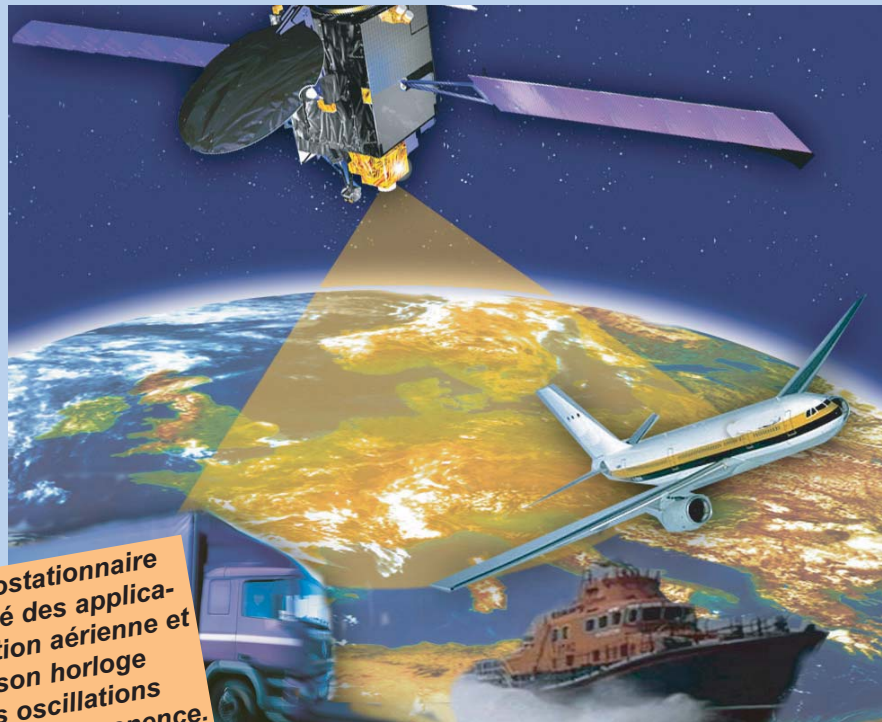


OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES ENTRETENUES

4



Egnos, satellite géostationnaire assurant la sécurité des applications de la navigation aérienne et maritime grâce à son horloge atomique dont les oscillations sont entretenues en permanence.

- ◆ La résistance d'un oscillateur électrique étant inéluctable, n'y a-t-il pas un moyen pratique à la compensation de l'amortissement conséquent ?
- ◆ Quel rôle peut-elle avoir la pile d'alimentation dans le fonctionnement de l'oscillateur à quartz d'une montre électronique ?

OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES ENTRETENUES

Dans les circuits électriques et électroniques, les oscillations libres sont très recherchées, mais celles-ci se trouvent dans tous les cas plus ou moins amorties. Pour qu'elles perdurent comme elles sont nées, il faut penser à les entretenir et ce en restituant continuellement à l'oscillateur, avec un dispositif approprié, l'énergie dissipée sous forme thermique. Un tel dispositif est qualifié de dispositif d'entretien.

Avec l'étude qui suit et qui porte uniquement sur le cas d'un circuit RLC série dont les oscillations libres ont été traitées dans le chapitre précédent, on découvrira un exemple de dispositif pratique à l'entretien de ces oscillations, réalisable avec des composants électriques qui nous sont familiers.

1 PRINCIPE D'ENTRETIEN DES OSCILLATIONS LIBRES

On a vu que tout circuit constitué d'un condensateur de capacité C et d'une bobine d'inductance L et de résistance r est modélisable en un circuit RLC série formé par l'association en série du condensateur de capacité C , d'une inductance pure L et d'un résistor représentant la résistance totale R du circuit, résistance pratiquement égale à la résistance r de la bobine. L'amortissement des oscillations libres d'un tel circuit résulte de la chute de tension u_R due à R . Pour le compenser, il suffit de réaliser un dipôle électrocinétique D dont l'insertion en série avec les composants de l'oscillateur (condensateur, bobine) fait apparaître une tension u opposée à u_R (Fig.1).

Or, en convention récepteur, $u_R = Ri$, avec $R = r$. Donc $u = - Ri$, où le coefficient négatif ($- R$) signifie une résistance négative simulée par le dipôle D .

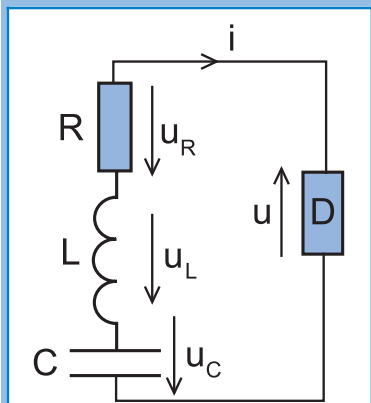


Fig.1 : Tension aux bornes d'un dipôle D à résistance négative

2 EXEMPLE DE DIPÔLE À RÉSISTANCE NÉGATIVE

2.1- Étude expérimentale Manipulation

- ♦ On réalise le montage de la figure 2 autour d'un amplificateur opérationnel (TL081 ou 741 par exemple) comme suit :
- ♦ On commence par la partie située à droite des points A et M.
- ♦ On fixe $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ tandis que $R' = 50 \Omega$ et on alimente l'amplificateur opérationnel en $+15 \text{ V}$ et en -15 V (alimentation non représentée sur la figure). On complète le montage par le générateur BF que l'on monte en série avec un résistor de résistance $R = 200 \Omega$ et on ferme l'interrupteur K.

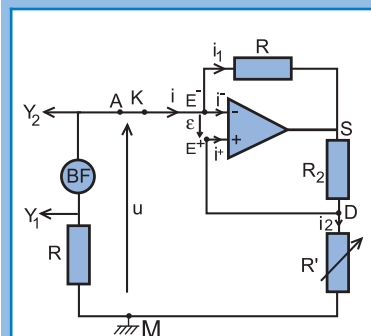


Fig.2a : Schéma du montage d'étude d'un dipôle à résistance négative

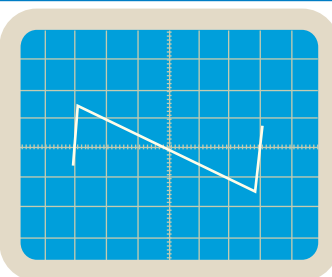
- ♦ On règle le générateur BF pour qu'il délivre entre ses bornes une tension alternative triangulaire d'environ 2 V crête à crête et de fréquence $N = 250$ Hz, puis on augmente l'amplitude du signal jusqu'à ce que l'amplificateur opérationnel sature, c'est-à-dire qu'il ne fonctionne plus en régime linéaire (en visualisant la tension de sortie $u_S(t)$ sur l'écran d'un oscilloscope).
- ♦ On visualise $u(t)$ sur la voie Y_2 d'un oscilloscope bicourbe et $u_{BM}(t)$ sur la voie Y_1 du même oscilloscope.
- ♦ On passe en mode XY tout en inversant la voie Y_1 afin de visualiser, pour différentes valeurs de R' , la caractéristique $u = f_1(u')$, u' étant la tension aux bornes du résistor de résistance R en convention récepteur.

Ainsi, on obtient entre autres, les oscillogrammes des figures 3a et 3b respectivement pour $R' = 50 \Omega$ et $R' = 80 \Omega$.

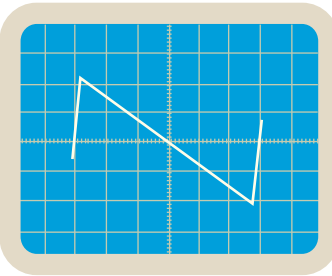
En maintenant R' égale à 80Ω et en fixant la valeur commune de R_1 et de R_2 à $2 \text{ k}\Omega$, on obtient l'oscillogramme de la figure 3c.



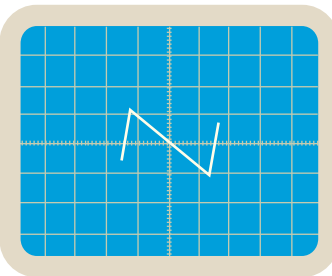
Fig.2b : Montage d'étude d'un dipôle à résistance négative



a : $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $R' = 50 \Omega$.



b : $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $R' = 80 \Omega$.



c : $R_1 = R_2 = 2 \text{ k}\Omega$, $R' = 80 \Omega$.

Fig.3 : Caractéristiques $u = f_1(u')$ obtenue avec les sensibilités 1V/div sur Y_1 et $0,5 \text{ V/div}$ sur Y_2 .

Questions

- 1°) Montrer que la caractéristique $u = f_1(u')$ représente la caractéristique $u = f(i)$, où i est l'intensité du courant débité par le générateur BF et justifier l'inversion du signal visualisé sur la voie Y_1 .
- 2°) Comparer les linéarités des portions centrales des caractéristiques $u = f_1(u')$ de la figure 3 et en déduire l'influence de la valeur de R' et de la valeur commune de R_1 et de R_2 sur la pente et la largeur de ces portions linéaires.
- 3°) Calculer la pente p de chacune des portions linéaires des caractéristiques $u = f_1(u')$ de la figure 3.
- 4°) Montrer d'après la forme de l'oscillogramme $u = f_1(u')$ de la figure 3 que $u = ki$, où k est une constante négative que l'on exprimera en fonction de la pente p et de la résistance R .
- 5°) - Calculer k dans les trois cas de figures 3a, 3b et 3c.
- Comparer les valeurs de k et de R' .

2.2- Étude théorique en régime linéaire

Il s'agit d'établir l'expression de la tension u aux bornes du dipôle AM de la figure 2 (partie de droite, constituée par le montage de l'amplificateur opérationnel).

Pour la maille MAE⁻ E⁺DM, on a : $u = R'i' + (v^- - v^+)$ (1)

Pour la maille DS E⁻ E⁺D, on a : $R_2i_2 + R_1i_1 + (v + - v^-) = 0$ (2)

La loi des noeuds s'écrit au point E⁻ : $i + i_1 + i^- = 0$ (3)

Au point D : $i_2 + i' + i^+ = 0$ (4)

L'amplificateur opérationnel utilisé étant supposé idéal, on a :

$$\varepsilon = (v^+ - v^-) = 0, i^+ = 0 \text{ et } i^- = 0.$$

D'autre part, $R_1 = R_2$.

Les équations (1), (2), (3) et (4) deviennent :

$$u = R'i' \quad (1)'$$

$$i_2 = -i_1 \quad (2)'$$

$$I_1 = -i \quad (3)'$$

$$I' = -i_2 \quad (4)'$$

D'où la relation: $u = -R'.i$

Par conséquent, le montage de l'amplificateur opérationnel de la figure 2 est équivalent à un dipôle AM caractérisé par une résistance négative $(-R')$. (Fig. 4)

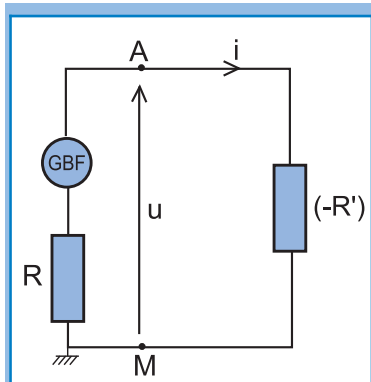


Fig.4 : Montage équivalent au montage de la figure 2

Conclusion

Avec un amplificateur opérationnel monté en boucle fermée à réaction sur l'entrée inverseuse, on peut réaliser un dipôle à résistance négative.

En convention récepteur, la tension u aux bornes d'un dipôle à résistance négative $(-R)$, parcouru par un courant d'intensité i s'écrit : $u = -R i$

Remarque

En montant l'amplificateur opérationnel en boucle fermée mais à réaction sur l'entrée non inverseuse (Fig.5), on a toujours un dipôle à résistance négative $(-R')$ mais qui n'est stable qu'avec des valeurs très élevées de R' .

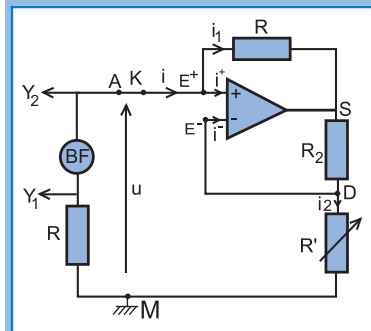


Fig.5 : Montage à réaction sur l'entrée non inverseuse.

3 ENTRETIEN D'UN OSCILLATEUR RLC SÉRIE AVEC UN DIPÔLE À RÉSIDANCE NÉGATIVE

3.1- Étude expérimentale

Manipulation

♦ Dans le montage de la figure 2 du paragraphe précédent, on remplace la partie située à gauche des points A et M (GBF, résistor de résistance R) par un dipôle RLC série (Fig.6) avec :

$$L = 1 \text{ H} ; C = 47 \mu\text{F} ; R = R_0 + r$$

R_0 étant la résistance du résistor associé en série avec le condensateur et la bobine : $R_0 = 2 \text{ k}\Omega$

r : résistance interne de la bobine, elle est de l'ordre de 25Ω .

R' est une résistance réglable ($n \times 1\Omega$, $nx 10 \Omega$, $nx100 \Omega$, $nx1 \text{ k}\Omega$).

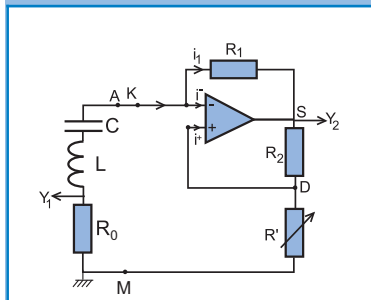
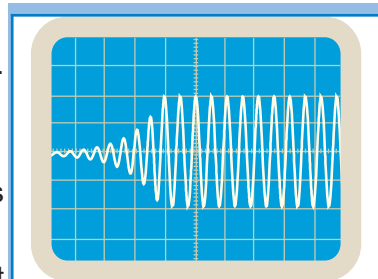


Fig.6 : Oscillateur RLC série associé à un dipôle à résistance négative

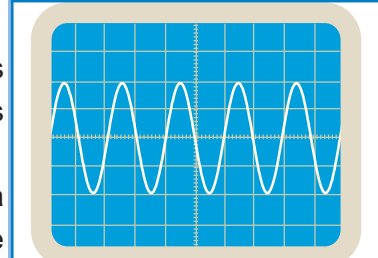
- ♦ On fixe R' à la valeur zéro ($R' = 0$).
- ♦ On alimente l'amplificateur opérationnel en +15 V et en -15 V.
- ♦ On ferme l'interrupteur K.
- ♦ On réalise les connexions nécessaires à la visualisation sur l'écran de l'oscilloscope numérique, de la tension u_o aux bornes du résistor de résistance R_o .
- ♦ En augmentant la valeur de R' , les oscillations s'amorcent pour $R' = 2070 \Omega$ environ et se stabilisent en prenant une forme quasi-sinusoidale : chronogramme $u_o(t)$ de la figure 7a. L'oscillogramme de la figure 7b, visualisé avec les sensibilités 10ms/div et 1V/div, montre bien qu'en régime permanent, ces oscillations entretenues sont quasi-sinusoidales. Quand on donne à R' des valeurs de plus en plus élevées, la courbe représentant $u_o(t)$ devient de plus en plus ample (Oscillogramme de la figure 8, obtenu avec les mêmes sensibilités 10 ms/div et 1V/div). Quand R' est trop élevée, la sinusoïde devient distordue et écrêtée. (Fig.9).

Questions

- 1°) Qu'est-ce qui fait naître dans le circuit RLC série les oscillations illustrées par l'oscillogramme de la figure 7a, surtout que l'on sait que le condensateur n'a pas été chargé au préalable.
- 2°) Expliquer l'absence d'oscillations pour les valeurs de R' inférieures à R ($R = R_o + r$).
- 3°) On s'attendait à ce que l'on obtienne des oscillations sinusoidales pour $R' = R$, mais l'expérience montre que les oscillations ne sont générées que pour une valeur de R' un peu supérieure à R ($R' = 2070 \Omega$). Expliquer cette différence.
- 4°) Mesurer directement sur l'oscillogramme de la figure 7b, la période des oscillations entretenues et la comparer à la valeur de la période propre $T_o = 2\pi\sqrt{LC}$ de l'oscillateur.
- 5°) Expliquer l'augmentation de l'amplitude des oscillations quand R' est trop supérieure à R , ainsi que leur écrêtage.



a : Amorçage et stabilisation des oscillations entretenues



b : Oscillations quasi-sinusoidales

Fig.7 : Oscillations entretenues avec R' légèrement supérieure à R

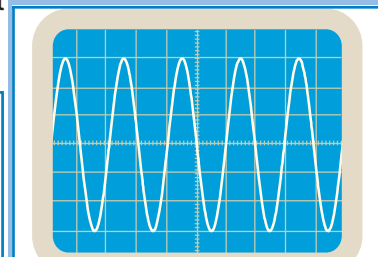


Fig.8 : Oscillations entretenues avec R' nettement supérieure à R .

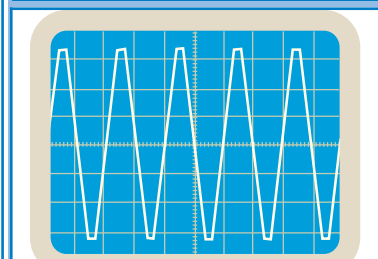


Fig.9 : Oscillations entretenues avec une valeur de R' trop supérieure à R

Conclusion

Il est possible d'entretenir les oscillations d'un circuit RLC série en le fermant sur un dipôle à résistance négative légèrement supérieure en valeur absolue à la résistance totale du circuit.

Les oscillations entretenues d'un circuit RLC série sont quasi-sinusoidales de fréquence égale à la fréquence propre de l'oscillateur.

L'amplitude des oscillations entretenues augmente avec la valeur absolue de la résistance négative d'entretien.

3.2- Interprétation énergétique de l'entretien des oscillations

Grâce à son alimentation en + 15 V et en -15 V, l'amplificateur opérationnel fournit au dipôle RLC série de l'énergie. Mais, avec les petites valeurs de R' , cette énergie suffit-elle pour y générer d'abord des oscillations ?

En fait, en convention récepteur, la loi des mailles s'écrit pour le circuit électrique équivalent (Fig.10) du montage d'entretien des oscillations :

$$\frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} + r i + R_0 i + (-R') i = 0.$$

Il vient donc, $\frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} + R_t i = 0$, avec $R_t = R_0 + r - R'$.

On sait qu'en multipliant une telle équation par $i = \frac{dq}{dt}$,

$$\text{on aboutit à } \frac{dE}{dt} = -R_t \cdot i^2,$$

où $E = E_C + E_L$: énergie totale de l'oscillateur.

♦ Cas où R' est inférieure à R ($R' < R$)

Si $R' < R$, on a $R_t > 0$. Par suite, $\frac{dE}{dt} < 0$, ce qui signifie que l'énergie apportée par le dipôle à résistance négative ne suffit pas pour compenser les pertes par effet Joule dues à R_t . Par conséquent, les oscillations initiées dans le circuit RLC série sont systématiquement amorties, ce qui explique l'impossibilité de les visualiser dans de telles conditions.

♦ Cas où R' est égale à R ($R'=R$)

Dans le cas où R' est égale à R , la résistance totale R_t devient nulle. En d'autres termes, lorsque cette condition est satisfaite, on a $\frac{dE}{dt} = 0$, ce qui signifie que l'énergie totale E du système ne diminue plus, elle reste constante. Ce résultat recherché s'explique par le fait que les bouffées d'énergie apportées par l'amplificateur opérationnel au cours du temps compensent exactement les dissipations d'énergie en énergie thermique, ce qui favorise l'amplification des oscillations qui naissent dans le circuit RLC série (phase d'amorçage) pour se stabiliser très rapidement sous forme quasi-sinusoïdale à une fréquence égale à la fréquence propre $N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ de l'oscillateur,

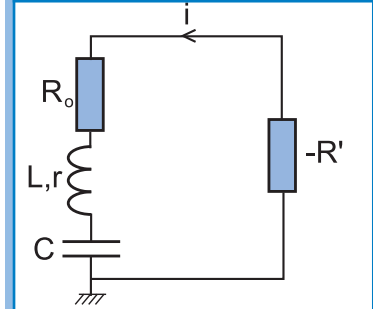


Fig.10 : Schéma du circuit équivalent à l'oscillateur RLC entretenu.

c'est-à-dire exactement comme si l'oscillateur RLC série n'a aucune résistance. On dit que les oscillations sont ainsi auto-entretenues. Mais, dans la pratique, on n'a le régime entretenu qu'à R' légèrement supérieure à (R_0+r) . Cela est dû essentiellement à des imperfections de l'amplificateur opérationnel (il n'est pas parfaitement idéal comme il est supposé), aux perturbations provoquées par l'oscilloscope utilisé comme appareil de mesure [⊙] et au fait que la résistance r de la bobine ne reste pas constante, elle augmente avec la fréquence des oscillations ^{⊙⊙}.

◆ Cas où R' est nettement supérieure à R ($R' > R$)

La résistance totale R_t devient remarquablement négative. Dans ce cas, $\frac{dE}{dt} > 0$: le montage de l'amplificateur opérationnel apporte plus d'énergie qu'il en faut pour l'entretien des oscillations, ce qui explique l'augmentation de leur amplitude.

◆ Cas où R' est très supérieure à R ($R' \gg R$)

Lorsque la résistance R' devient trop élevée, on atteint la saturation pour une valeur de l'intensité du courant oscillant inférieure en valeur absolue à sa valeur maximale. Par suite, l'amplificateur opérationnel ne peut plus continuer à ne fonctionner qu'en régime linéaire. En conséquence, les oscillations entretenues deviennent distordues et écrêtées.

Conclusion

Un dipôle à résistance négative joue le rôle de générateur mais non autonome.

Les oscillations d'un circuit RLC série ne peuvent être entretenues par un dipôle à résistance négative que lorsque l'énergie apportée par ce dernier suffit pour compenser l'énergie dissipée dans l'oscillateur par effet Joule.

⊙ Pour plus de détails, se référer à la fiche technique présentée à la fin du chapitre (p. 127).

⊙⊙ L'étude de l'influence de la fréquence des oscillations sur la valeur de la résistance de la bobine de l'oscillateur est hors programme.

L'essentiel

- L'entretien des oscillations nécessite un apport extérieur d'énergie en bouffées.
- Les oscillations libres d'un circuit RLC série peuvent être entretenues avec un dipôle à résistance négative.
- Avec un montage particulier d'un ensemble de résistors autour d'un amplificateur opérationnel, on peut réaliser un dispositif d'entretien simulant un dipôle à résistance négative.
- L'amorçage des oscillations entretenues d'un circuit RLC série demande une résistance négative légèrement supérieure en valeur absolue à la résistance totale de l'oscillateur.
- Dans certaines limites, les oscillations quasi-sinusoïdales d'un circuit RLC série entretenu sont d'autant plus amples que l'apport d'énergie assuré par le dipôle à résistance négative est plus grand. $T_o = 2\pi\sqrt{LC}$
- Les oscillations entretenues d'un dipôle à résistance négative ne peuvent être stabilisées que lorsque l'amplificateur opérationnel du dispositif d'entretien fonctionne en régime linéaire.
- Les oscillations entretenues d'un circuit RLC série sont quasi-sinusoïdales de période égale à sa période propre

Exercices



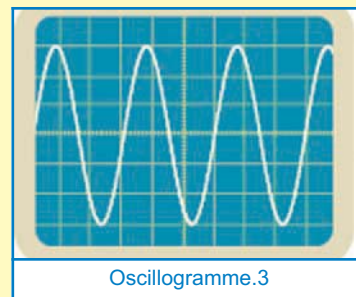
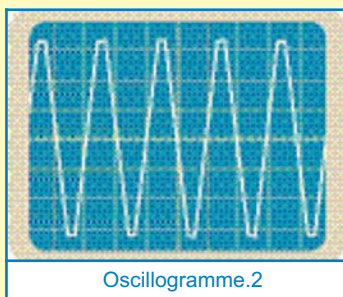
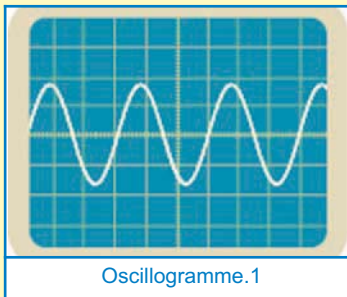
Exercice résolu

ÉNONCÉ

On réalise un circuit RLC série avec un condensateur de capacité $C = 2 \mu\text{F}$, une bobine d'inductance $L = 0,5 \text{ H}$ et de résistance $r = 24 \Omega$.

Afin d'y initier des oscillations et les entretenir, on réalise le montage de la figure 6 de la page 114 mais avec R' réglable avec une boîte ($n \times 1 \text{ k}\Omega$) seulement.

1°) Préciser, parmi les trois oscillogrammes suivants, celui qui peut être obtenu avec une résistance R' fixée à la valeur $2 \text{ k}\Omega$; justifier la réponse.



2°) a) Quelle est la valeur R' permettant théoriquement d'entretenir les oscillations du circuit ? Justifier la réponse.

b) Calculer la fréquence des oscillations entretenues.

3°) a) Montrer qu'avec la boîte de résistances R' utilisée, on ne peut entretenir les oscillations et proposer une solution pratique à cette fin.

b) Si l'on ne dispose que de la boîte de résistance R' ($n \times 1 \text{ k}\Omega$), proposer une autre méthode permettant d'améliorer la qualité des oscillations entretenues.

SOLUTION

1°) $R' = 2 \text{ k}\Omega$, tandis que $r = 24 \Omega$.

La résistance R' est trop supérieure à la résistance totale r du circuit RLC série. Dans ces conditions, l'amplificateur opérationnel apporte beaucoup plus d'énergie qu'il en faut, ce qui rend les oscillations distordues. Donc, parmi les trois oscillogrammes présentés, le seul qui peut être obtenu dans ces conditions est l'oscillogramme 2.

2°) a) Les oscillations entretenues ne peuvent être amorcées que lorsque le dispositif d'entretien est capable de compenser toute dissipation d'énergie par effet Joule due à la résistance totale du circuit, chose qui n'est réalisée que lorsque $R' = r$.

b) On sait que le dispositif d'entretien aide le circuit RLC série à osciller librement, c'est-à-dire avec sa fréquence propre :

$$N_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

A.N: $N = 159\text{Hz}$

3°) a) R' : boîte ($n \times 1 \text{ k}\Omega$); la valeur minimale $R'_{\min} = 1 \text{ k}\Omega$ est encore très nettement supérieure à la valeur 24Ω de r . Donc, il est impossible d'entretenir convenablement les oscillations avec une telle boîte de résistances, elles seront distordues même avec $R'_{\min} = 1 \text{ k}\Omega$. Il faut alors remplacer cette boîte par une association en série par exemple de boîtes ($n \times 1 \Omega$, $n \times 10 \Omega$, $n \times 100 \Omega$).

b) On sait qu'une augmentation de la valeur commune des résistances R_1 et R_2 du dispositif d'entretien réduit la largeur du domaine de fonctionnement linéaire de l'amplificateur opérationnel (manipulation de la page 112). Donc, pour améliorer la qualité des oscillations, il suffit de choisir pour R_1 et R_2 une valeur plus petite tout en fixant R' à sa valeur minimale $1 \text{ k}\Omega$.

Exercices à résoudre

Tests rapides des acquis

1 Items "vrai ou faux"

Evaluer les propositions suivantes par vrai ou faux.

- 1- L'amplificateur opérationnel est un dipôle à résistance négative.
- 2- On ne peut entretenir les oscillations d'un circuit RLC série que par l'insertion d'un dipôle à résistance négative.
- 3- Un circuit LC ne demande aucun entretien.
- 4- Le dispositif d'entretien des oscillations joue le rôle du générateur.
- 5- L'entretien des oscillations permet à un circuit RLC série d'osciller sans diminution d'amplitude et à son propre rythme.
- 6- Quelle que soit la valeur de la résistance négative du dispositif d'entretien, les oscillations sinusoïdales d'un circuit RLC série se produisent à la même fréquence.

2 Questions à Choix Multiples

Préciser pour chacune des questions suivantes, la (ou les) proposition(s) juste(s).

- I- Un oscillateur électrique est dit entretenu lorsque:
 - a- il n'y a aucune perte d'énergie ;
 - b- les pertes d'énergie dues à sa résistance sont compensées par un apport d'énergie de l'extérieur ;
 - c- la perpétuation des oscillations dont il est siège est assurée par un dispositif d'entretien approprié ;
 - d- les oscillations qui s'y produisent sont sinusoïdales.
- II- Les oscillations entretenues d'un circuit RLC série se produisent :
 - a- avec une amplitude dont la valeur dépend des caractéristiques du dispositif d'entretien ;
 - b- pour toute résistance négative supérieure ou égale en valeur absolue à la résistance R du circuit ;
 - c- avec une fréquence imposée par le dispositif d'entretien ;
 - d- avec une fréquence égale à sa fréquence propre ;
- III- En associant un dipôle RLC série à un dipôle à résistance négative R' , il ne peut y naître des oscillations que lorsque :
 - a- le condensateur est chargé au préalable ;
 - b- R' est réglable et sa valeur maximale est supérieure à celle de R ;
 - c- le condensateur est de très grande capacité.

Exercices d'application

- 3 Pour créer des oscillations entretenues dans un circuit RLC série, on associe ce dernier à un dipôle D à résistance négative ($-R'$)
- 1°) Schématiser le montage réalisé et y indiquer la tension $u = -R' i$.
 - 2°) Les oscillations quasi-sinusoïdales de u

- obtenues pour $R' = 250 \Omega$ caractérisées par une période $T = 6 \text{ ms}$ et une amplitude $U_m = 2 \text{ V}$.
- a) En déduire les propriétés de i .
 - b) Sachant que $C = 15,5 \mu\text{F}$, calculer L.
 - c) Quelle est la valeur théorique de la résistance R de la bobine ? Justifier la réponse.

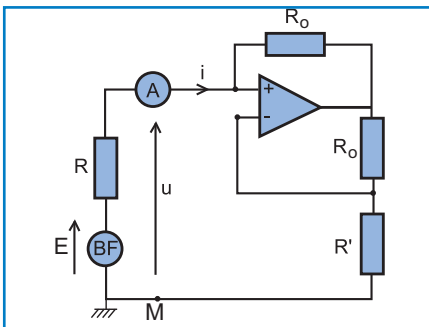
4 On monte aux bornes d'un dipôle à résistance négative réglable ($-R$), un condensateur de capacité C réglable en série avec une bobine d'inductance L et de résistance r . En fixant respectivement la capacité C aux valeurs $0,5 \mu\text{F}$, $10 \mu\text{F}$ et $150 \mu\text{F}$, on constate que les oscillations quasi-sinusoïdales ne sont pas obtenues avec la même valeur de R :

avec $C = 0,5 \mu\text{F}$, $R = 470 \Omega$;
 $C = 10 \mu\text{F}$, $R = 380 \Omega$;
 $C = 150 \mu\text{F}$, $R = 250 \Omega$.

1°) Exprimer la fréquence des oscillations en fonction de L et C .

2°) Sachant que toute autre résistance du circuit est négligeable devant la résistance r de la bobine, montrer que celle-ci n'est pas constante et qu'elle augmente avec la fréquence des oscillations.

5 Avec un amplificateur opérationnel idéal, un générateur de tension idéal $E = 6 \text{ V}$ et un ensemble de résistors ($R = 120 \Omega$, R_0 et R'), on réalise le montage schématisé ci-dessous.



1°) Montrer que $u = -R'i$.

2°) Sachant que l'ampèremètre indique $I = 200 \text{ mA}$, calculer R' .

3°) a) Ce dispositif, convient-il à l'entretien des oscillations d'un circuit constitué d'un condensateur de capacité $C = 0,5 \mu\text{F}$ en série avec une bobine d'inductance $L = 0,5 \text{ H}$ et de résistance $r = 50 \Omega$? justifier la réponse.

b) Dans l'affirmative, calculer la période de ces oscillations.

6 Les oscillations libres d'un circuit formé par l'association en série d'un résistor de résistance R_0 , d'un condensateur de capacité C_0 et d'une bobine d'inductance propre L_0 et de résistance r sont correctement entretenues à l'aide d'un dipôle à résistance négative ($-R$).

1°) Schématiser avec les éléments sus indiqués, le montage permettant d'obtenir des oscillations entretenues.

2°) Montrer qu'à l'amorçage des oscillations entretenues, le montage réalisé est équivalent théoriquement au condensateur de capacité C_0 initialement chargé, associé en série avec une bobine purement inductive d'inductance L_0 .

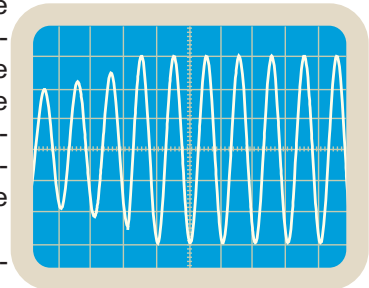
3°) Montrer qu'en régime permanent, les oscillations entretenues sont sinusoïdales de fréquence N_0 dont on donnera l'expression.

4°) a) Exprimer l'énergie totale de l'oscillateur en fonction de l'inductance L_0 et de l'intensité maximale I_m du courant oscillant.

b) D'où provient cette énergie de l'oscillateur ?

7 L'oscillogramme suivant obtenu avec une sensibilité horizontale de 5 ms/div est le chronogramme de la tension u aux bornes du condensateur d'un circuit RLC série entretenue avec un dipôle à résistance négative.

1°) Sachant que le début d'enregistrement de ce chronogramme coïncide pratiquement avec l'instant de fermeture du circuit :



a) interpréter énergétiquement l'allure du chronogramme $u(t)$;

b) déterminer graphiquement la durée approximative d'amorçage des oscillations.

2°) Déterminer graphiquement la période T des oscillations entretenues.

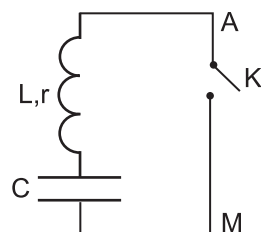
3°) Comparer T avec la période propre de l'oscillateur.

On donne : $C = 2,53 \mu\text{F}$; $L = 0,25 \text{ H}$.

Exercices de synthèse

8 Dans le circuit schématisé ci-après, le condensateur est initialement chargé.

1°) Décrire qualitativement ce qui va se passer dans le circuit si l'on ferme l'interrupteur K .



2°) Montrer que si la résistance de la bobine était nulle, les oscillations seraient sinusoïdales de période T_0 que l'on déterminera.

3°) Pour rendre cette hypothèse une réalité, on remplace l'interrupteur K par un générateur (Fig. ci-contre) délivrant entre ses bornes une tension proportionnelle à l'intensité du courant i ($u = k i$).

a) Montrer que la constante k a la dimension d'une résistance électrique.

b) Établir l'équation différentielle des oscillations de l'intensité du courant i dans le circuit.

c) Quel doit être le signe de k si l'on veut compenser l'amortissement dû à r ?

d) Pour quelle valeur de k , y aura-t-il des oscillations entretenues ?

9 Pour étudier l'entretien des oscillations d'un circuit RLC série, on réalise le montage schématisé dans la figure 1 :

$R_1 = R_2 = 5 \text{ k}\Omega$,
 R' : boîtes de résistances ($n \times 1\Omega$; $n \times 10\Omega$)
 $L = 0,5 \text{ H}$; $r = 50 \Omega$
 $C = 35 \mu\text{F}$ ou bien $85 \mu\text{F}$: en fait, n'étant pas bien lisible, le chiffre des dizaines peut être 8 ou 3.

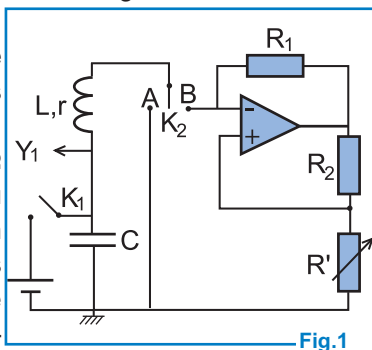


Fig.1

1°) On commence par actionner l'interrupteur K_1 : après l'avoir laissé fermé quelques secondes, on l'ouvre. Puis, on ferme le commutateur K_2 sur la position A.

Avec les sensibilités horizontale 10 ms/div et verticale 2 V/div , l'oscilloscope mémorise sur sa voie Y1 utilisée, le chronogramme de la figure 2.

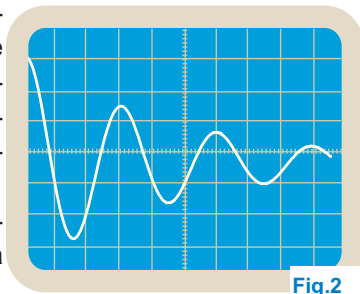


Fig.2

a) Commenter l'allure de ce chronogramme.
 b) Calculer la pseudopériode T .

c) Montrer que la valeur de C ne peut être que $35 \mu\text{F}$.

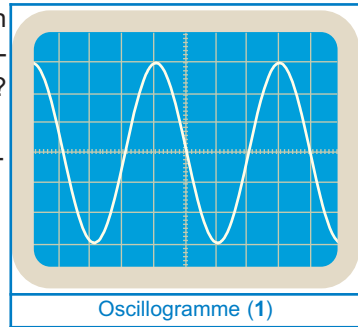
2°) R' étant fixée à la valeur 25Ω , on bascule K_2 sur la position B après avoir alimenté l'amplificateur opérationnel en -15 V et $+15 \text{ V}$, on n'obtient aucun oscillogramme.

a) Est-ce que l'on s'attendait à un tel résultat malgré l'utilisation du dispositif d'entretien ? pourquoi ?

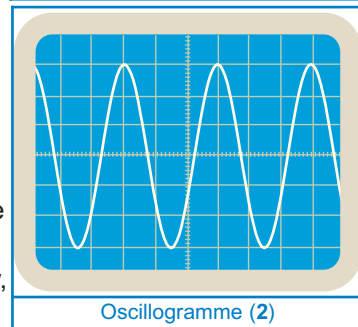
b) Proposer un réglage argumenté avec lequel les oscillations deviennent bien entretenues.

c) Le réglage adéquat étant effectué, préciser parmi les trois oscillogrammes ci-contre (Fig.3) obtenus avec une sensibilité horizontale 10 ms/div , celui réellement obtenu.

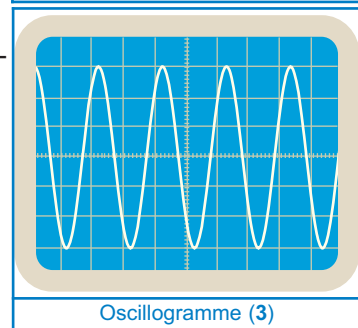
Justifier la réponse.



Oscillogramme (1)



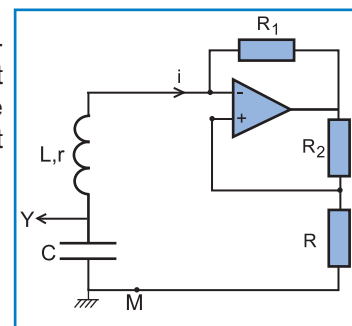
Oscillogramme (2)



Oscillogramme (3)

Fig.3

10 On associe un condensateur de capacité C et une bobine d'inductance L et de résistance interne r en série comme dans le schéma ci-dessous avec un dispositif d'entretien constitué d'un amplificateur opérationnel idéal et d'un ensemble de résistors (R , R_1 et R_2).



1°) Montrer que le dispositif d'entretien ne peut être équivalent à un dipôle à résistance négative égale à $(-R)$ que si $R_2 = R_1$.

2°) Ayant fixé $R_1 = R_2$, on alimente l'amplificateur opérationnel en $+15\text{ V}$ et en -15 V , puis on visualise la tension u aux bornes du condensateur sur l'écran d'un oscilloscope.

L'oscillogramme obtenu a pratiquement la forme d'une sinusoïde de période $T = 2,5\text{ ms}$ et d'amplitude $U_m = 4\text{ V}$.

a) Comparer r et R .

b) Déterminer l'expression de l'intensité $i(t)$ du courant oscillant sachant que $C = 0,5\text{ }\mu\text{F}$.

c) Calculer l'inductance L de la bobine.

d) Calculer l'énergie totale de l'oscillateur.

11 Étude de texte

Montre à quartz

La montre électronique (ou montre à quartz) est basée sur la piézoélectricité du quartz, c'est-à-dire l'apparition d'une différence de potentiel électrique entre deux faces en regard d'un tel cristal à chaque fois qu'il subit une compression ou une dilatation et inversement.

L'oscillateur d'une montre électronique est en effet une très petite lamelle de quartz dont les vibrations s'effectuent avec une fréquence qui ne dépend que de sa masse et de sa rigidité, sa valeur très élevée (entre 32 et 33 kHz)

confère à la montre à quartz une très grande précision (variation inférieure à une minute par année, soit moins d'une seconde par jour).

La montre à quartz est alimentée par une pile miniature (pile bouton) dont la durée de vie atteint plusieurs années grâce à la très faible consommation en puissance ($5\text{ }\mu\text{W}$ environ).



Questions

1°) Faire une analogie entre les grandeurs caractéristiques d'un oscillateur RLC série et celles d'un oscillateur à quartz.

2°) Enumérer les facteurs dont dépend la fréquence des oscillations de la lamelle de quartz et en déduire qu'il s'agit de la fréquence propre de l'oscillateur.

3°) Montrer que la lamelle de quartz d'une montre électronique effectue des oscillations entretenues.

Fiche technique

Réalisation pratique d'oscillations électriques entretenues

Caractéristique intensité-tension $u=f(i)$ d'un dipôle à résistance négative

A défaut d'oscilloscope, on peut tracer point par point la courbe représentant la tension u aux bornes d'un dipôle à résistance négative en fonction de l'intensité i du courant qui y circule. On remplace alors le générateur BF du montage utilisé dans le cours (Fig.2a, p.112) par un générateur 15 V associé à un réostat (0-1 k Ω) comme dans la figure 1.

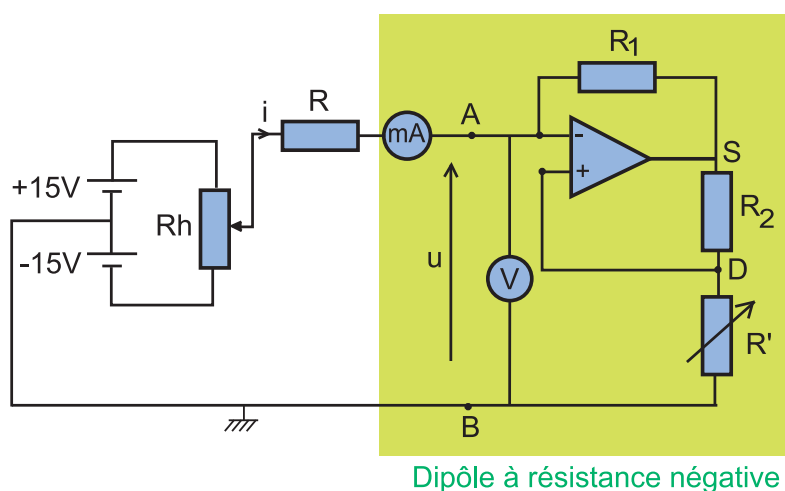


Fig.1 : Dispositif d'étude de la caractéristique $u = f(i)$ d'un dipôle à résistance négative

Remarque :

Comme générateur 15 V, on peut utiliser celui qui alimente l'amplificateur opérationnel.

De cette façon, on peut faire varier i de manière continue et la mesurer avec le milliampèremètre monté en série avec le résistor de résistance $R_0 = 220 \Omega$.

La tension u est mesurée avec le voltmètre branché entre les bornes A et M du dipôle à résistance négative ($-R'$) situé à droite.

♦ On fixe la résistance R' à une première valeur R'_1 (20 Ω par exemple).

En agissant sur le curseur du rhéostat, on arrive à dresser un tableau de mesures du couple (i, u) avec lequel on trace par la suite la courbe d'évolution de u en fonction de i et on précise le domaine de linéarité.

Le calcul de la pente du segment de droite qui le constitue (Fig.2) donne : $k = -R'_1$.

Donc, $u = -R'_1 i$ pour i variant de $-I_0$ à $+I_0$.

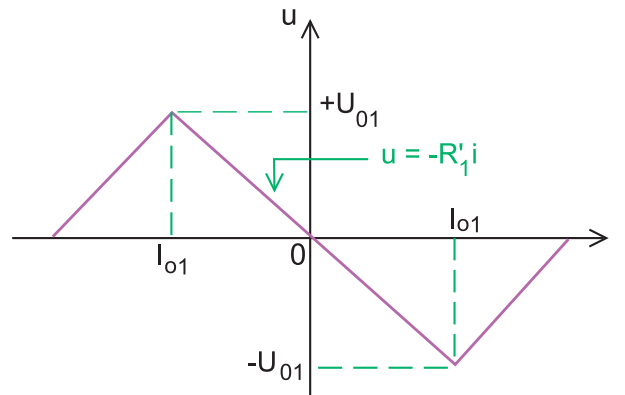


Fig.2 : Caractéristique $u = f(i)$ en forme de N, obtenue avec $R'_1 = 20 \Omega$

Remarque :

Si l'on dispose d'un deuxième voltmètre, on peut mesurer directement la tension u_s et constater qu'elle reste égale à :

- - 15 V pour $i \leq -I_0$.
- + 15 V pour $i \geq +I_0$.

♦ On fixe la résistance R' à une deuxième valeur R'_2 (40 Ω par exemple) et on refait la même manipulation, on obtient alors la caractéristique $u = f(i)$ de la figure 3.

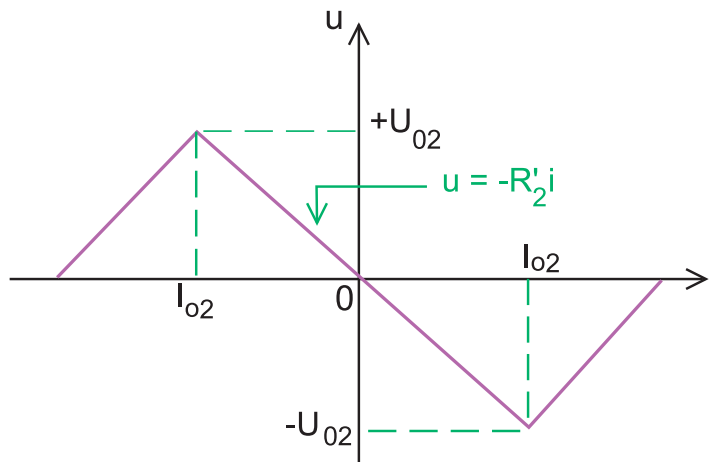


Fig.3 : Caractéristique $u = f(i)$ en forme de N, obtenue avec $R'_2 = 40 \Omega$

Conclusion :

□ Pour $-I_0 < i < +I_0$ tel que u donne $-U_{\text{sat}} < u_s < +U_{\text{sat}}$, le montage de l'amplificateur opérationnel est équivalent à un dipôle à résistance négative ($-R'$) inséré entre les points A et M :

$$u = -R'i$$

□ Plus R' est grande, plus le domaine de linéarité est étroit.

Remarque :

En maintenant R' constante et en remplaçant les résistances R_1 et R_2 égales à 1k Ω par des résistances égales à 10 k Ω , la caractéristique en N obtenue montre qu'une augmentation de R_1 et de R_2 a un effet semblable à celui de l'augmentation de R' sur la largeur du domaine de

linéarité.

Influence des caractéristiques d'entrée de l'oscilloscope sur l'entretien des oscillations.

Comme il a été précisé dans la fiche technique du chapitre précédent, l'oscilloscope peut avoir une influence sur la marche de l'expérience à cause du fait que son entrée Y_1 ou Y_2 est équivalente à un résistor de résistance $R_{osc} = 1 \text{ M}\Omega$ monté en parallèle avec un condensateur de capacité C_{osc} allant de 16 à 47 pF. (Fig.4).

Par conséquent, au lieu que l'évolution de la tension u_c soit régie par l'équation différentielle :

En d'autres termes, les oscillations ne

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{(R_o + r - R')}{L} \frac{du_c}{dt} + \omega_o^2 u_c = 0,$$

elle devient, en négligeant C_{osc} devant C , régie par :

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \left[\frac{1}{CR_{osc}} + \frac{(R_o + r - R')}{L} \right] \frac{du_c}{dt} + \omega_o^2 \left[1 + \frac{R_o + r - R'}{R_{osc}} \right] u_c = 0. \text{ Donc, pour qu'il y ait démarrage}$$

des oscillations, il faut : $\frac{1}{CR_{osc}} + \frac{(R_o + r - R')}{L} \leq 0$, ce qui donne : $R' \geq R_o + r + \frac{L}{CR_{osc}}$.

En d'autres termes, les oscillations ne s'amorcent pas dès que R' atteint la valeur de la résistance totale $(R_o + r)$ du circuit, mais à une valeur plutôt supérieure à cause, entre autres, du terme $\frac{L}{R_{osc} C}$ dû à l'oscilloscope.

Donc, pour que l'oscilloscope utilisé comme appareil de mesure ne fausse pas la valeur de la résistance d'amorçage des oscillations, il faut réduire la valeur du terme $\frac{L}{R_{osc} C}$ au maximum, ce qui revient à avoir un très petit quotient $\frac{L}{C}$.

Pour cela, il faut choisir une petite valeur pour L et une grande valeur pour C .

Contre exemple: Avec $R_o + r = 250 \Omega$, $R_{osc} = 1 \text{ M}\Omega$, $L = 1 \text{ H}$ et $C = 1 \text{ mF}$, $\frac{L}{R_{osc} C} = 4(R_o + r)$!

C'est évidemment un très mauvais choix : au lieu que l'oscillateur accroche pour R' légèrement supérieure à 250Ω , les oscillations ne s'amorcent que pour $R' = 1250 \Omega$.

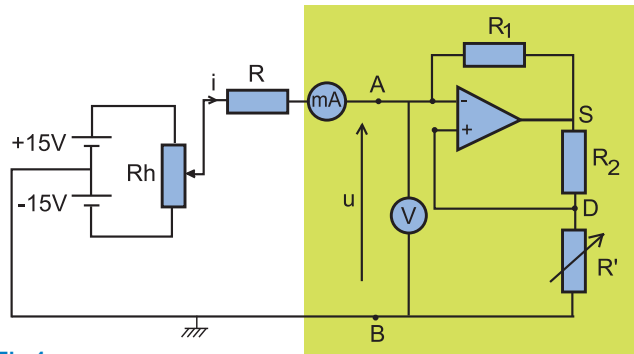


Fig.4

Dipôle à résistance négative

En savoir plus

Amorçage et stabilisation des oscillations entretenues

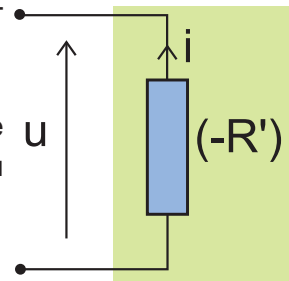
On sait que l'on peut simuler à l'aide d'un amplificateur opérationnel, un dipôle à résistance négative qui peut jouer le rôle de générateur d'entretien des oscillations d'un circuit RLC série. En fait, la tension entre ses bornes s'écrit en convention générateur : $u = R' i$.

La puissance mise en jeu est $p = - u \cdot i = - R' i^2 < 0$.

Donc, on vérifie bien qu'il s'agit d'un dipôle générateur dit à résistance négative ; il est caractérisé par le pouvoir de maintenir une tension u entre ses bornes proportionnelle à l'intensité du courant qu'il débite.

$u = k i$, où k est une constante ayant la dimension d'une résistance :

$$k = R.$$



On a vu dans le cours que, sans un tel dipôle à résistance négative qui est un réservoir d'énergie, les oscillations libres d'un circuit RLC série s'amortissent inévitablement. Sans avoir besoin de charger le condensateur au préalable, comme dans le montage de la figure 6 (p. 118), lorsque la résistance R' est légèrement supérieure à R , les oscillations commencent avec une très petite amplitude : c'est l'amorçage (ou l'accrochage).

Après le démarrage, les oscillations s'amplifient au fur et à mesure que R' augmente.

Mathématiquement, leur amplitude continue à augmenter indéfiniment si l'on reste dans le modèle linéaire ($u = - R' i$ en convention récepteur).

Par conséquent, la stabilisation des oscillations entretenues exige la présence d'éléments non linéaires dans le système oscillant, ce qui n'est pas impossible car tous les composants électroniques ont des limites de fonctionnement linéaire : l'amplificateur opérationnel par exemple ne fonctionne en régime linéaire que si $\varepsilon = V_{E+} - V_{E-} = 0$, c'est-à-dire $-15 \text{ V} < u_s < +15 \text{ V}$, sinon u_s sature : u_s ne suit plus u_e ; elle reste égale à $\pm U_{\text{sat}}$.

Dans le cas de notre montage :

en régime linéaire, $u_s = - (R' + R_2) i$.

Or $R_2 = R_1$ et $u = - R' i$. Donc, $u_s = \frac{R' + R_1}{R'} u$, ce qui signifie : $u = \frac{R'}{R' + R_1} u_s$, où $- U_{\text{sat}} < u_s < + U_{\text{sat}}$.

La condition de linéarité sur u_s se transforme alors en la condition sur u :

$$-\frac{R'}{R' + R_1} U_{\text{sat}} < u < + \frac{R'}{R' + R_1} U_{\text{sat}}$$

Et comme $u = - R' i$, on aboutit à la condition de linéarité sur i : $- I_0 < i < + I_0$, où $I_0 = \frac{U_{\text{sat}}}{R' + R_1}$.

En d'autres termes, si $i > I_0$, la tension de sortie u_s sature à $\pm U_s$ et les oscillations entretenues ne sont plus quasi-sinusoïdales, elles deviennent pratiquement rectangulaires.

Ainsi, on saisit pourquoi lorsque R' atteint une certaine valeur très supérieure à la résistance R du circuit RLC série, les oscillations deviennent écrêtées, car si R' augmente, I_0 diminue et l'intervalle de linéarité $[-I_0, +I_0]$ devient plus petit.

D'ailleurs, il est évident que l'augmentation de R_1 peut avoir le même effet que l'augmentation de R' .

ILLUSTRATION GRAPHIQUE

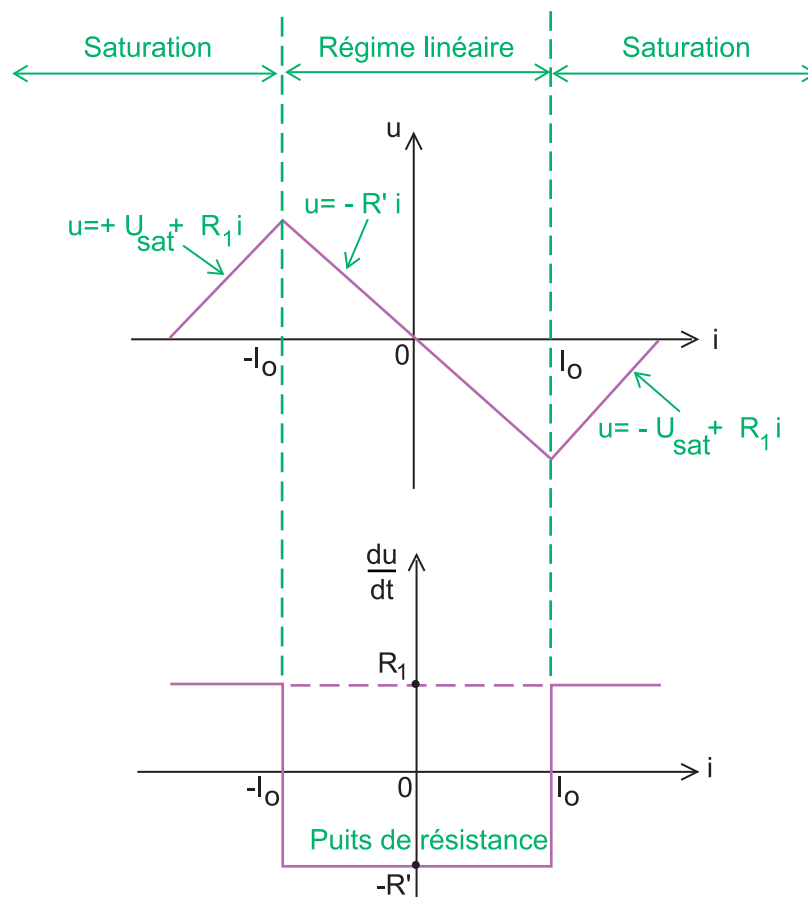
- En régime linéaire : $u = -R' i$. (1)

- A la saturation, le signe de u_s est lié à celui de la tension ε qui n'est pas nulle.

* Si $\varepsilon > 0$, $u_s = +U_{sat}$, d'où $u = +U_{sat} + R_1 i$ (2)

* Si $\varepsilon < 0$, $u_s = -U_{sat}$, d'où $u = -U_{sat} + R_1 i$ (3)

Ce qui se traduit graphiquement par une caractéristique $u = f(i)$ sous forme de N.



Donc, la stabilité des oscillations est assurée par l'existence de ce puits connu par les physiciens sous le nom de puits de résistance négative.

Objectifs

- ◆ Distinguer, en régime forcé, le résonateur de l'excitateur.
- ◆ Visualiser simultanément à l'oscilloscope la tension excitatrice $u(t)$ et l'intensité du courant $i(t)$.
- ◆ Mesurer l'amplitude et la fréquence d'une grandeur oscillante en régime forcé sinusoïdal.
- ◆ Déterminer le déphasage entre la tension excitatrice $u(t)$ et l'intensité du courant $i(t)$.
- ◆ Mettre en évidence expérimentalement le phénomène de résonance d'intensité.
- ◆ Établir l'expression de l'intensité maximale I_m du courant oscillant en fonction de la fréquence des excitations.
- ◆ Interpréter théoriquement le phénomène de résonance.
- ◆ Calculer la puissance moyenne absorbée par un oscillateur électrique.
- ◆ Expliquer l'importance du facteur de puissance dans les transformations de l'énergie électrique.

Prérequis

SAVOIR	SAVOIR FAIRE
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Définir un oscillateur. ◆ Caractériser une grandeur oscillante sinusoïdale par sa période, son amplitude et sa phase initiale. ◆ Écrire les relations : $T = \frac{2\pi}{\omega}$ et $N = \frac{1}{T}$ ◆ Définir les valeurs maximale I_m et efficace I de l'intensité du courant alternatif. ◆ Définir les valeurs maximale U_m et efficace U d'une tension alternative. ◆ Écrire les relations : $I_m = I\sqrt{2}$ et $U_m = U\sqrt{2}$ ◆ Écrire les relations : $E_C = \frac{q^2}{2C}$ et $E_L = \frac{1}{2} Li^2$ 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Reconnaître un oscillateur. ◆ Visualiser à l'oscilloscope : <ul style="list-style-type: none"> - une tension électrique, - une intensité de courant. ◆ Déterminer graphiquement la période et l'amplitude d'une grandeur électrique oscillante. ◆ Calculer la période propre d'un oscillateur RLC série. ◆ Établir l'équation différentielle régissant les oscillations libres d'un circuit RLC série par application de la loi des mailles. ◆ Calculer l'énergie totale d'un oscillateur RLC série.