DS3 (Électronique)

Durée de l'épreuve : 4 heures
L'usage de la calculatrice ou de tout dispositif électronique est autorisé.
Des points seront attribués à la qualité de la copie (présentation, écriture, rédaction).

1. CENTRALE // PSI // 2026 : Multiplicateur numérique à modulation d'amplitude

On étudie le montage dont le schéma est donné figure 1, destiné à calculer le produit d'une tension $u(t)$ et d'une intensité $i(t)$. Le signal $u(t)$ est échantillonné selon une période d'échantillonnage T_e, ce qui renvoie les valeurs $\{u_n = u(nT_e)\}, n \in \mathbb{N}$.

On note $u_{\text{ech}}(t)$ le signal échantillonné issu d'un échantillonneur-bloqueur, tel que $\forall n \in \mathbb{N}, \forall t \in [nT_e, (n+1)T_e[$, $u_{\text{ech}}(t) = u_n$

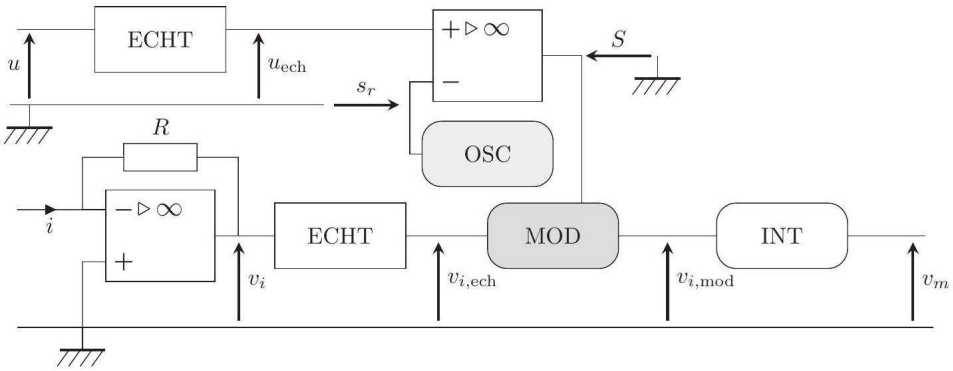
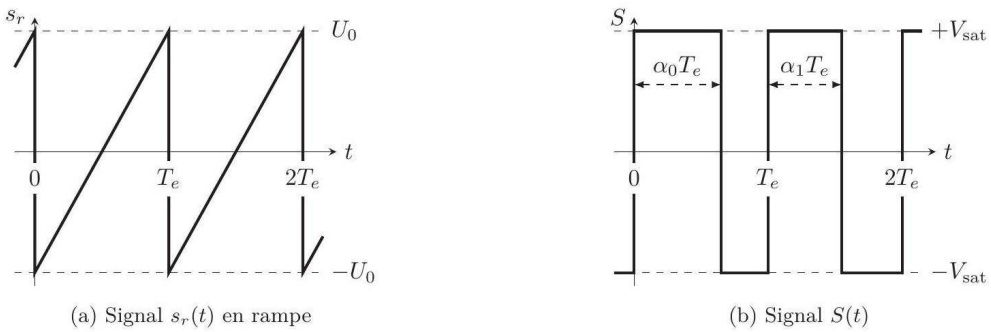


Figure 1 - Montage multiplicateur numérique. (ECHT désigne un échantillonneur, MOD le modulateur, INT l'intégrateur et OSC l'oscillateur.) L'oscillateur synchronise les deux échantillonneurs mais les contacts entre ces circuits ne sont pas représentés.

Q.1 On considère que le spectre du signal $u(t)$ est contenu dans l'intervalle de fréquence $[0, F]$. Rappeler la condition dite de Nyquist-Shannon permettant un échantillonnage correct de ce signal.

L'oscillateur OSC crée une tension périodique $s_r(t)$ en rampe, de période T_e, variant entre les tensions $-U_0$ et $+U_0$ (figure 2a) telle que $\forall t$, $|u(t)| < U_0$. Cet oscillateur synchronise les deux échantillonneurs ECHT en imposant les intervalles d'échantillonnage $[nT_e, (n+1)T_e[$.

Le signal $s_r(t)$ est comparé au signal $u_{\text{ech}}(t)$ grâce à un comparateur simple dont le signal de sortie est noté $S(t)$ (figure 2b). Les A.L.I du montage sont idéaux. Les tensions de saturation sont notées $\pm V_{\text{sat}}$.



(a) Signal $s_r(t)$ en rampe (b) Signal $S(t)$

Figure 2 – Signaux

Q.2 On a représenté figure 2b le signal $S(t)$ sur les deux premiers intervalles de temps $n = 0$ et $n = 1$. Pour chaque intervalle de temps $[nT_e, (n+1)T_e[$, la durée pour laquelle $S(t) > 0$ est notée $\alpha_n T_e$ où α_n est le rapport cyclique. Donner l'expression de $s_r(t)$ pour $t \in [nT_e, (n+1)T_e[$ puis exprimer α_n en fonction de u_n et U_0.

L'intensité $i(t)$ est appliquée à la seconde entrée du montage de la figure 1.

Q.3 Exprimer la tension $v_i(t)$ en fonction de $i(t)$ et R. Quel est l'intérêt de ce montage ?

La tension $v_i(t)$ est elle aussi échantillonnée selon les mêmes paramètres que la tension $u(t)$: on obtient en sortie de l'échantillonneur la tension $v_{i,\,\text{ech}}(t)$ telle que $\forall n \in \mathbb{N},\ \forall t \in \left[nT_e, (n+1)T_e\right[,\ v_{i,\text{ech}}(t) = v_{i,n} = v_i\left(nT_e\right)$.

Le modulateur, schématisé figure 3, reçoit en entrée $v_{i,\,\text{ech}}$. L'interrupteur K, idéal, est commandé à l'ouverture et à la fermeture par le signal S : $K \begin{cases} \text{fermé si } S(t) > 0 \\ \text{ouvert si } S(t) < 0 \end{cases}$

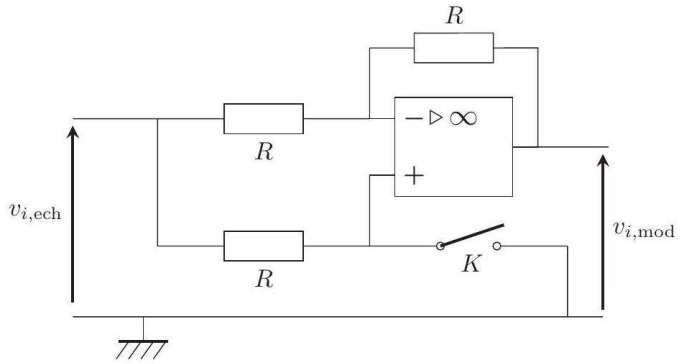


Figure 3 – Modulateur

Q.4 Le signal de sortie du modulateur est noté $v_{i,\,\text{mod}}$. Exprimer $v_{i,\,\text{mod}}$ en fonction de $v_{i,\,\text{ech}}$ selon la valeur du signal de commande S.

La tension $v_{i,\,\text{mod}}(t)$ est ensuite intégrée sur un intervalle de longueur T_e.

Q.5 Proposer le schéma d'un montage actif intégrant un signal d'entrée $v_e(t)$ par rapport au temps. Donner l'expression de la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée.

Soit $v_{i,\text{mod}}(t)$ le signal d'entrée de l'intégrateur. Celui-ci fournit en sortie la tension :

$$v_m(t) = -\frac{1}{\tau}\int_{nT_e}^{t} v_{i,\text{mod}}(u)\mathrm{d}u,\ \text{pour } t \in \left[nT_e, (n+1)T_e\right[$$

où τ est une constante caractéristique de l'intégrateur, homogène à un temps.

Q.6 Exprimer $v_{m,n} = v_m\left((n+1)T_e\right)$ en fonction de u_n, $i_n = i\left(nT_e\right)$ et des différentes constantes du montage. Montrer que l'on a bien obtenu le résultat voulu à une constante multiplicative près.

Le signal périodique nécessaire au fonctionnement du circuit est généré par un oscillateur. On étudie ici un oscillateur dit « à réseau déphaseur », à trois cellules RC (figure 4).

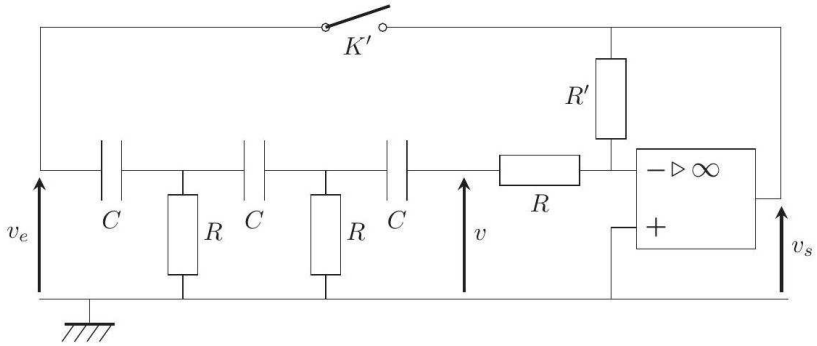


Figure 4 - Oscillateur à réseau déphaseur

La fonction de transfert des trois cellules RC est donnée par $H = \dfrac{\underline{v}}{\underline{v_e}} = \dfrac{1}{1 - \dfrac{5}{(RC\omega)^2} + \dfrac{1}{jRC\omega}\left(6 - \dfrac{1}{(RC\omega)^2}\right)}$

Q.7 Préciser la nature de ce filtre.

Q.8 Exprimer le gain $G = \dfrac{\underline{v_s}}{\underline{v}}$ de l'amplificateur.

Quand l'interrupteur K' est fermé, montrer que la tension v_s peut être sinusoïdale si G et H vérifient une condition que l'on précisera.
En déduire l'expression de la pulsation ω_{osc} du signal v_s ainsi que la valeur numérique de G.

On pose $v_s = A_{osc}\cos\left(\omega_{osc}t + \varphi_{osc}\right)$. Dans le circuit de la figure 4, aucun paramètre ne permet de contrôler l'amplitude A_{osc}. Pour pallier ce problème, la résistance R' est remplacée par une résistance R_{com} commandée en tension selon l'une des deux expressions suivantes : $R_{com} = R_0 + \dfrac{r}{1+\dfrac{A_{osc}}{V_0}}$ ou $R_{com} = R_0 - \dfrac{r}{1+\dfrac{A_{osc}}{V_0}}$.

Les grandeurs R_0, r et V_0 sont des constantes positives caractéristiques de la résistance commandée.

Q.9 Quelle est l'expression de R_{com} qui permet de stabiliser les oscillations, et pourquoi ? En particulier, quelle valeur faut-il donner à r pour obtenir $A_{osc} = 7$ V ?
On prendra $R = 5$ kΩ, $R_0 = 125$ kΩ et $V_0 = 5$ V.

2. CENTRALE // MPI // 2024 : Microphone de guitare électrique

I Aspect électrique

D'un point de vue électrique, un microphone de guitare électrique se modélise de la façon représentée à la figure 1.

$e(t)$ est la force électromotrice induite par le mouvement de la corde. L désigne l'inductance propre du bobinage et R sa résistance. De plus, le grand nombre de spires présentes dans le bobinage provoque un effet capacitif représenté par le condensateur de capacité C.

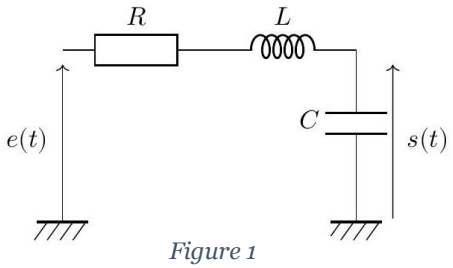


Figure 1

Q.1 Étudier le comportement asymptotique de ce circuit. En déduire le type de filtrage réalisé par le micro.

Q.2 Donner l'expression de la fonction de transfert du micro en régime sinusoïdal forcé $H\left(j\omega\right) = \dfrac{\underline{s}}{\underline{e}}$.

Q.3 Écrire la fonction de transfert sous la forme $H\left(j\omega\right) = \dfrac{H_0}{1 - \dfrac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\dfrac{\omega}{Q\omega_0}}$ et exprimer les paramètres H_0, ω_0 et Q en fonction de R, L et C.

Q.4 Montrer que, si $Q > \dfrac{1}{\sqrt{2}}$, il y a résonance à une pulsation ω_r à déterminer.

Q.5 Tracer l'allure des diagrammes de Bode du gain et du déphasage avec en abscisses $\log\omega$, dans le cas $Q > \dfrac{1}{\sqrt{2}}$.

Q.6 Expliquer comment tracer expérimentalement les diagrammes de Bode. Dans le cas précis du micro de guitare, expliquer pourquoi il n'est pas possible de tracer expérimentalement les diagrammes de Bode.

Q.7 Un potentiomètre de résistance r est traditionnellement ajouté en parallèle de la capacité C. Donner l'expression littérale du nouveau gain *statique* H_0' du circuit en présence de ce potentiomètre. Ce dernier est accessible pour le guitariste. Quelle est son utilité ?

On souhaite mesurer les paramètres R, L et C de deux micros différents : le micro Fender Lace Sensor et le micro De Armond Dynasonic. En l'absence de vibration de la corde, le micro est modélisé par le dipôle, d'impédance *Z*, représenté à la figure 2 à gauche.

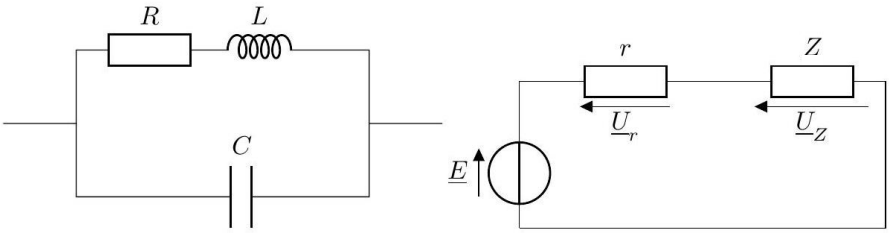


Figure 2

On réalise le montage de la figure 2 à droite, dans lequel $\underline{E} = Ee^{j\omega t}$ est la tension sinusoïdale délivrée par une source de tension idéale, et r une résistance de valeur $r = 10\ \text{k}\Omega$.

Q.8 Exprimer *Z*, l'impédance du micro, en fonction de R, L, C et ω.

Q.9 Montrer que $Z = r\dfrac{\underline{U}_Z}{\underline{U}_r}$.

Le graphe de la figure 3 représente $\dfrac{|\underline{U}_Z|}{|\underline{U}_r|}$ en fonction de la pulsation ω pour les deux micros étudiés : trait plein pour le micro Fender et pointillés pour micro Dynasonic.

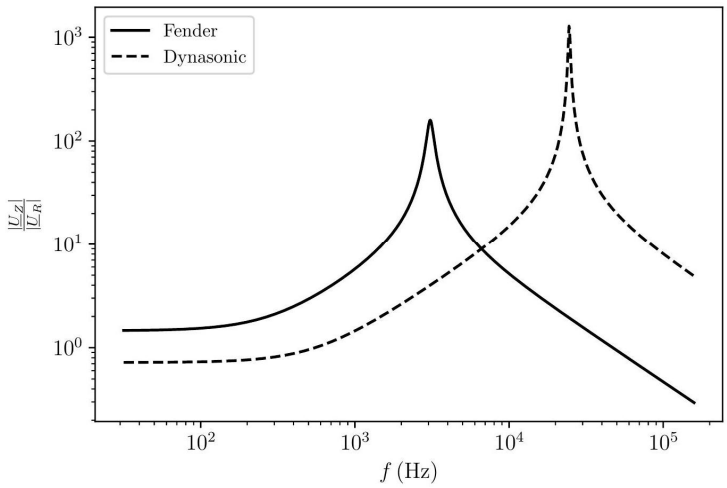


Figure 3

Q.10 En déduire la valeur de R pour chaque micro.

Q.11 Les relevés expérimentaux mettent en évidence que pour des fréquences de $1\ \text{kHz}$, l'influence de la capacité *C* est négligeable dans l'expression de *Z*.

Montrer que pour ces fréquences $L \simeq \frac{1}{\omega}\sqrt{r^2\left(\left(\frac{|\underline{U_Z}|}{|\underline{U_R}|}\right)^2 - R^2\right)}$. En déduire la valeur de L pour chaque micro.

Q.12 Z peut s'écrire sous la forme $Z = R\frac{1 + jQ\frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\frac{\omega}{Q\omega_0}}$. Simplifier l'expression de Z dans l'hypothèse $Q >> 1$ et ω proche (mais différent) de ω_0, puis pour $\omega = \omega_0$.

Expliquer comment évaluer C et de Q à partir des relevés expérimentaux. En déduire la valeur de C en pF et de Q pour chaque micro.

II Numérisation et traitement du signal

Le signal fourni par la guitare électrique est numérisé puis traité. On considère dans tout ce qui suit que ce signal est une tension positive comprise entre 0 V (potentiel de la masse) et V_{cc} (potentiel haut). On étudie, en premier lieu, un convertisseur analogique numérique de type flash. Le schéma de la figure 4 représente le circuit électronique d'un convertisseur flash sur deux bits.

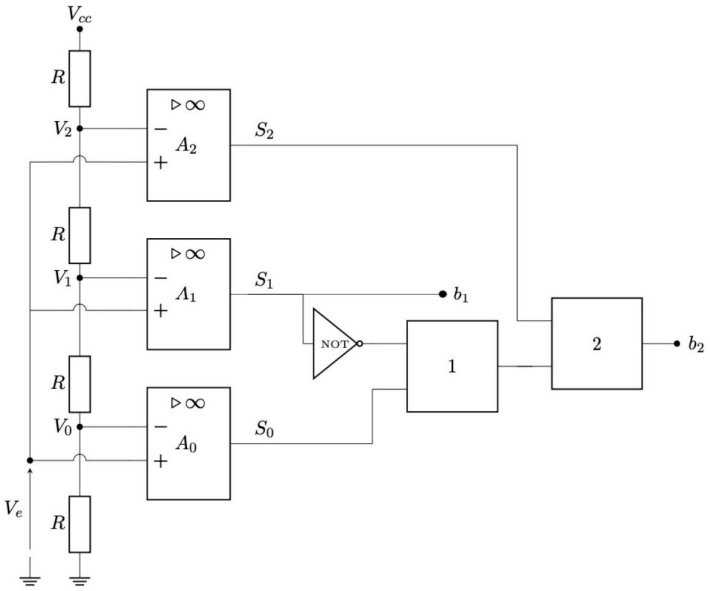


Figure 4

Q.13 Les A.L.I notés A0, A1 et A2 sont idéaux et ont pour tension de saturation en sortie $\pm V_{sat}$. Quelle fonction remplissent-ils ?

Q.14 Exprimer, en justifiant, les tensions V_0, V_1 et V_2 en fonction de V_{cc}.

Les composants notés « NOT », « 1 » et « 2 » sont des portes logiques dont les entrées et les sorties ne prennent que deux valeurs, notées 0 (« faux ») ou 1 (« vrai »). La sortie $-V_{sat}$ d'un A.L.I est associée à 0, la sortie $+V_{sat}$ à 1.

« NOT » est un inverseur (il renvoie le complémentaire à 1 de l'entrée, noté $\overline{S_1}$). La porte « 1 » réalise la fonction « ET » ; on note S_3 sa sortie, et la porte « 2 » la fonction « OU ».

Q.15 On a $V_{cc} = 4$ V. Reproduire et compléter la table de vérité ci-dessous relative au convertisseur flash.

	S_0	S_1	S_2	b_1	$\overline{S_1}$	S_3	b_2	sortie V_s en base 10
$0 < V_e < V_0$								$(b_1 b_2)_2 =$
$V_0 < V_e < V_1$								$(b_1 b_2)_2 =$
$V_1 < V_e < V_2$								$(b_1 b_2)_2 =$
$V_2 < V_e$								$(b_1 b_2)_2 =$

Représenter la courbe V_s (en volts) en fonction de V_e (en volts) et qualifier la numérisation réalisée.

Q.16 La norme Hi-Res Audio des fichiers audios (utilisé dans les fichiers .flac, par exemple) impose un encodage sur 24 bits à une fréquence égale ou supérieure à 96 kHz. Combien d'amplificateurs linéaires intégrés seraient nécessaires pour réaliser un convertisseur flash sur 24 bits ?

En pratique, il n'existe pas dans le commerce de convertisseur flash sur plus de 12 bits (au-delà, ils seraient trop chers et trop encombrants). On peut, néanmoins, mettre à profit leur grande rapidité de conversion dans des convertisseurs pipeline semi-flash. Prenons l'exemple du convertisseur pipeline 24 bits à trois étages, représenté à la figure 5.

E/B désigne un circuit échantillonneur bloqueur, CAN un convertisseur analogique numérique flash 8 bits et CNA un convertisseur numérique analogique 8 bits.

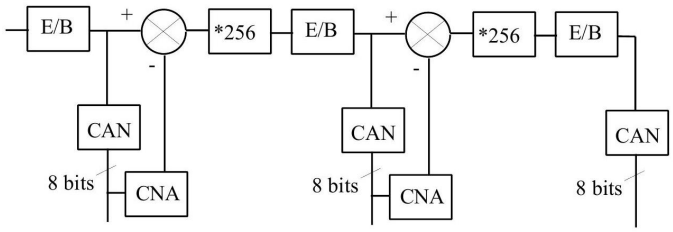


Figure 5

Le premier étage détermine les valeurs des 8 bits de poids fort, l'étage suivant les valeurs des 8 bits suivants, enfin le dernier étage détermine les valeurs des 8 bits de poids faible. Trois circuits échantillonneurs bloqueurs sont intercalés afin de synchroniser les trois conversions. Un échantillonneur bloqueur peut être réalisé selon le schéma de la figure 6, dans lequel l'interrupteur K est commandé par une tension créneau, appelé signal d'horloge, à la fréquence d'échantillonnage f_e.

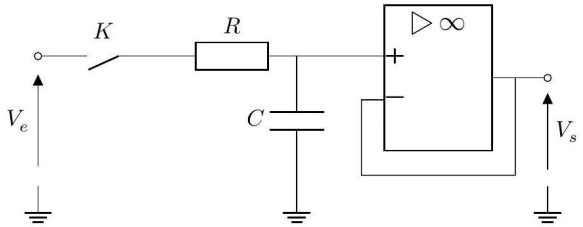


Figure 6

On suppose K fermé et le condensateur initialement déchargé. De plus, on suppose que les variations temporelles de $V_e(t)$ sont très lentes devant le produit RC.

Q.17 Comment s'appelle le montage à A.L.I ? Quel est son intérêt ? Au bout de combien de temps la tension $u_C = V^+$ aux bornes du condensateur atteint-elle la tension V_e à 99% ?

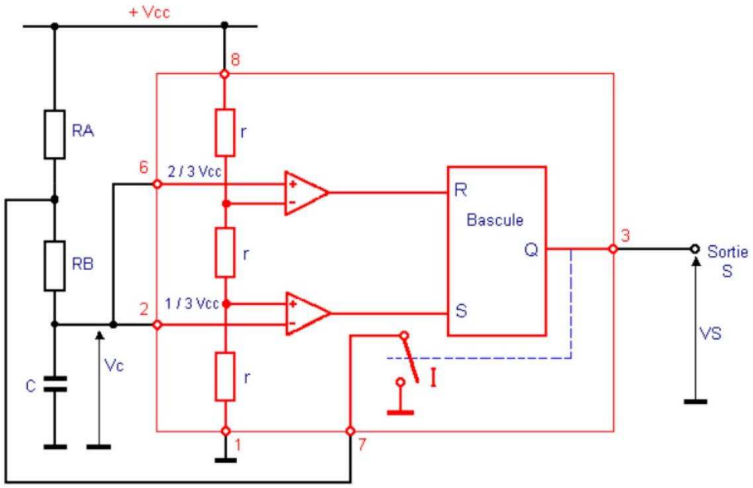
Q.18 K est piloté par une tension V_K de période $T_e = 1/f_e$ présentant deux états : l'état bas (« 0 ») de durée αT_e pendant lequel K est fermé, et l'état haut (« 1 ») de durée $(1-\alpha)T_e$ pendant lequel K est ouvert. Le rapport cyclique α est très inférieur à 1. En déduire une contrainte sur le produit RC, à exprimer en fonction de α et f_e, pour que u_C diffère de V_e de moins de 1% à chaque front ascendant du signal d'horloge.

Q.19 Que vaut la tension de sortie lorsque l'interrupteur est ouvert ? Quel est l'intérêt de ce circuit ? Donner sur le même graphe l'allure de V_e, de V_s et V_K sur trois périodes d'échantillonnage.

Q.20 La tension d'horloge V_K pilotant l'interrupteur K est réalisée à l'aide du circuit de la figure 7. L'interrupteur I est fermé pour Q à l'état bas, et ouvert quand Q est à l'état haut et ainsi qu'à la mise sous tension.

La sortie Q de la bascule est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tracer le chronogramme de la tension u_C, des entrées R, S et de la sortie Q, en partant de l'état initial $R=0$, $S=1$, I ouvert et $V_C = 0$. On tracera l'allure des chronogrammes de V_C et V_K sans chercher l'expression littérale de V_C au cours du temps.



R	S	Q	I
0	0	reste dans l'état précédent	
1	0	0	fermé
0	1	1	ouvert
1	1	1	ouvert

Figure 7

Q.21 Exprimer en fonction de R_A et R_B le rapport cyclique α défini à Q.18.

Comment choisir R_A et R_B pour obtenir un signal d'horloge en forme de peigne (soit ici un signal créneau pour lequel le temps à l'état bas est faible devant le temps à l'état haut) ?

3. MINES-PONTS // PSI // 2022 : Conditionnement d'un signal

On étudie le fonctionnement du conditionneur AD598 dont le schéma fonctionnel fourni par la notice est représenté en figure 1.

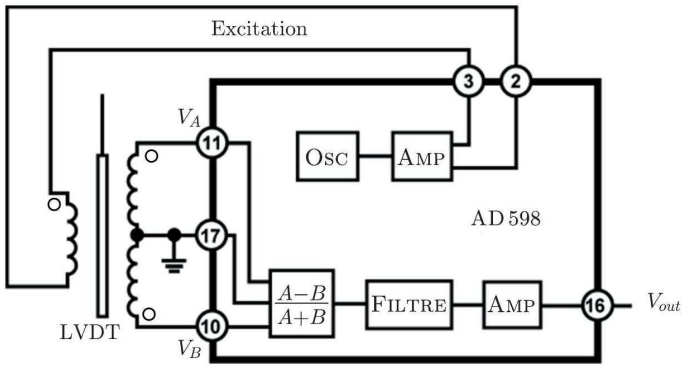


Figure 1 - Diagramme bloc fonctionnel du conditionneur AD598

L'AD598 comporte un oscillateur local, noté Osc en figure 1, générant une tension sinusoïdale dont la fréquence peut varier de 20 Hz à 20 kHz, suivi d'un amplificateur de tension qui délivre la tension u_p.

L'oscillateur local produit dans un premier temps une tension périodique fonction triangulaire du temps qui est ensuite transformée en une tension sinusoïdale du temps grâce à un montage conformateur à diodes.

À partir des deux tensions référencées par rapport au point de masse, $V_A = u_2$ et $V_B = u_1$, le circuit intégré AD598 construit une tension périodique en créneaux symétriques, de rapport cyclique α égal au rapport $\frac{A-B}{A+B}$, où A et B sont respectivement les tensions proportionnelles aux amplitudes des tensions V_A et V_B.
L'étude se focalise sur l'alimentation du circuit primaire.

I Bloc oscillateur

Le bloc Osc de la figure 1 est constitué d'un générateur de tension en triangle suivi d'un convertisseur triangle-sinus à diodes. Le circuit générateur de tension en triangle est représenté en figure 2.

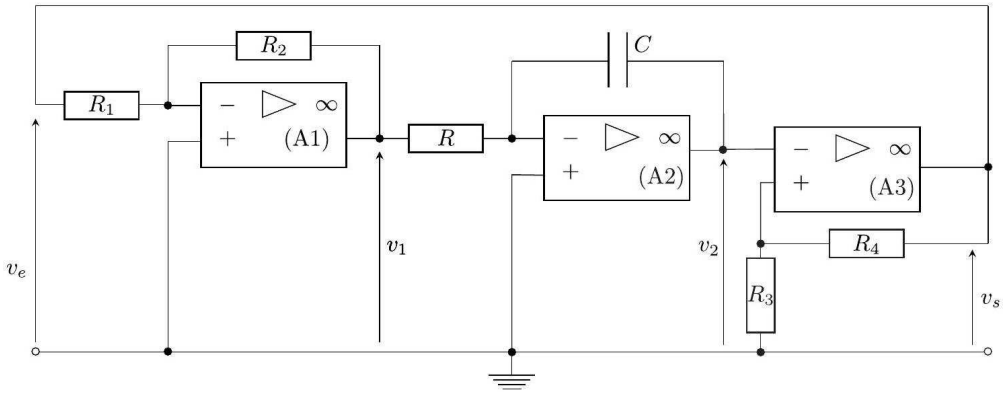


Figure 2 - Générateur de triangle.

Les trois Amplificateurs Linéaires Intégrés (A.L.I) sont idéaux et nommés (A1), (A2) et (A3) (voir figure 8).
On notera $+V_{sat}$ et $-V_{sat}$ les tensions de saturation haute et basse des ALI.

Q.1 Après avoir rappelé la définition d'un ALI idéal, indiquer quels sont ceux qui fonctionnent en régime linéaire. On justifiera simplement la réponse.

Les tensions $v_e(t)$, $v_1(t), v_2(t)$ et $v_s(t)$ sont des fonctions non sinusoïdales du temps.
Q.2 Établir la relation entre $v_e(t)$ et $v_1(t)$ puis celle entre $v_1(t)$ et $v_2(t)$.

Q.3 Déterminer la valeur de v_s selon les valeurs et le sens de variation de v_2, puis représenter graphiquement ces variations en reportant v_s en ordonnée et v_2 en abscisse. On fera apparaître les valeurs remarquables sur chaque axe du graphique.

Q.4 En tenant compte des trois résultats précédents, déterminer les variations de v_2 et v_s en fonction du temps. Représenter ces variations sur un même graphe.
Laquelle des tensions $v_e(t)$, $v_1(t)$, $v_2(t)$ et $v_s(t)$ est une fonction triangulaire périodique du temps ?
On nomme $v_t(t)$ cette tension. Calculer sa période T en fonction de R, C, R_1, R_2, R_3 et R_4.

Q.5 En fixant $R = 1\ \text{k}\Omega$ et en prenant $R_1 = R_2$ puis, uniquement pour cette application numérique $R_3 = R_4$, déterminer la valeur de C permettant d'obtenir une tension $v_t(t)$ de fréquence 2 kHz.
Comment faire pour permettre à un utilisateur de l'AD598 de modifier à volonté cette fréquence ?
Exprimer l'amplitude E de la tension $v_t(t)$ en fonction des données du circuit de la figure 2. Sur quels paramètres de ce circuit faut-il agir afin de modifier cette amplitude ?
Déterminer la condition sur ces paramètres pour que $\dfrac{E}{V_{\text{sat}}} = 0,22$. Calculer dans ce cas la valeur de E en prenant $V_{\text{sat}} = 15\ \text{V}$.

II Conformateur à diodes

L'origine des temps étant arbitrairement fixée, la figure 3 contient, d'une part, les variations de la tension triangulaire réduite v_t / E en fonction du temps réduit $\theta = t/T$ et, d'autre part, celles de la tension sinusoïdale réduite v_0 / E en fonction de θ que l'on souhaite obtenir après la conversion triangle-sinus.

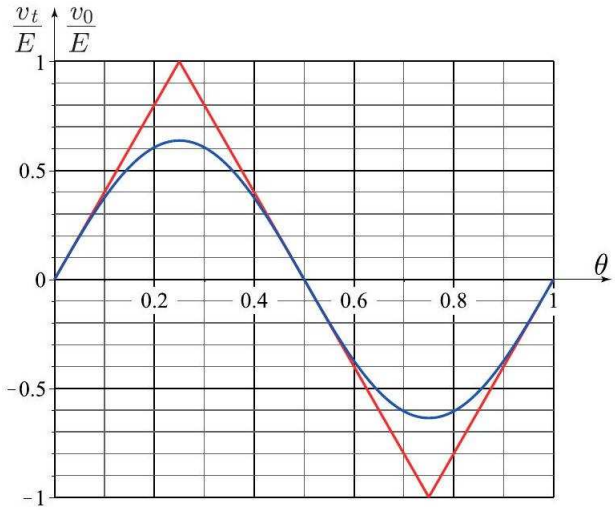


Figure 3 - Conversion triangle - sinus.

Afin de réaliser cette conversion, on utilise un montage conformateur à diodes représenté en figure 4. Les diodes sont toutes identiques. En notant i_{d} leur courant direct et u_{d} la tension en convention récepteur (figure 4), le fonctionnement de chaque diode est tel que si $i_{\text{d}} > 0$ alors $u_{\text{d}} = U_{\text{s}} > 0$ et si $i_{\text{d}} = 0$ alors $u_{\text{d}} \le U_{\text{s}}$.
Pour toute la suite, on prendra une tension de seuil égale à $U_{\text{s}} = 0,7\ \text{V}$.

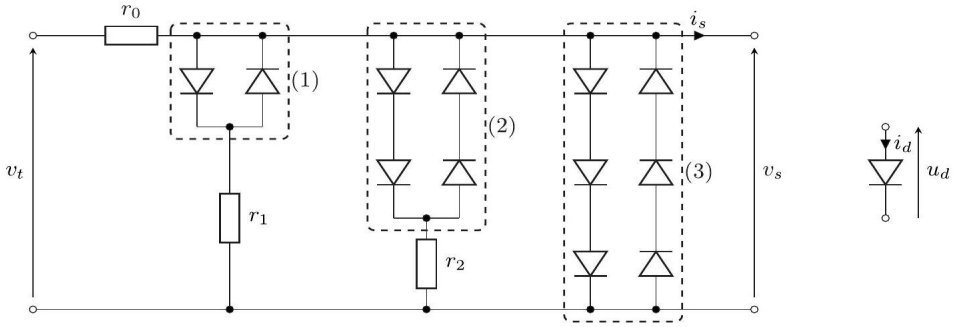


Figure 4 - Montage conformateur.

Le montage conformateur, alimenté par la tension v_t, est dimensionné pour délivrer une tension v_s se rapprochant au mieux de la tension v_0 représentée en figure 3.
Le dimensionnement consiste, entre autres, à choisir correctement les résistances r_1 et r_2, lorsque $r_0 = 1,0\ \text{k}\Omega$. Ce choix sera effectué pour une valeur du courant de sortie $i_s = 0$.

Q.6 Pour $0 \le \theta = \frac{t}{T} \le \frac{1}{4}$, donner l'expression de v_t en fonction de θ et de E.

On considère l'association des deux diodes dans la cellule en traits pointillés (1).

Q.7 Montrer que les deux diodes ne peuvent conduire le courant simultanément.
Montrer qu'il existe une valeur $U_1 > 0$ telle que si $0 \le v_s \le U_1$ alors le courant dans la résistance r_1 est nul et, si $v_s > U_1$, ce courant n'est pas nul. Exprimer U_1 en fonction de U_s.

On considère l'association des quatre diodes dans la cellule en traits pointillés (2).

Q.8 Montrer qu'il existe une valeur $U_2 > 0$ telle que si $0 \le v_s \le U_2$ alors le courant dans la résistance r_2 est nul et si $v_s > U_2$ ce courant n'est pas nul. Exprimer U_2 en fonction de U_s.
On considère finalement le bloc de la cellule en traits pointillés (3).

Q.9 Montrer que la valeur positive maximale de v_s, notée V_{max}, vaut $3U_s$.

On note désormais $s(\theta) = V_{max} \sin(2\pi\theta)$ la tension sinusoïdale idéale que l'on souhaite obtenir en sortie du montage de la figure 4, de même période que v_t.

Q.10 Déterminer la relation à imposer entre U_s et E afin que les deux pentes en $\theta = 0$ des courbes $v_t(\theta)$ et $s(\theta)$ en fonction de θ soient identiques. On vérifiera que cette condition revient à identifier le rapport E/U_s à une fraction de π et on supposera cette relation vérifiée par la suite.

Q.11 Pour $v_s < U_1$, quelle est l'expression de v_s en fonction de v_t puis celle en fonction de θ ? En déduire la valeur θ_1 de θ telle que $v_s(\theta_1) = U_1$. On simplifiera cette valeur en utilisant la condition déduite à la question précédente.

Q.12 On suppose pour cette question $U_1 < v_s < U_2$.
Exprimer v_s en fonction de v_t, U_s, r_1 et r_0 puis en fonction de U_s, E, θ et $\rho_1 = r_0 / r_1$.
Quelle doit être la valeur de ρ_1 afin que les pentes des courbes $v_s(\theta)$ et $s(\theta)$ soient identiques lorsque $\theta \to \theta_1$ par valeurs supérieures ? On exprimera ρ_1 uniquement en fonction du cosinus de 1/3.

Q.13 On suppose pour cette question $U_2 < v_s < 3U_1$. Déterminer l'expression de v_s en fonction de U_s, r_0, r_1, r_2, E et θ.

La valeur du rapport $\rho_2 = \frac{r_0}{r_2}$ est fixée afin que les pentes des courbes $v_s(\theta)$ et $s(\theta)$ soient identiques lorsque $\theta \to \theta_2$ par valeurs supérieures. On peut alors déterminer la valeur θ_3 telle que $v_s(\theta_3) = 3U_1$.

Q.14 Montrer que $v_s(\theta) = 3U_1$ si $\theta_3 < \theta < \frac{1}{4}$.

En réalisant le dimensionnement précédent, on obtient la tension $v_s(\theta)$ représentée en figure 5 sur laquelle figurent également les tensions $v_t(\theta)$ et $s(\theta)$.

Q.15 Proposer un aménagement du montage de la figure 5 permettant de réduire les écarts entre $v_s(\theta)$ et $s(\theta)$.

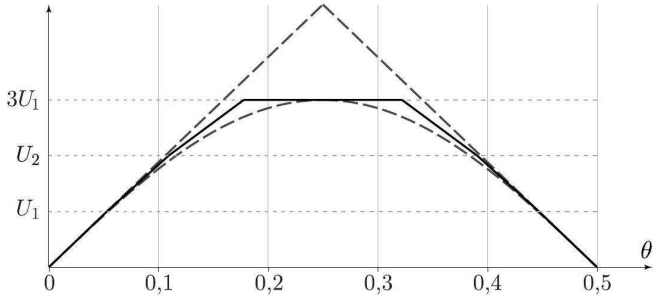


Figure 5 - Tensions $v_s(\theta), v_t(\theta)$ et $s(\theta)$.