

APPUNTI
DI
ELETTRONICA

(dal corso di Elettronica Generale)

Prof. G.V. Pallottino

A.A. 2010-2011

DIPARTIMENTO DI FISICA

UNIVERSITÀ SAPIENZA

ROMA

APPUNTI DI ELETTRONICA

INDICE

INTRODUZIONE ALL'ELETTRONICA

PARTE I **SEGNALI E SISTEMI**

1. Alcuni esempi introduttivi

I SEGNALI

2. Segnali analogici e digitali
3. Segnali a tempo continuo e a tempo discreto
4. Funzioni sinusoidali
5. Funzioni periodiche
6. La famiglia delle funzioni impulsive

I SISTEMI

7. Sistemi e modelli
8. Sistemi statici e sistemi dinamici
9. Sistemi lineari e sistemi non lineari
10. Sistemi stazionari e sistemi non stazionari

RISPOSTE CARATTERISTICHE

11. Risposta libera e risposta forzata
12. Risposta in regime permanente sinusoidale
13. Le risposte indici
14. Relazioni fra risposte indici e risposta in frequenza
15. Calcolo della risposta a una eccitazione qualsiasi con le risposte indici
16. Integrale di convoluzione e risposta impulsiva
17. Risposta in frequenza e risposta impulsiva
18. Risposta impulsiva e stabilità

SCHEMI A BLOCCHI E GRAFI DI FLUSSO

17. Schemi a blocchi
20. Grafi di flusso

PARTE II CIRCUITI ELETTRICI ED ELEMENTI IDEALI

1. Introduzione ai circuiti
2. I bipoli
3. Le leggi di Kirchhoff
4. Elementi a più terminali, reti a due porte

PROPRIETA' GENERALI DEGLI ELEMENTI E DEI CIRCUITI

5. Passività
6. Reciprocità

ELEMENTI IDEALI DEI CIRCUITI - Elementi ideali bipolari fondamentali

7. Resistore
8. Condensatore
9. Induttore
10. Circuiti equivalenti dei bipoli passivi reali
11. Rappresentazione delle dissipazioni degli elementi reattivi reali
12. Generatori indipendenti ideali

Elementi ideali a due porte

13. Induttori accoppiati
14. Trasformatore ideale
15. Circuito equivalente degli elementi induttivi a due porte reali
16. Giratore
17. Generatori controllati ed altri elementi attivi ideali a due porte
18. Circuito comprendente un transistor bipolare: circuito equivalente per piccoli segnali

PARTE III ANALISI DEI CIRCUITI

TOPOLOGIA DEI CIRCUITI

1. Il grafo di un circuito
2. Tagli e maglie
3. Alberi e coalberi

METODI DI ANALISI: MAGLIE E NODI

4. Il metodo delle maglie
5. Analisi in regime sinusoidale permanente
6. Il metodo dei nodi

DUALITA' E ANALOGIE

7. Dualità e circuiti duali
8. Il metodo delle analogie

ANALISI DEI CIRCUITI STATICI E DINAMICI

9. Analisi dei circuiti statici
10. Analisi dei circuiti dinamici
11. Soluzione numerica delle equazioni dei circuiti dinamici

PARTE IV IL METODO DELLA TRASFORMATA DI LAPLACE

1. La trasformata di Fourier
2. Introduzione alla trasformata di Laplace
3. I teoremi fondamentali
4. Trasformate di funzioni impulsive ed esponenziali
5. Impiego della trasformata di Laplace nei circuiti
6. Poli e zeri delle funzioni di s

METODI DI ANTITRASFORMAZIONE

7. Il metodo dei residui
8. Il metodo dello sviluppo in frazioni parziali
9. Le funzioni con poli multipli
10. Alcune note su zeri e poli

PARTE V FUNZIONI DI RETE, RETI DUE PORTE, LINEE

1. Funzioni di rete e funzioni di trasferimento
2. Risposta in frequenza

RISPOSTE CARATTERISTICHE

3. Le risposte caratteristiche
4. I circuiti RC
5. Il circuito RLC serie
6. Il circuito RLC parallelo

RETI DUE PORTE

7. Rappresentazione delle reti due porte
8. Amplificazioni, impedenze e impedenze caratteristiche
9. Reti in cascata

CONDIZIONI DI NON DISTORSIONE E SFASAMENTI

10. Condizioni di non distorsione
11. Relazioni fra ampiezza e fase
12. Il problema della fase

LINEE DI TRASMISSIONE (vedi capitoli 1 e 2 del testo Alberigi-Rispoli, *Elettronica*)

13. Introduzione alle linee di trasmissione
14. Qualche considerazione sulle costanti delle linee di trasmissione
15. Linea di trasmissione di lunghezza infinita e casi particolari
16. Linea di trasmissione di lunghezza finita collegata a un carico
17. Risposta al gradino di un tratto di linea ideale
18. Risposta di una linea in regime sinusoidale
19. Breve cenno sulle antenne
20. Linee di ritardo a costanti concentrate e altre tecniche

PARTE VI DISPOSITIVI E CIRCUITI A SEMICONDUTTORI (BOZZA INCOMPLETA)

RICHIAMI SUI SEMICONDUTTORI

1. Bande di energia e distribuzione in energia degli elettroni
2. Semiconduttori intrinseci
3. Semiconduttori drogati
4. Generazione e ricombinazione
5. Trasporto di cariche per deriva e diffusione
6. Alcuni effetti su cui si basano certi dispositivi utilizzati come trasduttori
7. Equazione di continuità. Iniezione di portatori minoritari
8. Drogaggio non uniforme.

LA GIUNZIONE PN. DISPOSITIVI A SINGOLA GIUNZIONE E CIRCUITI

9. La giunzione PN
10. La giunzione PN con polarizzazione esterna
11. Diodi reali in polarizzazione diretta e inversa
12. Capacità di transizione e diodi varicap. Capacità di diffusione
13. Alcuni circuiti impieganti diodi
14. Effetti di breakdown. Diodi zener e diodi tunnel
15. Fotodiodi e rivelatori di radiazioni
16. Celle fotovoltaiche
17. Diodi emettitori di luce (LED)

PARTE VII AMPLIFICATORI LINEARI

1. Generalità

RISPOSTA AI TEMPI BREVI

2. Calcolo dei tempi caratteristici
3. Amplificatori a larga banda
4. Composizione dei tempi caratteristici
5. La larghezza di banda

RISPOSTA AI TEMPI LUNGI

6. La pendenza iniziale della risposta indiciale
7. Composizione delle pendenze iniziali

CENNI SUGLI AMPLIFICATORI PER GRANDI SEGNALI

8. Generalità sugli amplificatori per grandi segnali
9. Classi di funzionamento

PARTE VIII LA CONTROREAZIONE

1. Introduzione alla controreazione

GLI EFFETTI DELLA CONTROREAZIONE

2. La desensibilizzazione
3. La linearizzazione
4. L'effetto sui disturbi
5. Gli effetti sulla risposta dinamica
6. La risposta dinamica nel dominio del tempo

UNO SCHEMA PIU' GENERALE PER GLI AMPLIFICATORI A CONTROREAZIONE

7. Un modello più generale
8. Classificazione e proprietà degli amplificatori reazionati
9. L'effetto della reazione sulle impedenze d'ingresso e d'uscita

GLI AMPLIFICATORI OPERAZIONALI

10. Gli amplificatori operazionali
11. Analisi semplificata nell'approssimazione di guadagno infinito
12. Realizzazione di funzioni di trasferimento prefissate
13. Analisi tenendo conto del guadagno finito dell'amplificatore

CENNI SUGLI OSCILLATORI

14. Introduzione agli oscillatori
15. Oscillatori a resistenza negativa
16. Oscillatori a reazione positiva

PARTE IX IL RUMORE

1. Introduzione al rumore
2. Aspetti matematici del rumore
3. Il rumore termico
4. Il teorema di Nyquist e la sua generalizzazione
5. Il rumore shot
6. Il rumore $1/f$ e altri tipi di rumore
7. Rappresentazione del rumore nelle reti elettriche
8. Fattore di rumore e temperatura di rumore
9. Cenni sul rumore dei dispositivi
10. Cenni sulla progettazione a basso rumore

APPENDICI

A I TEOREMI DEI CIRCUITI

1. Teorema del massimo trasferimento di potenza
2. Teorema di Helmholtz-Thévenin
3. Teorema di Norton

4. Teorema di Millman
5. Teorema di Miller

B I DIAGRAMMI DI BODE

1. La rappresentazione grafica delle funzioni dei sistemi nel dominio della frequenza
2. I diagrammi di Bode dei fattori standard
3. La composizione dei diagrammi di Bode

C L'AFFIDABILITA'

1. Cenni sull'affidabilità
2. I criteri per ottenere elevata affidabilità

ESERCIZI

TESTI CONSIGLIATI

A.Alberigi Quaranta, B.Rispoli *Elettronica* Zanichelli, 1960
per il materiale sulle linee di trasmissione (capitoli 1 e 2)

J.Millman, C.C.Halkias *Microelettronica* Boringhieri, 1978
per il materiale sui semiconduttori (capitoli 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 19)

S.M. Sze *Semiconductor Devices, Physics and Technology* John Wiley, 1985
per il materiale sui dispositivi

S.Cantarano, G.V.Pallottino *Elettronica Integrata, Circuiti e sistemi analogici* Etas Libri, 2^a
edizione, Milano, 1985

G.Martinelli, M.Salerno *Fondamenti di Elettrotecnica* Siderea, 1986

C.J.Savant, M.S.Roden, G.L.Carpenter *Electronic Design, Circuits and Systems*
Benjamin/Cummings, 1991

J.Millman, A.Grabel *Microelectronics* McGraw Hill, 1988

P.U.Calzolari, S.Graffi *Elementi di Elettronica* Zanichelli, Bologna, 1984

P.Horowitz, W.Hill *The Art of Electronics* Cambridge University Press, 2^a edizione, 1989

G.V. Pallottino *Il rumore elettrico – dalla fisica alla progettazione* Springer, 2011

INTRODUZIONE ALL'ELETTRONICA

In passato, si datava la nascita dell'**elettronica** (questo termine si è diffuso a partire dagli anni Trenta del secolo scorso) con la scoperta dell'elettrone (1897) e con l'invenzione di vari dispositivi basati sul moto di cariche elettriche nel vuoto, come il tubo a raggi catodici, il diodo, il triodo e gli altri tubi elettronici che furono introdotti nei primi decenni del Novecento. L'elettronica si configurava dunque come la scienza e la tecnica dei dispositivi elettronici propriamente detti, che trovavano impiego, soprattutto, nella trasmissione di informazioni, con la radio e la telefonia a grande distanza. Inoltre, poichè le intensità di corrente usate in questi dispositivi erano generalmente assai inferiori a quelle impiegate nelle altre, e più antiche, applicazioni dell'elettricità, l'elettronica era intesa come tecnica delle "correnti deboli" per distinguerla dalla tecnica delle "correnti forti" o elettrotecnica¹, che riguardava invece le applicazioni in cui l'energia ha un ruolo essenziale (macchine e impianti per la produzione, la trasmissione a distanza e l'utilizzazione pratica dell'energia elettrica).

Nel medesimo quadro si collocava, dopo l'invenzione del transistor (1947), la diffusione di una estesa varietà di nuovi dispositivi, che differivano da quelli precedenti perchè il moto delle cariche aveva luogo in corpi solidi², anzichè nel vuoto (o in un gas), e il loro impiego in una molteplicità di applicazioni.

Nello stesso tempo, però, il dominio di attenzione dell'elettronica si era allargato a coprire nuovi settori di applicazioni, che andavano via via sviluppandosi, e si erano arricchiti grandemente anche gli sviluppi di natura teorica e formale che si erano resi necessari. Al settore tradizionale della trasmissione dell'informazione (cioè delle "comunicazioni", in cui rientra assai bene anche tutta la problematica delle misure fisiche) si erano aggiunti infatti i nuovi campi della elaborazione dell'informazione: cioè quello dei sistemi di controllo e quello dei calcolatori.

¹ Oggi il termine elettrotecnica è usato spesso con il significato di teoria dei circuiti elettrici.

² Ricordiamo peraltro che le prime scoperte, e le prime applicazioni, dei dispositivi a stato solido hanno preceduto quelle dell'elettronica dei dispositivi a vuoto. La scoperta, per esempio, dell'effetto Hall era avvenuta già nel 1879. I [primi "diodi"](#) (i raddrizzatori a baffo di gatto, basati sulle proprietà di un contatto metallo-semiconduttore) erano stati costruiti da F. Braun nel 1874 e furono usati largamente ai primordi della radio. Ma a quel tempo non si disponeva ancora delle basi teoriche della fisica dei solidi (in particolare della meccanica quantistica) e questo impedì ulteriori progressi. Tuttavia, vari tipi di raddrizzatori a stato solido (selenio, ossido di rame) furono sviluppati su basi empiriche e usati comunemente fino a qualche decennio addietro.

Il dominio di interesse dell'elettronica, così, mutava grandemente rispetto a quello tradizionale: dal punto di vista delle applicazioni l'elettronica diventava sinonimo di 3C (comunicazioni, controlli e calcolatori), mentre la definizione di tale disciplina veniva ad essere, secondo un Autore (W.L. Everitt, 1952): "la scienza e la tecnica che tratta principalmente dell'ausilio ai sensi dell'uomo e al suo potere cerebrale per mezzo di dispositivi che raccolgono ed elaborano l'informazione". In realtà, la discussione sulla definizione dell'elettronica è tutt'altro che conclusa ed è anzi destinata a continue revisioni per la continua crescita di nuovi sviluppi, teorici e sperimentali, e di nuove applicazioni pratiche.

Questa differenza fondamentale rispetto al passato per ciò che s'intende per elettronica è segnata anche da una tendenza continua di questa disciplina verso la "dematerializzazione", come avviene del resto anche in altri settori. Sebbene la parte fisica e materiale dell'elettronica (l'hardware) abbia sempre grandissima importanza, con la continua introduzione di nuove tecnologie e la loro diffusione in ogni ambito della società umana, vogliamo sottolineare l'evoluzione che si è svolta nei decenni trascorsi, conducendo l'elettronica, inizialmente intesa soltanto come scienza e tecnica dei dispositivi, ad estendere i suoi contenuti in un quadro più generale, in particolare per quanto riguarda gli aspetti formali e metodologici. Questi hanno avuto origine, soprattutto, dall'esigenza importantissima di modellizzare in modo significativo, e al stesso tempo efficiente, gli oggetti fisici (dispositivi, circuiti e sistemi) di interesse per l'elettronica, di analizzarne il comportamento e di progettarli efficacemente, in relazione alle loro applicazioni. E sono proprio questi aspetti formali e metodologici dell'elettronica, in buona misura indipendenti dalle tecnologie e dai loro sviluppi nel tempo, che vengono privilegiati nella formazione universitaria, mirata a fornire all'allievo le basi più durevoli.

Ai contenuti e al quadro concettuale dell'elettronica, pertanto, contribuiscono varie discipline sia prettamente fisiche (in particolare l'elettromagnetismo e la fisica dello stato solido), che forniscono le basi, teoriche e sperimentali, per la comprensione dei dispositivi già noti e per la creazione di nuovi dispositivi, sia fisico-matematiche, con cui si costruiscono i modelli dei dispositivi, dei circuiti e dei sistemi da essi costituiti, e dei segnali che vengono usati per rappresentare l'informazione.

Esemplare, a questo riguardo, è la vicenda della "teoria dei circuiti", che tratta dei metodi di rappresentazione, di analisi e di sintesi dei circuiti elettrici. Questa teoria avrebbe potuto svilupparsi, attraverso opportune specializzazioni ed approssimazioni, a partire dal

quadro generale riassunto dalle equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo. E' accaduto, invece, che lo sviluppo della teoria dei circuiti sia avvenuto sulla base di definizioni formali, assunte come principi, per il comportamento di elementi idealizzati (come il resistore, il condensatore e l'induttore) e di altre definizioni formali, costituite essenzialmente dalle leggi di Kirchhoff (assunte come principi, anzichè come conseguenze particolari delle equazioni di Maxwell), per trattare le interconnessioni degli elementi idealizzati che costituiscono i circuiti.

Bisogna dire che questo modo di procedere ha condotto a risultati assai fecondi: l'eleganza e la semplicità del quadro teorico così costruito e delle metodologie che sono state sviluppate a tale proposito, è venuto a costituire, addirittura, un paradigma per la trattazione di argomenti anche assai lontani da quello dell'elettricità. La teoria dei circuiti ha trovato infatti molteplici applicazioni, che si estendono, per esempio, dallo studio di sistemi biologici all'analisi del comportamento dinamico di strutture meccaniche e di sistemi termici.

Consideriamo ora un aspetto essenziale nella considerazione del ruolo attuale dell'elettronica. Questo riguarda gli importantissimi e molteplici effetti dell'introduzione (1958) dei **circuiti integrati monolitici**, cioè di circuiti realizzati entro un solido semiconduttore, la cui complessità sta crescendo da decenni con legge esponenziale (legge di Moore): oggi si costruiscono moduli integrati contenenti anche centinaia di milioni di transistori. A questo proposito ricordiamo che l'inventore del circuito integrato, l'ingegnere americano Jack St.Clair Kilby, ha ricevuto il premio Nobel per la Fisica nel 2000³, e ricordiamo anche il contributo essenziale del fisico italiano [Federico Faggin](#) all'invenzione del microprocessore.

Ciò che più importa è che il perfezionamento dei processi di fabbricazione, e in particolare l'impiego dell'automazione, ha consentito di realizzare dispositivi, anche di notevole complessità, a costi straordinariamente inferiori a quelli del passato (quando i circuiti corrispondenti venivano realizzati "a componenti discreti") e con affidabilità assai maggiore. Proprio la larga disponibilità a basso costo di potenti dispositivi di elaborazione elettronica ha rappresentato un elemento decisivo nel decollo della cosiddetta "rivoluzione dell'informazione" (o seconda rivoluzione industriale) che stiamo vivendo in questi anni. Per comprenderlo, basta pensare anche soltanto agli sviluppi nel campo dei calcolatori e delle loro applicazioni, e al ruolo di questa tecnologia nella società d'oggi.

³ <http://nobelprize.org/physics/laureates/2000/kilby-lecture.html>

Ma gli sviluppi dell'elettronica integrata hanno anche avuto profondi effetti nel quadro dell'elettronica stessa: da un lato spostando l'attenzione dall'analisi e dal progetto dei circuiti e dei sistemi mediante componenti discreti verso una visione sistemistica, cioè basata su un largo, e talvolta addirittura esclusivo, impiego di moduli funzionali integrati, dall'altro accentuando ancora l'attenzione verso gli aspetti più direttamente rivolti all'elaborazione dei segnali intesi come supporto dell'informazione.

Sotto questo punto di vista, che si ricollega alla tendenza verso la dematerializzazione accennata prima, i dispositivi, non più necessariamente soltanto di tipo elettrico, vengono ad assumere solo il ruolo di mezzi fisici per la realizzazione di opportune funzioni di elaborazione. Già oggi, in elettronica, non mancano esempi d'impiego di dispositivi non elettrici (risonatori meccanici di vario tipo, dispositivi a onde acustiche superficiali, dispositivi "fotonici" per sistemi di trasmissione basati su impulsi di luce che viaggiano in fibre ottiche). E del resto la nuova tecnologia fotonica ha già soppiantato quella elettronica in senso stretto in parecchi settori delle telecomunicazioni. Ma anche a questa nuova tecnologia è l'elettronica a fornire tutto il necessario quadro metodologico, analitico e progettuale, come infatti si verifica a proposito dei sistemi di trasmissione di tipo ottico.

Notiamo infine, per concludere, che l'elettronica gioca un ruolo essenziale nella formazione culturale di un fisico, anche a prescindere dai vari sbocchi professionali diversi da quelli tradizionali della ricerca scientifica e industriale, sotto due distinti punti di vista:

- 1) l'elettronica costituisce attualmente la tecnologia essenziale per la realizzazione degli apparati sperimentali;
- 2) le metodologie dell'elettronica costituiscono un potente ausilio nello studio, in particolare nella modellizzazione e nell'analisi dinamica, dei sistemi fisici di qualsiasi natura, e nella elaborazione e nell'analisi dei dati sperimentali, che costituisce oggi un aspetto di importanza primaria nella ricerca fisica.