CIRCUITI E MISURE ELETTRONICHE — Venerdì 11 gennaio 2019

Prof. Cesare Svelto — **AA 2017/2018**

Tempo a disposizione 1h50m — **Aula S.1.5 ore 08.10**

COGNOME *(stampatello)*: ______________________________ **Nome** *(stampatello)*: ________________

Laurea-anno: **FIS-2°** **Matr. e firma** __ __ __ __ __ __ ________________________

Punteggi: pre-compito=6 Es.1=7 Es.2=6 Es.3=6 Es.4=7 TOT=32

N.B. Occorre saper svolgere tutti gli esercizi per poter consegnare il compito (con un esercizio mancante o sostanzialmente non svolto non si deve consegnare). **I compiti consegnati e corretti che evidenzieranno un risultato gravemente insufficiente, o comunque gravi lacune nella preparazione, comporteranno il salto dell'appello successivo**. Occorre motivare tutte le risposte date e indicare i passaggi risolutivi.

SOLUZIONI

(30 min)

Esercizio 1

(svolgere su questo foglio e sul retro)

1) La misura della potenza elettrica P assorbita da una macchina frigorifera per sale server viene ricavata in tre modi indipendenti:

A. con un wattmetro analogico si eseguono n=5 misure ripetute ottenendo i seguenti valori di potenza: $P_{A,i}$ (kW) = 1.9, 2, 2.2, 1.8, 2.1;

Si ricavi anche l'incertezza relativa per questa misura, esprimendola in percentuale.

B. la potenza viene letta con un wattmetro digitale ideale, con risoluzione 10 W, ottenendo P_B=2010 W;

C. l'alimentazione della macchina frigo è quella di rete in Europa, per ipotesi con una incertezza del 5 %, e si conosce la sua impedenza come R=12.1 Ω con una incertezza $u(R)$=0.5 Ω (tutta la tensione di alimentazione cade sul carico R e la corrispondente potenza elettrica si calcola come $P_C=V^2/R$).

1A) Si ricavi la misura della potenza P_A con l'incertezza in notazione compatta a due cifre significative. Si ricavi anche l'incertezza relativa per questa misura.

1B) Si ricavi la misura della potenza P_B con l'incertezza in notazione compatta a due cifre significative. Si ricavi anche l'incertezza estesa per questa misura, per un livello di confidenza del 95 %.

1C) Si ricavi la misura della potenza P_C con l'incertezza in notazione compatta a due cifre significative.

1D) Si discuta la compatibilità tra le 3 misure, ricavando con precisione i diversi fattori di copertura minimi ($k_{\alpha\text{-}\beta,\mathrm{MIN}}$) per avere compatibilità tra le diverse coppie di misure, e si commenti il risultato ottenuto.

1E) Si ricavi la miglior stima della potenza P della macchina frigorifera e la sua incertezza standard, assoluta e relativa.

[2]**1A)** Il valor medio delle misure "ripetute" è $P_A = \overline{P} = \overline{P_i} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i = 2\ \text{kW}$

con una deviazione standard campionaria $s(P_A) = s(P_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(P_i - \overline{P_i}\right)^2} = 0.1581\ \text{kW}$

e una incertezza di categoria A $u(P_A) = u_A(P_A) = \frac{s(P_A)}{\sqrt{n}} = 0.071\ \text{kW} = 71\ \text{W}$

La prima misura è dunque $\mathbf{P_A}$**=2000(71)W** con una incertezza relativa $\mathbf{u_r(P_A)}=u(P_A)/P_A=$**3.5 %**.

[2]**1B)** Dato il wattmetro ideale con risoluzione ΔP_B=10 W, la corrispondente incertezza di quantizzazione è $u(P_B)=\Delta P_B/\sqrt{12}\cong 2.9$ W.

La seconda misura è dunque $\boldsymbol{P_B}$**=2010.0(29) W**.

L'incertezza estesa per k=2 (livello di confidenza ~95 %), è $\boldsymbol{U(P_B)}=k\cdot u(P_B)$=**5.8 W**.

[2]**1C)** La potenza elettrica assorbita dalla rete a 220 V è $P_C=V^2/R$=4000 W=4 kW. Essendo l'equazione della misura di PC una produttoria semplice degli ingressi V e R, ci conviene ragionare in termini di incertezze relative. Le incertezze relative delle due variabili di ingresso, tensione e resistenza, sono $u_r(V)$=5 % e $u_r(R)=u(R)/R$=0.5/12.1=4.1 %. L'incertezza composta per la potenza P_C è $u_r(P_C)=\sqrt{4u_r^2(V)+u_r^2(R)}$=11 % con il contributo dell'incertezza sulla tensione che è dominante rispetto a quello dell'incertezza sulla resistenza. L'incertezza della potenza misurata indirettamente è allora $u(P_C)=u_r(P_C)\cdot P_C=4.3\cdot 10^2$ W=430 W.

La terza misura è dunque $\boldsymbol{P_C}$**=4.00(43) kW** (la misura è evidentemente piuttosto "lontana" dalle altre).

[2]**1D)** I tre risultati di misura, espressi in notazione compatta, sono:

$\boldsymbol{P_A}$**=2000(71) W** $\boldsymbol{P_B}$**=2010.0(29) W** $\boldsymbol{P_C}$**=4.00(43) kW**

Si può osservare che **il terzo valore di misura risulta piuttosto differente** ("lontano" in termini delle incertezze standard del caso) **rispetto al primo e al secondo**.

Siamo in presenza di 3 misure differenti della medesima grandezza fisica, che hanno fornito valori diversi e con incertezze differenti. **Si avrà compatibilità tra coppie di misure indipendenti se la distanza tra i due valori di misura è inferiore alla radice quadrata della somma quadratica delle due incertezze, eventualmente estesa per un fattore di copertura *k***: $\left|M_\alpha - M_\beta\right| \le k\sqrt{u^2(M_\alpha)+u^2(M_\beta)}$, con valori possibili/plausibili k=1, 2, o 3. Naturalmente a valori k inferiori corrispondono compatibilità più forti.

Nel caso considerato si ottiene compatibilità per fattori di copertura minimi $\boldsymbol{k_{AB}}$**≅0.14~0.2**, k_{AC}≅4.59~4.6, k_{BC}≅4.63~4.6. **Sono compatibili tra loro le misure $\boldsymbol{m_A}$ e $\boldsymbol{m_B}$, con $\boldsymbol{k}$=1, mentre risulta incompatibile con le altre la misura $\boldsymbol{m_C}$** (essendo i k_{comp}>3 tra questa misura e le altre).

La terza misura è stata ottenuta attraverso una misura indiretta che necessita la conoscenza della resistenza elettrica offerta dalla macchina frigo (cosa non semplice) e inoltre suppone che tutta la tensione di rete cada ai capi di tale resistenza (ci possono essere cadute di tensione anche prima del carico). **In sostanza, nella terza misura ci deve essere qualche errore che la rende non compatibile con le altre misure**.

[2]**1E)** Ricorrendo al criterio della media pesata tra le misure compatibili, la miglior stima per il valore della misura e la sua incertezza tipo sono:

$$\boldsymbol{P=P_{MP}}=\frac{\dfrac{P_A}{u^2(P_A)}+\dfrac{P_B}{u^2(P_B)}}{\dfrac{1}{u^2(P_A)}+\dfrac{1}{u^2(P_B)}}=\mathbf{2009.983\ W} \quad ; \quad \boldsymbol{u(P)=u(P_{MP})}=\sqrt{\frac{1}{\dfrac{1}{u^2(P_A)}+\dfrac{1}{u^2(P_B)}}}=\mathbf{2.898\ W=2.9\ W}$$

Come previsto dalla teoria, il valore della media pesata cade nell'intervallo tra i due valori mediati (e più vicino a quello con incertezza minore: qui molto più vicino a P_B essendo l'incertezza di P_B molto più bassa dell'incertezza di P_A), mentre l'incertezza della media pesata risulta inferiore alla più bassa tra le due incertezze delle misure mediate (ma qui praticamente coincide con $u(P_B) \ll u(P_A)$).

La misura finale è quindi $\boldsymbol{P=P_{MP}}$**=2010.0(29) W**.

L'incertezza relativa della media pesata è $\boldsymbol{u_r(P_{MP})}=u(P_{MP})/P_{MP}$=**0.14 %~0.2 %**.

*TOT = **10 punti** poi **da scalare** sul valore punti dell'esercizio.*

(20 min) **Esercizio 2**

(svolgere su questo foglio e sul retro)

2) Si dispone di un voltmetro integratore a doppia rampa, a 16 bit oltre al bit di segno, dinamica bipolare, e tensione massima V_{MAX}=10 V. Si misura la tensione di una pila al litio da 1.5 V con sovrapposti due disturbi sinusoidali a 50 Hz e a 120 Hz.

2A) Quanto vale la risoluzione dimensionale ΔV e l'incertezza di quantizzazione $u_q(V)$? E la corrispondente incertezza relativa?

2B) Se il voltmetro opera con un rumore elettronico interno di ampiezza efficace $V_{N,eff}=V_1$=400 μV, si calcoli il suo numero di bit equivalenti. Quanti bit si "perdono" a causa di questo rumore e quanti se ne perderebbero se l'ampiezza efficace del rumore fosse amplificata di 40 dB? Si valutino i bit equivalenti nei due casi.

2C) Scegliere il minimo tempo di integrazione $T_{UP,MIN}$ per una massima reiezione ai disturbi (50 Hz, 120 Hz).

2D) Si scrivano e commentino le espressioni per la reiezione al disturbo sinusoidale in ampiezza e in potenza. Adottando un tempo di salita T_{UP}=200 ms, si valuti la reiezione in potenza per un disturbo alla frequenza f_D=313 Hz e la si esprima sia in unità lineari sia in unità logaritmiche.

[3]**2A)** La risoluzione dimensionale del voltmetro è pari alla dinamica dello strumento divisa per il suo numero di livelli (tenuto conto anche del bit di segno il numero di bit è n=17) e quindi:

$\Delta V = D / N = 20\ \text{V} / 2^{17} \cong$ **153 µV**

L'incertezza di quantizzazione è legata alla larghezza del livello di quantizzazione (uniforme) ed è pari a:

$\boldsymbol{u_q(V)} = \Delta V / \sqrt{12} = 153\ \mu\text{V} / \sqrt{12} \cong$ **44 µV**

L'incertezza relativa corrispondente è:

$\boldsymbol{u_r(V)} = u(V)/V = u_q(V)/V_{MIS} \cong (44\ \mu\text{V})/(1.5\ \text{V}) \cong$ **2.9×10^{-5}~30 ppm**.

[3]**2B)** Per ricavare il numero di bit equivalenti, utilizziamo la formula

$$n_e = n - \frac{1}{2}\log_2\left(\frac{\sigma_q^2 + \sigma_N^2}{\sigma_q^2}\right) = n - \frac{1}{2}\log_2\left(1 + \frac{\sigma_N^2}{\sigma_q^2}\right)$$

dove n è il numero di bit, σ_q^2 è la varianza di quantizzazione e σ_N^2 è la varianza del rumore aggiunto.

Essendo $\sigma_q^2 = u_q^2 = \frac{(\Delta V)^2}{12} \cong 2\cdot10^{-9}\ \text{V}^2$ e $\sigma_N^2 = \left(V_{N,eff}\right)^2 \cong 1.6\cdot10^{-7}\ \text{V}^2$ si ottiene

$$\boldsymbol{n_e} \cong n - \frac{1}{2}\log_2(1+80) \cong 17 - 3.2 = \mathbf{13.8\ bit}$$

dunque a causa del rumore **si perdono 3.2 bit dei 17 bit inizialmente disponibili**.

Nel caso considerato in cui il rumore viene aumentato di 40 dB, ovvero di un fattore 100 in ampiezza, si lavora con σ_N=40 mV e possiamo ripetere gli stessi calcoli di prima ottenendo:

$$\boldsymbol{n_e} \cong n - \frac{1}{2}\log_2(825000) \cong 17 - 9.8 = \mathbf{7.2\ bit}$$

per cui **si perdono 9.8 bit che oltre la metà dei bit disponibili**.

[2]**2C)** È possibile rendere la misura immune da disturbi a frequenza fissa utilizzando un tempo di integrazione T_{UP} che sia multiplo intero del periodo del disturbo (si vedano le dispense del corso).
In questo caso si vuole annullare il contributo di due frequenze: f_a = 50 Hz e f_b = 120 Hz, per cui $T_{UP} = n\ T_a$ e anche $T_{UP} = m\ T_b$ con m e n numeri interi da determinare.

Ricaviamo quindi i due numeri: $n\ T_a = m\ T_b \Rightarrow \frac{n}{f_a} = \frac{m}{f_b} \Rightarrow \frac{n}{m} = \frac{f_a}{f_b} = \frac{50}{120} = \frac{5}{12}$

Il tempo di integrazione vale dunque $\boldsymbol{T_{UP}} = n\ T_a = 5 \times 20$ ms = **100 ms** (= $m\ T_b = 12 \times (1/120)$ s = **0.1 s**).

[2]**2D)** La reiezione in ampiezza del voltmetro a integrazione per un disturbo sinusoidale a frequenza f vale $r = \frac{\pi f T_{UP}}{\left|\sin(\pi f T_{UP})\right|}$ mentre la corrispondente reiezione in potenza è $R = r^2 = \frac{(\pi f T_{UP})^2}{\sin^2(\pi f T_{UP})}$. Entrambe le reiezioni dipendono da una funzione $\text{sinc}^{-1}(x) = [\sin(\pi x)/(\pi x)]^{-1}$ dove la variabile $x = \pi f T_{UP}$ comporta degli annullamenti della funzione $\sin(x)$ quando $fT_{UP} = i$ intero: per tali valori del prodotto fT_{UP} la reiezione tende idealmente all'infinito e comunque in pratica è molto grande.

Con un disturbo alla frequenza f = 313 Hz e per un tempo di salita $^*T_{UP}$=0.2 s, si calcola un valore $x \cong 196.6637$ ("preciso" perché 1/sin(x) può cambiare significativamente se x viene approssimato troppo).

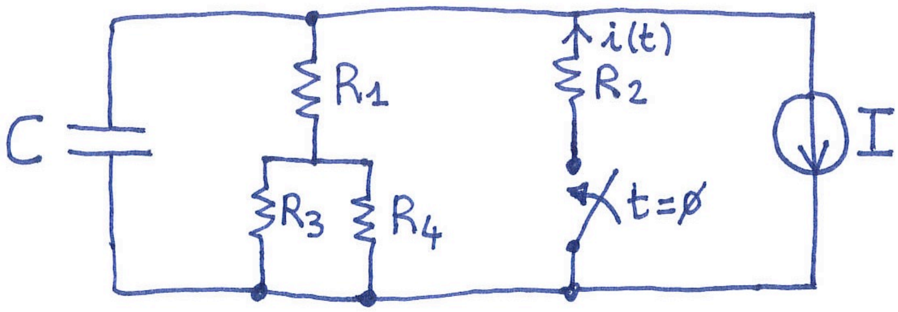
Con questi numeri, la reiezione in potenza vale $\boldsymbol{R} = r^2 = \frac{(\pi f \cdot {}^*T_{UP})^2}{\sin^2(\pi f \cdot {}^*T_{UP})} \cong 42759.8$**~43000≅46 dB**.

TOT = ***10 punti*** *poi* ***da scalare*** *sul valore punti dell'esercizio.*

(25 min) **Esercizio 3**

(svolgere su questo foglio e sul retro)

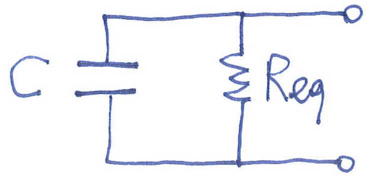
3) Il circuito mostrato in figura si trova a regime per t=0$^-$ e al tempo t=0 viene chiuso l'interruttore.



C=2 μF
R_1=3.6 kΩ
R_2=R_4=4 kΩ
R_3=6 kΩ
I=4 mA

3A) Ricavare espressamente e calcolare la resistenza equivalente, R_{eq}, che determina il transitorio del circuito e dunque la costante di tempo τ di tale transitorio.
3B) Risolvere il transitorio del circuito individuando l'espressione, analitica e numerica, per la corrente $i(t)$ nel resistore R_2 con il verso indicato, ricavando in particolare il valore iniziale e il valore finale per la corrente $i(t)$ dopo la chiusura dell'interruttore.
3C) Disegnare il grafico quantitativo di $i(t)$ in un diagramma cartesiano corrente-tempo per t=[-10 ms, +40 ms].
3D) Ricavare la carica e l'energia immagazzinata nel condensatore prima del transitorio e quindi a regime.

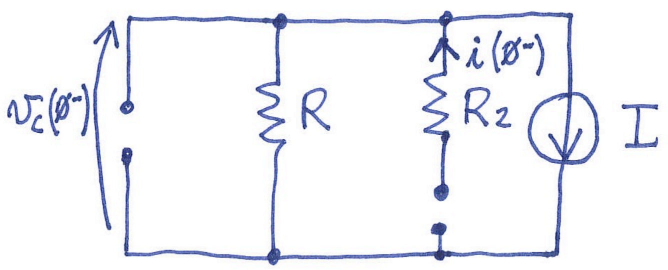
[2]**3A)** Possiamo innanzitutto semplificare il circuito riconoscendo che le resistenze R_3 e R_4 sono poste in parallelo e poi in serie con R_1: il tutto equivale ad un'unica resistenza $R=R_1+R_3//R_4=R_1+R_3R_4/(R_3+R_4)=6\ k\Omega$ posta in parallelo al condensatore C.

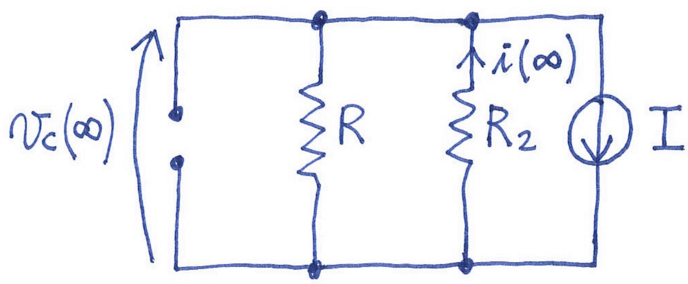


A interruttore chiuso, e dunque durante il transitorio, la resistenza equivalente è costituita dal parello di R con R_2 e pertanto $\boldsymbol{R_{eq}=R//R_2}=R\cdot R_2(R+R_2)$**=2.4 kΩ**.

La costante di tempo che governa il transitorio del circuito è allora $\boldsymbol{\tau=R_{eq}C}$**=4.8 ms**.

[4]**3B)** Per t<0 il resistore R_2 è di fatto scollegato dal circuito e dato che un suo terminale è aperto esso non viene percorso da corrente, pertanto la corrente di regime prima di t=0 è $i(0^-)$=0. Sempre prima della chiusura dell'interruttore il condensatore si comporta, a regime, come un circuito aperto e tutta la corrente del generatore deve scorrere nella resistenza R: pertanto la tensione ai capi di R e del condensatore C è $v_C(0^-)=-RI$=-24 V.





Il valore iniziale, in t=0$^+$ della tensione sul condensatore non può differire da quello in t=0$^-$ essendo la tensione sul condensatore una variabile di stato, che dunque può variare solo con continuità (la tensione ai capi di un condensatore non può variare istantaneamente): dunque $v_C(0^+)=v_C(0)=v_C(0^-)=-24$ V.

Immediatamente dopo la chiusura dell'interruttore la corrente iniziale in R_2 è ricavabile come $\boldsymbol{i(0^+)}=-v_C(0^+)/R_2=-(-24\text{ V})/(4\text{ k}\Omega)$**=6 mA**. Più in generale, per $t\geq0$ la corrente in R_2 sarà $i(t)=-v_C(t)/R_2$.

A transitorio esaurito per $t\to\infty$ il condensatore si comporta nuovamente come un circuito aperto e la corrente di regime è ottenibile dal partitore di corrente della corrente di generatore I tra le resistenze R ed R_2 che risultano poste in parallelo: pertanto $\boldsymbol{i(\infty)}=[R/(R+R_2)]\cdot I=[6/10]\cdot I$**=2.4 mA**.

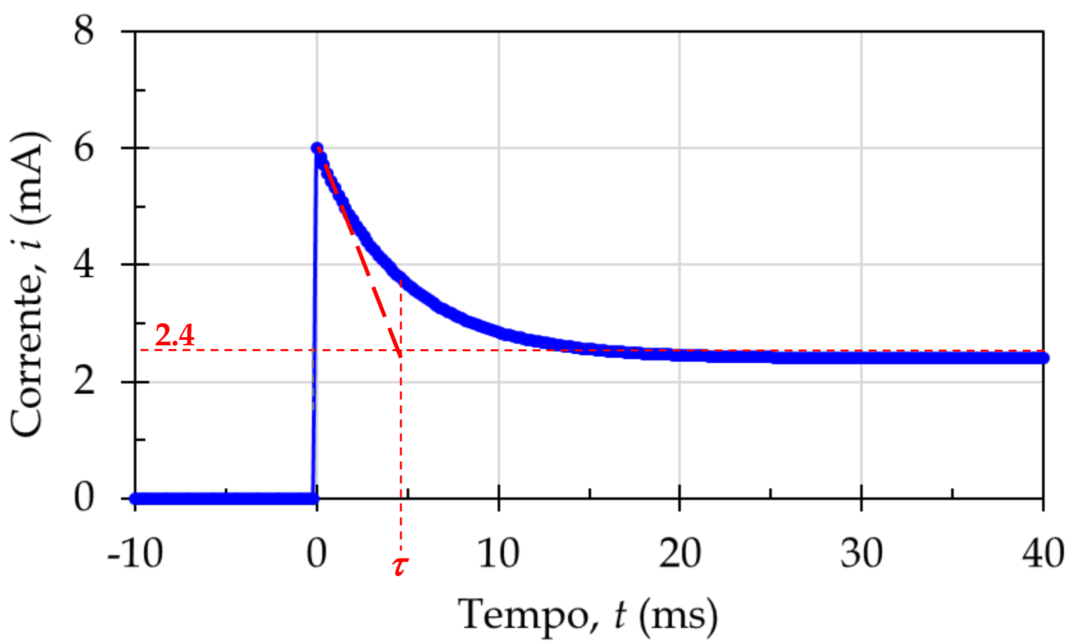
Alternativamente, la tensione di regime ai capi del condensatore sarà $v_C(\infty)=-R\cdot R_2/(R+R_2)]\cdot I=-9.6$ V ed conoscendo anche il valore iniziale $v_C(0^+)=-24$ V, possiamo scrivere la tensione durante transitorio, su C ma anche su R_2, come:

$$v_C(t)=[v_C(0^+)-v_C(\infty)]\exp(-t/\tau)+v_C(\infty)=[(-24+9.6)e^{-(1000/4.8)t}-9.6]\text{ V}=[-14.4e^{-t/(4.8\text{ ms})}-9.6]\text{ V}$$

Dalla tensione sul condensatore, e quindi anche su R_2, si ricava la corrente cercata:

$$\boldsymbol{i(t) = -v_C(t)/R_2 = [\, i(0^+) - i(\infty)\,]\exp(-t/\tau) + i(\infty) = [\, 3.6e^{-(1000/4.8)t} + 2.4\,]\text{ mA}}$$

[2]3C) Il grafico quantitativo corrente-tempo, con assi cartesiani che riportano le unità di misura e la scala numerica, è riportato nella figura seguente per $i(t)$ con tempi t variabili tra -10 ms e +40 ms:



[2]3D) Sia prima del transitorio che a regime il condensatore è polarizzato a tensione costante e dunque la sua carica ed energia sono, rispettivamente $Q=C\cdot V$ ed $E=(1/2)\cdot Q\cdot V=(1/2)\cdot C\cdot V^2$.

Pertanto, prima del transitorio

$\boldsymbol{Q(0^-)}=C\cdot|v_C(0^-)|$**=48 μC** ed $\boldsymbol{E(0^-)}=(1/2)\cdot C\cdot[v_C(0^-)]^2$**=576 μJ≅0.6 mJ**

ed invece, a transitorio esaurito

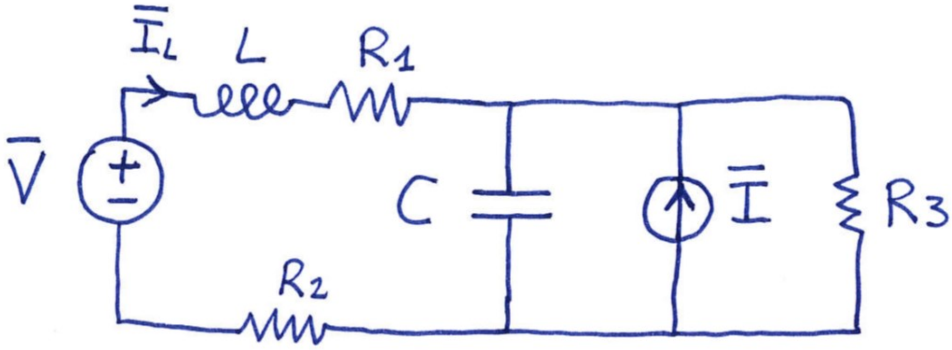
$\boldsymbol{Q(\infty)}=C\cdot|v_C(\infty)|$**=19.2 μC** ed $\boldsymbol{E(\infty)}=(1/2)\cdot C\cdot[v_C(\infty)]^2$**=92.16 μJ≅90 μJ**

TOT = ***10 punti*** *poi* ***da scalare*** *sul valore punti dell'esercizio.*

(25 min) **Esercizio 4**

(svolgere su questo foglio e sul retro)

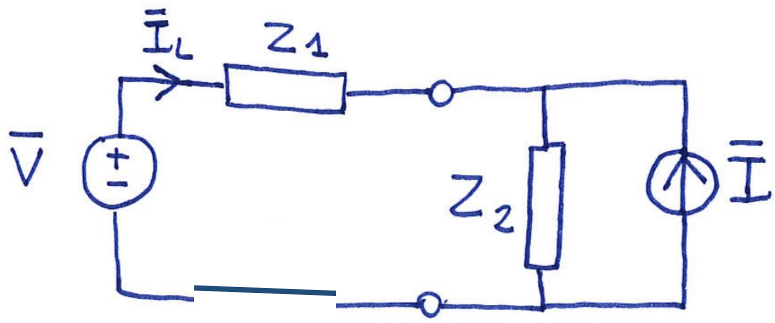
4) Il circuito rappresentato in figura in notazione dei fasori opera in regime sinusoidale permanente con: $v(t)$=4cos(ωt) V e $i(t)$=2sen(ωt) A.

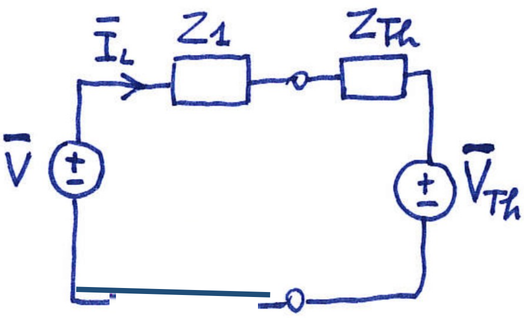


L=5 mH
R_1=10 kΩ
R_2=R_3=20 kΩ
C=200 μF
ω=2 krad/s

4A) Determinare la corrente $\boldsymbol{I}_L$ (il suo fasore) che scorre nell'induttore, sia in forma analitica (solo formule con le variabili del caso) sia in forma numerica (valori numerici specifici).
4B) Esprimere la funzione analitica $i_L(t)$ come cosinusoide con l'opportuna ampiezza e fase espressi anche con i valori numerici del caso.
4C) Ricavare la potenza complessa $\boldsymbol{S}$ erogata dal generatore di tensione e la sua potenza attiva P.

[4]**4A)** I fasori (con i valori efficaci) della corrente e della tensione, dei generatori assegnati, sono $\boldsymbol{I}=(2/\sqrt{2})e^{-j\pi/2}$ A$=-j2/\sqrt{2}$ A$\cong -j1.414$ A e $\boldsymbol{V}=4/\sqrt{2}$ V$\cong$2.828 V. Il circuito assegnato è equivalente a quelli mostrati nella figura sottostante (dove, dopo le prime equivalenze-serie ed equivalenze-parallelo per le impedenze, si è poi passati da generatore di Norton al generatore di Thévenin attraverso una trasformazione di generatore):





Lavorando alla frequenza angolare ω=2 krad/s le impedenze complesse degli elementi reattivi sono $Z_L=j\omega L=j10$ Ω e $Z_C=1/j\omega C=-j2.5$ Ω. Nel circuito equivalente otteniamo

$$Z_1=R_1+R_2+j\omega L=(30000+j10)\ \Omega=(30+j0.01)\ \mathrm{k}\Omega$$

$$Z_2=Z_C//R_3=\left(j\omega C+\frac{1}{R_3}\right)^{-1}=\frac{R_3}{1+j\omega R_3 C}=\frac{20000}{1+j8000}=(3.125\times10^{-4}-j2.5)\ \Omega=Z_{Th}$$

Notiamo subito che $|Z_{Th}|<<|Z_1|$ e $|Z_{Th}|<<R_2$. Essendo le tre impedenze poste in serie, e dunque percorse dalla stessa corrente, la tensione ai capi di Z_{Th} sarà dunque decisamente inferiore rispetto a quella ai capi delle altre due impedenze. In particolare, calcolando la tensione V_{Th} otteniamo:

$$\boldsymbol{V}_{Th}=Z_{Th}\boldsymbol{I}=Z_2\boldsymbol{I}=(-3.535-j4.419\times10^{-4})\ \mathrm{V}$$

La corrente nell'induttore, come fasore in forma analitica e poi numerica, è

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}} = \frac{\boldsymbol{V}-\boldsymbol{V}_{\mathrm{Th}}}{Z_1+Z_{\mathrm{Th}}} = \frac{2.828-(-3.535-j4.419\times10^{-4})}{(30000+j10)+(3.125\times10^{-4}-j2.5)} = (0.2121\text{-}j3.830\times10^{-5})\ \text{mA}$$

[3]**4B)** Dal fasore della corrente ricavato al punto precedente, possiamo esprimere modulo e fase come

$$|\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}| = I_{\mathrm{L}} = \sqrt{[\mathrm{Re}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}})]^2+[\mathrm{Im}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}})]^2} = \sqrt{(0.2121)^2+(3.830\times10^{-5})^2}\ \text{mA} = 0.2121\ \text{mA} \cong 212\ \mu\text{A}$$

$$\angle \boldsymbol{I}_{\mathrm{L}} = \theta_i = \arctan\left[\frac{\mathrm{Im}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}})}{\mathrm{Re}(\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}})}\right] = \arctan\left(\frac{-3.830\times10^{-5}}{0.2121}\right) = -1.8\times10^{-4}\ \text{rad} = -0.18\ \text{mrad} = -0.01\ °$$

A questo punto la cosinusoide della corrente nell'induttore si può scrivere come

$$i_{\mathrm{L}}(t) = I_{\mathrm{L}}\cos(\omega t+\theta_i) \cong 212\sqrt{2}\cos(2\times10^3 t-0.01°)\ \mu\text{A} \cong 300\cos(2\times10^3 t-1.8\times10^{-3})\ \mu\text{A}$$

[3]**4C)** La potenza complessa "erogata" dal generatore, dato il verso della corrente $\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}$ uscente dal generatore, è

$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}^{*}$ = [2.828 V]·[(0.2121+j3.829×10^{-5}) mA]≅(6.0×10^{-4}+j1.1×10^{-7}) VA≅(0.6+j0.11×10^{-3})×10^{-3} VA

La potenza attiva, che è la parte reale della potenza complessa, risulta pari a

P=Re[$\boldsymbol{S}$]≅0.6 mW [la potenza reattiva è Q=Im[$\boldsymbol{S}$]≅1.1×10^{-7} VAR] E' quasi tutta potenza attiva!

*TOT = **10 punti** poi **da scalare** sul valore punti dell'esercizio.*
(da tenere molto poco in considerazione eventuali errori di conto con i numeri complessi)
(resta importante il procedimento generale e le formule ricavate)

COMPLEX NUMBERS CALCULATIONS

V (4/2^0.5 +0*%i) = (2.828 +0*%i)
I (0 -2/2^0.5*%i) = (0 -1.414*%i)

Z_L (0 +10*%i)
Z_C (0 -2.5*%i)

Z_1 20000 +(0 +10*%i) +10000 = (30000 +10.0*%i)

Z_2=Z_Th 20000*(0 -2.5*%i) / (20000 +(0 -2.5*%i)) = (3.125*10^-4 -2.5*%i)

V_Th (3.125*10^-4 -2.5*%i) * (0 -1.414*%i) = (-3.535 -4.419*10^-4*%i)

I_L ((2.828 +0*%i) - (-3.535 -4.419*10^-4*%i)) / ((30000 +10.0*%i)+ (3.125*10^-4 -2.5*%i)) = (2.121*10^-4 -3.830*10^-8*%i)

S (2.828 +0*%i) * (2.121*10^-4 +3.830*10^-8*%i) = (6.0*10^-4 +1.1*10^-7*%i)