - 1.10.1 Struttura fisica 57
 - 1.10.2 Funzionamento a circuito aperto 57
- 1.11 La giunzione pn con una tensione applicata 63
 - 1.11.1 Descrizione qualitativa del funzionamento della giunzione pn 63
 - 1.11.2 La relazione corrente-tensione della giunzione pn 66
 - 1.11.3 Regione di breakdown 70
- 1.12 Effetti capacitivi nella giunzione pn 72
 - 1.12.1 Capacità di giunzione o di svuotamento 72
 - 1.12.2 Capacità di diffusione 74
- Sommario 76
- Problemi 80

2 Amplificatori operazionali 94

- Introduzione 95
- 2.1 L'amplificatore operazionale ideale 96
 - 2.1.1 I terminali dell'amplificatore operazionale ideale 96
 - 2.1.2 Funzione e caratteristiche dell'amplificatore operazionale ideale 97
 - 2.1.3 Segnale differenziale e di modo comune 99
- 2.2 La configurazione invertente 100
 - 2.2.1 Il guadagno ad anello chiuso 101
 - 2.2.2 Effetto del guadagno ad anello aperto finito 103
 - 2.2.3 Resistenze di ingresso e di uscita 104
 - 2.2.4 Un'applicazione importante: il circuito sommatore 107
- 2.3 La configurazione non invertente 109
 - 2.3.1 Il guadagno ad anello chiuso 109
 - 2.3.2 Effetto del guadagno ad anello aperto finito 111
 - 2.3.3 Caratteristiche della configurazione non invertente 111
 - 2.3.4 L'inseguitore di tensione 111
- 2.4 Amplificatori di differenza 113
 - 2.4.1 Un amplificatore di differenza a singolo stadio 114

- 2.4.2 Un circuito migliore
 - L'amplificatore per strumentazione 118
- 2.5 Integratori e derivatori 123
 - 2.5.1 La configurazione invertente con impedenze generiche 123
 - 2.5.2 L'integratore invertente 125
 - 2.5.3 Il derivatore ad operazionale 130
- 2.6 Non idealità in continua 132
 - 2.6.1 Offset di tensione 132
 - 2.6.2 Correnti di ingresso di polarizzazione e relativo offset 136
 - 2.6.3 Effetto di V_{os} e I_{os} sul funzionamento dell'integratore invertente 139
- 2.7 Effetto del guadagno e della banda ad anello aperto finiti sulle prestazioni dei circuiti 141
 - 2.7.1 Dipendenza dalla frequenza del guadagno ad anello aperto 141
 - 2.7.2 Risposta in frequenza degli amplificatori ad anello chiuso 143
- 2.8 Funzionamento per grandi segnali degli operazionali 146
 - 2.8.1 Saturazione della tensione di uscita 146
 - 2.8.2 Limiti per la corrente di uscita 146
 - 2.8.3 Slew Rate 148
 - 2.8.4 Larghezza di banda a piena potenza 150
- Sommario 151
- Problemi 152

3 I diodi 170

- Introduzione 171
- 3.1 Il diodo ideale 172
 - 3.1.1 Caratteristica tensione-corrente 172
 - 3.1.2 Una semplice applicazione: il raddrizzatore 173
 - 3.1.3 Un'altra applicazione: porte logiche a diodi 176
- 3.2 Caratteristiche ai morsetti di un diodo a giunzione 180
 - 3.2.1 La regione di polarizzazione diretta 180
 - 3.2.2 La regione di polarizzazione inversa 185
 - 3.2.3 La regione di breakdown 186
- 3.3 Modelli della caratteristica diretta del diodo 186
 - 3.3.1 Il modello esponenziale 186
 - 3.3.2 Analisi grafica usando il modello esponenziale 187
 - 3.3.3 Analisi iterativa con il modello esponenziale 187

- 3.3.4 La necessità di analizzare rapidamente un circuito 188
- 3.3.5 Modello a caduta di tensione costante 189
- 3.3.6 Il modello ideale del diodo 190
- 3.3.7 Il modello del diodo per piccoli segnali 191
- 3.3.8 L'uso della caduta di tensione diretta del diodo nella regolazione di tensione 196
- 3.4 Funzionamento nella regione inversa di breakdown – I diodi Zener 198
 - 3.4.1 Specifiche e modellistica del diodo Zener 199
 - 3.4.2 L'utilizzo dello Zener come regolatore in parallelo 200
 - 3.4.3 Effetti della temperatura 202
 - 3.4.4 Una considerazione finale 203
- 3.5 Circuiti raddrizzatori 203
 - 3.5.1 Il raddrizzatore ad una semionda 204
 - 3.5.2 Il raddrizzatore a doppia semionda 206
 - 3.5.3 Il raddrizzatore a ponte 208
 - 3.5.4 Circuito raddrizzatore con filtro capacitivo – Il raddrizzatore di picco 209
 - 3.5.5 Raddrizzatore di precisione a singola semionda – Il superdiodo 215
- 3.6 Circuiti limitatori e di aggancio 217
 - 3.6.1 Circuiti limitatori 217
 - 3.6.2 Il condensatore di aggancio o di ripristino della continua 220
 - 3.6.3 Il moltiplicatore di tensione 222
- 3.7 Tipi particolari di diodi 223
 - 3.7.1 Il diodo a barriera Schottky (SBD) 223
 - 3.7.2 I varactor 224
 - 3.7.3 I fotodiodi 224
 - 3.7.4 I diodi emettitori di luce (LED) 224
- Sommario 225
- Problemi 226

4 Il transistor bipolare a giunzione (BJT) 240

- Introduzione 241
- 4.1 Struttura del dispositivo e funzionamento fisico 242
 - 4.1.1 Struttura semplificata e modi di funzionamento 242
 - 4.1.2 Funzionamento del transistor *npn* nella regione attiva 243
 - 4.1.3 Struttura dei transistori reali 251
 - 4.1.4 Funzionamento nella regione di saturazione 252

- 4.1.5 Il transistoro *npn* 254
- 4.2 Caratteristiche corrente-tensione 256
 - 4.2.1 Simboli circuitali e convenzioni 256
 - 4.2.2 Rappresentazione grafica delle caratteristiche del transistoro 261
 - 4.2.3 Dipendenza di i_c dalla tensione di collettore - L'effetto Early 262
 - 4.2.4 Una forma alternativa delle caratteristiche a emettitore comune 265
- 4.3 Circuiti a BJT in continua 269
- 4.4 Breakdown del transistoro ed effetti della temperatura 287
 - 4.4.1 Il breakdown del transistoro 287
 - 4.4.2 Dipendenza di β da I_c e dalla temperatura 289
- Sommario 290
- Problemi 291

5 Transistori ad effetto di campo MOS (MOSFET) 302

- Introduzione 303
- 5.1 Struttura del dispositivo e funzionamento fisico 304
 - 5.1.1 La struttura del dispositivo 304
 - 5.1.2 Funzionamento con tensione di gate nulla 306
 - 5.1.3 Creazione di un canale per il flusso di corrente 306
 - 5.1.4 Comportamento per piccoli valori di v_{DS} 308
 - 5.1.5 Funzionamento al crescere di v_{DS} 312
 - 5.1.6 Funzionamento per $v_{DS} \geq V_{ov}$: pinch-off (strozzamento) del canale e saturazione di corrente 314
 - 5.1.7 Il MOSFET a canale *p* 317
 - 5.1.8 La tecnologia MOS complementare o CMOS 319
 - 5.1.9 Funzionamento del transistoro MOS in regione di sotto soglia 320
- 5.2 Caratteristiche corrente-tensione 320
 - 5.2.1 Simbolo circuitali 320
 - 5.2.2 Le caratteristiche i_D-v_{DS} 321
 - 5.2.3 La caratteristica i_D-v_{GS} 323
 - 5.2.4 Resistenza d'uscita di valore finito nella regione di saturazione 327
 - 5.2.5 Caratteristiche del MOSFET a canale *p* 330
- 5.3 Circuiti MOSFET in continua 332
- 5.4 L'effetto body e altri argomenti 344
 - 5.4.1 Il ruolo del substrato - L'effetto body 344
 - 5.4.2 Effetti della temperatura 345
 - 5.4.3 Breakdown e protezione dell'ingresso 345
 - 5.4.4 Saturazione della velocità 346

- 5.4.5 Il MOSFET a svuotamento 346
- Sommario 347
- Problemi 348

6 Amplificatori a transistori 360

- Introduzione 361
- 6.1 Principi di base 362
 - 6.1.1 Base di funzionamento di un amplificatore 362
 - 6.1.2 Realizzazione di un amplificatore di tensione 363
 - 6.1.3 Caratteristica di trasferimento in tensione (VTC) 364
 - 6.1.4 Polarizzazione del transistoro per ottenere un'amplificazione lineare 365
 - 6.1.5 Guadagno per piccolo segnale 368
 - 6.1.6 Determinazione della transcaratteristica mediante analisi grafica 374
 - 6.1.7 Posizionamento del punto di lavoro *Q* 375
- 6.2 Funzionamento e modelli per piccolo segnale 377
 - 6.2.1 Caso con MOSFET 377
 - 6.2.2 Caso con BJT 393
 - 6.2.3 Tabelle di riepilogo 414
- 6.3 Configurazioni fondamentali 417
 - 6.3.1 Le tre configurazioni di base 417
 - 6.3.2 Caratterizzazione degli amplificatori 418
 - 6.3.3 Amplificatore a source comune (CS) e a emettitore comune (CE) 420
 - 6.3.4 Amplificatore a source comune (emettitore comune) con resistenza di source (emettitore) 425
 - 6.3.5 Amplificatori a gate comune (CG) e a base comune (CB) 433
 - 6.3.6 Inseguitori di source ed emettitore 436
 - 6.3.7 Riepilogo e confronti 446
 - 6.3.8 Quando e come includere la resistenza di uscita r_o 447
- 6.4 Polarizzazione 448
 - 6.4.1 Polarizzazione del MOSFET 449
 - 6.4.2 Polarizzazione dei BJT 455
- 6.5 Amplificatori discreti 461
 - 6.5.1 Amplificatore a source comune (CS) 461
 - 6.5.2 Amplificatore a emettitore comune 464
 - 6.5.3 Amplificatore ad emettitore comune con resistenza di emettitore 465
 - 6.5.4 Amplificatore a base comune (CB) 467
 - 6.5.5 Inseguitore di emettitore (amplificatore a collettore comune) 469

- 10.3 L'amplificatore di tensione con retroazione 810
 - 10.3.1 Retroazione con topologia serie-parallelo 810
 - 10.3.2 Esempi di amplificatori con retroazione serie-parallelo 811
 - 10.3.3 Analisi dell'amplificatore di tensione con retroazione utilizzando il guadagno di anello 813
 - 10.3.4 Considerazione finale 818
 - 10.4 Analisi sistematica degli amplificatori di tensione con retroazione 818
 - 10.4.1 Il caso ideale 819
 - 10.4.2 Il caso reale 821
 - 10.5 Altri tipi di amplificatori con retroazione 830
 - 10.5.1 Principi di base 830
 - 10.5.2 L'amplificatore in transconduttanza con retroazione serie-serie 834
 - 10.5.3 L'amplificatore in transresistenza con retroazione parallelo-parallelo 845
 - 10.5.4 L'amplificatore di corrente con retroazione parallelo-serie 855
 - 10.6 Sintesi del metodo di analisi della retroazione 861
 - 10.7 Il problema della stabilità 861
 - 10.7.1 La funzione di trasferimento dell'amplificatore retroazionato 861
 - 10.7.2 Il diagramma di Nyquist 863
 - 10.8 Effetto della retroazione sui poli di un amplificatore 865
 - 10.8.1 Stabilità e posizione dei poli 865
 - 10.8.2 I poli dell'amplificatore retroazionato 866
 - 10.8.3 Amplificatore con risposta a singolo polo 867
 - 10.8.4 Amplificatore con risposta a due poli 868
 - 10.8.5 Amplificatori con tre o più poli 873
 - 10.9 Studio della stabilità per mezzo dei diagrammi di Bode 875
 - 10.9.1 Margine di guadagno e margine di fase 875
 - 10.9.2 Effetto del margine di fase sulla risposta ad anello chiuso 876
 - 10.9.3 Un approccio alternativo allo studio della stabilità 877
 - 10.10 Compensazione in frequenza 879
 - 10.10.1 Teoria 879
 - 10.10.2 Realizzazione 881
 - 10.10.3 Compensazione per effetto Miller e separazione dei poli 882
- Sommario 885
Problemi 886
- ## PARTE III CIRCUITI INTEGRATI ANALOGICI 910
-
- ### 11 Stadi di uscita e amplificatori di potenza 912
- Introduzione 913
- 11.1 Classificazione degli stadi di uscita 914
 - 11.2 Stadio di uscita in classe A 915
 - 11.2.1 Caratteristica di trasferimento 916
 - 11.2.2 Forme d'onda dei segnali 917
 - 11.2.3 Dissipazione di potenza 918
 - 11.2.4 Efficienza di conversione della potenza 920
 - 11.3 Stadio di uscita in classe B 921
 - 11.3.1 Funzionamento del circuito 921
 - 11.3.2 Caratteristica di trasferimento 921
 - 11.3.3 Efficienza di conversione della potenza 922
 - 11.3.4 Dissipazione di potenza 923
 - 11.3.5 Riduzione della distorsione da attraversamento 925
 - 11.3.6 Funzionamento con una singola alimentazione 926
 - 11.4 Stadio di uscita in classe AB 927
 - 11.4.1 Funzionamento del circuito 927
 - 11.4.2 Resistenza di uscita 929
 - 11.5 Polarizzazione del circuito in classe AB 932
 - 11.5.1 Polarizzazione mediante l'uso di diodi 932
 - 11.5.2 Polarizzazione con il circuito moltiplicatore di V_{BE} 934
 - 11.6 Variazioni della configurazione in classe AB 937
 - 11.6.1 Uso di inseguitori di emettitore in ingresso 937
 - 11.6.2 Uso di dispositivi composti 938
 - 11.6.3 Protezione dal cortocircuito 941
 - 11.6.4 Circuito per la protezione termica 942
 - 11.7 Stadi di uscita in classe AB in tecnologia CMOS 942

- nell'amplificatore differenziale bipolare 635
- 8.4.4 Un'osservazione conclusiva 636
- 8.5 L'amplificatore differenziale con carico attivo 636
 - 8.5.1 Conversione da differenziale a single-ended 636
 - 8.5.2 La coppia differenziale MOS con carico attivo 637
 - 8.5.3 Guadagno di modo differenziale della coppia MOS con carico attivo 639
 - 8.5.4 La coppia differenziale a transistori bipolari con carico attivo 643
 - 8.5.5 Guadagno di modo comune e CMRR 647
- 8.6 Amplificatori multistadio 651
 - 8.6.1 Amplificatore operativo CMOS a due stadi 651
 - 8.6.2 Un op amp bipolare 656
- Sommario 664
- Problemi 666

9 Risposta in frequenza 686

- Introduzione 687
- 9.1 Risposta in bassa frequenza degli amplificatori a source comune (CS) e ad emettitore comune (CE) 689
 - 9.1.1 L'amplificatore a CS 689
 - 9.1.2 Il metodo delle costanti di tempo in cortocircuito 697
 - 9.1.3 L'amplificatore CE 697
- 9.2 Effetti capacitivi interni e modello in alta frequenza del MOSFET e del BJT 701
 - 9.2.1 Il MOSFET 701
 - 9.2.2 Il BJT 707
- 9.3 Risposta in alta frequenza degli amplificatori CS e CE 712
 - 9.3.1 L'amplificatore a source comune 712
 - 9.3.2 L'amplificatore a emettitore comune 718
 - 9.3.3 Il teorema di Miller 722
 - 9.3.4 Risposta in frequenza dell'amplificatore CS quando R_{sig} è trascurabile 725
- 9.4 Strumenti utili per l'analisi della risposta in alta frequenza degli amplificatori 729
 - 9.4.1 La funzione guadagno in alta frequenza 729
 - 9.4.2 Calcolo della frequenza f_H a 3 dB 730
 - 9.4.3 Metodo delle costanti di tempo di circuito aperto 733
 - 9.4.4 Applicazione del metodo delle costanti di tempo a circuito aperto per l'amplificatore CS 734

- 9.4.5 Applicazione del metodo delle costanti di tempo a circuito aperto per l'amplificatore CE 738
- 9.5 Risposta in alta frequenza degli amplificatori a gate comune (CG) e cascode 738
 - 9.5.1 Risposta in alta frequenza dell'amplificatore CG 738
 - 9.5.2 Risposta in alta frequenza dell'amplificatore cascode MOS 744
 - 9.5.3 Risposta in alta frequenza dell'amplificatore cascode a bipolare 749
- 9.6 Risposta in alta frequenza degli inseguitori di source e di emettitore 750
 - 9.6.1 L'inseguitore di source 751
 - 9.6.2 L'inseguitore di emettitore 757
- 9.7 Risposta in alta frequenza degli amplificatori differenziali 758
 - 9.7.1 Analisi dell'amplificatore MOS con carico resistivo 758
 - 9.7.2 Analisi dell'amplificatore MOS con carico attivo 762
- 9.8 Altre configurazioni di amplificatori a larga banda 768
 - 9.8.1 La degenerazione di source e di emettitore per ottenere amplificazione a larga banda 768
 - 9.8.2 Le configurazioni CD-CS, CC-CE, e CD-CE 771
 - 9.8.3 Le configurazioni CC-CB e CD-CG 776
- Sommario 778
- Problemi 779

10 La retroazione 796

- Introduzione 797
- 10.1 La struttura generale della retroazione 798
 - 10.1.1 Diagramma del flusso dei segnali 798
 - 10.1.2 Il guadagno ad anello chiuso 799
 - 10.1.3 Il guadagno di anello 800
 - 10.1.4 Riepilogo 804
- 10.2 Alcune proprietà della retroazione negativa 805
 - 10.2.1 Desensibilizzazione del guadagno 805
 - 10.2.2 Estensione della larghezza di banda 806
 - 10.2.3 Riduzione delle interferenze 807
 - 10.2.4 Riduzione della distorsione di non linearità 809