CIRCUITS FILTRES

Abans d'anar al laboratori

1 - Estudieu l'apartat 1 sobre el fonament teòric d'aquesta pràctica.

2 - Resoleu els exercicis plantejats a l'apartat 2. La resolució l'haureu de lliurar al professor del laboratori a l'inici de la pràctica.

3 - Llegiu els apèndixs B i C sobre el funcionament del polímetre i l'oscil·loscopi.

Objectius:

a) Estudi i caracterització de **filtres passaalt, passabaix i passabanda**. Introducció dels conceptes de **freqüències de tall, ressonància**, **amplada de banda** i **factor de qualitat**.

b) Càlcul del **coeficient d'autoinducció** d'una bobina i la **capacitat** d'un condensador.

c) Visualització **del filtrat d'un senyal triangular**.

1. Fonament teòric

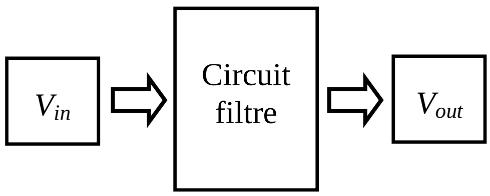

Figura 1

Un **filtre electrònic** és un circuit que **selecciona senyals** d'una determinada **freqüència**, o **rang de freqüències**, tot modificant, alhora, l'**amplitud** i la **fase**. Consta de dos **terminals**: un d'**entrada** i un altre de **sortida**. Segons la naturalesa dels components utilitzats per construir-los es classifiquen en **passius** i actius. Els primers, que seran els que considerarem en aquesta pràctica, no tenen guany en potència i estan formats per **associacions** d'elements passius, com **resistències**, **bobines** i **condensadors**. Els segons, que si que presenten guany, estan formats per associacions de components passius i actius, com transistors o amplificadors operacionals. Segons la freqüència o el rang de freqüències seleccionades es classifiquen en filtres **passaalt**, **passabaix**, **passabanda**, etc.

El comportament d'un determinat filtre queda caracteritzat per la **funció de transferència**, que descriu com el filtre **modifica** l'**amplitud** i la **fase** d'un senyal. Es tracta d'una funció complexa, que es defineix a partir del **quocient entre els senyals de sortida i d'entrada**:

$$\bar{H}(f) = \frac{\bar{V}_{out}}{\bar{V}_{in}} = H(f)e^{i\delta(f)} \, .$$

***H(f)* és el seu mòdul**, que es pot calcular a partir del quocient entre els **valors eficaços V_{out} i V_{in}** de les tensions a la sortida i l'entrada. ***δ(f)* és el seu angle de fase**, que es determina a partir de la diferència de fase entre els senyals de sortida i entrada.

1.1 Filtres passabaix

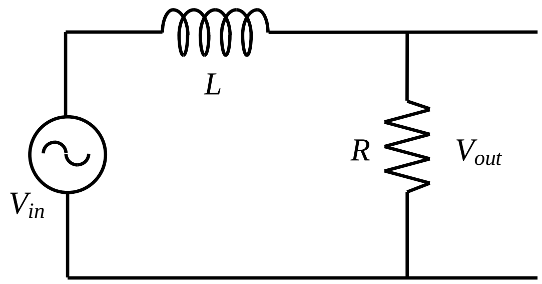

Figura 2

Són circuits que **permeten** el pas de **senyals de baixes freqüències** i atenuen els d'altes freqüències. S'utilitzen, per exemple, en els altaveus de baixes freqüències ("woofers" i "subwoofers"), en transmissors de ràdio, a fi de blocar els harmònics d'un determinat senyal. Altres exemples són el botó "tone" d'una guitarra elèctrica, que elimina el tons alts (treble), o també els filtres DSL o microfiltres que s'instal·len entre dispositius analògics (com un telèfon o un mòdem) i una línia telefònica ordinària, a fi d'evitar la interferència entre aquests dispositius i el servei DSL que opera a la mateixa línia. A la figura 2 es presenta l'esquema d'un filtre passabaix molt senzill format per una **resistència** *R***,** on es connecta la **sortida**, i una **bobina** amb un coeficient d'autoinducció *L*. En aquest cas la funció de transferència és:

$$\overline{H}(f) = \frac{R}{\overline{Z}},$$
$$\overline{Z} = R + iX_L\,,\; X_L = 2\pi f L\,.$$

$\overline{Z}$ és la impedància complexa i X_L la reactància inductiva. *H(f)* i *δ(f)* valen respectivament:

$$H(f) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}, \tag{1}$$

$$\delta(f) = -\tan^{-1}(X_L/R)\,. \tag{2}$$

A la figura 3 es representen ambdues quantitats. S'observa que:

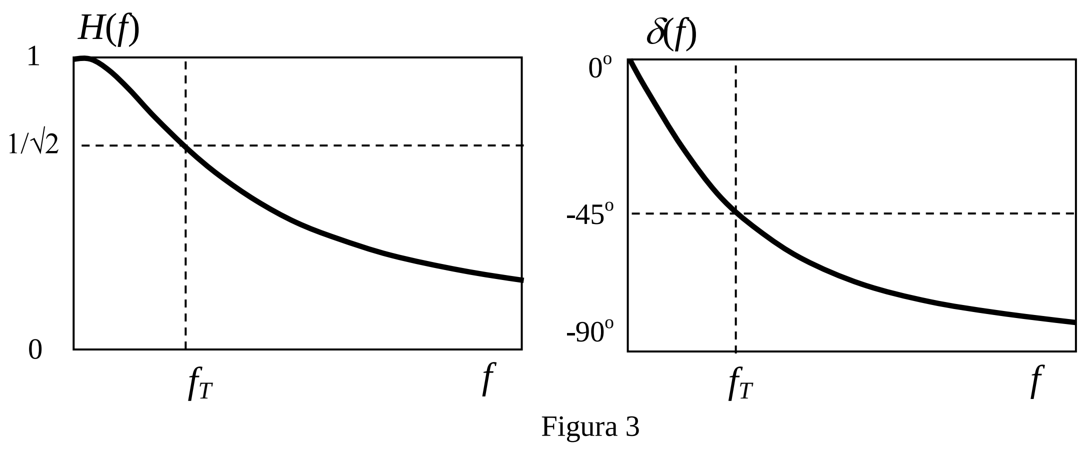

Figura 3

- Per **baixes freqüències** tenim que $X_L << R$. Aplicant les equacions (1) i (2) es compleix que ***H(f)* = 1** i ***δ(f)* = 0°**. És a dir, el circuit es comporta com si només hi hagués la resistència i, per tant, els **senyals** d'entrada i de sortida estan **en fase** i les seves **amplituds són iguals**.

- Quan la freqüència augmenta, X_L també ho fa. Com el circuit és inductiu, la intensitat i la **tensió de sortida**, **s'endarrereixen respecte la tensió d'entrada**. Per aquest motiu l'angle de fase de la figura 3 pren **valors negatius**.

- Per **altes freqüències** tenim que $X_L >> R$. Aplicant les equacions (1) i (2) es compleix que ***H(f) = 0 i δ(f)* = -90º**. És a dir, el circuit es comporta com si estigués obert, **blocant**, per tant, les **altes freqüències**.

Es defineix la **freqüència de tall f_T** com aquella per la ***H(f_T) = 1/√2*** = **0.707**. Com la potència és proporcional al quadrat de la tensió, aquesta definició és equivalent a dir que la potència a la sortida del filtre és la meitat de la d'entrada. Si ho expressem en el llenguatge dels decibels (dB), direm que f_T és aquella freqüència per la que el senyal de sortida s'atenua 3 dB respecte el d'entrada. En tot cas, aplicant la fórmula (1) tenim:

$$H(f_T) = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \;\rightarrow\; X_L = R \rightarrow L = \frac{R}{2\pi f_T} \,. \tag{3}$$

A més, per aquesta freqüència, com $X_L=R$, **l'angle de fase és de -45º**, tal i com es mostra a la figura 3.

L'equació (3) ens permet **determinar el coeficient d'autoinducció *L*** d'una **bobina** a partir de la **resistència *R*** i el valor de la **freqüència de tall f_T**.

1.2 Filtres passaalt

Són circuits que **permeten** el pas de **senyals d'altes freqüències** i atenuen els de baixes freqüències. S'utilitzen, per exemple, en els altaveus d'altes freqüències o "tweeters". Junt amb els filtres passabaix, s'utilitzen en el l'edició i el processament d'imatges. A la figura 4 es presenta l'esquema d'un de molt senzill format per una **resistència** *R*, on es connecta la **sortida**, i un **condensador** de capacitat *C*. En aquest cas la funció de transferència és:

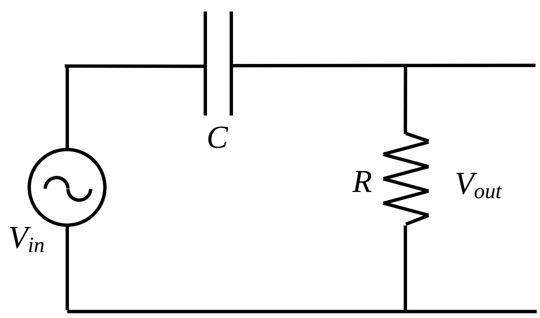

Figura 4

$$\overline{H}(f) = \frac{R}{\overline{\overline{Z}}},$$
$$\overline{Z} = R - iX_C \,, \qquad X_C = \frac{1}{2\pi f C} \,.$$

$\overline{Z}$ és la impedància complexa i X_C la reactància capacitiva. *H(f)* i *δ(f)* valen respectivament:

$$H(f) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \,, \tag{4}$$

$$\delta = \tan^{-1}(X_C/R) \,. \tag{5}$$

A la figura 5 es representen ambdues quantitats. S’observa que:

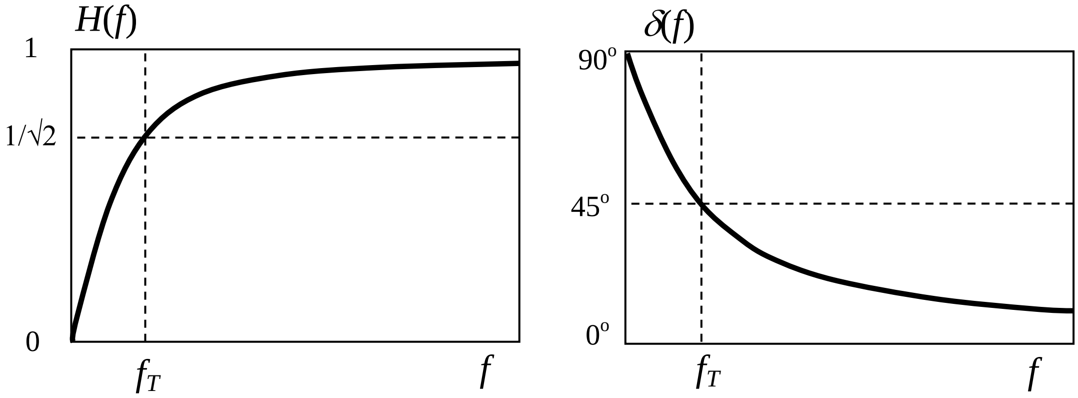

Figura 5

- Per **baixes freqüències** tenim que $X_C >> R$. Aplicant les equacions (4) i (5) es compleix que ***H(f)* = 0** i ***δ(f)* = 90º**. És a dir, el circuit es comporta com si estigués obert, **blocant les baixes freqüències**.

- Quan la freqüència augmenta, X_C disminueix. Com el circuit és capacitiu, la intensitat i la **tensió de sortida**, **s’avancen respecte la tensió d’entrada**. Per aquest motiu l’angle de fase de la figura 5 pren **valors positius**, però **cada cop més petits**.

- Per **altes freqüències** tenim que $X_C << R$. Aplicant les equacions (4) i (5) es compleix que ***H(f)* = *1 i δ(f)* = 0º**. És a dir, el circuit es comporta com si només hi hagués la resistència i, per tant, els senyals d’entrada i de sortida estan **en fase** i les seves **amplituds són iguals**.

Aplicant la fórmula (4), tenim que la **freqüència de tall f_T** és:

$$H(f_T) = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \;\rightarrow\; X_C = R \rightarrow\; C = \frac{1}{2\pi f_T R}\,. \tag{6}$$

A més per aquesta freqüència, com $X_C = R$, **l’angle de fase és de 45º**, com es mostra a la figura 5.

Així, doncs, l’equació (6) ens permet **determinar la capacitat *C* d’un condensador** a partir de la **resistència *R*** i el valor de la **freqüència de tall f_T**.

1.3 Filtres passabanda

Són circuits que **permeten el pas de senyals de freqüències contingudes dins un determinat rang**, atenuant o blocant la resta. El rang queda determinat per **dues freqüències de tall** diferents: una de **superior f_H** i un altra **d’inferior f_L.** S’utilitzen molt en camps com l’electrònica

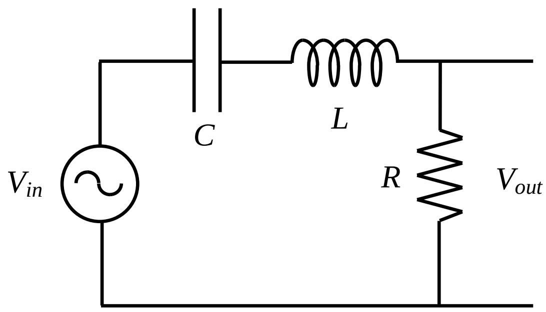

Figura 6

i les comunicacions. Un exemple seria els filtres dels equalitzadors d'audio, que seleccionen senyals d'un determinat rang de freqüències. A la figura 6 es presenta l'esquema d'un de molt senzill format per una **resistència** *R*, on està connectada la **sortida**, un **condensador** de capacitat *C* i una **bobina** amb un coeficient d'autoinducció *L*. En aquest cas la funció de transferència és:

$$\overline{H}(f) = \frac{R}{\overline{Z}},$$

$$\overline{Z} = R + i(X_L - X_C)\,, \qquad X_L = 2\pi f L \quad \text{i} \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C}\,.$$

H(f) i *δ(f)* valen:

$$H(f) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}\,, \tag{7}$$

$$\delta = -\tan^{-1}\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right). \tag{8}$$

A la figura 7 es representen ambdues quantitats. S'observa que

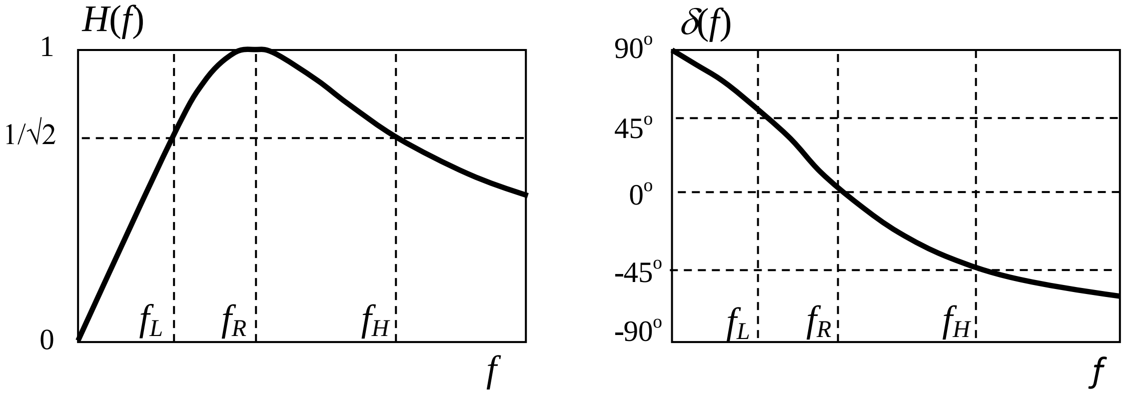

Figura 7

- Per **baixes freqüències** tenim que $X_C >> R$ i $X_C >> X_L$. Aplicant les equacions (7) i (8) es compleix que ***H(f)* = 0** i ***δ(f)* = 90º**. És a dir, el circuit es comporta com si estigués obert, blocant les baixes freqüències. Com el circuit és capacitiu, la intensitat i la **tensió de sortida**, **s'avancen 90º respecte la tensió d'entrada**.

- Per **altes freqüències** tenim que $X_L >> R$ i $X_L >> X_C$. Aplicant les equacions (7) i (8) es compleix que ***H(f)* = *0 i δ(f)* = -90º**. És a dir, de nou el circuit es comporta com si estigués obert, **blocant les altes freqüències**. Com el circuit és inductiu, la intensitat i la **tensió de sortida**, **s'endarrereixen 90º respecte la tensió d'entrada**.

- Quan la freqüència aplicada sigui tal que $X_L = X_C$ direm que el circuit està en **ressonància.** Aquest valor correspon a l'anomenada **freqüència de ressonància f_R**. En aquest cas, i aplicant les equacions (7) i (8) tenim que **$H(f_R)$ = 1 i $\delta(f_R)$ = 0º**. És a dir el **mòdul de la funció de transferència és màxim** i els senyals d'entrada i sortida estan **en fase**. El valor de f_R és:

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \,. \tag{9}$$

Els valors de les dues freqüències de tall f_L i f_H, que donen idea del rang de freqüències on actua el filtre, es determinen aplicant l'equació 7, tot imposant que ***H(f_L) = H(f_H)*= 1/√2:**

$$H(f_H) = H(f_L) = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \rightarrow X_L - X_C = \pm R \,.$$

De les condicions X_L - X_C = ±R, es deriven dues equacions de segon grau en freqüència que, un cop resoltes, donen lloc a les següents solucions per **les freqüències de tall:**

$$f_L = \frac{1}{2\pi}\left[-\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}\right] , \tag{10}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi}\left[+\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}\right] . \tag{11}$$

D'altra banda, aplicant a la fórmula (8) les condicions X_L - X_C = ±R, tenim que els valors dels **angles de fase** corresponents a les freqüències de tall f_L i f_H són respectivament **45º i -45º**.

L'**amplada de banda *Δf*** és defineix a partir de la diferència entre f_H i f_L:

$$\Delta f = f_H - f_L = \frac{R}{2\pi L} \,. \tag{12}$$

Un paràmetre molt utilitzat per avaluar la qualitat, és a dir la capacitat per seleccionar, d'un filtre és el **factor de qualitat *Q***. Es defineix com el quocient entre la freqüència de ressonància i l'amplada de banda:

$$Q = \frac{f_R}{\Delta f} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \,. \tag{13}$$

Dóna una idea de l'agudesa o intensa és la ressonància. Així, com menor sigui l'amplada de banda, major serà Q i el filtre serà més selectiu i, per tant, més eficient.

1.4 Mètode per determinar visualment amb un oscil·loscopi el desfasament entre dos senyals

En general si $\varphi > 0$ ($\varphi < 0$) diem que $V_{out}(t)$ s'endarrereix (avança) respecte $V_{in}(t)$. Quan amb un oscil·loscopi es visualitzen senyals alterns en funció del temps, **la magnitud que s'endarrereix es veu més a la dreta que la magnitud avançada.** Per exemple, a la figura 8 es representen dos senyals sinusoïdals $V_{in}(t)$ (línia contínua) i $V_{out}(t)$ (línia discontínua). En aquest cas la magnitud endarrerida, $V_{out}(t)$, està desplaçada cap a la dreta respecte l'altra, $V_{in}(t)$.

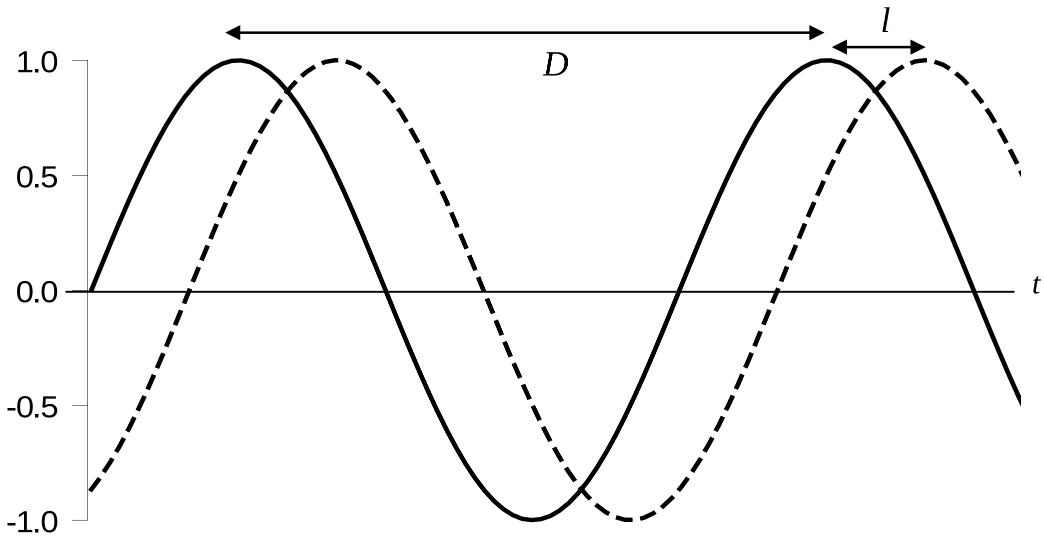

Figura 8

L'**angle φ de desfasament** pot trobar-se a partir de la gràfica. Tenint en compte que la **distància *D* entre dos màxims consecutius** d'una de les funcions correspon a un desfasament de 360°, si **mesurem *D*** a la gràfica, així com la **distància *l*** entre dos màxims consecutius dels dos senyals, l'angle φ en graus serà:

$$\varphi = 360\frac{l}{D}\,. \tag{14}$$

1.5 Expressió d'un senyal triangular en forma de sèrie de Fourier

El **teorema de Fourier** afirma que **qualsevol funció periòdica** *V(t)* de forma arbitrària de **freqüència *f*** es pot expressar com una **sèrie infinita de funcions harmòniques** de **freqüències que són múltiples enters de *f*:**

$$V(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(2\pi n f t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(2\pi n f t)\,.$$

Els coeficients A_n i B_n es calculen a partir d'integrals de la pròpia funció *V(t)*:

$$A_n = \frac{2}{T}\int_0^T V(t)\cos(2\pi n f t)dt\,, \qquad B_n = \frac{2}{T}\int_0^T V(t)\sin(2\pi n f t)dt\,.$$

La **funció periòdica triangular, d'amplitud V_0, període *T* i freqüència *f =1/T***, que es mostra a la figura 9, està definida per l'expressió:

$$V(t) = \begin{cases} \dfrac{4V_0}{T}t & \left(0 < t < \dfrac{T}{4}\right) \\ V_0 - \dfrac{4V_0}{T}\left(t - \dfrac{T}{4}\right) & \left(\dfrac{T}{4} < t < \dfrac{3T}{4}\right) \\ -V_0 + \dfrac{4V_0}{T}\left(t - \dfrac{3T}{4}\right) & \left(\dfrac{3T}{4} < t < T\right) \end{cases}$$

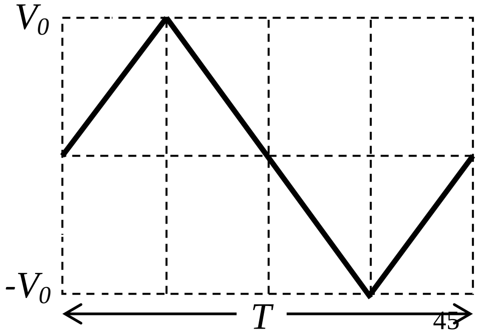

Figura 9

Es pot demostrar que per aquesta funció els coeficients A_n i els B_n amb valors parells de n són nuls; mentre que els B_n amb valors senars de n valen $\frac{8V_0}{\pi^2 n^2}\sin\left(n\frac{\pi}{2}\right)$. Per tant, la sèrie de Fourier és:

$$V(t) = \frac{8V_0}{\pi^2 n^2}\sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty} \sin\left(n\frac{\pi}{2}\right)\frac{\sin(2\pi nft)}{n} =$$

$$= \frac{8V_0}{\pi^2}\left\{\frac{\sin(1\cdot 2\pi ft)}{1^2} - \frac{\sin(3\cdot 2\pi ft)}{3^2} + \frac{\sin(5\cdot 2\pi ft)}{5^2} - \frac{\sin(7\cdot 2\pi ft)}{7^2} + \cdots\right\}.$$

Així, doncs, un **senyal triangular** de freqüència f s'expressa com la **suma de senyals sinusoïdals o harmònics** de freqüències ***f, 3f, 5f, 7f,***..., essent la contribució o **amplitud** B_n de cada terme de la sèrie o harmònic $8V_0/\pi^2$, $-8V_0/9\pi^2$, $8V_0/25\pi^2$, $-8V_0/49\pi^2$,... Com l'amplitud B_n de cada harmònic és inversament proporcional a "n", es pot reproduir acceptablement bé un senyal triangular amb un nombre reduït de termes de la sèrie de Fourier. És per aquest motiu que en aquesta pràctica es filtrarà un senyal triangular.

2 Exercicis previs

2.1 Filtre passabaix

Un filtre passabaix, com el que es mostra a la figura 2, està format per una resistència de 1 kΩ i una bobina. Si la freqüència de tall és de 2300 Hz, **determineu** el **coeficient d'autoinducció *L*** de la bobina.

A la figura 10 es representen la tensió instantània d'entrada $V_{in}(t)$ (línia contínua) i la de sortida $V_{out}(t)$ (línia discontínua), que s'observen a la pantalla d'un oscil·loscopi de doble canal. **Determineu el desfasament entre ambdues quantitats**, tot dient quina magnitud avança respecte l'altra.

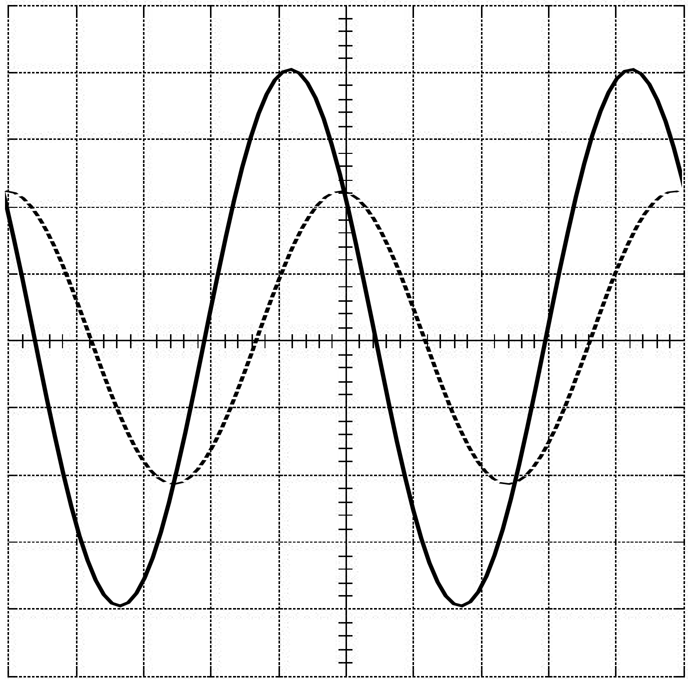

Figura 10

2.2 Filtre passaalt

Un filtre passaalt, com el que es mostra a la figura 4, està format per una resistència de 1 kΩ i un condensador. Si la freqüència de tall és de 1500 Hz, **determineu la capacitat *C*** del condensador.

2.3 Filtre passabanda

Un filtre passabanda com el que es mostra a la figura 6 està format per una resistència de 1 kΩ, un condensador de capacitat C i una bobina amb un coeficient d'autoinducció L. Utilitzant els valors de L i C calculats anteriorment, **determineu les freqüències de ressonància f_R i de tall f_H i f_L**. Quant val l'**amplada de banda Δf i el factor de qualitat Q** ? **Quant valen Δf i Q quan la resistència és de 100 Ω i 10 kΩ** ?

3 Procediment de mesura

3.1 Comproveu que al vostre lloc de treball teniu:

- 1 connector BNC en forma de T.
- 1 cable BNC-BNC.
- 2 cables BNC-banana.
- 4 cables de connexió banana-banana.
- 1 tauler de connexions.
- 1 joc de connectors en forma de pont.
- 1 oscil·loscopi de doble canal.
- 2 polímetres.
- 1 generador de funcions.
- 1 resistència de 1 kΩ, 1 de 10 kΩ i 1 de 100 Ω.
- 1 bobina.
- 1 condensador.

3.2 Comproveu el bon estat dels fils de connexió

1. Comproveu que tots els **cables de connexió** estan en bon estat. Per fer-ho mesureu la resistència de cada cable amb el polímetre funcionant com a **ohmímetre** (vegeu l'Apèndix B). Per això connecteu un born a l'entrada COM i l'altre a la VΩ. Si la resistència és més gran que 1 Ω o varia quan sacsegem el cable, aquest està en mal estat i cal canviar-lo.

3.3 Filtre passabaix

1. Mesureu el valor real de les **resistències** de 100 Ω, 1 kΩ i 10 kΩ**,** connectant-les directament al polímetre funcionant com a **ohmímetre** (vegeu l'Apèndix B). Si utilitzeu polímetres PROMAX cal prémer el botó blau per canviar d'escala de resistències.

2. Munteu el circuit de la figura 2 al tauler de connexions amb la **resistència de 1 kΩ** i la **bobina**.

3. Endolleu el connector en forma de T a la sortida de 50 Ω del generador de funcions. Connecteu el cable BNC-BNC entre una de les potes del connector en forma de T i l'entrada del canal I de l'oscil·loscopi. Connecteu un cable BNC-banana entre l'altra pota del connector en forma de T i l'entrada del circuit. Endolleu la banana vermella a la bobina i la negra a la resistència. Connecteu l'altre cable BNC-banana entre els extrems de la resistència i l'entrada II de l'oscil·loscopi. Tingueu en compte que quan es connecten simultàniament els dos canals de l'oscil·loscopi a dos elements diferents, **els borns negres dels cables s'han de connectar al mateix punt**. Això és així perquè els terres dels dos canals de l'oscil·loscopi estan connectats internament entre si. Connecteu dos cables banana-banana entre l'entrada del circuit i un dels polímetres, a fi de determinar el valor eficaç de la tensió a l'entrada V_{in}. Connecteu els altres dos cables banana-banana entre els extrems de la resistència i l'altre polímetre a fi de determinar el valor eficaç de la tensió a la sortida V_{out}.

4. Poseu en marxa els polímetres, de forma que funcionin com a voltímetres de corrent altern, el generador de funcions i l'oscil·loscopi. Comproveu que tots els botons de

l'oscil·loscopi no estan pitjats i que els diferents controls del generador de funcions, com el DC OFFSET i el SYM, estan en posició OFF. Feu que l'oscil·loscopi treballi en el **canal I** amb una base de temps de **2 ms/div** i un coeficient de deflexió de **2 V/div**. Activeu el botó de terra de l'oscil·loscopi GND (o GD) i moveu els controls POSITION 1 (o Y-POS. I) i X-POSITION (o X-POS.) de manera que la línia horitzontal que apareix a la pantalla estigui al centre. Desactiveu el botó GND. Feu la mateixa operació pel canal II. Per això premeu el botó CH I/II i el botó de terra GND del segon canal i moveu el control POSITION 2 (o Y-POS.) de forma que la línia horitzontal aparegui al centre de la pantalla. Desactiveu el botó GND del canal II i premeu de nou el botó CHI/II a fi de veure a la pantalla el canal I de l'oscil·loscopi.

5. Utilitzeu els controls del generador de funcions per aplicar un **senyal sinusoïdal** de **100 Hz** de freqüència, i amb el botó *amplitude*, ajusteu l'amplitud del senyal fins que el **valor eficaç de la tensió a l'entrada, mesurat amb el polímetre, sigui de V_{in} = 5 V**. **Mesureu el valor eficaç de la tensió a la sortida V_{out} amb el segon polímetre**. Calculeu el **mòdul de la funció de transferència** a partir del quocient entre els dos valors eficaços: $H(f) = V_{out}/V_{in}$.

6. Visualitzeu el senyal de sortida al **canal II** de l'oscil·loscopi. Per això poseu els coeficients de deflexió d'ambdós canals a 2 **V/div** i premeu el botó **DUAL** de l'oscil·loscopi. Observeu que a la pràctica ambdós senyals estan en fase i tenen la mateixa amplitud.

7. **Repetiu** els dos punts anteriors per les freqüències de **500, 1000, 1500, 2000, 2500, 5000, 10000 i 20000 Hz**. Si cal, per cada valor de la freqüència, moveu el botó *amplitude* del generador de funcions de forma que **V_{in} = 5 V** i aneu canviant l'escala de temps de l'oscil·loscopi a fi de veure clarament un període. Observeu com, a mesura que augmenta la freqüència, el valor eficaç V_{out} mesurat al polímetre i l'amplitud a la sortida, que es visualitza a l'oscil·loscopi, es redueixen. També s'observa que la diferència de fase entre els dos senyals augmenta.

8. Determineu la **diferència de fase** entre els dos senyals, emprant la metodologia explicada a l'apartat 1.4 per la freqüència de **20 kHz**, tot aplicant la fórmula 14. D'acord amb el que s'ha explicat a l'apartat 1.1, l'angle és positiu o negatiu ?

9. **Determineu experimentalment el valor de la freqüència de tall f_T**, aplicant la definició introduïda a l'apartat 1.1. Per això moveu els controls de freqüència del generador de funcions fins que **$H(f_T) = V_{out}/V_{in}$ = 0.707.**

10. A partir dels valors de R i f_T, i aplicant la fórmula (3), **calculeu** el **coeficient d'autoinducció L de la bobina**.

11. Utilitzeu els controls del generador de funcions per aplicar un **senyal triangular** de **100 Hz** de freqüència. Ajusteu la base de temps de l'oscil·loscopi de forma que es vegi un període sencer. Observeu que a la sortida tindrem un senyal triangular semblant al de l'entrada. Això és així perquè f_T és molt més gran que la freqüència aplicada (f=100 Hz) i les dels seus harmònics ($3f$, $5f$, $7f$, ...). És a dir, el filtre passabaix ha deixat passar un nombre important d'harmònics de freqüències menors que f_T. Repetiu el procés per un **senyal triangular de 20 kHz**. Seleccioneu una base de temps que permeti visualitzar un període sencer i observeu com a la sortida es veu un senyal sinusoïdal d'amplitud molt

menor que la de l'entrada. En aquest cas com $f_T < f = 10$ kHz, el filtre només deixa passar el primer harmònic *f*.

3.4 Filtre passaalt

1. Munteu el circuit de la figura 4 al tauler de connexions amb la **resistència de 1 kΩ** i el **condensador**. Per això, respecte el muntatge anterior, només heu de substituir la bobina pel condensador.

2. Utilitzeu els controls del generador de funcions per aplicar un **senyal sinusoïdal** de **20 kHz** de freqüència, i amb el botó *amplitude*, ajusteu l'amplitud del senyal fins que el **valor eficaç de la tensió a l'entrada, mesurat amb el polímetre, sigui de V_{in} = 5 V**. **Mesureu el valor eficaç de la tensió a la sortida V_{out} amb el segon polímetre**. Calculeu el **mòdul de la funció de transferència** a partir del quocient entre els dos valors eficaços: $H(f) = V_{out}/V_{in}$.

3. Visualitzeu el senyal de sortida al **canal II** de l'oscil·loscopi. Per això poseu els coeficients de deflexió d'ambdós canals a 2 **V/div**. Observeu com els senyals quasi estan en fase i tenen la mateixa amplitud.

4. **Repetiu** els dos punts anteriors per les freqüències de **10000**, **5000**, **2500, 2000, 1500, 1000, 500 i 100 Hz**. Si cal, per cada valor de la freqüència, moveu el botó *amplitude* del generador de funcions de forma que el valor eficaç de la tensió a **l'entrada sigui de 5 V** i aneu canviant l'escala de temps de l'oscil·loscopi a fi de veure clarament un període. Observeu com, a mesura que disminueix la freqüència, l'amplitud a la sortida es redueix i la diferència de fase entre els dos senyals augmenta.

5. Determineu la **diferència de fase** entre els dos senyals emprant la metodologia explicada a l'apartat 1.4 per la freqüència de **100 Hz**, tot aplicant la fórmula 14. Si cal poseu el coeficient de deflexió del canal II a 0.5 V/div. D'acord amb el que s'ha explicat a l'apartat 1.2, l'angle és positiu o negatiu ?

6. Torneu a posar el coeficient de deflexió del canal II a 2 V/div. **Determineu experimentalment el valor de la freqüència de tall f_T**, aplicant la definició introduïda a l'apartat 1.2. Per això, moveu els controls de freqüència del generador de funcions fins que $\boldsymbol{H(f_T)} = V_{out}/V_{in} = \mathbf{0.707}$.

7. A partir dels valors de R i f_T, i aplicant la fórmula (6), **calculeu** la **capacitat C del condensador**. Compareu aquest resultat amb el **mesurat directament amb un polímetre C_{pol}**. Per això traieu el condensador del circuit i connecteu-lo directament a borns del polímetre, que el fareu funcionar com a capacímetre.

8. Torneu a posar el condensador al circuit i utilitzeu els controls del generador de funcions per aplicar un **senyal triangular** de **20 kHz** de freqüència. Ajusteu la base de temps de l'oscil·loscopi de forma que es vegi un període sencer. Observeu que a la sortida tindrem un senyal triangular semblant a d'entrada. Això és així perquè f_T és molt menor que la freqüència aplicada (f=10 kHz) i les dels seus harmònics ($3f$, $5f$, $7f$, ...). És a dir, el filtre passaalt ha deixat passar un nombre important d'harmònics de freqüències superiors a f_T.

3.5 Filtre passabanda

1. **Calculeu els valors teòrics** de les freqüències de ressonància i de tall $\boldsymbol{f_R^t, f_L^t}$ **i** $\boldsymbol{f_H^t}$, aplicant les fórmules (9), (10) i (11). Utilitzeu el valor de la resistència R = 1 kΩ, mesurada anteriorment amb el polímetre, i els valors de L i C, determinats anteriorment.

2. Munteu el circuit de la figura 6 al tauler de connexions amb la **resistència de 1 kΩ**, el **condensador i la bobina**. Com fins ara, un dels cables BNC-banana s'endolla entre una pota del connector en forma de T i l'entrada del circuit, amb la banana negra connectada a la resistència. L'altre cable BNC-banana s'endolla entre els extrems de la resistència i l'entrada II de l'oscil·loscopi. Tingueu en compte que **els borns negres dels cables s'han de connectar al mateix punt.**

3. Utilitzeu els controls del generador de funcions per aplicar un **senyal sinusoïdal** d'una freqüència semblant a f_R^t, i amb el botó *amplitude*, ajusteu l'amplitud del senyal fins que el **valor eficaç de la tensió a l'entrada, mesurat amb el polímetre, sigui de** $\boldsymbol{V_{in}}$ **= 5 V**. Canvieu l'escala de temps de l'oscil·loscopi a fi de veure clarament un període. **Determineu el valor experimental de la freqüència de ressonància** $\boldsymbol{f_R^{ex}}$, que serà aquell pel que els senyals d'entrada i sortida, que es visualitzen als dos canals de l'oscil·loscopi, estiguin en fase.

4. **Determineu el valor experimental de les freqüències de tall** $\boldsymbol{f_L^{ex}}$, i $\boldsymbol{f_H^{ex}}$. Per això moveu els controls de freqüència del generador de funcions, en primer lloc cap a freqüències menors, i després, cap a majors, que la de ressonància. En ambdós casos el valor de la funció de transferència, calculat a partir dels valors eficaços de les tensions mesurades amb els voltímetres, haurà de ser $H(f_L^{ex}) = H(f_H^{ex}) = V_{out}/V_{in} = 0.707$. Observeu com en un cas $V_{out}(t)$ avança a $V_{in}(t)$, i com en l'altre cas s'endarrereix

5. Calculeu **l'amplada de banda** $\Delta f^{ex} = f_H^{ex} - f_L^{ex}$, i el **factor de qualitat** $Q = f_R^{ex}/\Delta f^{ex}$ a partir dels valors experimentals.

6. Apliqueu les fórmules (12) i (13) per calcular els valors teòrics de l'amplada de banda $(\Delta f^t = R/2\pi L)$ i el factor de qualitat $(Q^t = f_R^t/\Delta f^t)$ per les resistències de 100 Ω, 1 kΩ i 10 kΩ, tot utilitzant el valor de L determinat anteriorment.

7. Utilitzeu els controls del generador de funcions per aplicar un **senyal triangular** de **freqüència** igual a $\boldsymbol{f_H^{ex}}$. Ajusteu la base de temps de l'oscil·loscopi de forma que es vegi un període sencer. Compareu els senyals de sortida i d'entrada. Observeu que passa quan es substitueix la resistència de 1 kΩ per la de 10 kΩ i després per la de 100 Ω. Quan R = 10 kΩ, l'amplada de banda del filtre es prou gran com perquè hi passi un nombre suficient d'harmònics, que fan que els senyals d'entrada i sortida siguin idèntics; per aquest motiu direm que la capacitat o qualitat del filtre per seleccionar freqüències (factor de qualitat) és baixa. Per contra, quan R = 100 Ω, el filtre només selecciona un harmònic, que fa que el senyal de sortida sigui sinusoïdal; per aquest motiu direm que la capacitat o qualitat del filtre per seleccionar freqüències (factor de qualitat) és alta.

Circuits filtres

R (100 Ω) =	R (1 kΩ) =	R (10 kΩ) =

Filtre passabaix

f(Hz)	V_{in} (V)	V_{out} (V)	$H(f)$
100			
500			
1000			
1500			
2500			
5000			
10000			
20000			

D =	l =

⇩

δ(10 kHz) =

f_T = ⇨ L =

Filtre passaalt

f(Hz)	V_{in} (V)	V_{out} (V)	$H(f)$
20000			
10000			
5000			
2500			
1500			
1000			
500			
100			

D =	l =

⇩

δ(100 Hz) =

f_T = ⇨ C = ⇔ C_{pol} =

Filtre passabanda

f_R^t=	f_R^{ex}=
f_L^t=	f_L^{ex}=
f_H^t=	f_H^{ex}=

⇨

Δf^{ex} =
Q^{ex} =

R	Δf^t	Q^t
100 Ω		
1 kΩ		
10 kΩ		