

ETUDE D'UNE PUCE ELECTRONIQUE : L'ALI

MATERIEL MIS A DISPOSITION :

- ✓ 1 Oscilloscope 4 voies
- ✓ 1 GBF arbitraire
- ✓ 1 alimentation +15V/-15V
- ✓ 1 plaquette LAB
- ✓ Petits fils courts
- ✓ 2 boîtes de résistance (à décades) précision 1%
- ✓ 1 boîte de capacités (à décades)
- ✓ Composantes libres divers dont : diodes à jonction 1N4007 ; AO TL081, résistances, capacités (notamment 1 μ F)
- ✓ 1 potentiomètre (1k Ω ou 10k Ω)
- ✓ 2 câbles coaxiaux+ prise en « T »+ BNC
- ✓ 1 pont de mesures pour mesurer les résistances, inductances et capacités avec sa notice.
- ✓ 1 multimètre.
- ✓ Interrupteur

PREREQUIS :

- ✓ Amplificateur linéaire (ALI)
- ✓ Montage intégrateur passif, montage intégrateur actif.
- ✓ Étude de signaux périodiques non sinusoïdaux : période, amplitude, valeur efficace, valeur moyenne, rapport cyclique, décomposition en série de Fourier, spectre de Fourier
- ✓ Acquisition de signaux périodiques mais non sinusoïdaux, critère de Shannon.
- ✓ Mesure de déphasage à l'oscilloscope ou à l'aide d'une carte d'acquisition.

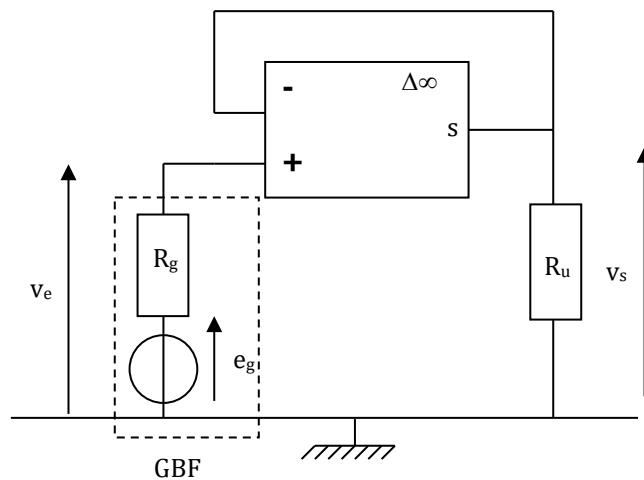
ALI en régime linéaire : Filtres

A FAIRE EN PREPARATION

- ✓ Lire l'intégralité de l'énoncé et travailler sur l'interprétation des résultats attendus.

I. ETUDE DU MONTAGE SUIVEUR.

1. PRESENTATION DU MONTAGE.



Rappels :

- ✓ Ne pas appliquer une tension sur les entrées de l'AO lorsque l'alimentation +15V, -15V n'est pas branchée. Au début du TP brancher l'alimentation, ainsi que la masse, avant d'utiliser le générateur et en fin de TP, supprimer la tension d'entrée avant d'éteindre l'alimentation +15V, -15V.
- ✓ Observer constamment V_s à l'oscilloscope pour vérifier le fonctionnement linéaire. $|V_s| < V_{sat}$

2. FONCTION PRINCIPALE DU MONTAGE.

a. ETUDE THEORIQUE.

- ✓ En considérant l'AO idéal, donner la valeur de V_s en fonction de V_e et les différents paramètres du montage si nécessaire.

b. ETUDE PRATIQUE.

Régler le GBF de manière à obtenir une tension sinusoïdale, fixer e_g (valeur efficace du signal d'entrée) à environ 5V et la fréquence générateur à 500 Hz. Fixer R_u à 10kΩ. Visualiser à l'oscilloscope les tensions d'entrée et de sortie. Faire varier R_u entre 10kΩ et l'infini. Conclusion ?

3. RECHERCHE DES FRONTIERES DU DOMAINE DE LINEARITE.

a. SATURATION DE LA TENSION DE SORTIE ET DU COURANT DE SORTIE

- ✓ Fixer R_u à l'infini et prendre une tension d'entrée sinusoïdale de fréquence 500 Hz. Augmenter e_g , à partir de 5V, et observer la tension de sortie. Conclusion ?
- ✓ Remplacer la tension du générateur à 5V et diminuer progressivement la résistance R_u , en partant d'une valeur de 10kΩ et retrouver le phénomène de saturation sur la sortie à partir d'une résistance limite R_o . En réalité

l'amplificateur opérationnel possède une fonction limitatrice du courant de sortie qui ne peut-être supérieur à environ 25mA. Comparer la valeur de R_o mesurée à la valeur de R_o prévue connaissant le courant limite.

b. VITESSE DE BALAYAGE.

- ✓ Reprendre R_u infinie et imposer en entrée une tension sinusoïdale de fréquence 500 Hz et de valeur efficace : $e_g = 5V$. Augmenter progressivement la fréquence du générateur et observer que le signal de sortie se triangularise à partir de quelques dizaines de kHz. Ce phénomène est du à la limitation de la vitesse de balayage pour la tension de sortie. On introduit alors la grandeur : $\sigma = \left(\frac{dv_s(t)}{dt} \right)_{\max}$ appelée vitesse de balayage ou slew-rate.
- ✓ En mesurant la pente du signal triangulaire, évaluer la valeur de σ .
- ✓ Si la tension d'entrée est sinusoïdale : $v_e(t) = e_g \sqrt{2} \cos(\omega t)$, on obtient, dans le domaine de linéarité de l'AO : $v_s(t) = e_g \sqrt{2} \cos(\omega t)$. On en déduit alors la condition pour que le phénomène de slew-rate apparaisse : $\omega \cdot e_g \sqrt{2} \geq \sigma$. On peut donc vérifier que si l'on diminue e_g , ou si l'on diminue ω , la triangulation du signal de sortie disparaît.
- ✓ Recommencer les mesures en prenant une tension d'entrée en créneaux (+5V,-5V).

c. TENSION DE DECALAGE OU OFFSET.

- ✓ Placer la tension d'entrée du générateur à 0 : pour cela, il est nécessaire de débrancher le générateur et de relier l'entrée non inverseuse à la masse.
- ✓ Observer la tension de sortie et vérifier que celle-ci n'est pas nulle. : donner un ordre de grandeur de cette tension de décalage.

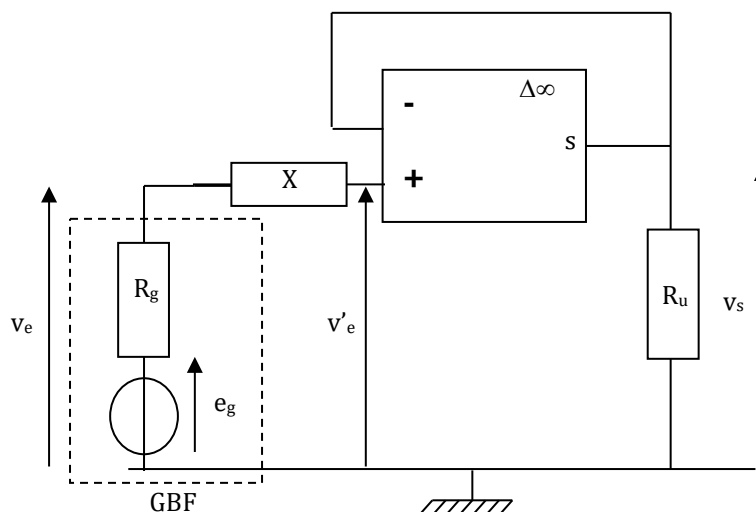
4. MESURES DE PARAMETRES LINEAIRES.

a. REPONSE FREQUENTIELLE.

- ✓ Tracer rapidement le diagramme de Bode (uniquement le gain) du montage et vérifier que l'AO se comporte comme un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure se situe vers 1 MHz.
- ✓ Prendre la précaution de choisir une tension d'entrée suffisamment faible de manière à ne pas être limité en sortie par la vitesse de balayage.

b. MESURE DE LA RESISTANCE D'ENTREE.

- ✓ Effectuer le montage ci-dessous, X étant une résistance variable (boite AOIP), R_u infinie.

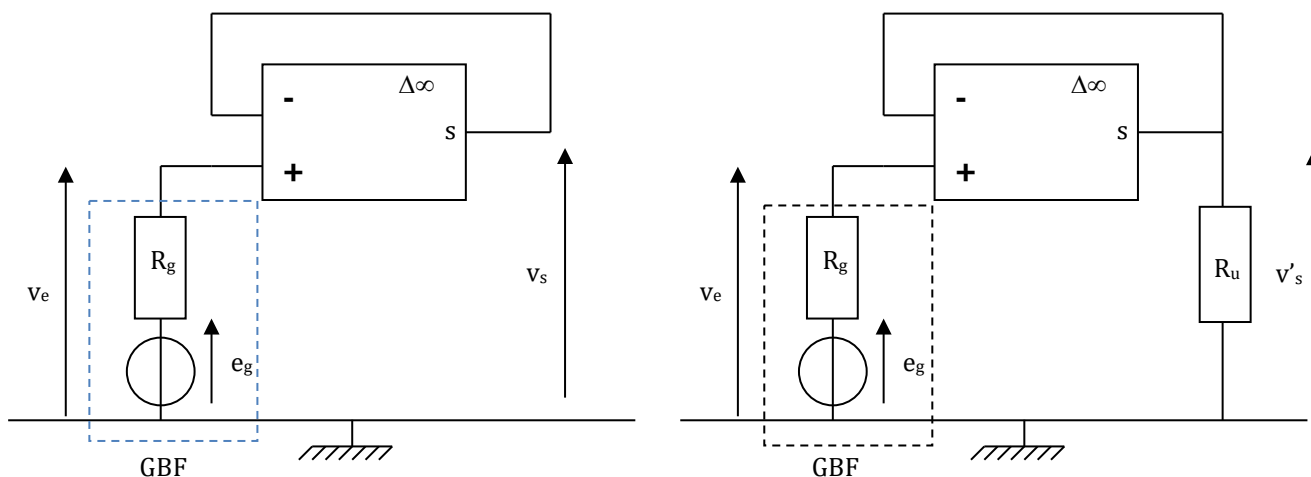


- ✓ On règle celle-ci de manière à obtenir $V'_e = \frac{V_e}{2}$. Montrer que dans ce cas là, on obtient $X = R_{ea}$: résistance correspondant à la résistance d'entrée de l'AO placée en dérivation avec la résistance d'entrée du voltmètre.

Remarque : A fréquence élevée, l'entrée correspond à une résistance en dérivation avec un condensateur et on peut ainsi obtenir un déphasage entre V'_e et V_e .

c. MESURE DE LA RESISTANCE DE SORTIE.

- ✓ Effectuer successivement les deux montages ci-dessous, où R_u est formée de boîtes AOIP ($\times 1$, $\times 10$, 100).



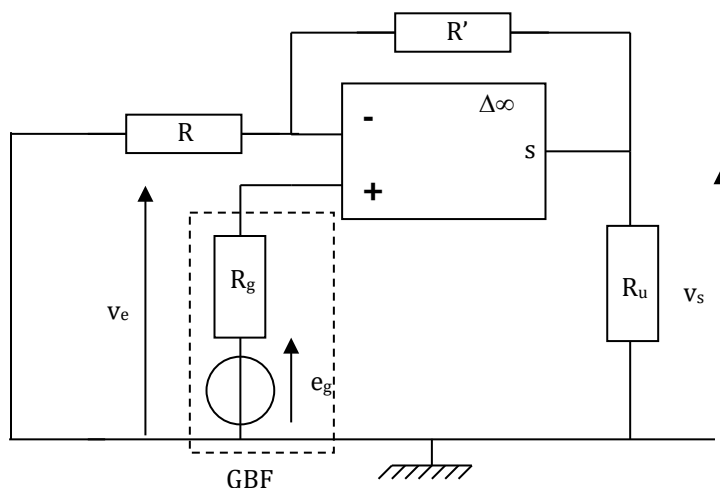
- ✓ Montrer que $\frac{V'_s}{V_s} = \frac{R_u}{R_u + R_s}$ où R_s est la résistance de sortie de l'AO. En déduire un ordre de grandeur de R_s .

d. ETUDE DU CIRCUIT EN REGIMES NON SINUSOÏDAUX.

- ✓ Observer le signal de sortie lorsque le signal d'entrée est en créneaux.
- ✓ Remarquer des oscillations à chaque changement des valeurs de e_g . Ceci est dû au fait que l'AO est un filtre passe-bas, et qu'ainsi les harmoniques hautes du signal sont coupées.

II. MONTAGE NON-INVERSEUR.

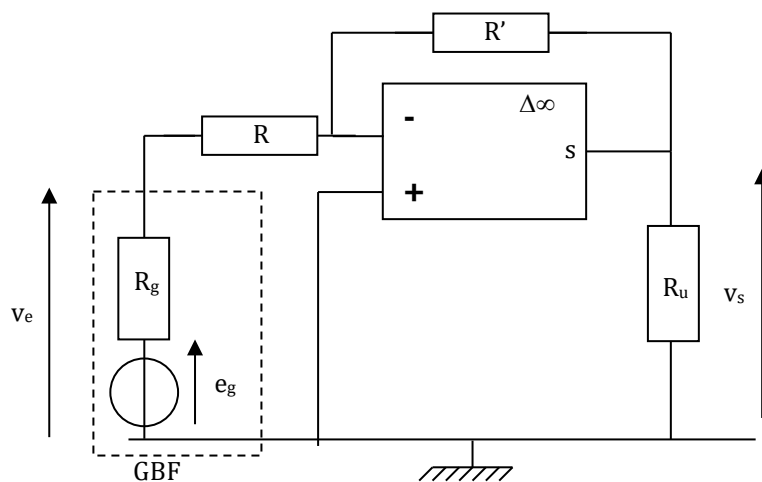
- ✓ Effectuer le montage suivant (R_u infinie) :



- ✓ Vérifier que le gain maximal est $G = \frac{R + R'}{R}$.
- ✓ Tracer le diagramme de Bode du filtre, Interpréter sachant que l'ALI seul se comporte comme un filtre passe-bas du premier ordre.

III. MONTAGE INVERSEUR.

- ✓ Effectuer le montage ci-dessous (R_u infinie) :

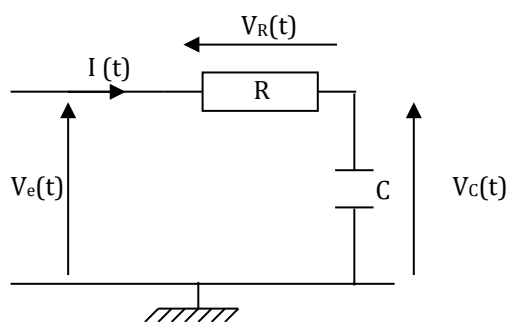


- ✓ Vérifier que le gain maximal est $G = -\frac{R'}{R}$
- ✓ Tracer le diagramme de Bode du gain du filtre sachant que l'ALI seul se comporte comme un filtre passe bas du premier ordre.

IV. PRINCIPE DU MONTAGE INTEGRATEUR

1. PRINCIPE

- On considère le montage suivant :



- Montrer que lorsque $V_c(t) \ll V_R(t)$ alors :

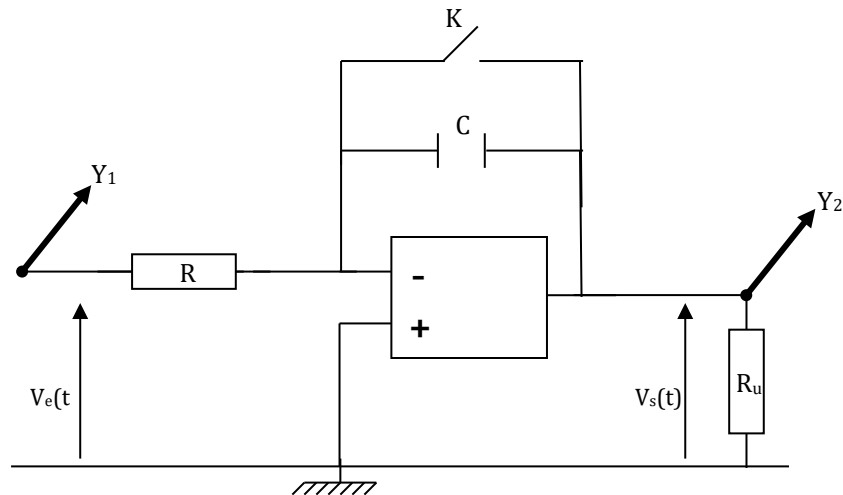
$$V_c(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t V_e(t) dt + V_c(0)$$

Ainsi le critère pratique pour réaliser un montage intégrateur sera :

$$RC \gg \text{période du phénomène étudié}$$

2. MONTAGE A UN AO NE FONCTIONNANT PAS...

a. SCHEMA ET PRINCIPE



- ✓ On prendra : R boîte AOIP $\times 10^4 \Omega$, $C = 1 \mu F$ et $R_u = 5 k\Omega$
- ✓ Montrer que, pour un AO idéal, K étant ouvert :

$$V_s(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_e(t) dt + V_s(0)$$

Remarque : L'interrupteur K permet de réaliser une remise à zéro de $V_s(t)$; si on ouvre K à $t = 0$, alors $V_s(0) = 0 V$ et donc $V_s(t)$ est proportionnelle à $\int_0^t V_e(t) dt$.

b. OBSERVATION DE LA FONCTION REALISEE

- ✓ Réaliser le montage ci-dessus où $V_e(t)$ est une tension sinusoïdale fournie par un GBF de la forme : $V_e(t) = E\sqrt{2} \cos(2\pi\nu t)$ où E est de l'ordre de quelques volts et ν est de l'ordre de 500 Hz. Attention ! On veillera à minimiser la composante continue du signal d'entrée $V_e(t)$.
- ✓ Montrer que :

$$V_s(t) = \left(\frac{-E}{2\pi\nu RC} \right) \sqrt{2} \sin(2\pi\nu t) = \left(\frac{E}{2\pi\nu RC} \right) \sqrt{2} \cos(2\pi\nu t + \frac{\pi}{2})$$

- ✓ Observer le signal $V_s(t)$ sur la voie Y_2 en position continue (entrée DC). Décharger la capacité C à l'aide de K puis l'ouvrir de nouveau. On observe en général pendant un temps très court le signal $V_s(t)$ qui disparaît ensuite de l'écran. En changeant le calibre de Y_2 , on remarque la saturation de l'AO. En effet, ce circuit intègre également la composante continue, due à la valeur moyenne de $V_e(t)$ non nulle (Offset pas rigoureusement nul) et aux défauts de l'AO ($\varepsilon = V_+ - V_- \neq 0$ et les courants de polarisation i_+ et i_- non nuls), jusqu'à saturation à $\pm V_{sat}$

3. MONTAGE PRATIQUE A UN AO

a. PRINCIPE

On place une résistance R' en parallèle avec la capacité C afin qu'elle se décharge lentement dans R' , ce qui permet d'éviter la saturation de l'AO.

b. CHOIX DE LA RESISTANCE R'

- ✓ Etude qualitative : Si R' est très grande, le condensateur se décharge trop lentement et on atteint la saturation de l'AO. Si R' est trop faible, le système ne fonctionne plus en intégrateur.
- ✓ Etude en régime sinusoïdal :
- ✓ Montrer qu'en régime sinusoïdal, la fonction de transfert du filtre est :

$$\underline{H} = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R'}{R} \cdot \frac{1}{1 + jR'C\omega}$$

- ✓ En déduire que le circuit fonctionne en intégrateur si $R'C\omega \gg 1$ et que l'on opère alors à une intégration et à un déphasage de π .

c. OBSERVATION DE LA FONCTION REALISEE

- ✓ Ajouter au montage étudié au paragraphe 2 la résistance $R' = 100 \text{ k}\Omega$ et observer $V_s(t)$. Pour une fréquence de 1 kHz , vérifier que le montage fonctionne correctement en intégrateur.

Remarque : Si le signal d'entrée comporte une composante continue importante, on peut observer encore la saturation de l'AO ; il faut donc diminuer R' ou mieux diminuer cette composante continue.

- ✓ Changer la forme du signal d'entrée et observer $V_s(t)$:
 - Pour $V_e(t)$ signal créneau $(-E, E)$, montrer que $V_s(t)$ est une fonction en dents de scie de pentes $\pm \frac{E}{RC}$
 - Pour $V_e(t)$ signal triangulaire de pente $\pm at$, montrer que $V_s(t)$ est constitué d'arc de paraboles.

d. ETUDE DU DOMAINE D'UTILISATION EN REGIME SINUSOÏDAL

- ✓ A partir de la fonction de transfert $\underline{H}$ du montage calculée précédemment, faire une étude théorique du gain $G(\omega) = 20 \cdot \log(H)$ du montage
- ✓ Tracer le diagramme de Bode du montage à partir de la mesure de $G(\omega)$.
- ✓ En déduire le domaine d'utilisation du montage.

L'ALI EN REGIME NON LINEAIRE : LES MULTIVIBRATEURS

Les multivibrateurs astables sont des montages permettant de générer des signaux périodiques mais non sinusoïdaux à partir des tensions des composants électroniques uniquement ($\pm 15V$) Les multivibrateurs analogiques comportent les deux éléments essentiels suivants :

- ✓ Un intégrateur (passif ou actif).
- ✓ Un comparateur à hystérésis.

A FAIRE EN PREPARATION

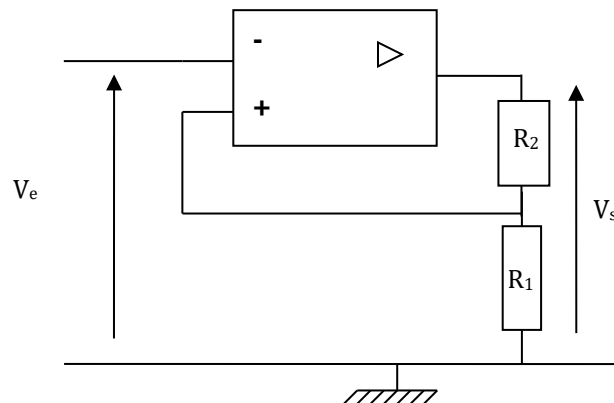
- ✓ Etudier les trois documents et comprendre le fonctionnement des trois multivibrateurs.
- ✓ Choisir des valeurs adéquates pour les différents composants.

ÉNONCE DU TP (2H)

- ✓ Etudier le fonctionnement d'un comparateur à hystérésis en choisissant des valeurs appropriées pour les résistances R_1 et R_2 . Déterminer expérimentalement la valeur de V_o et la comparer à la valeur prévue par la théorie.
- ✓ Propose un protocole pour élaborer un signal créneau de rapport cyclique $\frac{1}{2}$, d'amplitude $5V$ et de fréquence $1kHz$.
- ✓ Proposer un protocole pour élaborer un signal en dent de scie et un signal créneau, de rapport cyclique $\frac{1}{4}$, d'amplitude $5V$ et de fréquence $1 kHz$.

DOCUMENT 1 : COMPAREUR A HYSTERESIS.

1. SCHEMA.

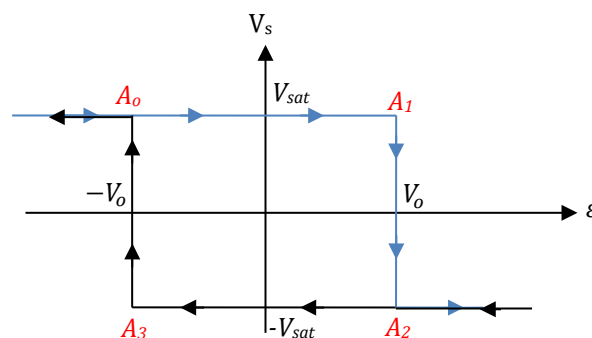


2. FONCTIONNEMENT.

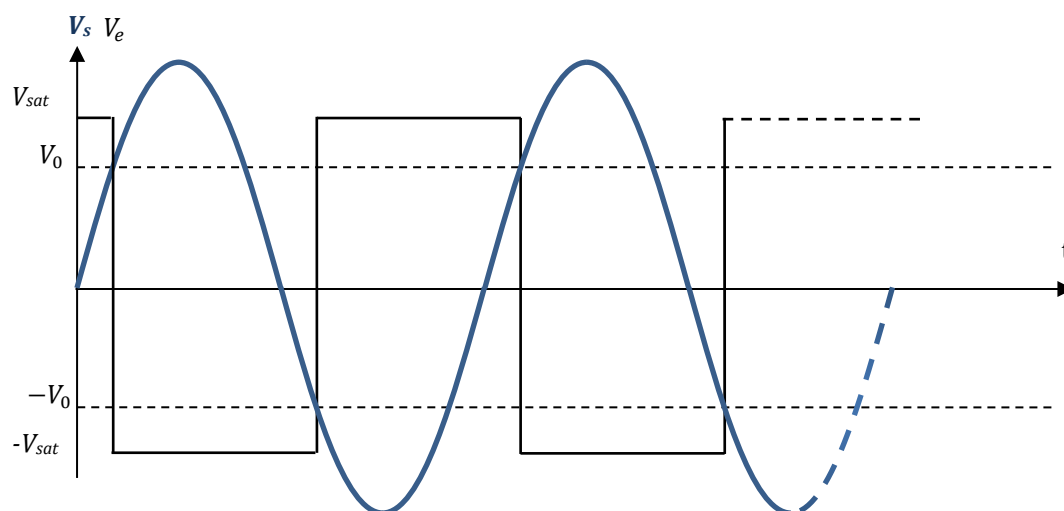
L'AO fonctionnant en régime non linéaire, on a : $V_s = \pm V_{sat}$ suivant la valeur de $\varepsilon = V_+ - V_-$

Le diviseur de tension en V_+ donne : $V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s = \pm V_0$

- Supposons que $V_s = V_{sat}$ alors $V_+ = V_0$
 $\Rightarrow$ Ceci est vrai tant que $V_+ > V_-$ et donc tant que $V_e < V_0$
 $\Rightarrow$ Si l'on part de l'état $V_s = V_{sat}$ avec $V_e < V_0$ et que l'on augmente V_e alors la tension V_s restera égale à V_{sat} tant que V_e n'aura pas atteint V_0 . Lorsque V_e atteint V_0 (point A_1), V_s passe de V_{sat} à $-V_{sat}$: c'est la commutation (passage de A_1 à A_2).
- Supposons maintenant que $V_s = -V_{sat}$ alors $V_+ = -V_0$
 $\Rightarrow$ Ceci est vrai tant que $V_+ < V_-$ et donc tant que $V_e > -V_0$
 $\Rightarrow$ Si l'on part de l'état $V_s = -V_{sat}$ avec $V_e > -V_0$ et que l'on diminue V_e alors la tension V_s restera égale à $-V_{sat}$ tant que V_e n'aura pas atteint $-V_0$. Lorsque V_e atteint $-V_0$ (point A_3), V_s passe de $-V_{sat}$ à V_{sat} : c'est la commutation (passage de A_3 à A_0).

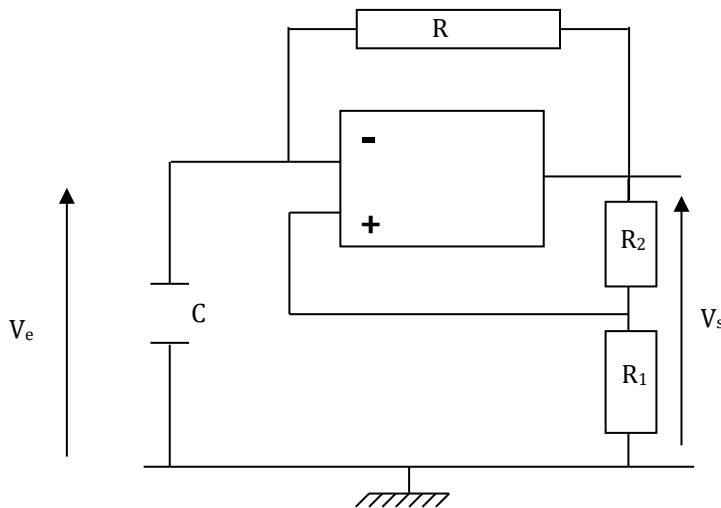


Exemple : dans le cas où $V_e(t) = E \sin \omega t$ on obtient :



DOCUMENT 2 : MULTIVIBRATEUR ASTABLE A 1 ALI

1. MONTAGE.



2. FONCTIONNEMENT.

On repère tout de suite la présence d'un intégrateur (circuit RC) et d'un comparateur à hystérésis dans le montage.

INTEGRATEUR

Le courant d'entrée dans l'ALI idéal étant nul, on a un circuit RC série.

⇒ L'équation différentielle vérifiée par $V_e(t)$ (tension aux bornes du condensateur, variant donc de manière continue) est :

$$\frac{dV_e}{dt} + \frac{1}{\tau} V_e = \frac{1}{\tau} V_s$$

⇒ Lorsque $V_s = +V_{sat}$, le condensateur se charge sous une tension totale $+V_{sat}$ et quand $V_s = -V_{sat}$, le condensateur se décharge sous une tension totale $-V_{sat}$.

COMPARATEUR A HYSTERESIS.

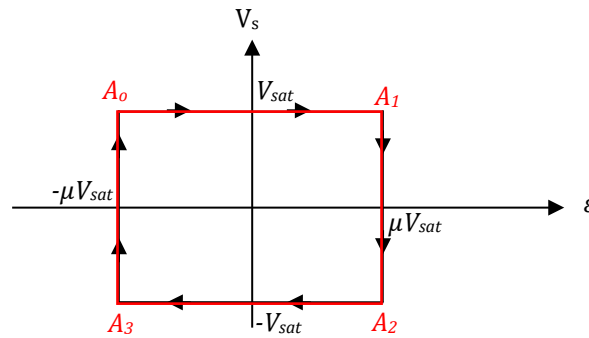
On note $\mu = \frac{V_o}{V_{sat}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Le montage évoluant de manière périodique, le point de fonctionnement, dans la caractéristique de transfert ($V_s, \varepsilon = V_+ - V_-$) évolue périodiquement entre les points A_0, A_1, A_2, A_3 .

Les commutations ont lieu entre les points $(A_1; A_2)$ et $(A_3; A_0)$

Entre A_0 et A_1 , $V_s = +V_{sat}$, le condensateur se charge et donc la tension $V_- = V_e$ augmente jusqu'à atteindre μV_{sat} , on a alors commutation.

Entre A_2 et A_3 , $V_s = -V_{sat}$, le condensateur se décharge et donc la tension $V_- = V_e$ diminue jusqu'à atteindre $-\mu V_{sat}$, on a alors commutation.



Les temps de réponse des intégrateurs étant identiques, on obtiendra des signaux de rapport cyclique égal à 1/2

FONCTIONNEMENT

Supposons qu'à $t = 0$, le système commute de A_3 vers A_0 (le temps de commutation étant négligeable devant la période, on suppose qu'à $t = 0^-$ le point de fonctionnement est en A_3 et à $t = 0^+$ le point de fonctionnement est en A_0)

$\Rightarrow$ A $t = \frac{T^-}{2}$ le point de fonctionnement est en A_1 ; à $t = \frac{T^+}{2}$ le fonctionnement est en A_2 et à $t = T^-$ le point de fonctionnement est en A_3 .

Notons qu'à $t = 0^-$, on a : $V_s(0^-) = -V_{sat}$ et $V_e(0^-) = -\mu V_{sat}$

Et qu'à $t = \frac{T^-}{2}$, on a : $V_s\left(\frac{T^-}{2}\right) = +V_{sat}$ et $V_e\left(\frac{T^-}{2}\right) = +\mu V_{sat}$

- Évolution pour $t \in \left[0, \frac{T}{2}\right]$

$$V_s = +V_{sat} \text{ et donc : } \frac{dV_e}{dt} + \frac{1}{\tau} V_e = \frac{1}{\tau} V_{sat}$$

$$\text{Sachant que } V_e(0^+) = V_e(0^-) = -\mu V_{sat}, \text{ on en déduit : } V_e(t) = V_{sat} \left(1 - (1 + \mu) \exp -\frac{t}{\tau}\right)$$

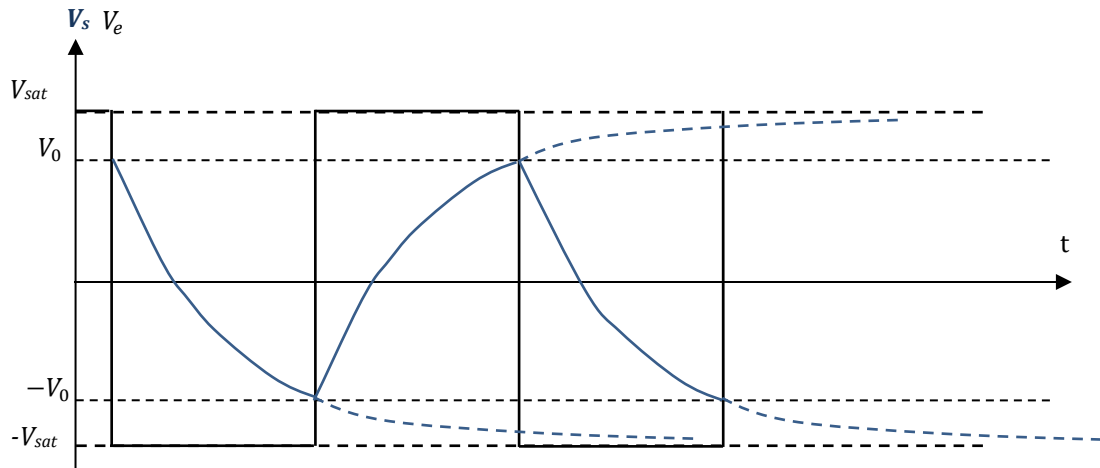
$$\text{Sachant que } V_e\left(\frac{T^-}{2}\right) = +\mu V_{sat}, \text{ on en déduit la relation : } V_e\left(\frac{T^-}{2}\right) = +\mu V_{sat} = V_{sat} \left(1 - (1 + \mu) \exp -\frac{T}{2\tau}\right)$$

- Évolution pour $t \in \left[\frac{T}{2}, T\right]$

$$V_s = -V_{sat} \text{ et donc : } \frac{dV_e}{dt} + \frac{1}{\tau} V_e = -\frac{1}{\tau} V_{sat}$$

$$\text{Sachant que } V_e\left(\frac{T^+}{2}\right) = V_e\left(\frac{T^-}{2}\right) = +\mu V_{sat}, \text{ on en déduit : } V_e(t) = -V_{sat} \left(1 - (1 + \mu) \exp \left(-\frac{t - \frac{T}{2}}{\tau}\right)\right)$$

$$\text{Sachant que } V_e(T^-) = -\mu V_{sat}, \text{ on en déduit la relation : } V_e(T^-) = -\mu V_{sat} = -V_{sat} \left(1 - (1 + \mu) \exp -\frac{T}{2\tau}\right)$$

**PERIODE :**

Les deux résultats ::

$$V_e\left(\frac{T^-}{2}\right) = +\mu V_{sat} = V_{sat} \left(1 - (1 + \mu) \exp -\frac{T}{2\tau}\right)$$

et :

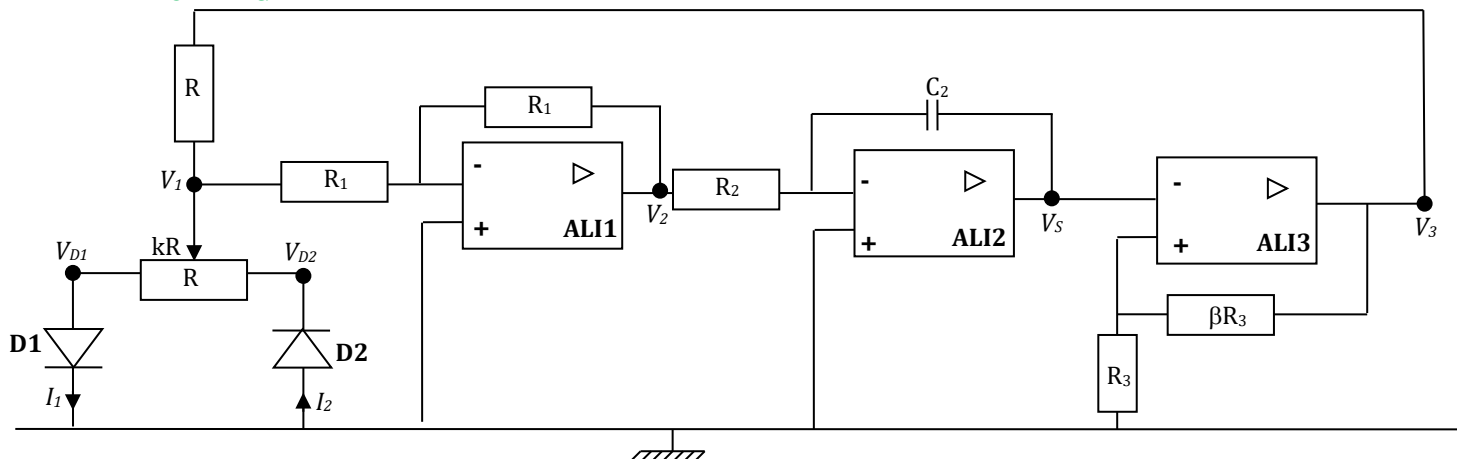
$$V_e(T^-) = -\mu V_{sat} = -V_{sat} \left(1 - (1 + \mu) \exp -\frac{T}{2\tau}\right)$$

correspondent à la même relation permettant de trouver T :

$$T = 2RC \ln \frac{1 + \mu}{1 - \mu}$$

MULTIVIBRATEUR A 3 ALI ET DIODES.

1. MONTAGE.



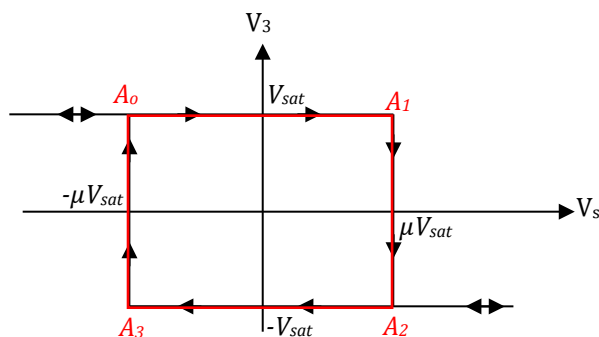
2. FONCTIONNEMENT

FONCTIONNEMENT DES ALI

ALI1 : Montage inverseur $\Rightarrow V_2 = -V_1$

ALI2 : Montage intégrateur $\Rightarrow \frac{dV_s}{dt} = -\frac{V_2}{R_2 C_2}$ soit $V_s(t) = V_s(0^+) - \frac{1}{R_2 C_2} \int_0^t V_2(t) dt$

ALI3 : Comparateur à hystérésis $\Rightarrow V_s = V_{3+} = \frac{V_3}{\beta + 1} = \mu V_3$ où $V_3 = \pm V_{sat}$



MONTAGE A DIODE :

Supposons la diode D_1 passante ($i_1 > 0, V_{D1} = 0$)

$\Rightarrow V_1 = k R i_1$ avec $i_1 > 0$ et donc $\Rightarrow V_1 > 0$

Supposons de plus la diode D_2 passante ($i_2 > 0, V_{D2} = 0$)

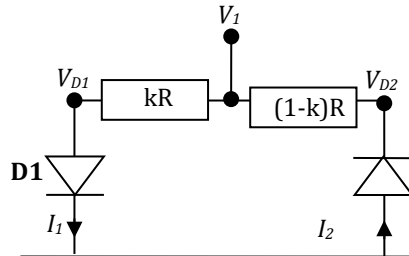
$$\Rightarrow V_1 = - (1-k).R.i_2 \text{ avec } i_2 > 0 \text{ et donc : } \Rightarrow V_1 < 0 !$$

$\Rightarrow$ Incompatible !

Conclusion :

Si $V_1 > 0$ alors D_1 est passante et D_2 est bloquée

Si $V_1 < 0$ alors D_1 est bloquée et D_2 est passante.



ÉVOLUTION DE L'OSCILLATEUR :

Plaçons nous à $t=0^+$ en A_0 (

$$\begin{cases} V_3(0^-) = -V_{sat}; V_3(0^+) = V_{sat} \\ V_s(0^-) = V_s(0^+) = -\mu V_{sat} \\ \left(\frac{dV_s}{dt} \right) > 0 \end{cases}$$

Or $V_1 = -V_2 = R_2 C_2 \underbrace{\frac{dV_s}{dt}}_{>0} > 0 \Rightarrow D_1 \text{ est passante et } D_2 \text{ est bloquée}$

$\Rightarrow$ L'application du théorème de Millman en V_1 donne **(en choisissant $R \ll R_1$, on peut négliger le courant**

passant dans R_1) : $V_1 = \frac{\frac{0}{kR} + \frac{V_3}{R}}{\frac{1}{kR} + \frac{1}{R}} = \frac{k}{k+1} V_{sat}$

D'où : $\frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{R_2 C_2} V_1 = \frac{1}{R_2 C_2} \cdot \frac{k}{k+1} V_{sat}$

$\Rightarrow V_s(t) = \underbrace{V_s(0^+)}_{-\mu V_{sat}} + \underbrace{\frac{1}{R_2 C_2} \cdot \frac{k}{k+1} V_{sat} t}_{k^+}$

$\Rightarrow V_s(t) = -\mu V_{sat} + k^+ V_{sat} t$

$\Rightarrow V_s$ augmente donc jusqu'à μV_{sat} on a alors commutation (A_1)

Calculons le temps t_1 pour lequel on a commutation :

$$V_s(t_1) = -\mu V_{sat} + k^+ \cdot V_{sat} t_1 = \mu V_{sat}$$

$$t_1 = \frac{2\mu}{k^+} = \frac{2(k+1)}{(1+\beta)k} R_2 C_2$$

Après commutation, le point de fonctionnement de l'oscillateur est en A₂.

$$\text{On a alors : } \begin{cases} V_3(t_1^-) = V_{sat}; V_3(t_1^+) = -V_{sat} \\ V_s(t_1^-) = V_s(t_1^+) = \mu V_{sat} \\ \left(\frac{dV_s}{dt} \right) < 0 \end{cases}$$

$$\text{Or } V_1 = -V_2 = R_2 C_2 \underbrace{\frac{dV_s}{dt}}_{<0} < 0 \Rightarrow D_2 \text{ est passante et } D_1 \text{ est bloquée}$$

$\Rightarrow$ L'application du théorème de Millman en V_1 donne **(en sachant que $R \ll R_1$, on peut négliger le courant passant dans R_1)** :

$$V_1 = \frac{\frac{0}{(1-k)R} + \frac{V_3}{R}}{\frac{1}{(1-k)R} + \frac{1}{R}} = -\frac{(1-k)}{(2-k)} V_{sat}$$

$$\text{D'où : } \frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{R_2 C_2} V_1 = -\frac{1}{R_2 C_2} \cdot \frac{(1-k)}{(2-k)} V_{sat}$$

$$\Rightarrow V_s(t) = \underbrace{V_s(t_1^+)}_{+\mu V_{sat}} - \underbrace{\frac{1}{R_2 C_2} \cdot \frac{(1-k)}{(2-k)}}_{k^- > 0} V_{sat} (t - t_1)$$

$$\Rightarrow V_s(t) = +\mu V_{sat} - k^- \cdot V_{sat} (t - t_1)$$

$\Rightarrow V_s$ diminue donc jusqu'à $-\mu V_{sat}$ on a alors commutation (A₃)

Calculons le temps t_2 pour lequel on a commutation :

$$V_s(t_2) = \mu V_{sat} - k^- \cdot V_{sat} (t_2 - t_1) = -\mu V_{sat}$$

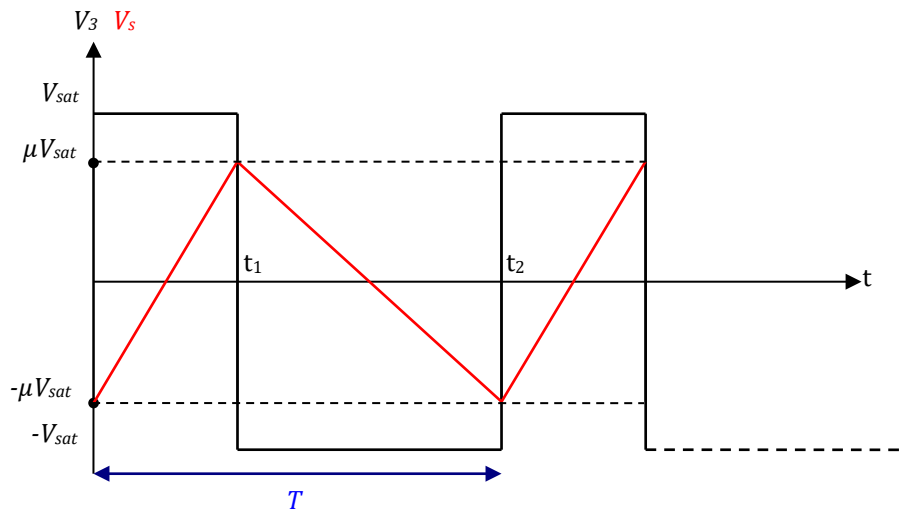
$$t_2 = t_1 + \frac{2\mu}{k^-} = \frac{2(k+1)}{(1+\beta)k} R_2 C_2 + \frac{2(2-k)}{(1+\beta)(1-k)} R_2 C_2$$

Après commutation on est à nouveau en A₀.

PERIODE DES OSCILLATIONS :

$$T = t_2 = \frac{2(k+1)}{(1+\beta)k} R_2 C_2 + \frac{2(2-k)}{(1+\beta)(1-k)} R_2 C_2$$

CHRONOGRAMMES :



Rapport cyclique :

$$\alpha = \frac{t_1}{T_2} = \frac{\frac{2(k+1)}{k}}{\frac{2(k+1)}{k} + \frac{2(2-k)}{(1-k)}} = \frac{(1-k^2)}{(1+2k-2k^2)}$$

(Pour k=1/2, on a α=1/2)