



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO : 87

DATA : 28/04/2011

A P P U N T I

STUDENTE : Alessio

**MATERIA : Elettronica + Macchine Elettriche + Esercizi
Prof. Reyneri - Arcidiacono**

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

11/10/10

Prof. Reymeri → elettronica

Prof. Arcidiacono → macchine elettriche

Test di elettrotecnica dopo un paio di settimane → può far punti per l'esame !!!

A volte domandine su quello che è stato fatto → possono far punti per l'esame anche queste !!!

Esame NON SERVE LO STATINO! 2h

- scritto → min. 15 + pt. del test + mezza pt. delle domandine
- orale → eventuale e può essere tenuto in sospeso qnt si vuole
- * lo scritto può essere ridato → se si consegna vale il compito nuovo, se ci si ritira vale quello vecchio

scritto: se no pt in più, voto max 27, cmq si può prendere anche 35 pt
 $\frac{2}{3}$ elettronica, $\frac{1}{3}$ macchine elettriche

↳ anche di qnt parte si possono raccogliere pt durante l'anno

- 1 domanda di progetto (progetto semplice)
- dato un circuito → analizzarlo opp. descrivere un componente
- 1 macchina elettrica → analizzarla

cmq vedi al centro stampa → esempi di esame

Materiale

- dispense centro stampa
- vanno bene libri da perito (elettronica analogica e digitale)

• libretto politeco:

Reymeri - Chiaberge

Esercizi svolti di elettronica (ing. serexp.)

Emilio Ambrosini
ed. Tronantoma
- di Elettronica Analogica
e di Potenza
- di Elettronica Digitale

• Beards ; Jackson libri

Elettronica analogica e digitale

} fuori produzione

• Martin - Jones ; Hoepfi

Elettronica dei circuiti

} o uno o l'altro

• Rashid ; Apsey

Fondamenti di elettronica

} molto avanzato



SEMICONDUITTORE

- materiale (derivato principalm. del silicio)
- componente realizzato tramite il materiale semicond. } ambiguità ma si capisce dal contesto!

Materiale:

gruppo IV → derivati di silicio e magnesio } pochi materiali diversi
 leghe di gruppi III e V

Componenti derivati → decine di migliaia

Normalmente NON-LINEARITÀ da fastidio "

salvo qnd la si vuole esplicitam. (es. chitarra elettrica ")

→ voglio cose lineari (non distorte) ma le ottengo tramite compon. non lineari!

Elettrotecnica → è impossibile amplificare la potenza! la si può solo trasformare

Elettronica → un circuito permette di amplificare la potenza.

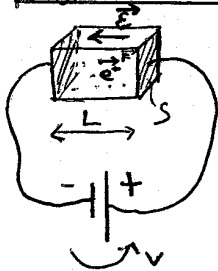
tut compon. non lineari nel complesso:

- amplificano la potenza
- in maniera lineare!

se messi assieme in modo diverso possono fare altre cose diverse.

Semiconduttore → conduce male/poco MA in un modo ben preciso.

Legge di Ohm : $V = RI$



estremi metallizzati collegati a 2 fili elettrici di rame che io collego ad una batteria → applico una certa diff. di potenziale V .

Dentro parallelepipedo di materiale conduttore omogeneo io ho degli atomi → protoni, elettroni, neutroni

Se stacco un elettrone da un atomo io ottengo degli ioni fissi (reticolo) ed elettroni liberi di muoversi (staccati per questioni termiche)

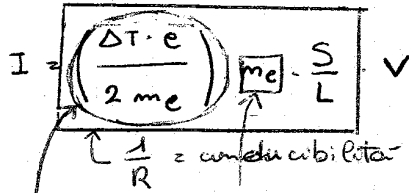
buon conduttore → tutt e^-

buoni isolante → pochissimi e^-

$1e^- \rightarrow$ circa $-1,6 \cdot 10^{-19} C \Rightarrow 1e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$ (elettrone usato come unità di misura → carica di un elettrone = $-1e$)

Quindi otteniamo:

$$I = \frac{m_e \cdot S \cdot k}{k} \cdot \frac{1}{2} \Delta T \cdot \frac{e \cdot V}{L \cdot m_e} \quad \text{N.B. } \Delta T \neq T$$



• $\frac{\Delta T \cdot e}{2 m_e} = \mu_e = \text{mobilità dell'elettrone} = \text{cost}$

- buon conduttore → μ_e elevato (Cm. max 3-4 per ogni atomo)
- buon isolante → μ_e piccolissimo
- semiconduttore → μ_e intermedio

→ $\left(\frac{\Delta T \cdot e}{2 m_e}\right) \cdot m_e = \sigma = \text{conduttività specifica} = \frac{1}{\rho}$

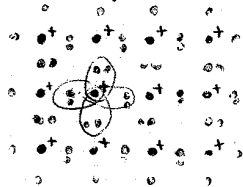
N.B. conduttori ed isolanti → sa termici che elettrici
(pochissime eccezioni!)

SEMICONDUTTORE

- cristallino (gruppi IV opp. leghe III-V)

(silicio e germanio → reticolo tetraedrico)

→ sul piano: ogni atomo è a forma di matrice, regolare, oo



Ogni nucleo ha 4 vicini, ci sono 4 e- nello strato esterno (gruppo IV)

• = nucleo + elettroni nn esterni (carica +4)
(nuclei fissi salvo piccoli moti browniani)

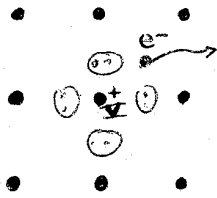
→ config. elettronica poco stabile (4 e- esterni)

MA atomo centrale vede intorno a se 8 e- (4 suoi + 4 di altri) idem altri atomi → ql atomo lettero il più possibile per tenersi quegli 8 e- vicini (legame covalente → molto duro! es. diamante)

Dal pt di vista elettronico qst materiale è un semiconduttore intrinseco (cristallograficam. perfetto).

Se per caso un e- si stacca e diventa libero (ne ho pochi liberi!) ovviam. soddisfa la legge di Ohm (e- libero)!

Solo che μ_e e- piccolo, d' e- che se ne va lascia dietro di se una ione positivo fisso nn neutralizzato.



Ogni nucleo vede intorno a se- 4 coppie di elettroni. Sostituiamo idealm l'atomo centrale con un'impurita- \rightarrow elemento del gruppo V \rightarrow ora c'è un e- in più, che e- già libero da subito! Tutti gli atomi del gruppo V perdono subito un e- e lasciano dietro di se- uno ione, ma un una lacuna !!!

\Rightarrow impurita- di tipo DONATORE (dona un e-)

Una a atomi di impurita- ogni milione di atomi di silicio !!

Non deve avere quanta sconosciute di impurita- (devo partire da un silicio che ha un più di 10^{-9} atomi indesiderati, ^{per atomo di Si} $10^{-5} \div 10^{-6} \rightarrow$ silicio chimicam. puro ma e- già troppo !!!)

\rightarrow sviluppi tecnologici per fare silicio a basso costo e purezza elevatissime.

\Rightarrow Silicio DROGATO con impurita- di tipo DONATORE genera un surplus di e- liberi $\rightarrow n_e = N_D \leftarrow$ donatore

Qst materiale un genera lacune, MA le lacune ci sono! Il resto e' silicio intrinseco!

$$N_D \gg n_i = p_i$$

Le lacune sono cariche positive, gli e- sono cariche -ve \rightarrow si attraggono!

Nel silicio intrinseco tutt si annichilano qnt se ne generano

Qui però ho tutt lacune create dagli elettroni \rightarrow annichilo

molte più lacune di qnt ne genero \rightarrow il no delle lacune diminuisce!

Rispetto ad un intrinseco \rightarrow tutt e- in più

tutt lacune in meno

Qst e' un semiconduttore di tipo "n"

$$L \rightarrow n_e \approx N_D$$

$$p_h \leftarrow \text{tipo n}$$

dove, necessariamente, $n_i \cdot p_i = n_n \cdot p_n$

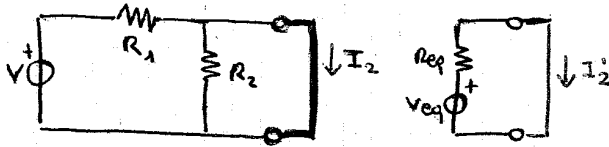
$\uparrow \uparrow$ \uparrow
 le conosci le deduci

Lo ricavo da qst formula ed e- inversam proporz. a n_n

N.B.

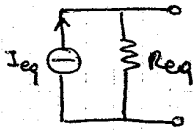
Poss quindi trascurare $n_p \cdot p_p$ nella formula !!!

N.B. Per calcolare R_{eq} si può fare anche:

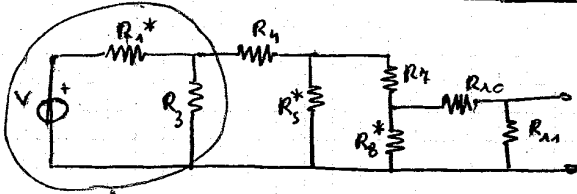
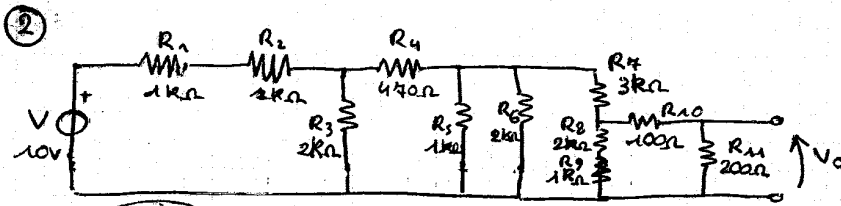


calcolo $I_2' \rightarrow$ ricavo R_{eq}
 $I_2 = I_2'$

$$I_2 = \frac{V}{R_1} = \frac{V_{eq}}{R_{eq}} \rightarrow R_{eq} = \frac{V_{eq}}{V} R_1 = \frac{V R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0,64 k\Omega$$



R_{eq} e I_{eq} sono di prima } Equivalente di Norton
 $I_{eq} = \frac{V_{eq}}{R_{eq}}$

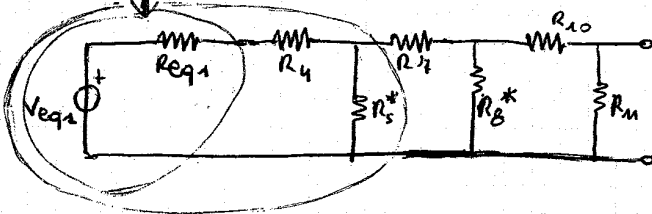


$$R_1^* = R_1 + R_2 = 2 k\Omega$$

$$R_3^* = \frac{R_3 R_6}{R_3 + R_6} = 0,64 k\Omega$$

$$R_6^* = R_6 + R_7 = 3 k\Omega$$

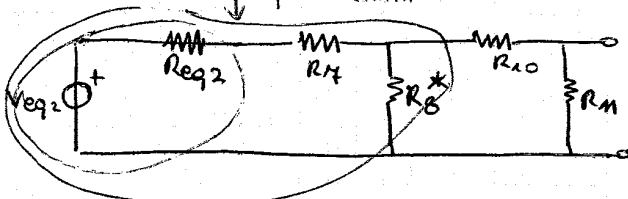
eq. Thevenin



$$V_{eq1} = V \frac{R_3}{R_3 + R_1^*}$$

$$R_{eq1} = \frac{R_3 R_1^*}{R_3 + R_1^*}$$

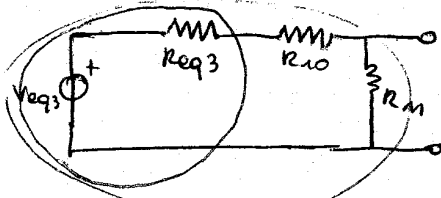
eq. Thevenin



$$V_{eq2} = V_{eq1} \frac{R_6^*}{R_{eq1} + R_4 + R_6^*}$$

$$R_{eq2} = \frac{R_6^* (R_{eq1} + R_4)}{R_6^* + R_{eq1} + R_4}$$

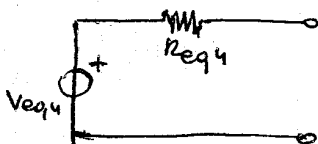
eq. Thevenin



$$V_{eq3} = V_{eq2} \frac{R_6^*}{R_{eq2} + R_4 + R_6^*}$$

$$R_{eq3} = \frac{R_6^* (R_{eq2} + R_4)}{R_6^* + R_{eq2} + R_4}$$

eq. Thevenin



$$V_{eq4} = V_{eq3} \frac{R_{11}}{R_{eq3} + R_{10} + R_{11}} = V_0 = 0,045 V$$

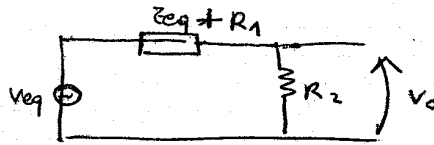
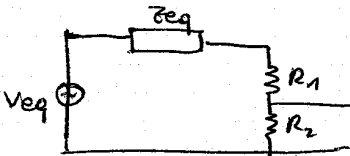
$$R_{eq4} = \frac{R_{11} (R_{eq3} + R_{10})}{R_{11} + R_{eq3} + R_{10}}$$

⑨

$$\begin{aligned}
 v_{eq}(t) &= v(t) \frac{z_2^*}{z_1 + z_2^*} = 10V \sin(\omega t) \frac{j0,314 \Omega}{1000 \Omega + j0,314 \Omega} = \\
 &= 10V \sin(\omega t) \left[\frac{j0,314 (1000 - j0,314)}{1000^2 + (0,314)^2} \right] = \\
 &= 10V \sin(\omega t) \left[\frac{j314 + 0,0986}{1000000,099} \right] = 10V \sin(\omega t) [0,99 \cdot 10^{-7} + j0,000314]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{v}_{eq} &= \bar{v} [0,99 \cdot 10^{-7} + j0,000314] = 10V e^{j\frac{\pi}{2} \text{rad}} [\quad] = \\
 &= 10V \cdot j [0,99 \cdot 10^{-7} + j0,000314] = \\
 &= j0,99 \cdot 10^{-6} V - 0,00314 V
 \end{aligned}$$

$$z_{eq} = \frac{z_1 z_2^*}{z_1 + z_2^*} = \frac{1000 \Omega \cdot j0,314 \Omega}{1000 \Omega + j0,314 \Omega} = \frac{j314}{1000 + j0,314} \Omega$$



Millman:

$$\begin{aligned}
 \bar{v}_o &= \frac{\bar{v}_{eq}}{z_{eq} + R_1} = \frac{-0,00314 + j0,99 \cdot 10^{-6}}{\frac{j314}{1000 + j0,314} + 1000} \quad V = \\
 &= \frac{1}{z_{eq} + R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{\frac{j314}{1000 + j0,314} + 1000} + \frac{1}{1000} \\
 &= \frac{-0,00314 + j0,99 \cdot 10^{-6}}{\frac{j314 + 10^6 + j314}{1000 + j0,314}} = \\
 &= \frac{1}{\frac{j314 + 10^6 + j314}{1000 + j0,314}} + \frac{1}{1000} \\
 &= \frac{(-0,00314 + j0,99 \cdot 10^{-6})(1000 + j0,314)}{j628 + 10^6} = \\
 &= \frac{1000 + j0,314}{j628 + 10^6} + \frac{1}{1000} \\
 &= \frac{-3,14 + j0,99 \cdot 10^{-3} - j0,99 \cdot 10^{-3} - 0,31 \cdot 10^{-6}}{10^6 + j314 + 10^6 + j628} = \\
 &= \frac{-3,14 (j628 \cdot 10^6 + 10^9)}{2 \cdot 10^6 + j942} = \frac{-j19,42 \cdot 10^4 - 3,14 \cdot 10^9}{2 \cdot 10^6 + j942} = \\
 &= \frac{3,146 \cdot 10^9 A e^{j3,59^\circ}}{2 \cdot 10^6 S e^{j0,024^\circ}} = 1573 V e^{j3,563^\circ} = \\
 &= 1573 V e^{j0,062 \text{ rad}}
 \end{aligned}$$

18/10/10

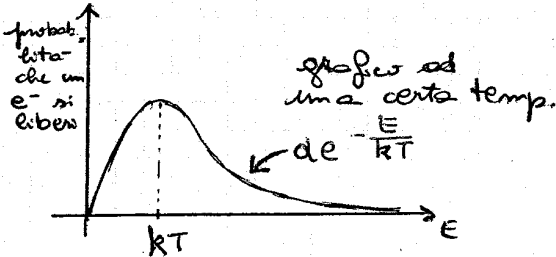
... Semiconduttori

Da cosa dipende la generazi di coppie elettrone-lacuna ?

Dall' agitaz. termica !

Quanti elettroni hanno energia superiore all' en. min per rompere il legame ?

Vediamolo graficamente:



en. suff. a rompere i legami:

- bassa per i conduttori ($\ll KT$)
- altissima per gli isolanti
- a metà strada per i semicond.

A $25^\circ C \rightarrow KT = 25,9 \text{ meV}$ (millesimi elettronvolt)

↑
prodotto di una carica per una tensione = energia

In genere: $E = V \cdot Q$

↑ potenziale ← carica

$1V \cdot 1C = 1J$

$1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J$

KT = en. che ogni elettrone ha a $25^\circ C$

N° di elettroni che \geq l'energia: $n_e = N \cdot d e^{-\frac{E}{KT}}$

↑
n° di atomi del materiale

A me interessa sapere quante elettroni hanno en. superiore ad un certo valore:

$$\int_{E_G}^{\infty} N d e^{-\frac{E}{KT}} dE = N d \int_{E_G}^{\infty} e^{-\frac{E}{KT}} dE = N d \left[\frac{-1}{KT} e^{-\frac{E}{KT}} \right]_{E_G}^{\infty} = 0 - \left(\frac{-N d}{KT} e^{-\frac{E_G}{KT}} \right) = \frac{N d}{KT} e^{-\frac{E_G}{KT}} = n_i = p_i$$

(E_G)
energy gap.

$T \uparrow \rightarrow \frac{N d}{KT} \downarrow$ ma $e^{-\frac{E_G}{KT}} \uparrow$

\rightarrow all' aumentare della T

n_i e p_i aumentano! (rapidamente)

Poi involucro plastico:

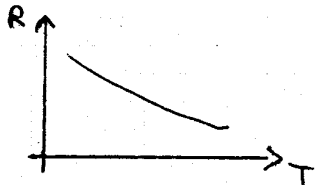
- evita che il semicond. venga drogato
- evita che elementi esterni (H_2O , aria) conducano

$R \approx \text{cost}$, in realtà piccole variaz. in funz. della temp.

→ vari grafici

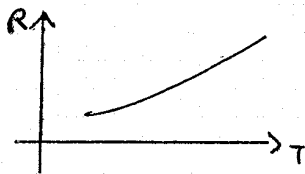
Variaz. di R in funz. di $T = \text{coeff. termico}$:

es 1% di variaz. di $R \quad \forall \quad 1^\circ C$



NTC

negative temperature coefficient
(più usato)



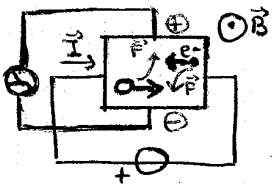
PTC

positive temperature coefficient

N.B. relaz. non lineare! → termometri di precisione non
mano opt componenti!

da uso qnd voglio una stima approssimaz. opp. qnd
ho un valore soglia da regolare qnd sono sopra o sotto
(termostati → fanno scattare un interruttore e basta)

Sensore a effetto di Hall



sezione, metallizzata sui 4 lati

applico $V \rightarrow I$ all'interno

→ 2 flussi di cariche < $\left\{ \begin{array}{l} \text{elettroni: da dx a sx} \\ \text{lacune: da sx a dx} \end{array} \right.$
(semicond intrinseci)

Corrente immersa in un camp. magnetico \perp foglia

legge di Lorentz → \vec{I} e \vec{B} interagiscono → $\vec{F} \curvearrowright$

→ sopra accumulo di lacune \oplus

↳ sotto: " di elettroni \ominus

} condensatore carico!

V proporz. a I e B

se $V = \text{cost.} \rightarrow$ misuro B

Appena una lacuna entra nella zona di svuotam. vede \vec{E}
 → viene sottoposta ad una forza che la spinge indietro (verso sx)
 Su un e^- che entra nella zona di svuotam. agisce una forza
 verso dx → lo spinge indietro

⇒ finché la pressione del gas di lacune (e quella di e^-)
 non equilibra la forza repulsiva → la zona di svuotam si
 allarga.

\vec{E} dipende dalla quantità di carica, la quale dipende da
 - concentraz. (drogaggio)
 - volume → stessa sezione, spessore diverso
 man mano che aumenta la zona di svuotam

⇒ p di gas sempre la stessa

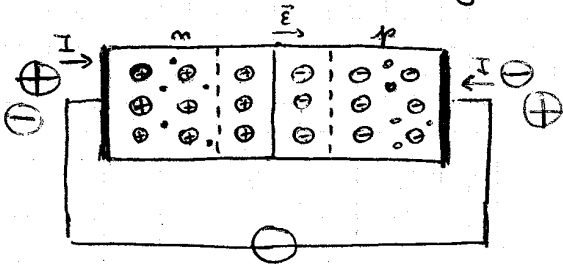
↓ \vec{E} aumenta man mano che aumenta la zona di svuotam

la spessore della zona di svuotam dipende dalla T perché
 la p del gas dipende dalla T (Van der Waals)

Giunzione p-n: 4 parti (da sx verso dx):

- 1) semicond. di tipo p → p
- 2) zona di svuotam. -va
- 3) zona di svuotam. +va } → intrinseco omogeneo
- 4) semicond. di tipo n → n

Ora mettiamo gli estremi:



① Spetticismo $+ \ominus$

3 resistenze in serie:

n, intrinseco, p

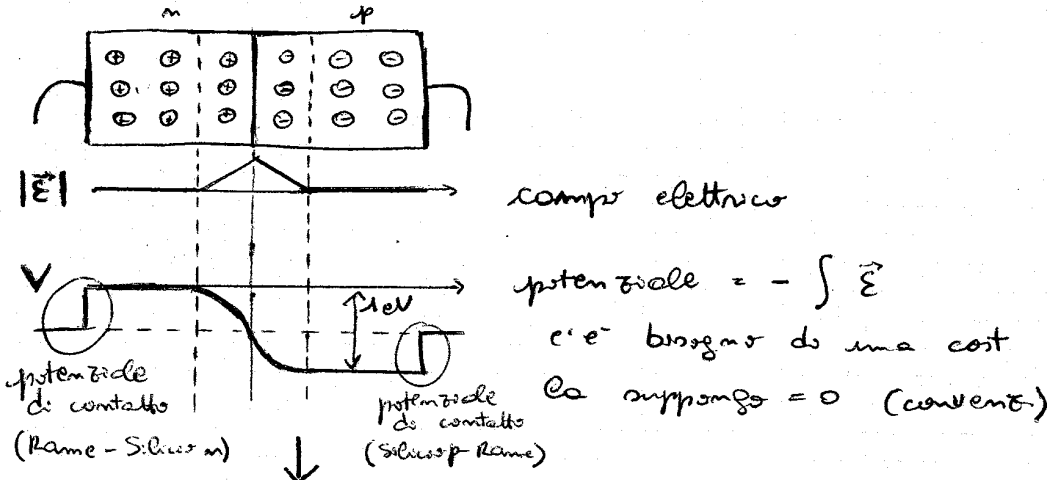
le quali hanno un valore diverso:

n, p → R bassa

intrinseco → R alta

} la serie avrà R alta → I bassa

Giunzione p-n non polarizzata (no tensione applicata ai capi)

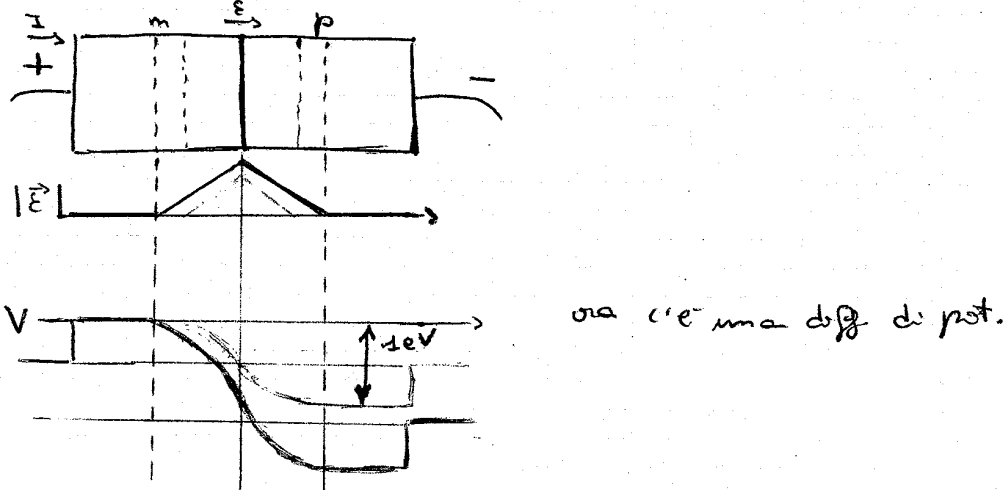


sembra che ci sia una diff di pot. tra n e p
 se collego i 2 fili però non posso avere una diff di pot.
 se collego i 2 fili ad un voltmetro.

Qst per questioni termodin. se attaccassi una resistenza ai 2 fili avrei un riscaldamento, se ce fosse una diff di pot e \rightarrow una corrente
 \rightarrow potrei spostare calore tra 2 pt di un sist. alla stessa temp senza apporti di en. esterna \parallel

La somma dei 2 pot di contatto coincide esattamente con la diff di pot. del silicio.

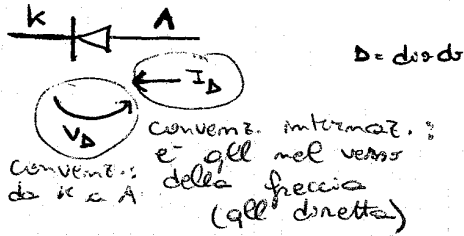
Giunzione p-n inversam. polarizzata (diodo)



Una carica elettrica messa in un pt. elettrico vede un pt. meccanico, che deve superare per andare avanti:

Esame \rightarrow portatori maggioritari a dx \rightarrow non ce la fanno a portare elettroni \rightarrow " " " " " " " " " " " "

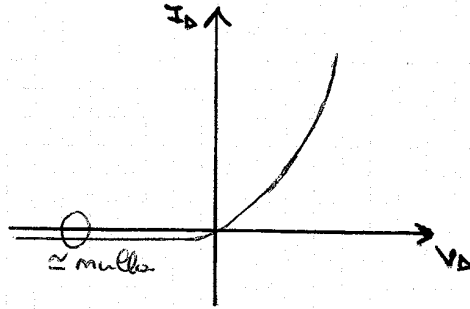
Diode, visto ai terminali d'ora in poi



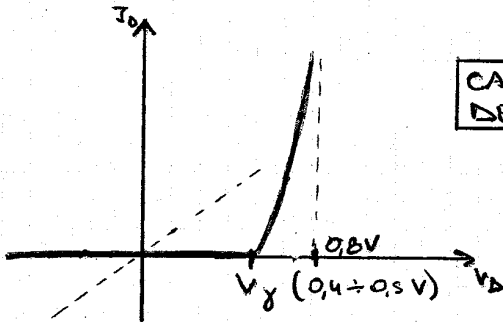
($I_D \sim \text{mA}$ silicio
 $I_D \sim \mu\text{A}$ germanio)

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

↑
 fattore correttivo
 $1 \leq n < 2$
 (per via di fenomeni di meccanica quantistica)



Cambiando le scale del grafico:



CARATTERISTICA DEL DIODO

ogni 0,25 mV aumenta di un fattore e
 → in 100 mV aumenta di circa 40 volte

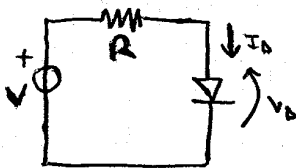
N.B. fosse una R sarebbe una retta passante per l'origine

→ Non si prova più applicare vari teoremi:

- Thevenin
- Norton
- Millman
- Sovrapposizione effetti
- ...

→ praticam. pero solo per applicare Kirchhoff

Se ho un circuito con una sorgente di gen. ed R ed un diodo, posso risolverlo applicando l'eq. di TB da tutto tranne che del diodo e poi lo applico al diodo



maglia:

- stessa I_D ovunque
- somma delle tensioni = 0

$$V - RI_D - V_D = 0$$

↑ note ↑ incognite

$V_{\gamma'}$ leggerm. maggiore di V_{γ}

$$r_d = \frac{1}{\frac{dI_D}{dV_D}}$$

$$\frac{dI_D}{dV_D} = \frac{I_D}{V_D} e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} = \frac{I_D}{\eta V_T} \quad (\text{trascurando } -1)$$

es. \downarrow

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = \frac{40 \text{ mV}}{1 \text{ A}} = 40 \text{ m}\Omega$$

valore molto piccolo

↑
 qll dove abbiamo calcolato \tan
 → qll intorno a cui derivato, che è curva a metà strada sul grafico.

Poss quindi considerare il diodo

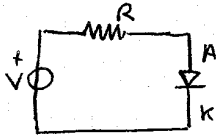
con 2 circuiti equivalenti:

- uno per $V_D \geq V_{\gamma'}$ → se r_d piccolo → $V_{\gamma'}$
- uno per $V_D \leq V_{\gamma'}$ → $I_D \geq 0$
 $I_D = 0$

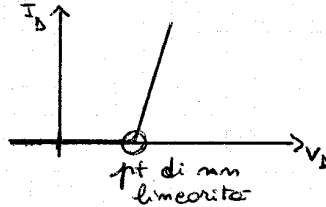
21/10/10

Qnd un diodo non conduce, si dice "interdetto"

① Vediamo un circuito:



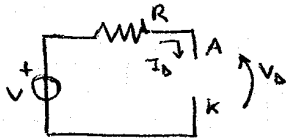
caratteristica lineare a tratti



$V = 5V$

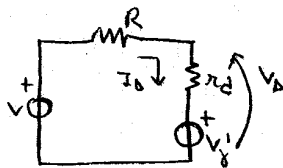
$R = 1k\Omega$

Supponiamo che il diodo sia interdetto:



$V_D = V = 5V > V_{\gamma} \rightarrow$ modello non valido
 $I_D = 0$

Visto che non è interdetto → conduce:



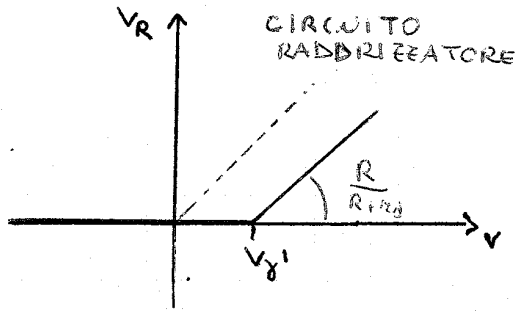
$$V_D = \frac{V}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_d}} = \frac{V r_d + V_{\gamma'} R}{R + r_d}$$

r_d è minore delle altre, da una caduta di tensione piccola

$$\rightarrow V_D \approx \frac{V_{\gamma'} R}{R} = V_{\gamma'}$$

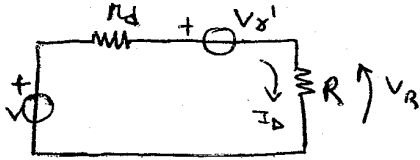
$$I_D = \frac{V - V_{\gamma'}}{R + r_d} \approx \frac{V - V_{\gamma'}}{R} = \frac{5 - 0,5}{1000} = 4,5 \text{ mA} > 0$$

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D} = \frac{25,9 \text{ mV}}{4,5 \text{ mA}} = 5,6 \Omega$$



le tensioni $V > 0$
 saranno ridotte di $V_{d'}$

caso b)



$$I_R = \frac{V - V_{d'}}{R + r_d} \approx \frac{V - V_{d'}}{R} \geq 0$$

$$V_R = I_R R = \frac{V - V_{d'}}{R + r_d} R$$

$$V \geq V_{d'}$$

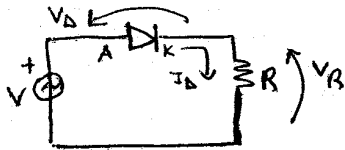
leggermente minore di 1

Se inverto il diodo:

V_D, I_D al contrario, V_R idem

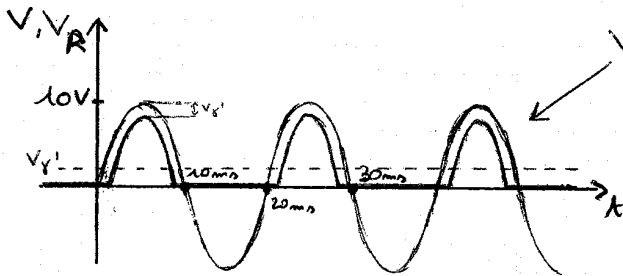
→ grafico simmetrico rispetto all'origine

Circuito raddrizzatore:



$$V = 10V \sin(2\pi 50 \text{ Hz} \cdot \omega)$$

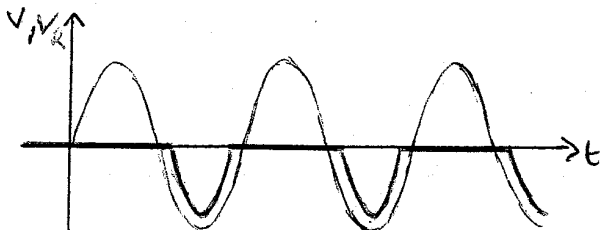
NB non esistono più i fessori!!!
 (mm e lineare)



V_D alternata raddrizzata

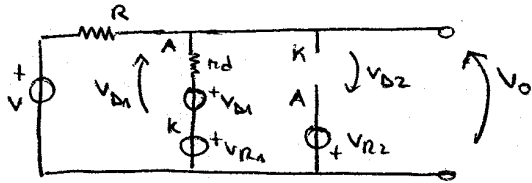
RADDRIZZATORE A
 SEMIONDA
 POSITIVA

Se diodo al contrario:



RADDRIZZATORE A
 SEMIONDA
 NEGATIVA

caso c) D_2 in conduzione, D_1 interdetto



$$V_o = \frac{V r_d + (V_{R1} + V_{D1}') R}{R + r_d} \approx V_{R1} + V_{D1}'$$

qst modello vale fino a qnd:

$$I_{D1} \geq 0 \quad \text{e} \quad V_{D2} \leq V_{D1}'$$

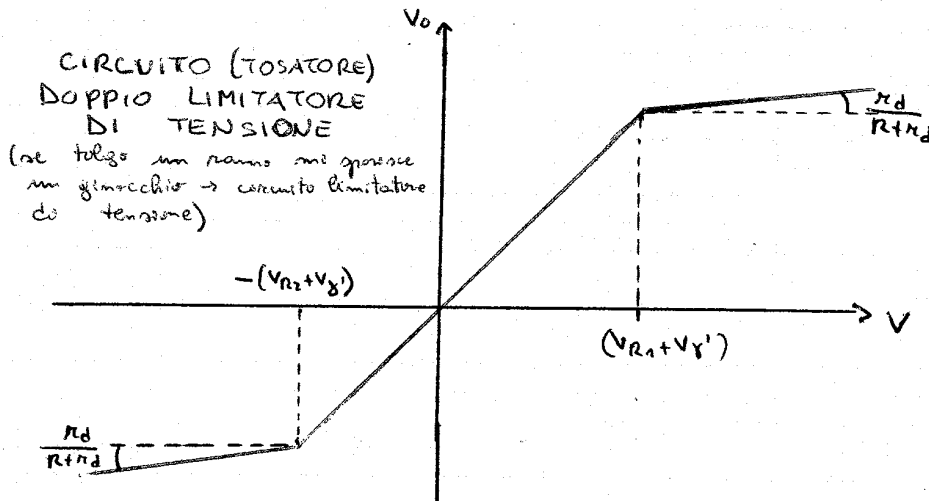
$$\bullet V_{D2} = -V_o - V_{R2} = -(V_{R1} + V_{R2} + V_{D1}') < 0$$

$$\bullet I_{D1} = \frac{V - (V_{R1} + V_{D1}')}{R + r_d} \geq 0$$

quindi $V \geq (V_{R1} + V_{D1}')$

caso d) D_1, D_2 in conduzione.

non considero nemmeno qst caso perché abbiamo già tutta la retta! ☺

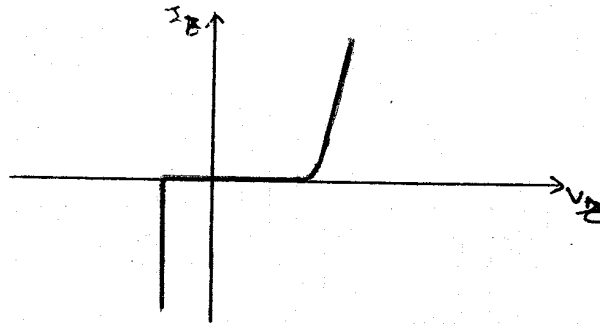
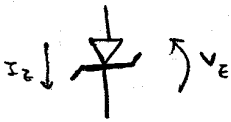


Qst circuito serve per proteggere i circuiti elettronici ☺

se tensione troppo alta → viene limitata e resta \approx cost

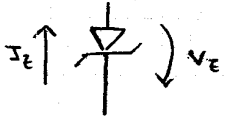
se tensione piccola → resta invariata

Diode Zener

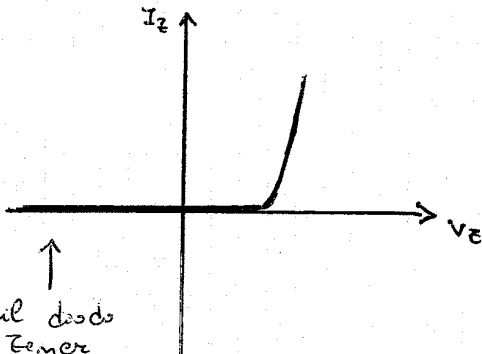


un diodo Zener
 con diodo
 normale

Diciamo in gioco



tracciamo il grafico $I_Z = f(V_Z)$



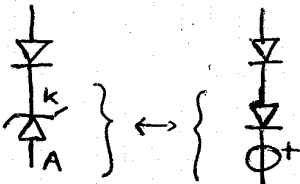
il diodo
 Zener
 condurrebbe
 anche per
 $V_Z < -V_{Dmax}$

si comporta come se fosse:



nel 1° quadrante!

Per evitare qst caso → metto 2 diodi in serie

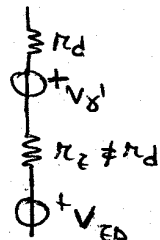


qst diodo impedisce
 alla corrente negativa
 di passare

Polarizzaz. inversa:



Polarizzaz. diretta:



⇒ come prima (diodo +
 generatore) ma

$r_D + r_E$ invece di r_D

$V_D' + V_{ED}$ invece di V_D'

Qst è un tostatore che limita le tensioni positive

Qst limita qll negative

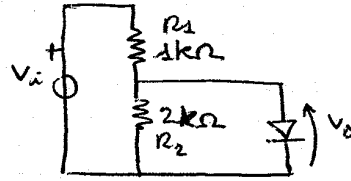
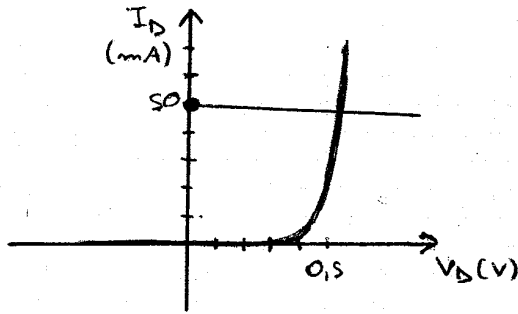


⇒ in parallelo sono un doppio tostatore! (sempre 5 componenti)

ESERCIZI (cap A₁ e A₂)

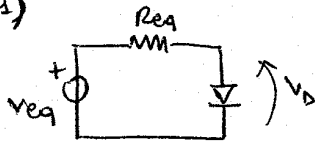
4/11/10

①



- 1) se $V_i = 50V$, quanto vale V_D, I_D ?
- 2) calcolare $V_D = f(V_i)$ e tracciare grafico ad assi, torati.

(-1)



$$\left. \begin{aligned} V_{eq} &= \frac{V_i R_2}{R_1 + R_2} = 33,33V \\ R_{eq} &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 666,67\Omega \end{aligned} \right\} \text{Thevenin}$$

metodo della retta di carico : $V_D = V_{eq} - R_{eq} I_D$

$$V_D = 33,33 - 666,67 I_D$$

$$V_D = 0 \rightarrow I_D = \frac{33,33}{666,67} = 0,05 A = 50 \text{ mA}$$

$$V_D = 0,5 \rightarrow I_D = \frac{33,33 - 0,5}{666,67} = 49,25 \text{ V}$$

$$V_D = 0,55 V \rightarrow I_D = \frac{V_{eq} - V_D}{R_{eq}} = 49,175 \text{ mA}$$

~~$$V_D = \frac{V_i R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_D = \frac{R_2 (V_i - R_1 I_D)}{R_1 + R_2}$$~~

~~$$V_D \leq 0,5 V \rightarrow I_D = 0 \quad V_D = \frac{R_2 V_i}{R_1 + R_2}$$~~

~~$$V_D = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_i + \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_D$$~~

~~$$V_D > 0,5 V \rightarrow I_D = \frac{V_{eq} - V_D}{R_{eq}}$$~~

(2)
$$V_D = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_D$$

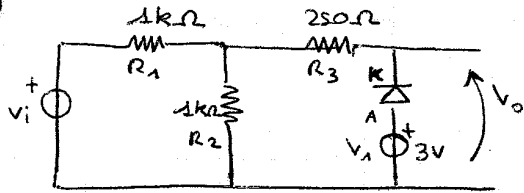
$$V_i \neq \frac{R_1 + R_2}{R_2} \left(V_D + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_D \right) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_D + I_D R_1$$

$$V_i = 1,5 V_D + 1000 I_D$$

$$V_D = \frac{V_i - 1000 I_D}{1,5}$$

31

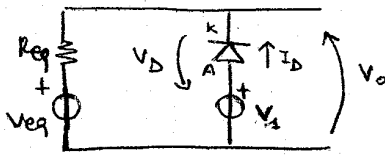
2



$$V_{\gamma'} = 0,6V$$

- 1) Se $V_i = 10V \rightarrow V_o = ?$
- 2) Se $V_i = -10V \rightarrow V_o = ?$
- 3) Tracciare il grafico di $V_o = f(V_i)$
per $-10V \leq V_i \leq 10V$

eq. di Thevenin



$$R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = 750 \Omega$$

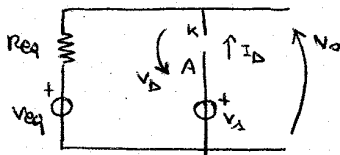
$$V_{eq} = V_i \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0,5 V_i$$

$$V_{eq1} = 5V \quad (V_{i1} = 10V)$$

$$V_{eq2} = -5V \quad (V_{i2} = -10V)$$

$$V_{eq} + V_D = R_{eq} I_D + V_1$$

Ipotezziamo che il diodo sia interdetto:



$$I_D = 0$$

$$V_{eq} + V_D = V_1 \rightarrow V_D = V_1 - V_{eq}$$

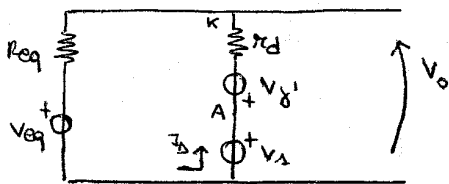
qst modello vale fino a qnd $V_D < V_{\gamma'}$

$$V_1 - V_{eq} \leq V_{\gamma'} \rightarrow V_{eq} \geq V_1 - V_{\gamma'} = 2,4V$$

$$V_{eq1} = 5V \rightarrow \text{il modello vale e } V_o = V_{eq1} = 5V$$

$$V_{eq2} = -5V \rightarrow \text{il modello non vale} \rightarrow \text{il diodo conduce}$$

Diodo che conduce:



$$I_D = \frac{V_1 - V_{\gamma'} - V_{eq}}{R_{eq} + r_d} \geq 0$$

$$V_1 - V_{\gamma'} - V_{eq} \geq 0$$

$$V_{eq} \leq V_1 - V_{\gamma'} = 2,4V$$

\rightarrow il modello vale per $V_{eq2} = -5V$

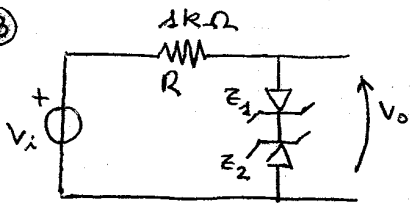
$$V_o = \frac{V_{eq} r_d + (V_1 - V_{\gamma'}) R_{eq}}{r_d + R_{eq}}$$

$$-V_{eq} - V_{\gamma'} + V_1 = I_D (r_d + R_{eq})$$

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I_D}$$

33

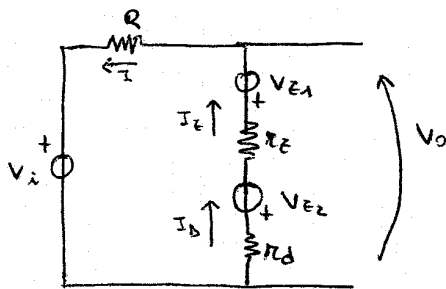
3



$V_{Z1} = 5V$
 $V_{Z2} = 3V$
 $R_E = 5\Omega$

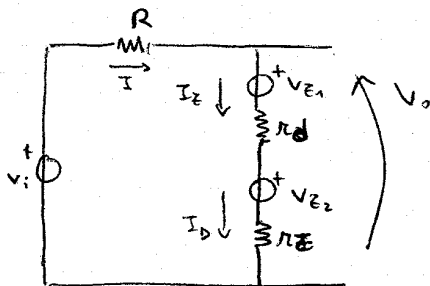
- 1) tracciare $v_o = f(v_i)$ per $-10 \leq v_i \leq 10V$
- 2) tracciare $v_o(t)$ sapendo che v_i è una f.d.o. (forma d'onda) triangolare 1 kHz, simmetrica 20 V_{pp}, valore medio nullo

a) ipotizziamo : Z_1 in zona Zener
 Z_2 in conduzione



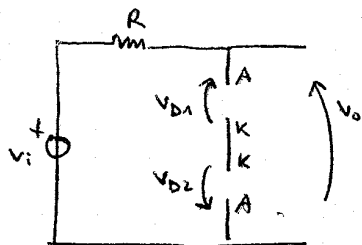
$I_D = I_Z$
 opt modello vale fino a qnd
 $I_D, I_Z \geq 0$

b) ipotizziamo : Z_1 in conduz.
 Z_2 in Zener



$I_D, I_Z \geq 0$

c) ipotizziamo : Z_1, Z_2 interdetti



$v_{D1} - v_{D2} = v_i$

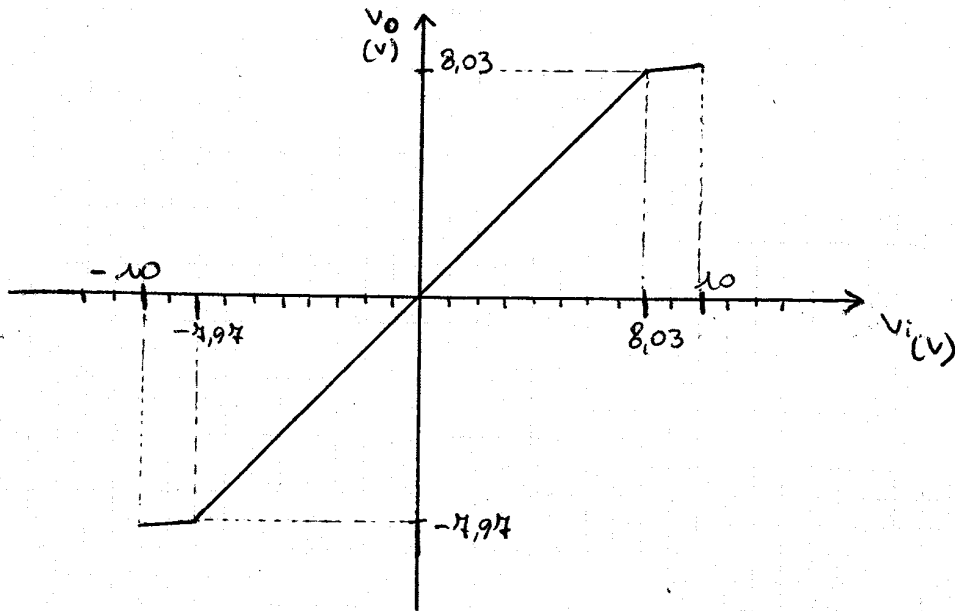
$v_D \leq V_{\gamma'}$
 $v_E \leq V_{E'}$

tutte e 2

ma $-v_D = +v_E \leq V_{E2} \rightarrow v_D \geq -V_{E1}$

quindi $-V_{E1} \leq v_{D1} \leq V_{\gamma'}$

$-V_{E2} \leq v_{D2} \leq V_{\gamma'}$



8/11/10

Cap 11.3-11.4

ALIMENTATORI

Conversione tensione alternata \rightarrow continua

circuiti elettronici \rightarrow tensione continua (qle decima di volt)

distribuz. Enel \rightarrow tensione alternata (220V Europa, 160V USA)

qst perché la tensione continua è molto più difficile da trasformare, qll alternata è più facile; ogni utilizzatore trasforma qll che gli serve.

Inoltre V continua \rightarrow I forti \rightarrow riscaldamento, —

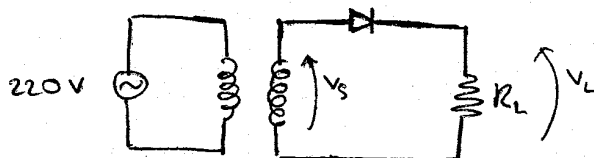
Distribuz. in continua solo nelle ferrovie:

tutti i treni sono a 3000 V (\rightarrow un c'e bisogno di trasformatore)

Alternata \rightarrow continua:

- trasformatore in alternata attaccato alla dinamo

- trasformatore + circuito basato su un diodo

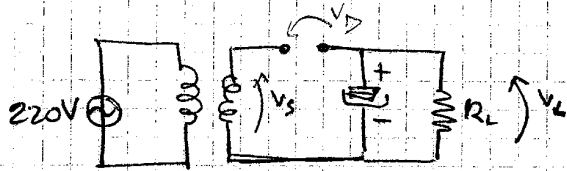


ALIMENTATORE
A UNA SEMIONDA

1) elimino metà delle semionde \rightarrow qll negative

$R_L = R_{eq}$ TR del circuito che usera la V continua \rightarrow CARICO
(generatore nullo $\rightarrow V_{eq} = 0, R_{eq} = R_L$)

il diodo in qpt $\cos\omega t \rightarrow$ apre \rightarrow circuito RC $\rightarrow V_C$ decresce e va alla V del generatore ($=0$ in qpt $\cos\omega t$)



$RC \gg T \rightarrow$ decade in τ un tempo molto grande

$$V_D = V_S - V_L$$

se $V_D < 0,6V \rightarrow$ diodo interdetto (0,6V)

se $V_D = 0,6V \rightarrow$ diodo conduce \rightarrow ricarica il condensatore

\rightarrow tensione quasi continua:

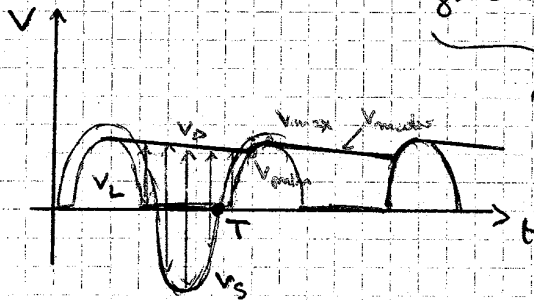
- un po' buchi

- ma ONDULAZIONE \rightarrow piccoli salti

(sinusoide troncata + esponenziale)

\approx gradino

\approx retta



approssimata lineare a tratti (più facile da calcolare)

• frequenza = $f_{\text{rip}} = f_{\text{di}}$ (qpt di periodo)

• $V_{\text{max}} = \sqrt{2} V_S - m V_S$ $m=1$ (in qpt circuito)
valore efficace

• $V_{\text{min}} = ?$

$$\Delta V = V_{\text{max}} - V_{\text{min}}$$

considero la carica che entra ed esce dal condensatore:

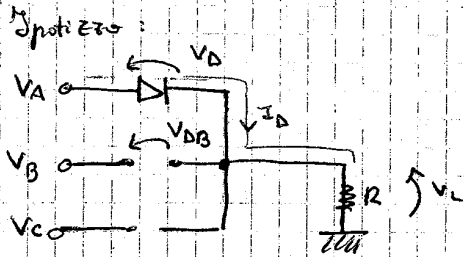
$$Q = C \cdot V \rightarrow \Delta Q = C \cdot \Delta V$$

durante la scarica, qnt carica esce dal condensatore?

$$Q = I_L \cdot T = \frac{V_L}{R} \cdot \frac{1}{f}$$

$$\text{quindi } \Delta V = \frac{1}{C} \frac{I_L}{f} = \frac{I_L}{m C f} = \frac{V_L}{m R C f} \gg 1 \rightarrow \Delta V \ll V_L$$

$$V_{\text{min}} = V_{\text{max}} - \Delta V$$



$$V_L = I_D R = V_A - V_D \approx V_A - V_\gamma$$

Se diodo conduce $\rightarrow I_D > 0 \rightarrow V_L > 0$

$$\rightarrow V_A > V_\gamma$$

vero per l'ipotesi iniziale

Ora verifico che gli altri 2 diodi sono interdetti

$$V_{DB} < V_\gamma$$

$$V_{DB} = V_B - V_L = V_B - (V_A - V_\gamma) = V_B - V_A + V_\gamma$$

$$V_B - V_A + V_\gamma < V_\gamma \quad \text{case}$$

$$V_B < V_A$$

vero per l'ipotesi iniziale

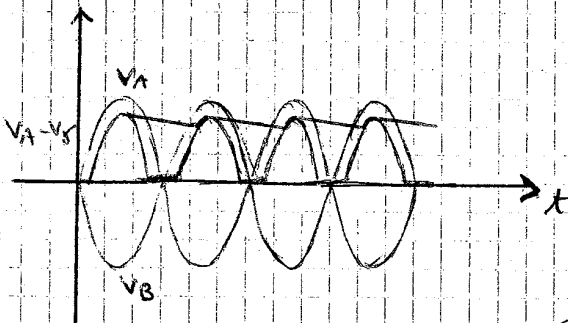
A maggior ragione qst ragionamento vale per il diodo c.

Se ho più diodi, V_{solo} ^{al max} uno conduce, qll collegato alla tensione maggiore se $V_A > V_\gamma$, se no non conduce nemmeno lui e, in qst' ultimo caso, $V_L = 0$

Pensiamo scrivere qst concetto in forma matematica?

$$V_L = \max \{ V_A - V_\gamma, V_B - V_\gamma, V_C - V_\gamma, 0 \}$$

(E se i 3 diodi avessero l'anodo in comune?)

$$V_L = \min \{ V_A + V_\gamma, V_B + V_\gamma, V_C + V_\gamma, 0 \}$$


Cm prima ma stavolta $\frac{T}{2}$ opp 2f nelle formule:

$$V_{max} = \sqrt{2} V_s - m V_\gamma \quad m=1$$

$$\Delta V = \frac{I_L}{m C f} \quad m=2$$

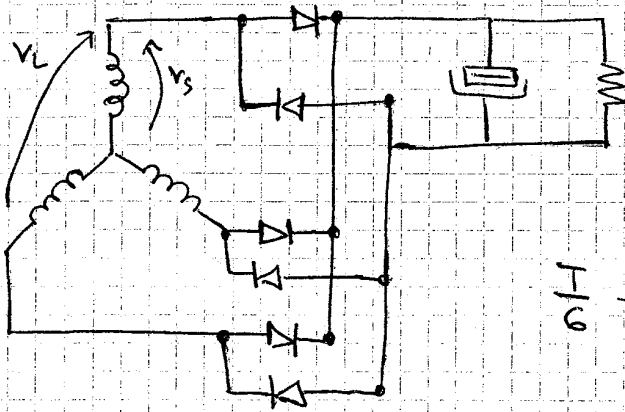
$$V_{med} = V_{max} - \frac{\Delta V}{2}$$

$$V_{min} = V_{max} - \Delta V$$

$$f_{ac} = m f \quad m=2$$

$$R_{eq} = \frac{1}{2m C f} \quad m=2$$

se u come
la v tra
A e B
metterei
s/2

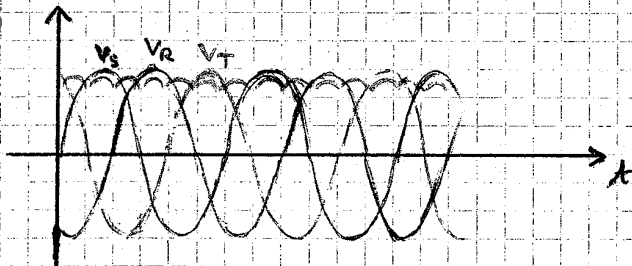


ALIMENTATORE
A 6 SEMIONDE

$\frac{T}{6} \rightarrow n=6$
 $m=2$ (attraverso cui 2 diodi)
 $(m=1$ quando diodi solo col catodo in comune)

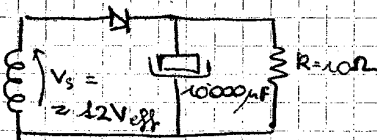
$$V_L = \sqrt{3} \cdot V_s$$

Nelle formule in ogni caso qui scambieremo V_s e V_L



ESERCIZI

10/11/10



Secondario di un trasformatore
 N.B. mF non si usa in elettronica!

- 1) calcolare V_{max} , V_{min} , V_{med} , ΔV
- 2) tracciare il modello equivalente

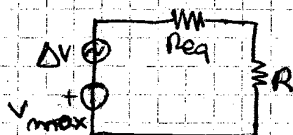
Qst è un alimentatore ad una semionda $\rightarrow m=1, n=1$

$$V_{max} = \sqrt{2} V_s - m V_f = \sqrt{2} \cdot 12 - 0,6 = 16,34 V$$

$$\Delta V = \frac{V_{max}}{m R C f} = \frac{16,34}{10 \cdot 10000 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 3,27 V$$

$$\Delta V \approx V_{max} - V_{min} \rightarrow V_{min} = 13,10 V$$

$$V_{med} = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} = 14,74 V$$



$$R_{eq} = \frac{1}{2mfc} = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 1 \Omega$$

$$R_{eq} = \frac{1}{2m\omega C} = \frac{1}{2 \cdot 50 \cdot 0,04} = 1 \Omega$$

$$V_{max} = \sqrt{2} V_s - V_{gm} = 13,54 V$$

il valore medio di ΔV è 0V

$$V_{L_{medio}} = \frac{\frac{V_{max}}{R+R_{eq}} + \frac{V_{zo}}{r_z}}{\frac{1}{R_{eq}+R} + \frac{1}{r_z} + \frac{1}{R_L}} = 9,1 V$$

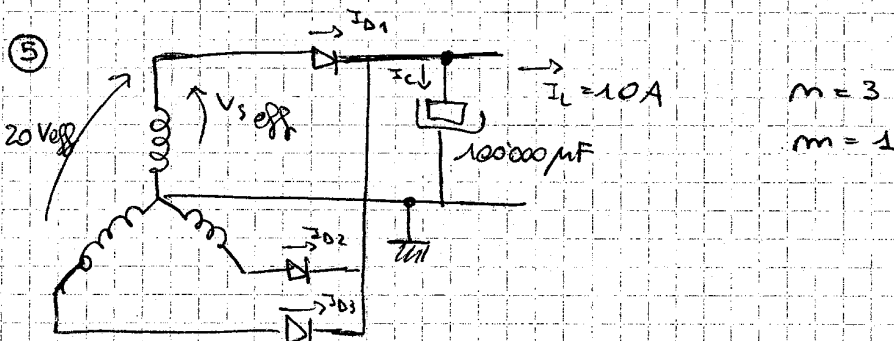
$$I_R = \frac{V_{max} - V_L}{R + R_{eq}} = 0,46 A$$

$$\Delta V = I_R \cdot 2 = 0,92 V_{pp}$$

$$\Delta V_L = \frac{\Delta V}{\frac{1}{R+R_{eq}} + \frac{1}{r_z} + \frac{1}{R_L}} = \frac{0,92}{\frac{1}{1+1} + \frac{1}{11} + \frac{1}{100}} = 0,046 V$$

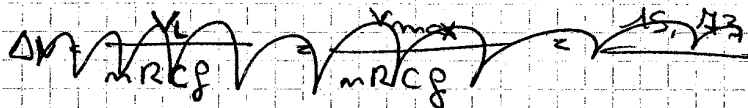
$$V_{L_{max}} = V_{L_{medio}} + \frac{\Delta V_L}{2} = 9,138 V$$

$$V_{L_{min}} = V_{L_{medio}} - \frac{\Delta V_L}{2} = 9,062 V$$



$$V_{s_{eff}} = \frac{20}{\sqrt{3}} = 11,55 V_{eff}$$

$$V_{max} = \sqrt{2} V_{s_{eff}} - mV_g = 11,55 \sqrt{2} - 0,6 = 15,43 V$$



$$\Delta V = \frac{I_L}{m\omega C} = \frac{10}{3 \cdot 0,1 \cdot 50} = 0,67 V$$

$$V_{min} = V_{max} - \Delta V = 15,06 V$$

$$V_{medio} = V_{max} - \frac{\Delta V}{2} = 15,43 - \frac{0,67}{2} = 15,40 V$$

$$R_{eq} = \frac{1}{2m\omega C} = 0,033 \Omega$$

$$\bar{I}_D = \frac{I_p T_c}{\frac{2}{\pi}} = I_L \rightarrow I_p = \frac{I_L \cdot 2T}{\pi T_c} \quad \text{mi manca } T_c$$

$$T_c: T = \theta_c : 2\pi$$

$$V_c = V_{cmax} \cos \theta$$

$$V_{cmin} = V_{cmax} \cos \theta_c \rightarrow \theta_c = \cos^{-1} \left(\frac{V_{cmin}}{V_{cmax}} \right)$$

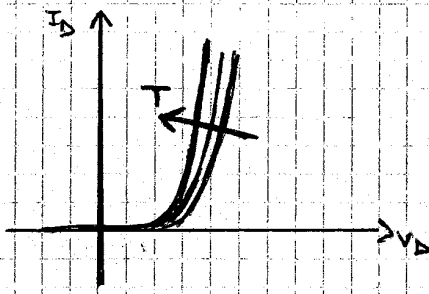
Quindi $I_p = \frac{I_L \cdot 2 \cdot 2\pi}{\pi \theta_c}$ NB. θ si imposta la calcolatrice in rad opp. al posto di 2π si mette 360°

Es di prima:

$$\bar{I}_D = \frac{I_L}{\pi} = \frac{I_L}{\pi} = \frac{10}{3} = 3,33 \text{ A}$$

$$I_p = \frac{I_L \cdot 4\pi}{\pi \theta_c} = \frac{10 \cdot 4\pi}{3 \cos^{-1} \left(\frac{15,06}{15,43} \right)} = 215,05 \text{ A}$$

$$V_{Dmax} = \frac{2V_{cmax}}{\pi} = \frac{2 \cdot 15,43}{\pi} = 9,81 \text{ V}$$



$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right)$$

V_T, I_S legate a T (in K)

$T \uparrow \quad I_S \uparrow$
 $T \downarrow \quad I_S \downarrow$

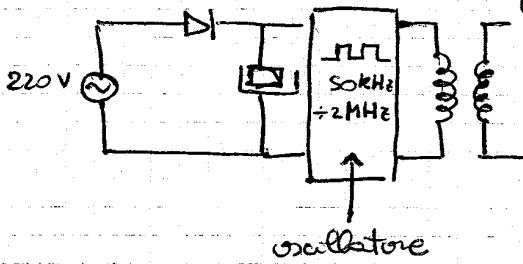
$$I_{const} \rightarrow \frac{\Delta V_D}{\Delta T} \approx -2,5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

la volte opt e trascurabile, per-
 può essere usato per misurare la T
 (es termometri clinici)

Aggiungo un oscillatore (data a tensione continua genera una tensione alternata ad onda quadrata)

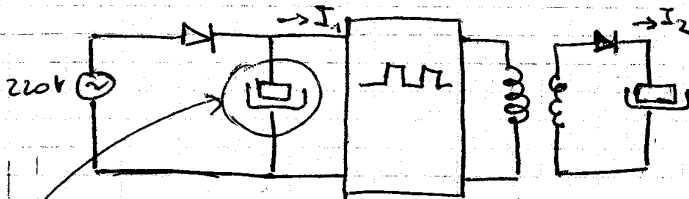
Poi alternatore che converte alla tensione che voglio in

(tipicamente da 50 kHz a 2 MHz)

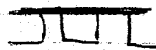


Volume trasformatore \rightarrow peso \propto inversam. proporzionale alla frequenza \rightarrow ora peso molto meno !!

Poi aggiungo il raddrizzatore



Se non ci fosse il raddrizzatore non servirebbe nemmeno il trasformatore



condens. inversam. proporzionale a frequenza e capacità \rightarrow f elevate \rightarrow tutto più piccolo

50 Hz ma tensione elevata e $I_1 < I_2$

(si mantiene la potenza)

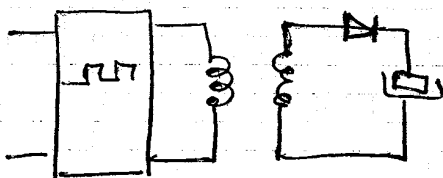
$$\Delta V = \frac{I_e}{m f C}$$

$$\frac{\Delta V}{V_{max}} \approx \frac{I_e}{m f C V_{max}}$$

\downarrow
tutto più piccolo!
(anche qst)

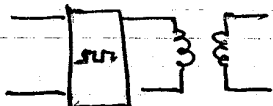
Se devo passare da V continua a continua

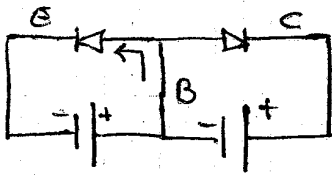
(es. batteria auto 12V computer di bordo 3V):



convertitore
continua - continua

Oppure: convertitore continua - alternata (es. trans) \rightarrow inverter

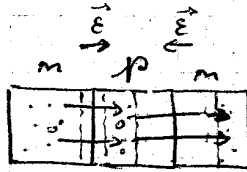




E polarizz. diretta.
C " inversa.

Eds di BE si riduce, qll di BC si allarga

↓
diodo conduce
corrente composta da
e da o



E si droga molto molto di più di B

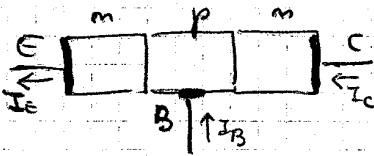
→ o → o → corrente composta principalmente da o

molto di qd porteremmo la zona di svuotam. (e- per qd che e- importante drogare per B)

Arrivano alla 2a zona di svuotam e li vengono spinti verso dx → attraversano Eds e arrivano nel collettore C (B sottilissima)

la grande maggioranza di o va al collettore
una minoranza va alla base

d e la % di elettroni che vanno a C (≈ 90 ÷ 95%)



I_E = corrente di emettitore
 I_C = " di collettore
 I_B = " di base

Per def $d = \frac{I_C}{I_E}$

quindi $\begin{cases} I_C = d I_E \\ I_E = I_B + I_C \end{cases}$

$I_E = I_B + d I_E \rightarrow (1-d) I_E = I_B \rightarrow I_E = \frac{I_B}{1-d}$

d molto prossimo a 1

→ 1-d è piccolo

→ $I_E \gg I_B$ (anche 100 volte tant)

$I_C = d I_E = \frac{d}{1-d} I_B$
 β

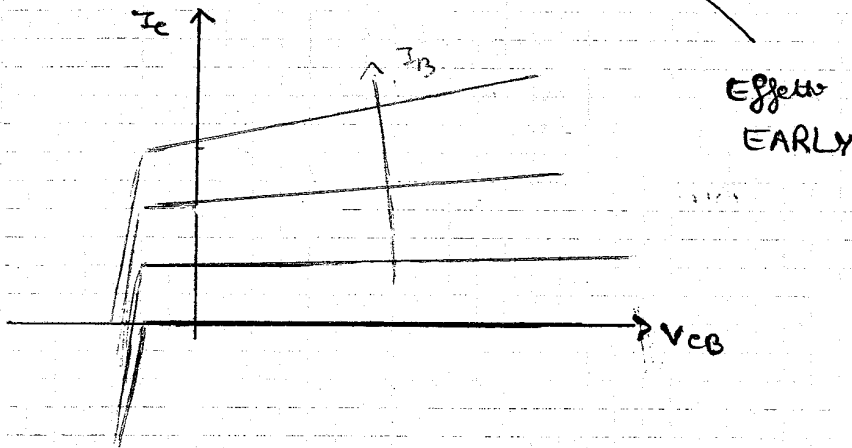
valore tipico $\beta = 100$ (varia tra 50 e 200)
(a volte $\beta = 10$)

$I_C \gg I_B$

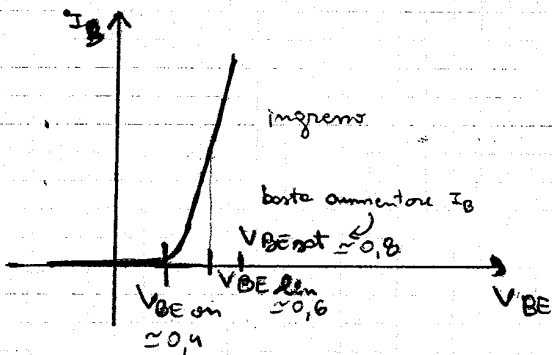
☺ appena vista sarebbe la situaz. ideale.

Aumento $V_{CB} \rightarrow$ cambiano:

- campo elettrico \vec{E}
- aumenta la zona di svuotam. \rightarrow si riduce lo spessore effettivo della base \rightarrow % di elettrone che proseguono (di) aumenta $\rightarrow \beta$ aumenta ancora di più.
- \Rightarrow rette crescenti \leftarrow

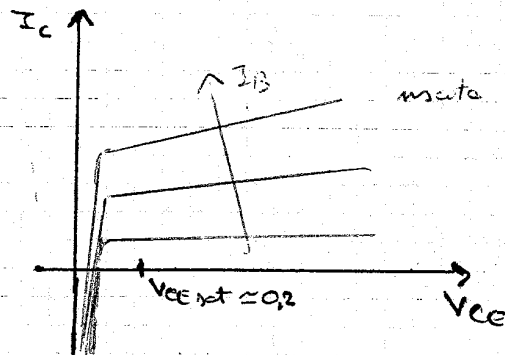


Caratteristiche a emettitore comune:



$$I_E = (1 + \beta) I_B \Rightarrow I_B = \frac{I_E}{1 + \beta}$$

$1 + \beta \approx \text{cost.}$
 \rightarrow cambia solo il fattore di scala del grafico

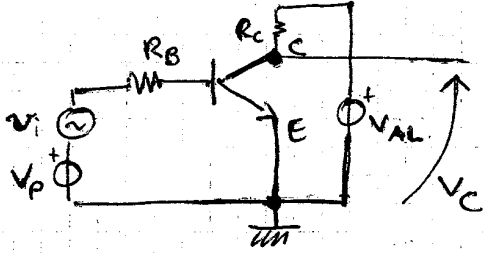


$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB} \approx V_{\gamma} + V_{CB}$$

$$V_{BE} \approx V_{\gamma} = \text{cost}$$

\rightarrow traslo il grafico di $(I_c - V_{CB})$ di V_{γ}
 \leftarrow lo sposta tutto a dx dell'axe verticale

Zona lineare → AMPLIFICATORE

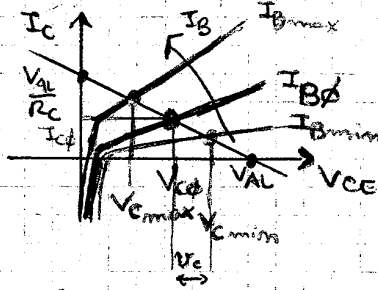
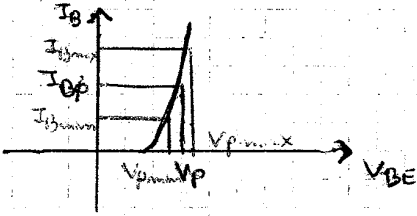


R_B = resistenza da base

V_{Al} = tensione di alimentazione

↑ alimentatore

v_i → segnale che io voglio amplificare



Supponiamo R_B trascurabile → $R_B = 0$

- consideriamo solo il generatore in continua

$v_i = 0 \rightarrow V_{BE} = V_p$

→ ricavo I_{BQ} e la curva corrispondente usiamo il metodo della retta di carico!

→ trovo V_{CEQ} e I_{CQ} (dove lavora il collettore)

- $v_i \neq 0$ pochi mV ma cmq oscill. attorno ad un valore medio → V_p va da V_{pmin} a V_{pmax} - resto cmq in zona lineare!

V_p varia poco ma I_B varia molto!

I_C varia tra 2 curve (min e max) nello stesso modo in cui varia v_i , ma si riduce: $I_B \uparrow V_{CE} \downarrow$

→ Stessa forma, ampiezza >, segno opposto

$v_C = A_v \cdot v_i$
 ↑ ↑
 Variazioni guadagno di tensione < 0

→ conta solo le piccole variaz. v_i ma le tensioni continue!

distorsione → sono piccole variaz. del segnale perché la caratteristica del diodo è esponenziale

segnale piccolo → piccola distorsione

" grande → grande "

V_p, V_{Al} → il circuito fange, ma no amplificat.

variaz → amplificat. del segnale

Prima continua e poi alterata perché in continua trascura h_{ie} , mentre in alterata h_{ie} è fondamentale.

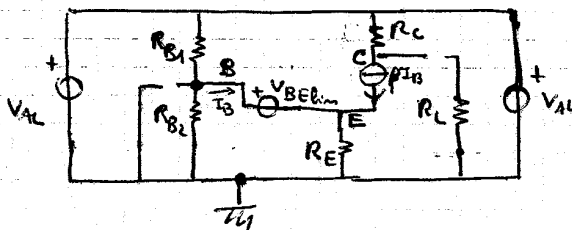
Nel caso $h_{ie} = \frac{V_I}{I_B} \quad (\gamma_0 \approx 1)$

corrente nel pt di lavoro, la trovo con l'analisi in continua

24/11/10

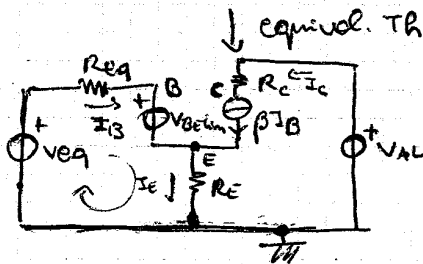
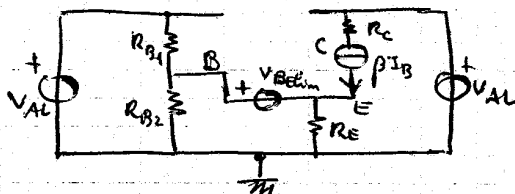
1) continua

- condensatori \rightarrow circuiti aperti
- $v_i \rightarrow$ corto circuito
- $V_{AL} \rightarrow$ lo sdoppiamo in 2 V_{AL} identici in parallelo



(la resistenza del diodo è trascurabile in qst circuito)

Eliminando ql che non serve e tagliando il filo tra R_{B1} e R_C (tensioni non servono \rightarrow non sono ant)



$$I_E \approx (1 + \beta) I_B$$

$$V_{Eq} - R_{Eq} I_B - V_{BElim} - R_E (1 + \beta) I_B = 0$$

$$\rightarrow I_B = \frac{V_{Eq} - V_{BElim}}{R_{Eq} + R_E (1 + \beta)}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = (1 + \beta) I_B$$

\Rightarrow ho calcolato le 3 correnti, ora voglio le 3 tensioni.

$$V_E = R_E I_E = R_E (1 + \beta) I_B$$

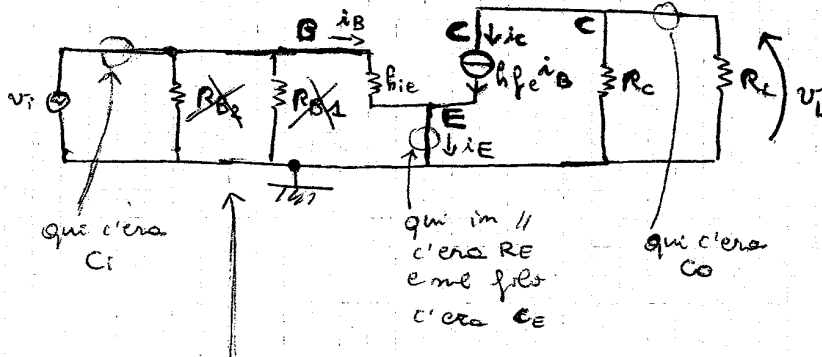
$$V_B = V_{Eq} - R_{Eq} I_B = V_E + V_{BElim}$$

$$V_C = V_{AL} - R_C I_C$$

\uparrow
 R_E viene vista $1 + \beta$ volte più grande per via del generatore βI_B e qst è una caratteristica dei transistori

opt era la freq. di taglio inferiore, ed n'è anche una di taglio superiore, dovuta a limiti fisici del transistore tra le 2 freq. di taglio c'è la **BANDA PASSANTE**

Tutte le correnti dell' amplificatore vengono dette "in banda" → al di fuori della banda ne sopprimiamo int.



Su i_B , R_{B1} ed R_{B2} non hanno effetto

$$i_B = \frac{v_i}{h_{ie}}, \quad i_c = h_{fe} i_B$$

$$v_L = (R_L // R_C) (-i_c) = - \left(\frac{R_C // R_L \cdot h_{fe}}{h_{ie}} \right) v_i$$

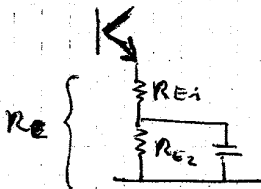
in valore assoluto
opt termine è grande ⇒ guadagno alto
(circa 1 centomila)
[h_{fe} grande]

Se aumento R_C e diminuisco rispetto ad R_L il guadagno cmq non aumenta e diminuisce

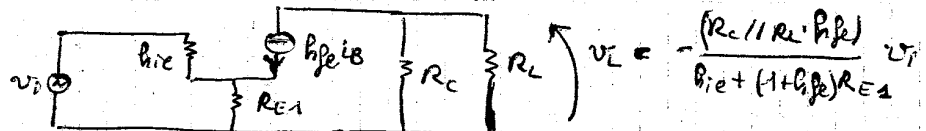
$$R_C I_C \approx \frac{V_{CC}}{2} \rightarrow \text{se aumenta } R_C, \text{ aumenta anche } R_L$$

$$R_C \uparrow \rightarrow I_C \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow h_{ie} \uparrow \Rightarrow \text{rapporto cmq cost.}$$

⇒ se voglio aumentare il guadagno, o aumento V_{CC} oppure uso un transistora con h_{fe} maggiore



in continua non cambia nulla
in alternata conta solo R_{E1}

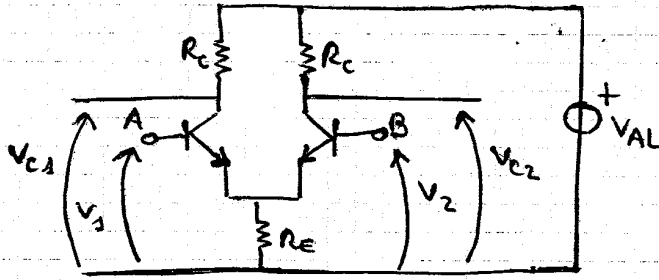


$$R_C \text{ ed } h_{ie} \text{ vanno insieme} \rightarrow \frac{R_C}{h_{ie}} = \text{cost.}$$

se metto R_E posso ridurre il guadagno

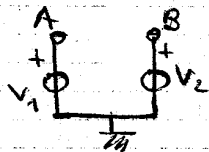
$$\text{Se trascuro } h_{ie} \rightarrow v_L = - \frac{R_C // R_L}{R_{E1}} v_i$$

AMPLIFICATORE OPERAZIONALE (cap D.1.1, D.2.2)

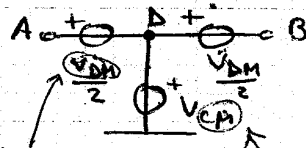


STADIO
DIFFERENZIALE

Analizziamo il circuito a coppie di terminali (in bifore)



equivalenti



differential mode (modo differenziale)

common mode (modo comune)

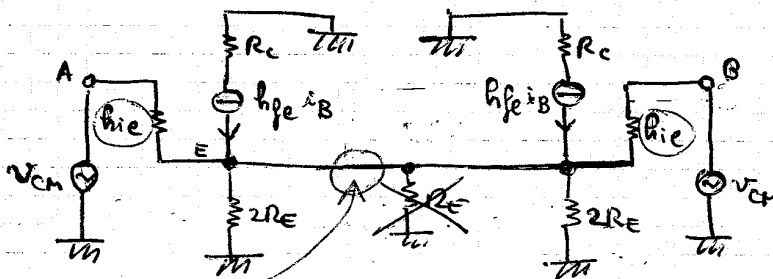
$$\begin{cases} V_A = V_{CM} + \frac{V_{DM}}{2} = V_1 \\ V_B = V_{CM} - \frac{V_{DM}}{2} = V_2 \end{cases}$$

$$\ominus 2V_{CM} = V_1 + V_2 \rightarrow V_{CM} = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

$$\ominus V_{DM} = V_1 - V_2$$

Trasformiamo il nostro circuito:

- in alternata:

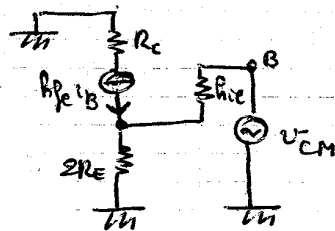
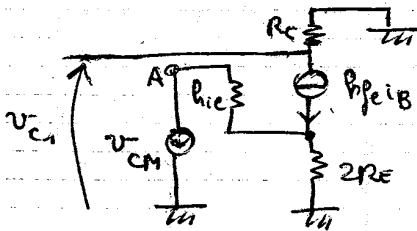


se facciamo l'analisi in continua vediamo che le due hie non sono uguali

due generatori di modo comune V_{CM}

circuito simmetrico \rightarrow rendiamolo ancora più simmetrico

opt filo perso togliendolo (tuttavia ci circola corrente)

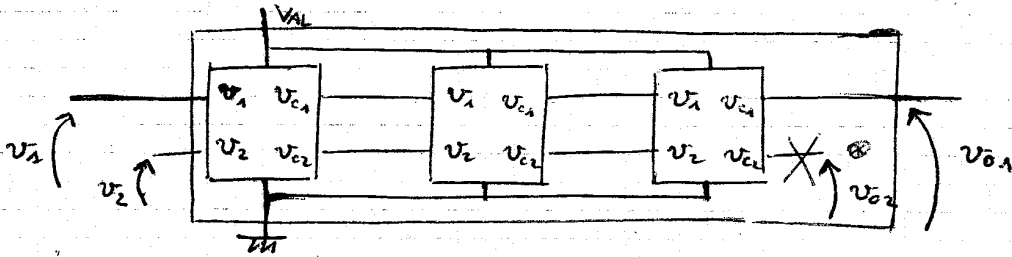


$$V_{c1} = \frac{R_C h_{fe}}{h_{ie} + (4 + h_{fe}) 2R_E} V_{CM}$$

$$V_{c2} = V_{c1}$$

$$\begin{cases} V_{CM} = V_{c1} = V_{c2} \\ V_{DM} = \phi \end{cases} \quad (61)$$

Cost circuito si chiama STADIO DIFFERENZIALE



Così ottengo in uscita?

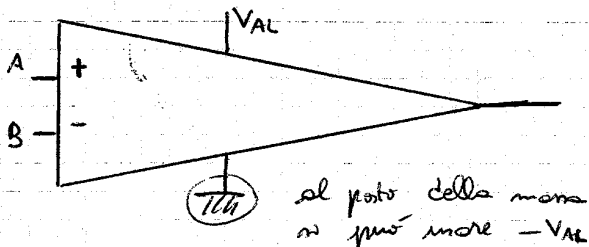
- se in ingresso ho un solo DM, in uscita ho un solo DM
 amplificatore di $100^3 \rightarrow A_{DM1} \cdot A_{DM2} \cdot A_{DM3} = A_{DM}$
- se in ingresso ho un solo CM, in uscita ho un solo CM
 amplificatore di $A_{CM} = A_{CM1} \cdot A_{CM2} \cdot A_{CM3}$ molto piccolo!
 → viene diminuito.

Qualunque cosa ci sia in ingresso, in uscita sono praticamente un solo DM $\Rightarrow v_{01} = -v_{02}$ (trascurare dei μV)
 → tant'è bene tenerne solo 1 in uscita!

Caratteristica: amplifica solo il DM in ingresso (qualunque esso sia) \rightarrow mostruosamente.

$$v_{01} = A_{DM} (v_1 - v_2)$$

29/11/10



AMPLIFICATORE OPERAZIONALE

Ce ne sono tre varianti:

- amplificatori diversi
- tensioni V_{AL} più o meno alte
- consumi diversi
- banda \pm larga

Qual è la max tensione a cui può andare il collettore?

V_{AL} (caso a dx). È un valore min? $V_{CE\text{sat}}$ se collegato a massa, $= V_{AL} + V_{CE\text{sat}} \approx -V_{AL}$ se collegato a $-V_{AL}$.

Nel primo caso \rightarrow tensione in uscita solo positiva, nel 2° caso sia positiva che negativa. (Emg doppio alimentato. cosa di più !!)

63

$$|A_v| = \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 A_d}} \right)$$

$$|A_v^*| = \frac{R_2}{R_1}$$

(x piccolo)

Taylor: $\frac{1}{1+x} \approx 1-x$

errore < di qll di prima

$$|A_v| \approx |A_v^*| \left(1 - \frac{R_1 + R_2}{R_1 A_d} \right) = |A_v^*| \left[1 - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{1}{A_d} \right] = |A_v^*| \left(1 - \frac{1 + |A_v^*|}{A_d} \right)$$

$$|A_v^*| - |A_v| = \frac{1 + |A_v^*|}{A_d} |A_v^*| \quad \text{errore relativo}$$

$$\frac{|A_v^*| - |A_v|}{|A_v^*|} = \frac{1 + |A_v^*|}{A_d} \approx \frac{|A_v^*|}{A_d}$$

↑
|A_v^{*}| grande

errore relativo rispetto al guadagno approssimato

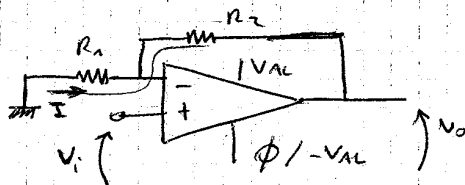
→ se voglio guadagnare quas. A_d → formula approssimata un uolo di solito → errore trascurabile (cmq anche le resistenze stesse hanno un loro errore)

Esiste un metodo che ci dia direttam. la formula approssimata?

$$V_d = \frac{V_o}{A_d} \approx 0 \rightarrow V^+ = V^-$$

↑
A_d grande
V_o piccola

tutti i circuiti in cui ho qcs tra l'uscita e il meno hanno V⁺ ≈ V⁻ e sp^t e il **PRINCIPIO DI CORTOCIRCUITO VIRTUALE (DI MASSA VIRTUALE)** e il collegam. in dce **RETROAZIONE**



$$V^+ = V_i$$

$$V^- = V_i \rightarrow I = - \frac{V_i}{R_1}$$

$$I = - \frac{V_o - V_i}{R_2}$$

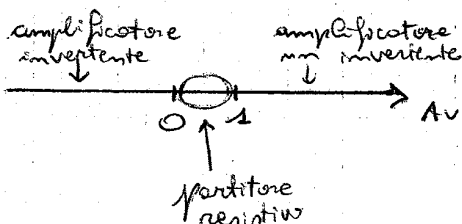
egualis le 2 equaz di I:

$$+ \frac{V_i}{R_1} = + \frac{V_o - V_i}{R_2} \rightarrow \frac{V_o}{R_2} = V_i \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \rightarrow \boxed{V_o = V_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}$$

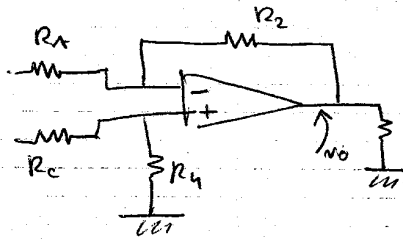
AMPLIFICATORE NON INVERTENTE

formula approssimata (V⁺ ≈ V⁻ ma V⁺ = V⁻)

$$1 \leq A \leq \frac{A_d}{100} \quad \text{piu o meno}$$



per guadagnare di piu metto piu amplificatori in cascata !!



$$R_A = R_C$$

$$R_2 = R_4$$

AMPLIFICATORE DIFFERENZIALE

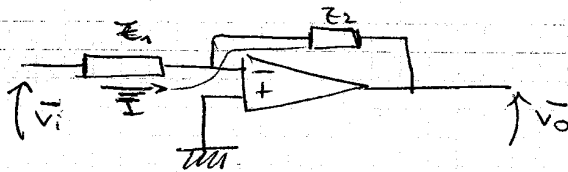
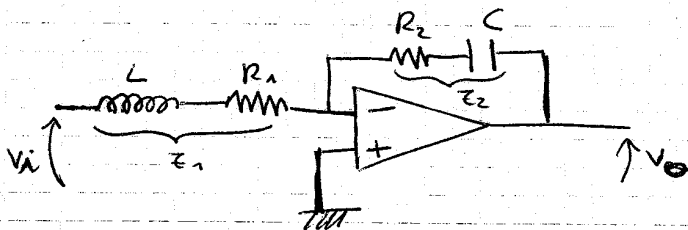
$$d = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_4}, \quad \beta = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_2} = d$$

$$v_0 = \beta R_2 \left(\frac{v_C}{\beta R_C} - \frac{v_A}{\beta R_A} \right) = \frac{R_2}{R_A} (v_C - v_A)$$

es. $\frac{R_2}{R_A} = 10$

↑
amplifica
la differenza

→ $R_2 = 10^5 \Omega$
 $R_A = 10^4 \Omega$ } che esistono pure !!
 $(R_2 R_A = 10^9 \Omega^2)$



$$v^+ = v^-$$

$$v^+ = \phi$$

$$i = \frac{v_i}{Z_1} = -\frac{v_0}{Z_2}$$

$$v_0 = -v_i \cdot \frac{Z_2}{Z_1}$$

(nel caso in cui Z_1, Z_2 resistenze → $v_0 = -v_i \frac{R_2}{R_1}$)

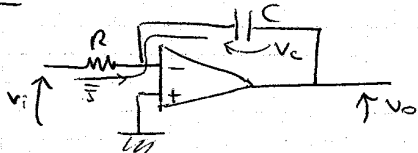
$$Z_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C} = \frac{1 + j\omega C R_2}{j\omega C}$$

$$Z_1 = R_1 + j\omega L = R_1 \left(1 + j\omega \frac{L}{R_1} \right)$$

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{1 + j\omega C R_2}{j\omega C R_1 \left(1 + j\omega \frac{L}{R_1} \right)}$$

→ tutto adimensionale

Eccellenze:



$$v^+ = v^-$$

INTEGRATORE

$$i = \frac{v_i}{R} = C \frac{dv_c}{dt} = -C \frac{dv_0}{dt}$$

$$v_c = 0 - v_0$$

$$\frac{dv_0}{dt} = -\frac{v_i}{RC} \rightarrow v_0 = -\frac{1}{RC} \int_{\phi}^t v_i dt + v_k$$

[V] [V][s] tensione iniziale del condensatore [V]

$$v_0 = A_d (v_d + v_{off})$$

piccolissima o a m nulla

ESERCIZI

1/12/10

① Progettare un navigatore inerziale da fornisca:

- 1) tensione v_a proporzionale all'acceleraz. $1V/g$ sensibilità
- 2) " v_v " alla velocità $1V/(km/h)$
- 3) " v_s " allo spostam. $1V/1000km$

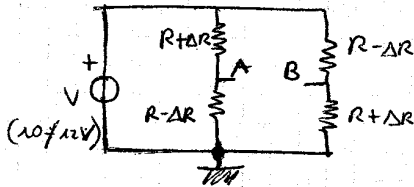
utilizzando un sensore di acceleraz. a ponte di Wheatstone con $\frac{\Delta R}{R} = 1\%$ a $1m/s^2$

Sensibilità: $v_a = k_a \cdot a = 1V/g \cdot a \rightarrow v_a \propto a \rightarrow 1^a$ uscita

$v_v = k_v \cdot v = \frac{1V}{km/h} \cdot v \rightarrow 2^a$ uscita

$v_s = k_s \cdot s = \frac{1V}{1000km} \cdot s \rightarrow 3^a$ uscita

Ponte di Wheatstone completo [varianti: solo 2 resistenze variabili, opp. solo 1]



il valore delle resistenze varia con dei parametri fisici.

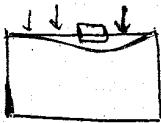
es acceleratore verticale:



accelera la base verso l'alto + c'è un'accel. inerziale sulla massa che flette la barra verso il basso.

→ resistenze grandi sopra e sotto a riposo, quindi se si flette → sopra $R + \Delta R$, sotto $R - \Delta R$; dove $\Delta R \propto acc.$

es premisse:



ponte di Wheatstone:

$$V_B = V \frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R - \Delta R} = V \frac{R + \Delta R}{2R}; \quad V_A = V \frac{R - \Delta R}{2R}$$

$$V_{BA} = \underbrace{V_B - V_A}_{\text{modo differenziale}} = V \frac{R + \Delta R - (R - \Delta R)}{2R} = V \frac{2\Delta R}{2R} = V \frac{\Delta R}{R} \propto \Delta R \propto acc.$$

(sensore di acc.)

qund $a = 1m/s^2 \rightarrow \frac{\Delta R}{R} = 1\%$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot a \rightarrow 1\% = k \cdot 1m/s^2 \rightarrow k = \frac{0,01}{m/s^2} \rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{0,01}{m/s^2} \cdot a$$

$$\frac{10^9 \Omega^2}{R_5^2} \cdot 12V \cdot \frac{0.01}{1m/s^2} = \frac{1V}{8} = \frac{1V}{9.81 m/s^2} \rightarrow R_5 = \sqrt{\frac{10^9 \Omega^2 \cdot 12V \cdot 0.01 \cdot 9.81 m/s^2}{1m/s^2 \cdot 1V}} = 34.31 k\Omega = R_6$$

$$R_7 = R_8 = \frac{10^9 \Omega^2}{34.31 k\Omega} = 29.15 k\Omega$$

$$v_v = \frac{1}{R_9 C_1} \int_{\phi}^t v_a dt = \frac{1}{R_9 C_1} \int_{\phi}^t \frac{1V}{9.81 m/s^2} \cdot a dt = \frac{1}{R_9 C_1} \cdot \frac{1V}{9.81 m/s^2} \int_{\phi}^v dv = \frac{1}{R_9 C_1} v$$

$$\frac{1}{R_9 C_1} = \frac{1V}{\frac{1}{3.6} m/s}$$

$$\rightarrow C_1 = \frac{1/3.6 m/s}{R_9 \cdot 1V} = 8.48 \mu F$$

$$R_9^2 = 10^9 \Omega^2 \rightarrow R_9 = 31.62 k\Omega$$

$$v_s = \frac{1}{R_{10} C_2} \int_{\phi}^t v_v dt = \frac{1}{R_{10} C_2} \int_{\phi}^t \frac{1}{R_9 C_1} v dt = \frac{1}{R_9 R_{10} C_1 C_2} \int_{\phi}^t v dt = \frac{1}{R_9 R_{10} C_1 C_2} v$$

$$R_{10}^2 = R_9^2 = 10^9 \Omega^2 \rightarrow R_9 R_{10} = 10^9 \Omega^2$$

$$\frac{1}{R_9 R_{10} C_1 C_2} = \frac{1V}{10^6 m} \rightarrow C_2 = \frac{10^6 m}{10^9 \Omega^2 \cdot 8.48 \mu F \cdot 1V} = 113.84 F$$

Ricapitolando:

$$R_1 = R_4 = R \left(1 + \frac{0.01}{1m/s^2} a \right)$$

$$R_2 = R_3 = R \left(1 - \frac{0.01}{1m/s^2} a \right)$$

$$R_5 = R_6 = 34.31 k\Omega$$

$$R_7 = R_8 = 29.15 k\Omega$$

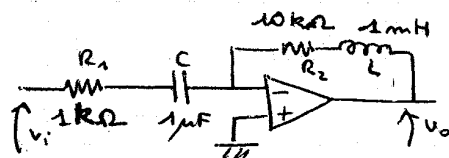
$$R_9 = R_{10} = 31.62 k\Omega$$

$$C_1 = 8.48 \mu F$$

$$C_2 = 113.84 F$$

Il problema principale è l'offset.

②



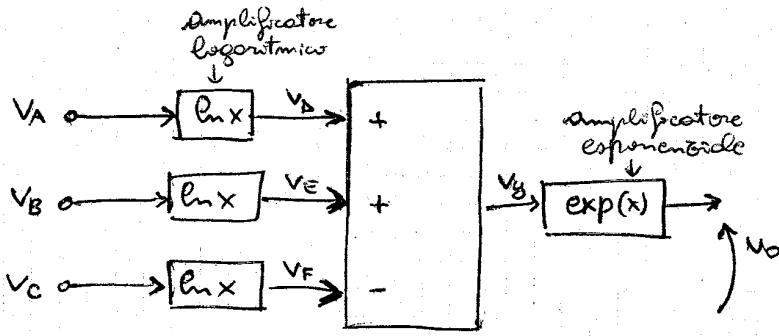
1) Calcolare $\frac{v_o}{v_i}$, al variare di ω .

2) Tracciare $\left| \frac{v_o}{v_i} \right|_{dB}$ e $\angle \frac{v_o}{v_i}$ sul grafico semilogaritmico tra 10 Hz e 10 MHz

3) Calcolare $v_o(t)$ sapendo che $v_i = 1V \sin(2\pi \cdot 1 kHz \cdot t)$

⑦①

13/12/10



$$V_D = -\eta V_T \ln\left(\frac{V_A}{R I_S}\right), \quad V_E = -\eta V_T \ln\left(\frac{V_B}{R I_S}\right), \quad V_F = -\eta V_T \ln\left(\frac{V_C}{R I_S}\right)$$

Supponiamo tutte le R e le I_S uguali tra loro

$$V_Y = K_A V_D + K_B V_E - K_C V_F$$

$\uparrow \quad \quad \uparrow \quad \quad \uparrow$
 dipendono dalle resistenze

$$V_0 = -R I_S e^{\frac{V_Y}{\eta V_T}}$$

$$V_0 = -R I_S e^{\frac{1}{\eta V_T} [K_A \eta V_T \ln\left(\frac{V_A}{R I_S}\right) + K_B \eta V_T \ln\left(\frac{V_B}{R I_S}\right) - K_C \eta V_T \ln\left(\frac{V_C}{R I_S}\right)]}$$

$$= -R I_S e^{-\left[\ln\left(\frac{V_A}{R I_S}\right)^{K_A} + \ln\left(\frac{V_B}{R I_S}\right)^{K_B} - \ln\left(\frac{V_C}{R I_S}\right)^{K_C}\right]}$$

$$= -R I_S e^{\ln\left[\frac{\left(\frac{V_C}{R I_S}\right)^{K_C}}{\left(\frac{V_A}{R I_S}\right)^{K_A} \left(\frac{V_B}{R I_S}\right)^{K_B}}\right]} = -R I_S \frac{\left(\frac{V_C}{R I_S}\right)^{K_C}}{\left(\frac{V_A}{R I_S}\right)^{K_A} \left(\frac{V_B}{R I_S}\right)^{K_B}}$$

$$= \underbrace{-\left(R I_S\right)^{-(1-K_C+K_A+K_B)}}_{\text{termine cost. che mette a posto le unita di misura}} \cdot \frac{V_C^{K_C}}{V_A^{K_A} V_B^{K_B}}$$

Scegliendo opportunam. K_A, K_B, K_C posso calcolare qualunque potenza, prodotto, divisione, radice o loro combinazione

Cost type di calcolo e superato, però a volte ho bisogno di fare calcoli a basso costo \rightarrow lo uso ma so che il calcolo analogico non è preciso \Rightarrow dipende da quanta può essere grande l'errore che io accetto.

A volte otteniamo $1 + \frac{j\omega}{a} - \frac{\omega^2}{b}$ che ora si può esprimere in monomi (ma è raro)

•) prendiamo dei valori di ω e tracciamo il grafico per pit

•) opp. metodo molto più veloce ma più approssimativo:

modulo \rightarrow prodotto dei termini $A, B = A \cdot B$

[log del prodotto = somma dei log: $20 \log_{10}(A) + 20 \log_{10}(B) = 20 \log_{10}(AB)$]

es ho un circuito che guadagna 10 e uno che guadagna 100

\rightarrow guadagno tot = 1000 \approx 60 dB

10 \rightarrow 20dB, 100 \rightarrow 40dB \Rightarrow 1000 \rightarrow 60dB

Posso sommare i grafici! (idem per le fasi)

Devo imporre la forma dei termini elementari $\frac{j\omega}{\omega_A}$ e $1 + \frac{j\omega}{\omega_2}$

Un'altra possibilità è che tutto sia moltiplicato per $K \in \mathbb{R} \rightarrow$ devo imporre anche il grafico di K .

$$H(\omega) = \frac{j\omega}{\omega_1} \left(1 + \frac{j\omega}{\omega_2}\right) \frac{j\omega}{\omega_3} \left(1 + \frac{j\omega}{\omega_4}\right) \cdot K$$

zero nell'origine, zero nn nell'origine, polo nell'origine, polo nn nell'origine

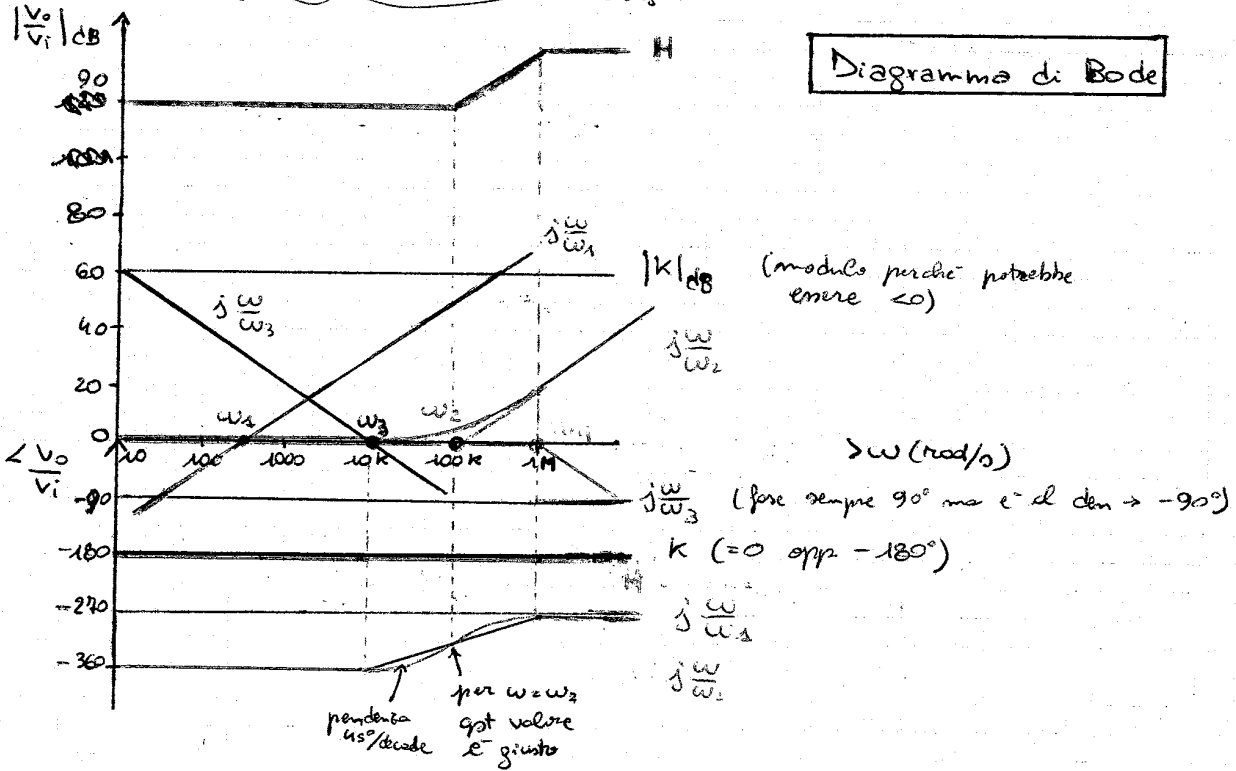


Diagramma di Bode

(modulo perché potrebbe essere <0)

ω (rad/s)

$\frac{j\omega}{\omega_3}$ (fase sempre 90° ma è il den \rightarrow -90°)

$K (=0$ opp $-180^\circ)$

$\frac{j\omega}{\omega_1}$

$\frac{j\omega}{\omega_2}$

$\left| \frac{j\omega}{\omega_1} \right| = \frac{\omega}{\omega_1}$ per ogni aumento di 10 in ascissa aumento di 20 dB \rightarrow retta con pendenza 20dB/decade

Devo def il punto iniziale!

$\frac{j\omega}{\omega_3}$ è il denom. \rightarrow pendenza <0 ma sempre di 20dB/decade

Del pt di vista analitico:

$$H(\omega) = \frac{\begin{cases} H & \textcircled{1} \leftarrow \text{basso} \\ j\omega H & \textcircled{2} \leftarrow \text{banda} \\ -\omega^2 H & \textcircled{3} \leftarrow \text{alto} \end{cases}}{(1 + j\frac{\omega}{\omega_1})(1 + j\frac{\omega}{\omega_2})}$$

$$\frac{j^2 \omega^2}{1/H} = \frac{-\omega^2}{1/H} = -H\omega^2$$

① passa basso

$\omega_1 = \omega_2 \rightarrow$ poli coincidenti ed dem.

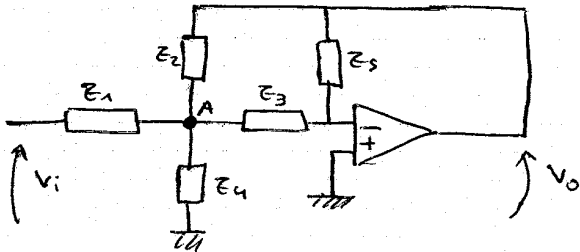
② passa alto

e' come $(\frac{j\omega}{\sqrt{1/H}})^2 \rightarrow$ 2 zeri nell'origine finche, per $\omega_1 = \omega_2$, la pendenza diventa nulla

③ passa banda

$\frac{j\omega}{1/H} \rightarrow$ uno zero e due poli, stavolta $\omega_1 \neq \omega_2$
 ↑
 sale con pendenza +20

il primo polo a ω_1 abbassa di 20dB \rightarrow pendenza nulla
 il secondo polo abbassa ancora \rightarrow -20dB



E' piu' facile a uso le impedenze Y al posto di Z.

$$Y_{1,2,3,4,5} \begin{cases} \frac{1}{R_{1,2,3,4,5}} \\ j\omega C_{1,2,3,4,5} \end{cases}$$

$V^+ = V^- = \phi$

$V_A = \frac{V_i Y_4 + V_o Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}$ ○ incognite

Considero la corrente $I = V_A Y_3 = -V_o Y_5 \rightarrow V_A = -\frac{V_o Y_5}{Y_3} = \frac{V_i Y_4 + V_o Y_2}{Y_3 + Y_2 + Y_3 + Y_4}$

$V_i Y_1 Y_3 + V_o Y_2 Y_3 = -V_o Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)$

$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{Y_1 Y_3}{Y_2 Y_3 + Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}$

num può essere di grado 0, 1 oppz 2 ed e' qll che vogliamo
 ↑ ↑ ↑
 2R R, C 2C

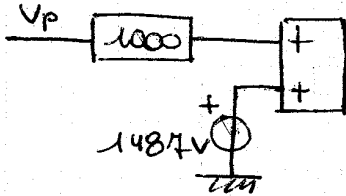
ed den ogni termine può essere di grado 0, 1, 2 e voglio che si siano termini di qti 3 tipi: (vedi funz. generale del filtro) e dovrò regolarli in base al num.

(19)

$$R = 1\text{km} \left[50 - \sqrt{50^2 + \left(\frac{1\text{MPaVp}}{10\text{V/1mbar}} \cdot 1013 \right)^2} \right] = \frac{1\text{m}}{1\text{mV}} V_R$$

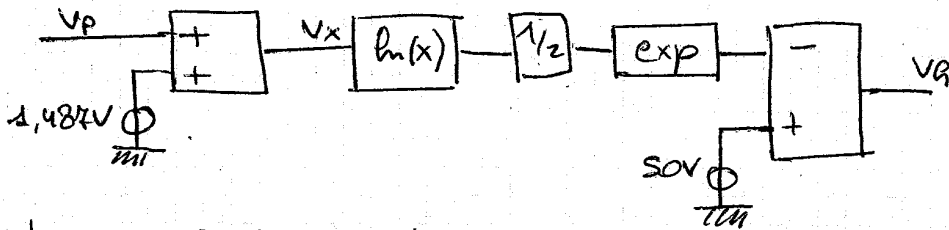
$$V_R = \frac{1\text{mV}}{1\text{m}} \cdot 1\text{km} \left[50 - \sqrt{1487^2 + \frac{10^6}{10\text{V}} V_p} \right] =$$

$$= 1\text{V} \left[50 - \sqrt{\frac{1487\text{V}}{1\text{V}} + \frac{10000}{1\text{V}} V_p} \right] = 1\text{V} \left[50 - \sqrt{\frac{1487\text{V} + 10000 V_p}{1\text{V}}} \right]$$



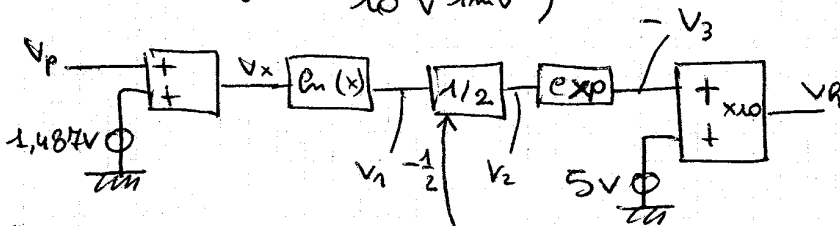
Le tensioni così sono troppo alte \$\mu\$
 \$\rightarrow\$ moltiplica e divide per 1000

$$V_R = 1\text{V} \left[50 - \sqrt{\frac{1487\text{V} + V_p V_x}{1\text{mV}}} \right] = 50\text{V} - 1\text{V} \sqrt{\frac{V_x}{1\text{mV}}}$$



di nuovo 50V è grande

$$V_R = 10 \left(5\text{V} - \frac{1\text{V}}{10} \sqrt{\frac{V_x}{1\text{mV}}} \right)$$



$$\begin{cases} V_1 = -\eta_0 V_T \ln \left(\frac{V_x}{R_1 I_s} \right) \\ V_2 = -\frac{1}{2} V_1 \\ V_3 = -R_2 I_s \exp \left(\frac{V_2}{2 V_T} \right) \end{cases} \rightarrow V_3 = -R_2 I_s \exp \left[\frac{\frac{1}{2} (\eta_0 V_T) \ln \left(\frac{V_x}{R_1 I_s} \right)}{2 V_T} \right]$$

$$V_3 = -R_2 I_s \sqrt{\frac{V_x}{R_1 I_s}}$$

$$R_1 I_s = 1\text{mV}$$

$$R_2 I_s = \frac{1}{10} \text{V} = 100 \text{mV}$$

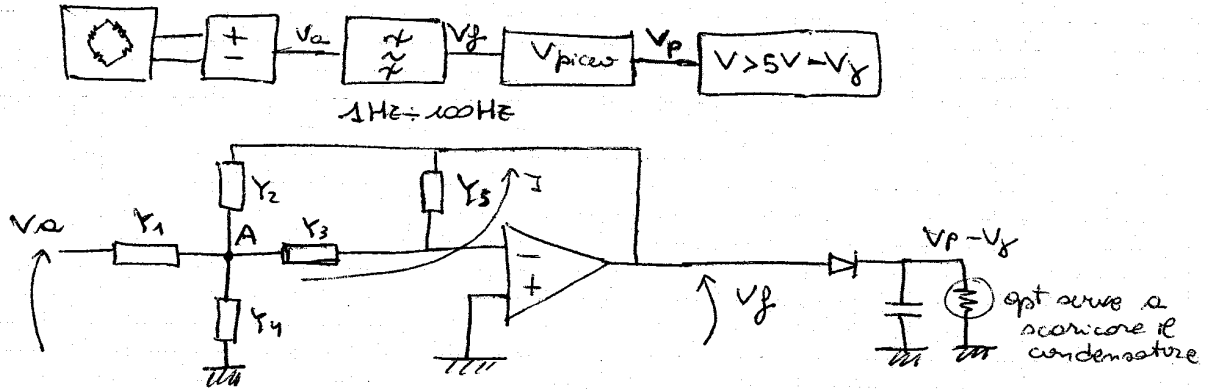
tipicam. \$I_s = 1\text{mA}\$

finire a colata

② Misuratore di vibrazione

(ponte di Wheatstone)

- uscita proporz. all' acc $\frac{1V}{g}$
- nell' intervallo 1Hz ÷ 100Hz → diagramma di Bode
- accendere una spia qnd il valore di picco supera 5g



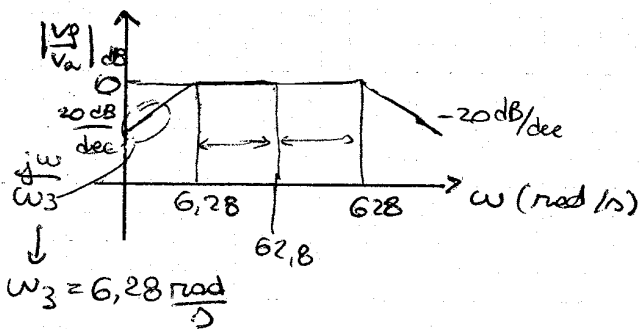
$$V^- = V + = \phi$$

$$\begin{cases} V_A = \frac{V_a Y_1 + V_f Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4} \\ V_A Y_3 = -V_f Y_5 \end{cases}$$

$$\rightarrow V_f = -\frac{V_A Y_3}{Y_5} = -\frac{Y_3 (V_a Y_1 + V_f Y_2)}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)}$$

$$V_f = \frac{Y_3 V_a Y_1}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4)} \cdot \frac{1}{1 - \frac{Y_3 Y_2}{Y_5}}$$

$$\frac{V_f}{V_a} = \frac{-Y_1 Y_3}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_2 Y_3}$$



$$\frac{V_f}{V_a} = H(\omega) = \frac{j\omega}{\omega_3} \frac{1}{\left(1 + \frac{j\omega}{6.28 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}\right) \left(1 + \frac{j\omega}{62.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}\right)}$$

$$Y_1 = j\omega C_1$$

$$Y_2 = 1/R_2$$

$$Y_3 = 1/R_3$$

$$Y_4 = 1/R_4$$

$$Y_5 = j\omega C_5$$

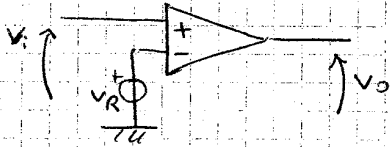
(R costa meno di C ed e più precisa)

20/12/2010

Comparazione

- fortemente non lineare (σ / V_0)
- ⇒ i circuiti di comparazione sono simili a gli invertitori ma la retroazione è positiva (\oplus)

Vediamo prima un circuito intermedio → no retroazione



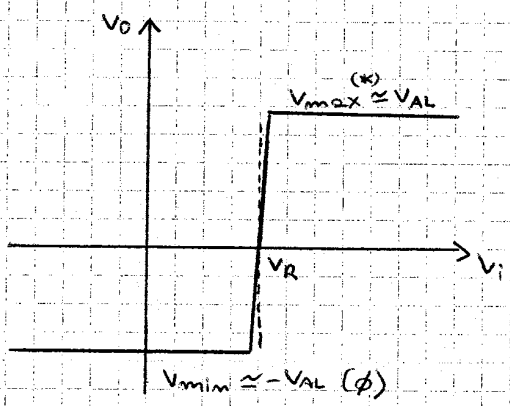
$V_R =$ tensione di riferimento
[Comparatore di soglia senza isteresi]

no retroaz. → non vale il principio di massa virtuale

$$\begin{cases} V_0 = A_d V_d \\ V_d = V^+ - V^- = V_i - V_R \end{cases} \Rightarrow V_0 = A_d (V_i - V_R)$$

\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow
 incognita data meta meta

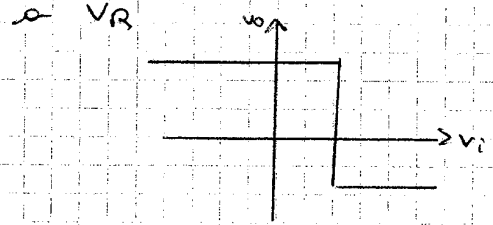
A_d è molto molto molto grande → se tracciamo un grafico $V_0 - V_i$, fissata V_R, \dots



retta poco o non verticale
(A_d e la sua pendenza)
(*): tipicam. - $V_{max} = V_{AL} - 1V$
**COMPARATORE DI SOGLIA
SENZA ISTERESI
DI TIPO NON INVERTENTE**

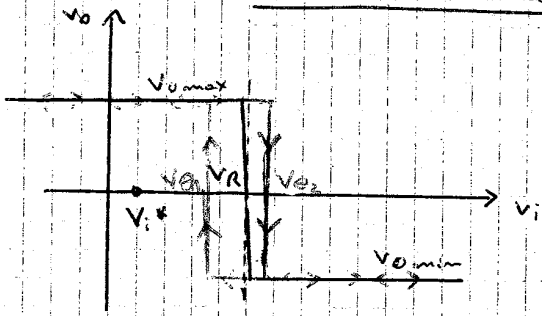
... ottengo una caratteristica non lineare (V_0 sempre molto alta opp. molto bassa e seconda del risultato della comparazione).

(**) scambiando \oplus e \ominus avrei una caract. speculare rispetto



non invertente → alta in ingresso
= alta in uscita
invertente → alta in ingresso
= bassa in uscita

CICLO D'ISTERESI



Se ora però consideriamo $V^+ \approx V_R$ abbiamo un sist.

$$\begin{cases} v_o = A_d (V^+ - V^-) \\ \textcircled{V^+} = \frac{v_o R_1 + V_R R_2}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

 ↑ incognita ↑ nota

Punto da sx $\rightarrow v_o = V_{omax}$

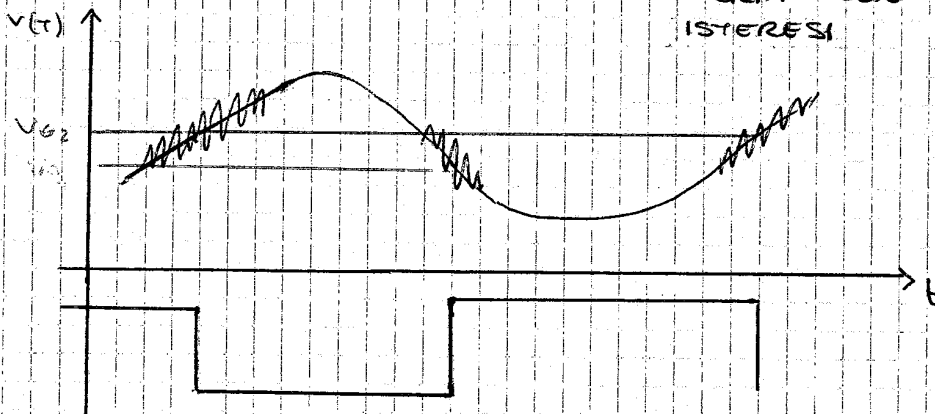
$\Rightarrow V_{\Theta_2} = \frac{V_{omax} R_1 + V_R R_2}{R_1 + R_2} > V_R$ (ma di poco)

Appena arrivo a V_{Θ_2} mi trovo la soglia a sx \rightarrow sono già oltre
 \rightarrow crollo da V_{omax} a V_{omin}

$\Rightarrow V_{\Theta_1} = \frac{V_{omin} R_1 + V_R R_2}{R_1 + R_2} < V_R$

And torno indietro da sotto (V_{omin}) appena tocco V_{Θ_1} sono di nuovo già oltre la soglia \rightarrow torno su da V_{omin} a V_{omax} .

(vedi frecce disegno) \rightarrow COMPARATORE DI SOGLIA CON ISTERESI



Appena oltrepasso la soglia superiore vado a vedere gli ingressi, e viceversa \rightarrow 2 soglie \rightarrow T mi ha più un valore preciso (vasta tra un min ed un max)

d'isteresi: permette di non sentire il rumore (errori, ...)

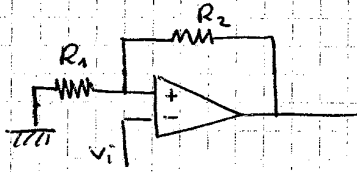
colazioniamo $V_{\Theta_1}, V_{\Theta_2}$, che dipendono da R_1, R_2

• il loro modo comune ~~è quello differenziale~~ e lo chiamo tensione di soglia $\textcircled{V_{\Theta}} = \frac{V_{\Theta_1} + V_{\Theta_2}}{2}$

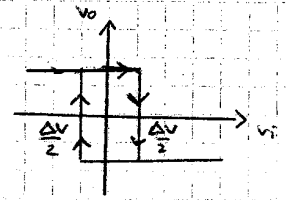
• il loro modo differenziale è $\textcircled{\Delta V} = V_{\Theta_2} - V_{\Theta_1} = \text{isteresi}$

($\Delta V = 1V$ opp $\Delta V = \pm 0.5V$ sono notazioni equivalenti)

OSCILLATORE A RILASSAMENTO



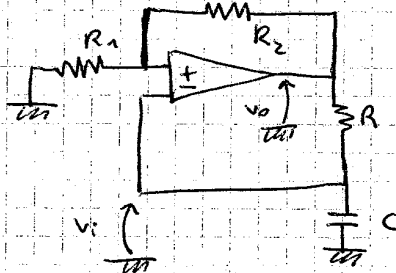
è un comparatore di soglia con isteresi invertente



Suppongo $V_{omax} = -V_{omin}$ → $V_0 = \phi$

$$\Delta V = (V_{omax} + V_{omin}) \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

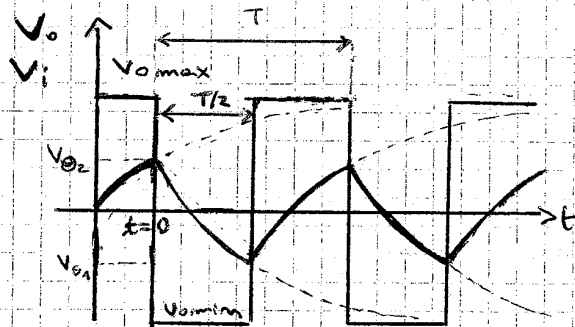
E se collego il comparatore a un altro circuito RC?



Prevede l'effetto sensore di soglia e un comparazione

$$V_i = V^- = V_e$$

$$V_o = V_R + V_C$$



consideriamo il condensatore inizialmente scarico

curve esponenziali che tendono a V_{omax} e V_{omin}

Non sappiamo qual è la condic. iniziale, ipotizziamo $V_0 = V_{omax}$

Qst circuito non ha tensioni ingresso → genera delle tensioni senza avere nulla in ingresso

V_0 è un'onda quadra simmetrica (impiega tut tempo a salire qnt a scendere del 2° ciclo in avanti)

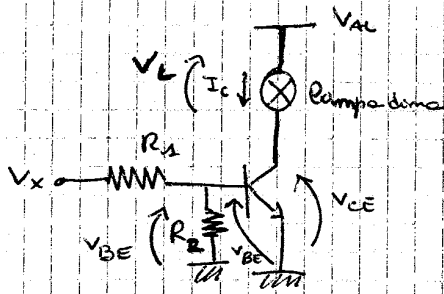
v_i è quasi triangolare, per averla veramente triangolare dovrà mettere un integratore.

Con quali a variare la frequenza? → varia R e C

Con quali l'ampiezza della forma d'onda rettangolare?

→ mette un amplificatore con guadagno variabile (1 resistenza e variabile → potenziometro)

Caso (a) (continua)
per una lampadina / un motore



V_x = tensione di controllo
(o e' alta o e' bassa)

basso : $V_x < V_{x\ off}$ → spento
alto : $V_x > V_{x\ on}$ → acceso

es. $V_{x\ off} = 1V$
 $V_{x\ on} = 5V$ } $V_{x\ on} \neq V_{x\ off}$ → errori non cambiano mt
↑ abbastanza lontani, (qll che alto rimane alto, qll che basso rimane basso)

$+10V > 5V \rightarrow$ alto
 $-10V < 1V \rightarrow$ basso

[no interesi → esiste una zona tra alto e basso]
[di interesi → no zona intermedia]

Spento

$I_C = \phi \rightarrow$ transistore interdetto

$V_{BE} < V_{BE\ on}$ (0.4V)

$I_B = \phi$

R_1, R_2 e' un partitore senza carico (da li' non esce mt)

$V_{BE} = \frac{V_x R_2}{R_1 + R_2} \leq V_{BE\ on} \quad \forall V_x < V_{x\ off}$

$\Rightarrow V_{x\ off} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_{BE\ on}$ ne garantisco opt → $V_{BE} \leq V_{BE\ on}$

es. $V_{x\ off} = 1V$
 $V_{BE\ on} = 0.4V \rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} \geq 0.4 \rightarrow$ ricavo R_1 ed R_2

Acceso

$I_C \neq \phi$

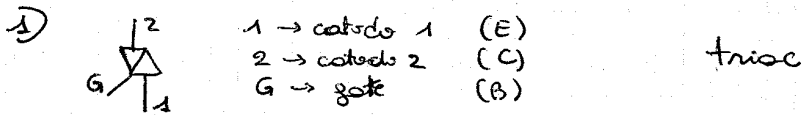
$V_L = V_{AL} - V_{CE}$

per dare V_L maggiore possibile → V_{CE} più piccola possibile

→ transistore in saturazione → $V_{CE} = V_{CE\ sat}$

$V_L = V_{AL} - V_{CE\ sat}$

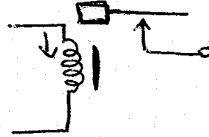
b) Se voglio comandare un motore in alternata mi posso usare qst circuito (transistore m va bene) → ci sono varie possibilità



2) relett

solenoidi con interruttore

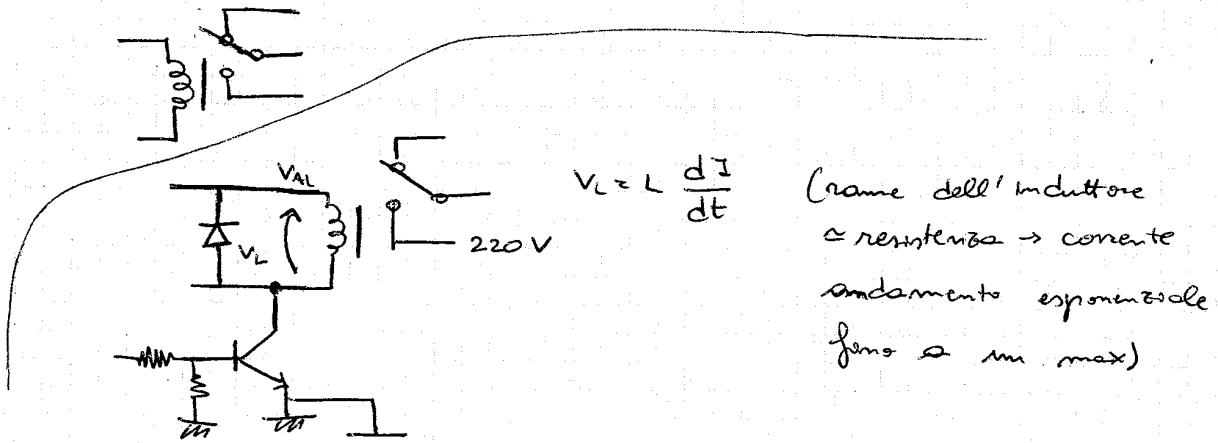
↑
con nucleo magnetico che si deforma fuori per condita



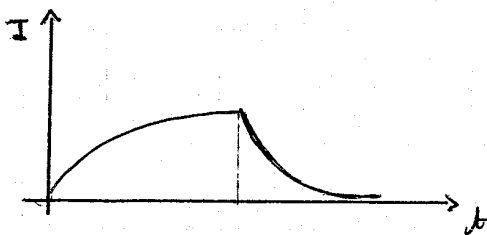
La molla tiene aperto il contatto → no corrente

se nel solenoide circola corrente → attrae la sbornetta → contatto chiuso → circola corrente

Opp. deviatore e un interruttore!



Se induttore si interdice la corrente dovrebbe andare istantaneamente a $-\infty$ e la tensione sul collettore va ad ∞ → brucia il transistor ⇒ si mette un diodo in // all'induttore → corrente m va a zero (nell'induttore si, nel diodo no)



Separazione galvanica
tra contatto ed induttore
(m può portare corrente → separa la tensione pericolosa dal resto del circuito)

Tabella della verità

ci mettiamo tutti i possibili valori per A, B

A	B	$A * B$	$A + B$	$A \oplus B$	\bar{A}
0	0	0	0	0	1
0	1	0	1	1	1
1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	0

Trae la sua origine dall'algebra della proposiz. (analisi di proposiz. → vero o falso a seconda che i postulati di una frase siano veri o falsi → 1 o 0)

EXOR → e' OR esclusivo → o uno oppo l'altro

Le diverse funz. dell'algebra classica sono infinite, nell'algebra booleana invece no! Al max ha 2^{2^N} diverse funz., dove N e' il n° di variabili.

• teoremi

Se in un teorema io ho solo somme, prodotti, variabili, costanti e scambio i + coi * e gli 1 con gli 0 → il teorema continua a valere → i teoremi per * e + sono detti DUALI

$$\boxed{\text{AND}} \quad A \cdot A = A \quad \boxed{\text{OR}} \quad A + A = A$$

$$A \cdot 0 = 0 \quad A + 1 = 1$$

$$A \cdot 1 = A \quad A + 0 = A$$

$$\begin{aligned} (A \cdot B) \cdot C &= (A+B) \cdot C = \text{prop. distributiva} \\ &= A \cdot (B \cdot C) = A + (B+C) = \\ &= A \cdot B \cdot C = A + B + C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A \cdot (B+C) &= A + (B \cdot C) = \\ &= (A \cdot B) + (A \cdot C) = (A+B) \cdot (A+C) \end{aligned}$$

$$A \cdot \bar{A} = 0 \quad A + \bar{A} = 1$$

$$A + \bar{A} = A \quad \bar{\bar{A}} = A$$

$$A + \bar{A}B = A + B$$

Teorema di De Morgan:

$$\overline{A + B + C} = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C}$$

$$\overline{A \cdot B \cdot C} = \bar{A} + \bar{B} + \bar{C}$$