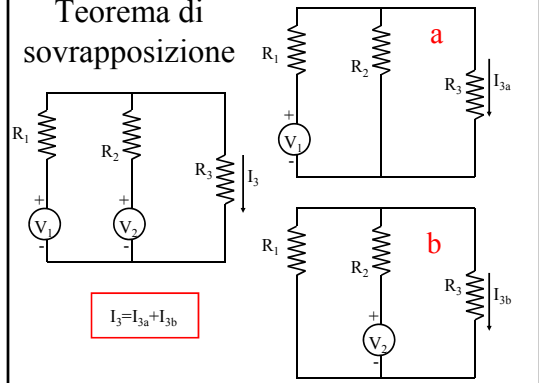


Teorema di sovrapposizione

- Se in un circuito lineare agiscono simultaneamente diversi generatori, la corrente totale prodotta in un ramo generico e' la somma delle correnti che sarebbero prodotte dai singoli generatori se ciascuno di essi agisse isolatamente.
- Questo teorema deriva dalla linearita' delle leggi che esprimono i principi di Kirchhoff.

Teorema di sovrapposizione



Teorema di sovrapposizione

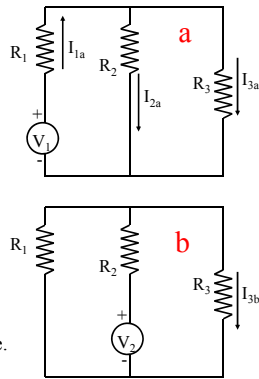
- Risolvere i circuiti a) e b) e' molto piu' semplice che risolvere il circuito originale:

per a) : $I_{1a} = \frac{V_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}$

inoltre : $R_2 I_{2a} = R_3 I_{3a}$

ed infine : $I_{1a} - I_{2a} - I_{3a} = 0$

3 equazioni nelle 3 incognite.



Teorema di sovrapposizione

- Il circuito b) e' identico ad a), con lo scambio delle resistenze R1 ed R2

- Si puo' quindi scrivere subito:

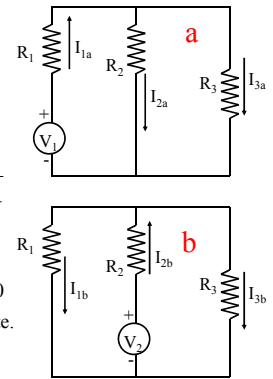
per b) : $I_{2b} = \frac{V_2}{R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}}$

inoltre : $R_1 I_{1b} = R_3 I_{3b}$

ed infine : $I_{2b} - I_{1b} - I_{3b} = 0$

3 equazioni nelle 3 incognite.

- Infine $I_3 = I_{3a} + I_{3b}$

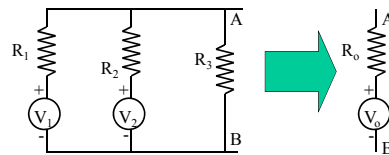


Teorema di Thevenin

- Serve a sostituire ad un circuito elettrico complicato un circuito equivalente che, per i nostri scopi, ha le stesse caratteristiche dell' originale.
- Il circuito sostitutivo e' costituito da un generatore di tensione con in serie una resistenza.

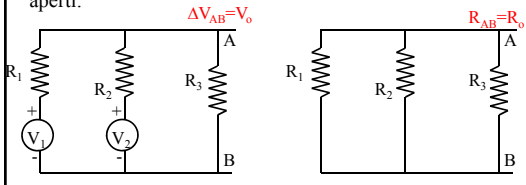
Teorema di Thevenin

- Qualsiasi circuito elettrico lineare attivo puo' essere schematizzato con un circuito costituito da un generatore ideale di tensione V_0 e da una resistenza R_0 in serie ad esso.
- Fissati due punti A e B del circuito, V_0 e' la ddp esistente tra A e B, ed R_0 e' la resistenza che si misura tra A e B quando tutti i generatori ideali di tensione sono cortocircuitati e tutti i generatori ideali di corrente sono aperti.



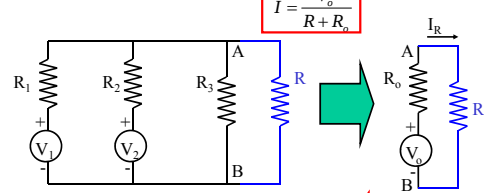
Teorema di Thevenin

- Qualsiasi circuito elettrico lineare attivo può essere schematizzato con un circuito costituito da un generatore ideale di tensione V_o e da una resistenza R_o in serie ad esso.
- Fissati due punti A e B del circuito, V_o è la ddp esistente tra A e B, ed R_o è la resistenza che si misura tra A e B quando tutti i generatori ideali di tensione sono cortocircuitati e tutti i generatori ideali di corrente sono aperti.



Teorema di Thevenin

- Ne segue che se tra A e B si connette una nuova resistenza R , in essa scorre una corrente $I = \frac{V_o}{R + R_o}$



- Questo permette di **misurare** V_o e R_o :
 - con $R = \infty$ (circuito aperto) $V_{AB} = V_o$
 - con $R = 0$ (cortocircuito) $I_R = V_o / R_o$

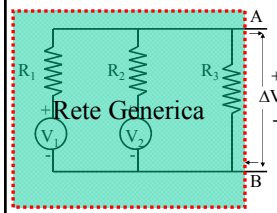
$$I = \frac{V_o}{R + R_o}$$

Teorema di Thevenin

- Consideriamo la ΔV come un generatore di forza elettromotrice. La corrente I che fluisce da A e in B può sempre essere calcolata col metodo delle maglie: otterremo un'equazione del tipo:

$$I = \sum G_i V_i - G \Delta V$$
- Dove G sono coefficienti con dimensioni di R^{-1} . Quindi

$$\Delta V = \sum \frac{G_i}{G} V_i - \frac{I}{G}$$



Teorema di Thevenin

- $$\Delta V = \sum \frac{G_i}{G} V_i - \frac{I}{G}$$

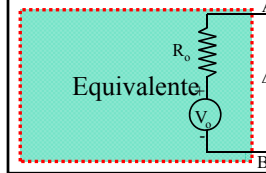
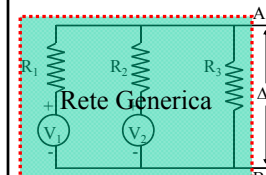
possiamo definire

$$V_o = \sum \frac{G_i}{G} V_i \quad \text{e} \quad R_o = \frac{1}{G}$$

ottenendo

$$\Delta V = V_o - R_o I$$

che è proprio l'espressione della ΔV dovuta ad un generatore V_o in serie ad una resistenza R_o



Applicazione del Teorema di Thevenin (1)

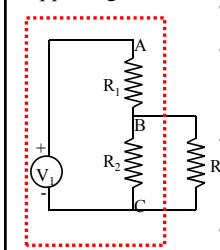
- Riprendiamo il partitore di tensione e supponiamo di applicargli un carico R .

- Si vogliono trovare la corrente che scorre in R e la tensione ai suoi capi.
- Si trovano immediatamente con il teorema di Thevenin:

$$I_R = \frac{V_o}{R + R_o}$$
- Dove: V_o è la tensione che si misura tra B e C in assenza di R , ed è quindi

$$V_o = \frac{V_1 R_2}{R_1 + R_2}$$
- e R_o è il parallelo tra R_1 ed R_2 :

$$R_o = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

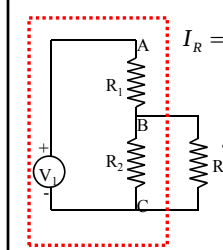


Applicazione del Teorema di Thevenin (1)

- Si ottiene quindi subito

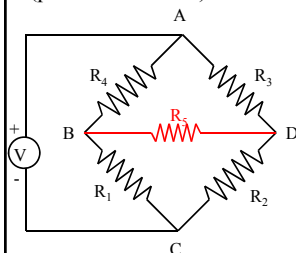
$$I_R = \frac{\frac{V_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{V_1 R_2}{R R_1 + R R_2 + R_1 R_2}$$

- Trovare la stessa formula con le leggi di Kirchhoff è molto più complicato.



Applicazione del Teorema di Thevenin (2)

- Riprendiamo il Ponte di Wheatstone, e supponiamo di voler determinare la corrente che scorre nella R_5 (ponte sbilanciato).



- Si trova immediatamente con il teorema di Thevenin:

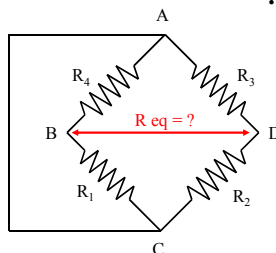
$$I_R = \frac{V_o}{R_5 + R_o}$$

- Dove: V_o e' la tensione che si misura tra B e D in assenza di R_5 , ed e' quindi la differenza tra le tensioni dei due partitori R_4/R_1 e R_3/R_2 :

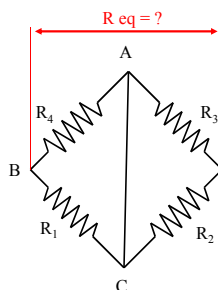
$$V_o = V \frac{R_4}{R_4 + R_1} - V \frac{R_3}{R_3 + R_2}$$

Applicazione del Teorema di Thevenin (2)

- R_o e' la resistenza vista tra B e D quando V e' in corto.



Applicazione del Teorema di Thevenin (2)



- R_o e' la resistenza vista tra B e D quando V e' in corto.
- E quindi e' la serie dei paralleli $R_4//R_1 + R_3//R_2$:

$$R_o = \frac{R_4 R_1}{R_4 + R_1} + \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2}$$

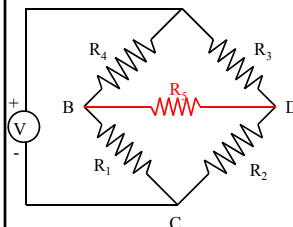
Applicazione del Teorema di Thevenin (2)

- Quindi:

$$I_R = \frac{V_o}{R_5 + R_o}$$

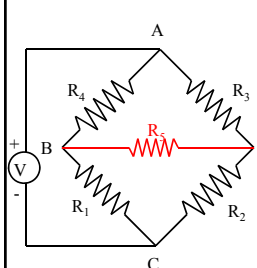
$$R_o = \frac{R_4 R_1}{R_4 + R_1} + \frac{R_3 R_2}{R_3 + R_2}$$

$$V_o = V \frac{R_4}{R_4 + R_1} - V \frac{R_3}{R_3 + R_2}$$



Applicazione del Teorema di Thevenin (2)

- Se R_5 e' molto alta, $V_{BD} = V_o$, che e' diversa da zero solo se



$$0 \neq V_o = V \frac{R_4}{R_4 + R_1} - V \frac{R_3}{R_3 + R_2}$$

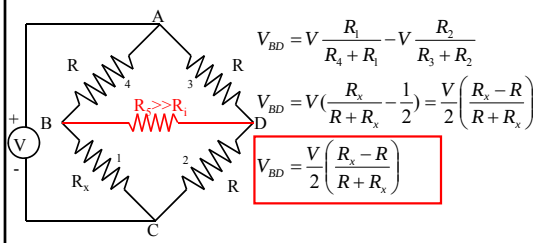
$$\frac{R_4}{R_4 + R_1} \neq \frac{R_3}{R_3 + R_2}$$

$$R_1(R_3 + R_2) \neq R_2(R_4 + R_1)$$

$$R_1 R_3 \neq R_2 R_4$$

Importanza del ponte di Wheatstone:

- E' l' implementazione di un metodo DIFFERENZIALE e quindi permette misure estremamente sensibili.



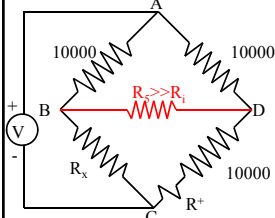
$$V_{BD} = V \frac{R_4}{R_4 + R_1} - V \frac{R_3}{R_3 + R_2}$$

$$V_{BD} = V \left(\frac{R_4}{R_4 + R_1} - \frac{R_3}{R_3 + R_2} \right) = \frac{V}{2} \left(\frac{R_4 - R_3}{R_4 + R_3} \right)$$

$$V_{BD} = \frac{V}{2} \left(\frac{R_4 - R_3}{R_4 + R_3} \right)$$

Importanza del ponte di Wheatstone:

- Ad es. supponiamo di voler sapere se una resistenza e' di 10000Ω oppure di 10001Ω .
- Misurando solo la resistenza, dovremmo avere uno strumento capace di apprezzare bene almeno una parte su 10000 : per avere una misura al 10%.



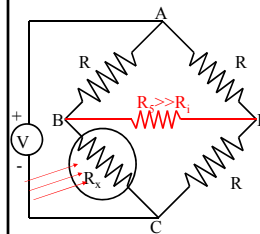
- Invece, possiamo inserire la resistenza da misurare come R_x in un ponte fatto con altre tre resistenze di riferimento come in figura, e variare R^+ fino ad ottenere il bilanciamento del ponte.

$$V_{BD} \cong \frac{V}{4R} [R_x - R]$$

In questo modo basta misurare V , V_{BD} , al 5% per ottenere $R_x - R$ al 10%

Importanza del ponte di Wheatstone:

- Spesso R_x e' un trasduttore
- In assenza di segnale in ingresso il ponte e' bilanciato, (cioe' $R_x = R$) e quindi $V_{BD} = 0$
- Appena arriva un segnale, R_x cambia, e si misura subito un V_{BD} , tanto maggiore quanto piu' grande e' il segnale.

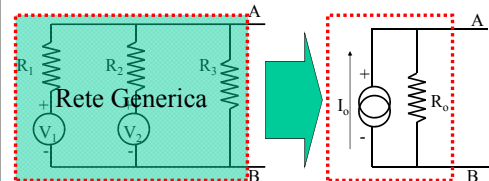


$$V_{BD} = \frac{V}{4R} (R_x - R)$$

Teorema di Norton

- Qualsiasi circuito elettrico lineare attivo connesso a due punti A e B puo' essere schematizzato con un circuito costituito da un generatore di corrente I_o ed una resistenza R_o in parallelo ad esso.
- I_o e' la corrente di corto circuito tra A e B, ed R_o e' quella che si misura quando tutti i generatori di corrente sono aperti e quelli di tensione sono cortocircuitati.

Teorema di Norton



Teorema di Norton

- E' coerente con il teorema di Thevenin:

$$I_{R_o} R_o = I_R R \Rightarrow I_{R_o} = I_R R / R_o$$

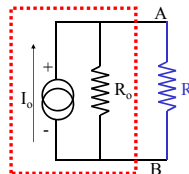
$$\text{ma } I_o = I_{R_o} + I_R$$

$$\text{e quindi } I_o = I_R (1 + R / R_o)$$

per cui la V_o di Thevenin e'

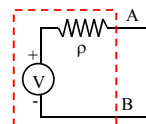
$$V_o = I_o R_o = I_R (R_o + R)$$

$$I_R = \frac{V_o}{R_o + R}$$



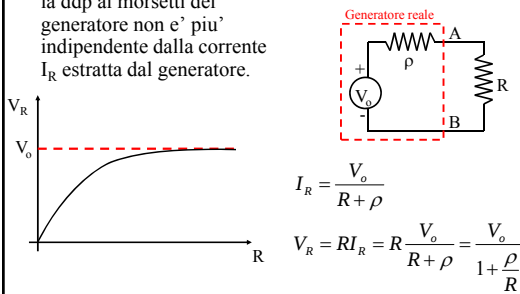
Generatori reali

- Un generatore reale di tensione puo' essere schematizzato come la serie di un generatore ideale di tensione e un resistore di resistenza ρ detta resistenza interna.



- Se si applica un carico R , la ddp ai morsetti del generatore non e' piu' indipendente dalla corrente I_R estratta dal generatore.

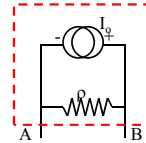
Generatori reali



- Una batteria da 9V ha una resistenza interna dell'ordine di 1Ω . Per carichi $\gg \rho$, si ha $V_R \approx V_o(1 - \rho/R)$

Generatori reali

- Un generatore reale di corrente puo' essere schematizzato come il parallelo di un generatore ideale di corrente e di una resistenza ρ che e' detta resistenza interna del generatore.



Generatori reali

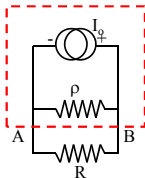
- Quindi un generatore reale di corrente si comporta quasi idealmente se la resistenza di carico e' molto minore della sua resistenza interna.

$$I_o = I_\rho + I_R$$

$$I_\rho \rho = I_R R$$

$$\Rightarrow I_R = I_o \frac{\rho}{\rho + R} = I_o \frac{1}{1 + R/\rho}$$

Per carichi $R \ll \rho$, si ha $I_R \approx I_o(1 - R/\rho)$



Trasferimento di potenza da un generatore a un carico

- E' il caso piu' banale di uso di un circuito elettrico per trasferire energia.
- Se il generatore e' una batteria, l'energia chimica viene trasformata in energia elettrica al suo interno.
- La corrente elettrica trasporta quest'energia nel carico.
- Si cerca il massimo trasferimento di potenza.
- Se il carico e' una resistenza, questa energia viene trasformata in energia termica per effetto Joule (riscaldatore, es. stufa elettrica).

Parentesi : Effetto Joule

- Supponiamo di applicare ad un circuito con resistenza R una ddp V : si instaurera' una corrente I , data dal moto delle cariche nel circuito.
- Sia dQ la carica che si sposta nell'unita' di tempo dt tra i due punti ai quali viene applicata la ddp.
- Il lavoro L compiuto dalla forza elettrica e' $dL = dQ \cdot V$
- Ma $I = \frac{dQ}{dt}$ quindi $dL = I \cdot V \cdot dt$
- Quindi la potenza dissipata nel conduttore, che e' per definizione dL/dt , vale $W = dL/dt = IV$
- Unita' di misura Watt = VA = J/s

Trasferimento di potenza da un generatore a un carico

La potenza dissipata nel carico e'

$$W = V_R I_R$$

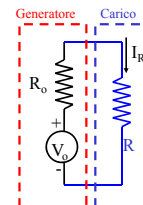
Il circuito e' un normale partitore, quindi

$$V_R = V_o \frac{R}{R + R_o} \quad ; \quad I_R = \frac{V_o}{R + R_o}$$

$$\Rightarrow W = \frac{V_o^2 R}{(R + R_o)^2}$$

se si deriva rispetto a R si ottiene

$$\frac{dW}{dR} = V_o^2 \left[\frac{(R + R_o)^2 - 2R(R + R_o)}{(R + R_o)^4} \right] = V_o^2 \frac{[R_o - R]}{(R + R_o)^3}$$



Trasferimento di potenza da un generatore a un carico

- La derivata si annulla per $R = R_o$
- E la potenza trasferita vale $W_{\max} = \frac{V_o^2}{4R_o}$
- In questo caso si dice che il carico è adattato.
- Massimo trasferimento di potenza non significa massima efficienza del sistema. In caso di massima potenza trasferita, infatti, metà della potenza totale dissipata nel sistema è dissipata dove si vuole che sia dissipata (nel carico) ma l'altra metà è dissipata nel generatore, dove non si vorrebbe. L'efficienza è del 50%.

Definizione di efficienza del trasferimento di potenza

- Si può definire efficienza del trasferimento di potenza la quantità

$$\eta = \frac{W_{\text{carico}}}{W_{\text{totale}}} = \frac{W_{\text{carico}}}{W_{\text{gen}} + W_{\text{carico}}} = \frac{Ri^2}{R_o i^2 + Ri^2} = \frac{R}{R_o + R}$$

- Questa è massima quando $R \gg R_o$

Alcune considerazioni sui conduttori reali che connettono i componenti dei circuiti

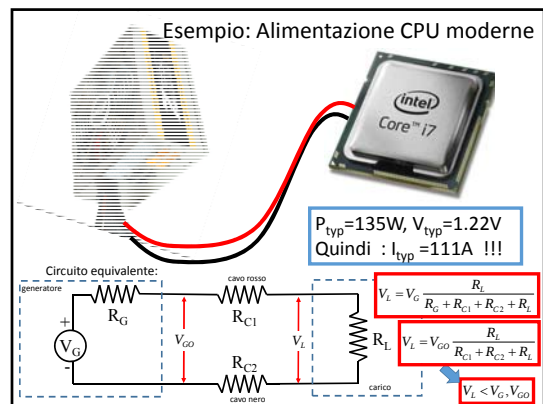
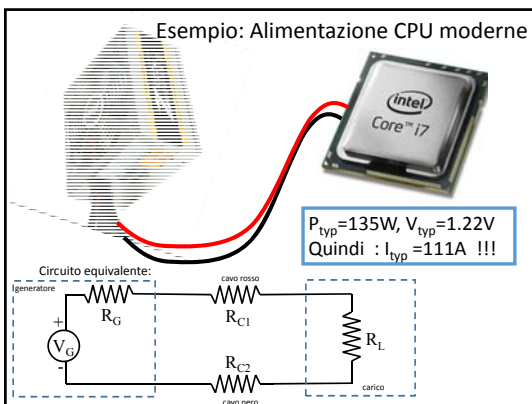
- Finora abbiamo considerato le connessioni tra generatori di tensione (o di corrente) e i resistori come ideali: non essendoci caduta di tensione, possono avere una lunghezza qualsiasi.
- Questa è una approssimazione. Dato da ricordare: la resistività del rame (che normalmente si usa come materiale per i conduttori di connessione nei circuiti) è $\rho_{Cu} = 2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
- Va inserita nella seconda legge di Ohm per calcolare la resistenza di un conduttore di rame.
- Quando la corrente è alta, la resistenza dei conduttori di rame non può essere trascurata.

Alcune considerazioni sui conduttori reali che connettono i componenti dei circuiti

- Prendiamo ad es. un conduttore di rame lungo 10 cm e di sezione 1 mm, la sua resistenza sarà di circa

$$R = \frac{\rho_{Cu}}{S} l = 2 \cdot 10^{-8} \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} \Omega = 2 \cdot 10^{-3} \Omega$$

- trascurabile rispetto alle resistenze con le quali abbiamo a che fare quasi sempre ma NON SEMPRE !



Circuito equivalente:

$V_L = V_G \frac{R_L}{R_G + R_{C1} + R_{C2} + R_L}$
 $V_L = V_{G0} \frac{R_L}{R_{C1} + R_{C2} + R_L}$
 $V_L < V_G, V_{G0}$

- **Conseguenze :**
 - A causa della resistenza interna del generatore e della resistenza dei cavi, la tensione del generatore (interna, V_G , oppure esterna, V_{G0}) deve essere maggiore della tensione che si vuole applicare al carico V_L
 - Parte della potenza del sistema verrà dissipata nel generatore, parte nei cavi, parte nel carico. Il sistema sarà efficiente se la potenza dissipata nel carico sarà molto maggiore di quella dissipata nel generatore e nei cavi
 - Se non si usano fili di sezione adeguata, nei fili viene dissipata troppa potenza, e si scaldano troppo.
- **Quantitativamente :**

Resistenza dei cavi

- Supponiamo di usare due conduttori lunghi 20 cm, con diametro del conduttore di rame di 1 mm:

$$\rho_{Cu} = 1.68 \times 10^{-8} \Omega m$$

$$R_{C1} = R_{C2} = \rho_{Cu} \frac{4L}{\pi D^2} = 4.1 m\Omega$$
- Con una corrente di 111A la caduta di tensione sui due conduttori è di

$$\Delta V = (R_{C1} + R_{C2}) i = 0.905 V$$
- Quindi se si ha bisogno di una tensione sul carico di 1.22V il generatore deve produrre alla sua uscita

$$V_{G0} = 1.22V + 0.905 V = 2.125 V$$
- Quasi il doppio di quella richiesta dal carico.

Resistenza dei cavi

- Supponiamo di usare due conduttori lunghi 20 cm, con diametro del conduttore di rame di 1 mm:

$$\rho_{Cu} = 1.68 \times 10^{-8} \Omega m$$

$$R_{C1} = R_{C2} = \rho_{Cu} \frac{4L}{\pi D^2} = 4.1 m\Omega$$
- Con una corrente di 111A la caduta di tensione sui due conduttori è di

$$\Delta V = (R_{C1} + R_{C2}) i = 0.905 V$$
- Quindi se si ha bisogno di una tensione sul carico di 1.22V il generatore deve produrre alla sua uscita

$$V_{G0} = 1.22V + 0.905 V = 2.125 V$$
- Questo approccio è problematico, per diversi motivi.

Resistenza dei cavi

- 1) In ciascuno dei conduttori si dissiperebbe una potenza di

$$W = \frac{(\Delta V)^2}{R_{C1,2}} = 50 W$$
 cioè in totale nei 2 conduttori si dissipa altrettanta potenza che nel processore ! Tutta sprecata, e poi gli isolanti dei cavi probabilmente si surriscalderebbero.
- 2) Se il generatore produce $V_{G0} = 2.125V$ quando c'è il carico tipico di 135W, nei momenti in cui il processore consuma meno potenza (utilizzo meno intenso) e quindi assorbe meno corrente, la tensione ai capi del processore aumenta, e può distruggerlo.
- Supponiamo per semplicità che il generatore sia ideale, cioè $R_G = 0$, $V_{G0} = V_G = 2.125V$. In tal caso

$$V_L = V_{G0} - 2R_C i$$
- Quando i si riduce da 111A a 20A, ad esempio, la tensione sul carico aumenta da 1.22V a 1.96V, e diventa maggiore della massima tensione sopportabile dal processore.

Resistenza dei cavi

- Una soluzione è aumentare il diametro dei conduttori:

Diametro conduttori (mm)	Resistenza due conduttori (mΩ)	Caduta (V) per potenza tipica (corrente 111A)	Potenza Dissipata nei cond. (W)	Tensione su carico al minimo (V) (corrente 20A)
1	8.15	0.904	100	1.96
3	0.90	0.101	11.1	1.30
5	0.16	0.036	4.02	1.25

- Oppure, se i conduttori di grande diametro sono troppo pesanti o costosi, si deve generare la bassa tensione più vicino al processore (con un regolatore convertitore di tensione direttamente sulla scheda madre del PC)

Avviamento automobile

- Correnti richieste: da 100 a 500 A per pochi secondi (dipende dal motore, dal rapporto di compressione, dalla temperatura dell'olio...).
- 12V, 300A, $1.68 \times 10^{-8} \Omega m$
- I conduttori devono essere di grande sezione :

Avviamento da batteria interna				Avviamento da batteria esterna (cavi e pinze)			
Diametro conduttore (mm)	Lunghezza L (m)	Caduta di V (V)	Potenza dissipata (W)	Diametro conduttore (mm)	Lunghezza L (m)	Caduta di V (V)	Potenza dissipata (W)
2	1	3.0	920	2	3	9.2	2750
3	1	1.4	410	3	3	4.1	1220
5	1	0.5	150	5	3	1.5	440

Misure in corrente continua

- Esistono due tipi di strumenti di misura: analogici e digitali.
- Gli strumenti analogici hanno un indicatore che si muove su una scala: la posizione dell'indicatore (la "lancetta") rispetto alla scala permette di stimare il valore dell'osservabile.
- Gli strumenti digitali visualizzano il risultato della misura già in forma numerica.



Strumenti analogici

- Moto dell' "equipaggio mobile"
- Può considerarsi un corpo rigido girevole intorno ad un asse fisso verticale. Per cui

$$\mathfrak{I} \ddot{\theta} = M$$

dove $\mathfrak{I}$ è il momento d'inerzia,

$\ddot{\theta}$ è l'accelerazione angolare

M è il momento risultante delle forze esterne

- M ha tre componenti:
 - Coppia deviatrice dovuta all'osservabile: $f(I)$
 - Coppia elastica della molla di richiamo (serve a definire una posizione di zero): $-C\theta$
 - Coppia delle forze di smorzamento $-\beta\dot{\theta}$
- quindi
$$\mathfrak{I} \ddot{\theta} + \beta \dot{\theta} + C\theta = f(I)$$

Moto dell' equipaggio mobile

$$\mathfrak{I} \ddot{\theta} + \beta \dot{\theta} + C\theta = f(I)$$

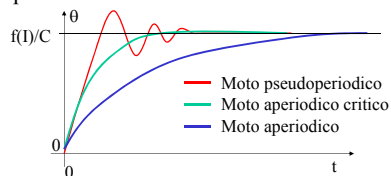
- In condizioni di equilibrio

$$C\theta = f(I) \Rightarrow \theta = f(I)/C$$
- Cioè l'angolo di rotazione dell'equipaggio mobile è proporzionale alla coppia prodotta dall'osservabile.
- Normalmente l'indice è montato sull'equipaggio mobile, e si muove su una scala, lineare se $f(I)$ è lineare in I , quadratica o logaritmica se $f(I)$ è quadratica o logaritmica. Sulla scala sono riportati i valori di I corrispondenti agli angoli secondo la calibrazione dello strumento.

Moto dell' equipaggio mobile

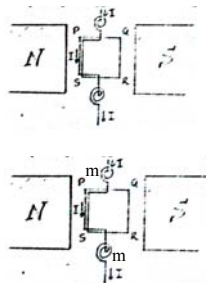
$$\mathfrak{I} \ddot{\theta} + \beta \dot{\theta} + C\theta = f(I)$$

- Il raggiungimento della posizione di equilibrio (cioè la dinamica che dalla posizione di riposo ($I=0$) porta alla posizione di regime con $I>0$) dipende dalle costanti dell'equazione differenziale.



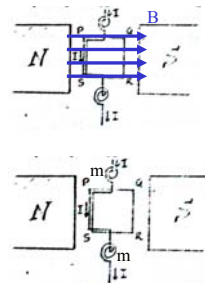
Amperometro a bobina mobile

- È una bobina piatta rettangolare che può ruotare intorno ad un asse verticale, immersa in un campo magnetico uniforme e costante.
- In assenza di corrente la posizione di riposo è determinata dalla posizione di riposo delle due molle m



Amperometro a bobina mobile

- È una bobina piatta rettangolare che può ruotare intorno ad un asse verticale, immersa in un campo magnetico uniforme e costante.
- In assenza di corrente la posizione di riposo è determinata dalla posizione di riposo delle due molle m



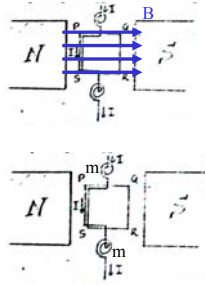
Amperometro a bobina mobile

- Supponendo uniforme il campo B nel traferro del magnete, le forze agenti sui quattro lati della bobina sono:

$$F_{PS} = I \vec{r}_{PS} \times \vec{B} = -I \vec{r}_{RQ} \times \vec{B} = -F_{RQ}$$

$$F_{SR} = I \vec{r}_{SR} \times \vec{B} = -I \vec{r}_{QP} \times \vec{B} = -F_{QP}$$

- Le forze che agiscono su lati opposti sono quindi uguali ed opposte. Sui lati orizzontali si compensano, perché la bobina è rigida, mentre sui lati verticali formano una coppia, proporzionale ad I, che tende a far ruotare la bobina, con momento $f(I) = 2 \frac{d}{2} F \cos \theta = daBI \cos \theta$



Amperometro a bobina mobile

$$\theta_o = \frac{daB \cos \theta}{C} I$$

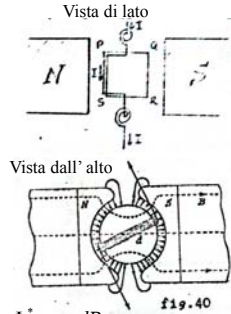
- Per evitare la dipendenza da $\cos \theta$ (non lineare) si può fare in modo che il campo magnetico sia sempre ortogonale alla spira, anche mentre questa ruota, inserendo un nucleo ferromagnetico che fa convergere le linee di forza di B verso l'asse di rotazione.

- Se invece di una spira se ne avvolgono n, si moltiplica per n la coppia. Quindi:

$$\theta_o = \frac{ndaB}{C} I = \frac{\Phi^*}{C} I$$

- Si definisce la sensibilità dell' amperometro

$$\sigma = \frac{\Phi^*}{C} = \frac{ndaB}{C}$$

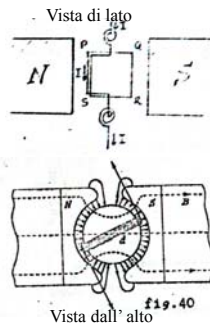


Amperometro a bobina mobile

$$\sigma = \frac{\Phi^*}{C} = \frac{ndaB}{C}$$

- Per aumentare la sensibilità si può:

- Aumentare il numero di spire (ma aumenta la resistenza interna)
- Aumentare le dimensioni (ad) della spira (ma poi ha molta inerzia)
- Aumentare B (ma il magnete diventa più grande)
- Diminuire la costante di richiamo C, ad esempio appendendo la bobina ad un sottile filo di quarzo (galvanometro, raggiunge 10^{-12} A, ma lo strumento diventa molto fragile e poco trasportabile).
- Usare uno specchietto e un laser invece dell' ago, per vedere deflessioni piccolissime



Variazioni della portata dell' amperometro

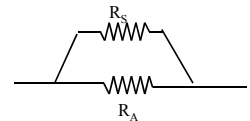
- E' possibile misurare correnti maggiori di quella di fondo scala inserendo un resistore in parallelo all' amperometro: resistenza di shunt (derivatore di corrente).

$$I = I_s + I_A$$

$$I_A R_A = I_s R_s$$

$$\Rightarrow I_A = \frac{R_s}{R_A + R_s} I$$

$$I_A = \frac{I}{n} \quad \text{se} \quad R_s = \frac{1}{n-1} R_A$$



Esercizio

- Perché gli shunt del multimetro sono questi?

