PRATIQUE DE L'ELECTRONIQUE (8e PARTIE)

Les circuits linéaires

Où il sera question de la perfection du redresseur parfait et de l'élaboration de signaux proportionnels aux différences de tension.

Une anomalie traîtresse

Donc, tout se passe bien, la tension de sortie, u, est rigoureusement égale à la valeur absolue de e, soit :
u = e si e > 0
u = – e si e < 0
On voit, sur la figure 50, comment u varie en fonction de e, et c'est exactement ce que nous souhaitions.
L'auteur, ayant réalisé ce montage, en vérifia le fonctionnement en appliquant en e des tensions diverses, positives et négatives, mesurées avec précision (c'est là que les contrôleurs numériques s'avèrent précieux), en mesurant chaque fois la valeur de u correspondante, laquelle fut exactement conforme aux prévisions, à 1 ou 2 mV près (les amplificateurs opérationnels ont tout de même des tensions d'offset).
Pour avoir une idée du fonctionnement dynamique de l'ensemble, l'auteur eut l'idée de commander l'entrée e par un générateur de tension sinusoïdale (mais pas le « générateur idéal », à résistance interne nulle dont il a été question plus haut).
La forme d'onde attendue en (E) devait avoir l'aspect classique du « redressement en deux alternances », qu'illustre la figure 51.
Mais, oh horreur ! la forme d'onde montra des alternances paires hautes et des alternances impaires un peu plus basses. Donc, ce qui était vrai en tension continue n'était plus valable pour des tensions alternatives. L'auteur en déduisit donc, stupidement, que le fonctionnement dynamique de l'un des amplificateurs était normal, ce que la fréquence de e (200 Hz) ne pouvait justifier en aucune façon.

Encore cette... (censuré) de résistance interne !

Après un... certain temps (trop long), l'auteur se dit enfin que la transmission des amplificateurs n'y était sans doute pour rien, que le montage donnait bien, en sortie, la valeur absolue de la tension d'entrée, mais que cette dernière devait être déformée pour une raison quelconque. La deuxième sonde de l'oscilloscope fut immédiatement connectée en (B), permettant de voir que les alternances négatives de la tension d'entrée avaient, effectivement, une valeur de crête inférieure (en valeur absolue) à celle des alternances positives.
La conclusion (prématurée) fut : « Saleté de générateur, il a une distorsion en harmonique 2 qui lui fait mériter la mise à la poubelle ! » Mais le générateur, une fois débranché du montage, répondit (moralement) : « Odieuse accusation : moi, je donne une sinusoïde parfaite. »
Cette fois, le « bug » était trouvé, le « Bon sang, mais c'est bien sur ! » partit aussitôt.
Comme nous l'avons expliqué plus haut, le montage ne consomme aucun courant quand e est positif, mais, quand e est négatif, il consomme e/R_1. Autrement dit, sa résistance interne est :
infinie pour e > 0
égale à R_1 pour e < 0
Donc, l'anomalie ne se serait pas manifestée si le générateur n'avait pas eu « la résistance interne » (l'auteur ne dit pas qu'une source a *une* résistance interne, mais qu'elle a *la* résistance interne, comme on dit de quelqu'un qu'il a *la* peste ou *la* lèpre, et non *une* peste ou *une* lèpre).
En effet un générateur « de rêve » (sans *aucune* résistance interne) n'aurait nullement été perturbé par la variation de la résistance d'entrée du montage, infinie pour les alternances positives, faible pour les alternances négatives.
Pour rendre le montage utilisable même par des sources gravement atteintes de résistance interne chronique, il n'était pas nécessaire de tout changer : un simple étage « suiveur » (un amplificateur opérationnel monté en « gain unité ») à l'entrée suffisait.
Si nous avons relaté longuement cette petite histoire, c'est pour montrer que la connaissance des qualités de base des montages à amplificateurs opérationnels est essentielle.

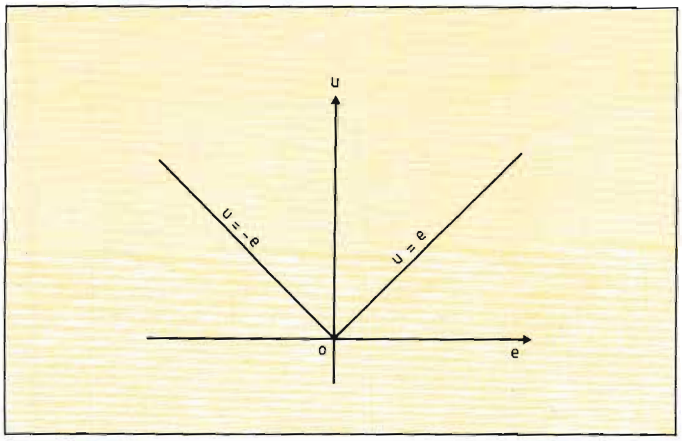
Comment faire une différence

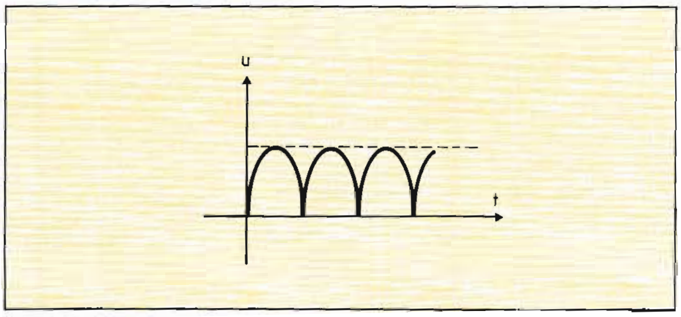
Voyons maintenant comment, avec un amplificateur opérationnel, on peut obtenir une tension de sortie proportionnelle à la *différence* de deux tensions d'entrée, car, pour ce qui est de la somme, le montage est bien connu, et nous ne reviendrons pas dessus.
Examinons ce qui se passe dans le montage de la figure 52.
Si la tension v est nulle (nous supposons le générateur qui la fournit entièrement « sain », c'est-à-dire totalement exempt de résistance interne, comme celui qui fournit u), le montage se comporte exactement comme si l'extrémité gauche de R_1 était à la masse. Nous avons donc un amplificateur du type de la figure 46 (a), à cette différence près que son gain n'est pas égal à k, mais à k+1.
A l'opposé, si la tension u est nulle, l'entrée « + » de l'amplificateur est à la masse, et nous avons (mais cette fois exactement) le montage de la figure

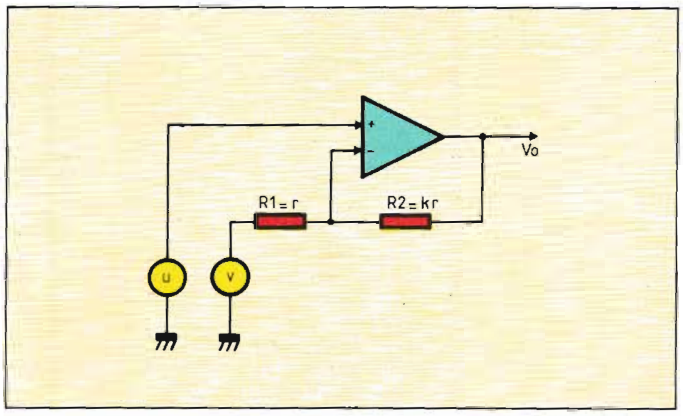
46 (b). Son gain est bien égal à –k.
Pour fixer les idées, nous supposerons que k = 4. Quand v est nulle, la tension de sortie vaut donc 5 u, et, quand u est nulle, la tension de sortie vaut – 4 v.
On se doute que ces résultats peuvent « s'ajouter » (si l'on veut être très pédant, on dit que l'on fait appel au « théorème de la superposition des états d'équilibre »). Donc, si l'on applique en même temps les tension u et v, on aura une tension de sortie :
5 u – 4 v
Autrement dit, u « agit trop » sur la tension de sortie. Qu'à cela ne tienne : on va réduire son effet de 20 % ; par exemple, par le montage de la figure 53.
Le diviseur de tension constitué par les deux résisteurs R_3 et R_4 applique donc en (B) une tension u' qui vaut :
u' = 4 u/5 = 0,8 u
Il ne faut pas oublier, en effet, que l'entrée « + » de l'amplificateur opérationnel ne consomme aucun courant, donc que le rapport du diviseur de tension est exactement :
$R_4 / (R_3 + R_4)$ soit 4/5.
Maintenant, la tension de sortie, qui vaut 5u' – 4v, est donc égale à :
4 u – 4 v = 4 (u-v)
L'inconvénient de ce montage est que sa résistance d'entrée n'est pas infinie au point (A) : elle vaut R_3+R_4, et qu'elle est même faible au point (D) où elle vaut R_1.
Pour avoir un bon montage, ayant des résistances d'entrée infinies sur les deux entrées, il faudra donc utiliser deux amplificateurs opérationnels abaisseurs d'impédance, et nous en arriverons à l'ensemble de la figure 54.
Les amplificateurs opérationnels A_2 et A_3 « recopient » respectivement les tensions u et v, mais ils ont une résistance d'entrée pratiquement infinie, et une résistance interne de sortie nulle.
La seule condition à respecter, pour que ce montage nous donne bien une tension de sortie fonction de la seule différence des deux tensions d'entrée est :
$R_4 / R_3 = R_2 / R_1$

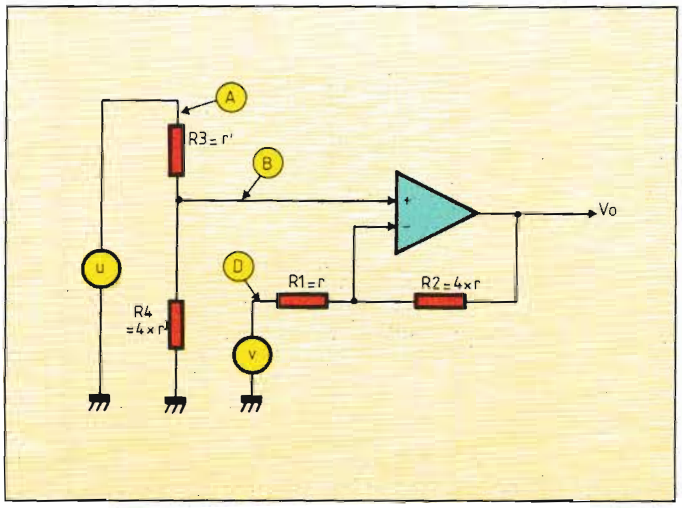
Une différence ? Pour quoi faire ?

Pour ne pas rester dans la généralité, voyons tout ce que l'on peut faire d'in-









De haut en bas
Fig. 50. – La courbe donnant la valeur de u en fonction de e dans le montage de la figure 49 est celle d'une détection à deux alternances parfaite : u est toujours égal à la valeur absolue de e.

Fig. 51. – En appliquant, à l'entrée du montage de la figure 49, une tension sinusoïdale, on s'attend à trouver en sortie la forme d'onde classique du redressement à deux alternances. Mais on peut avoir des surprises...

Fig. 52. – Si u est nul, nous aurons Vo = (k + 1) u, si c'est v qui est nul, nous aurons Vo = – kv. Donc, pour faire un amplificateur « de différence », ce montage est « trop sensible » à la tension u.

Fig. 53. – Nous obtiendrons une tension de sortie rigoureusement proportionnelle à la différence u – v en réduisant, par le diviseur de tension R_3-R_4, la sensibilité à la tension u du montage de la figure 52.

téressant avec un montage permettant d'obtenir la différence de deux tensions.

Il suffit de deux montages du type de la figure 54, avec quelques autres parties, pour constituer un « impédancemètre » fort intéressant, le type « Blet-Rochar », dont nous allons voir qu'il est assez simple, tout en donnant des résultats très intéressants.

Il permet, en effet, de mesurer, pour un dipôle donné, le module (valeur absolue) de son impédance ainsi que l'angle de déphasage du dipôle, connu par une mesure de son cosinus et aussi de son sinus – ce qui est intéressant, car le sinus est la grandeur à connaître quand le déphasage est petit, le cosinus devenant intéressant quand le déphasage est grand. En effet, considérons deux déphasages petits (10° et 20°), leurs cosinus diffèrent peu (0,9948 pour 10°, 0,9397 pour 20°) alors que leurs sinus sont respectivement 0,1736 pour 10° et 0,3420 pour 20°.

Que fait-on avec un tel impédancemètre ? On réalise, par exemple, une excellente adaptation d'un haut-parleur à son enceinte, car le diagramme des impédances montre tout de suite les résonances et les défauts.

On peut aussi détecter immédiatement l'usure d'une tête magnétique, par étude de sa variation d'impédance en fonction de la fréquence. Il y a d'ailleurs des quantités d'autres applications.

Le principe de base

La figure 55 indique le schéma de l'ensemble, et le diagramme de la figure 56 explique comment on en tire les valeurs cherchées.

Toutes les tensions sont prises par rapport à la masse, qui est le point (M). En (A), on trouve la tension U, appliquée par le générateur G. Ce que l'on désigne par R est une « boîte à décades » permettant d'ajuster une valeur de résistance, ohm par ohm, de 1 Ω à 100 kΩ – (il y a un commutateur qui commute des résisteurs de 1, 2,... 9 Ω, un autre pour commuter des résisteurs de 10, 20, ...90 Ω, un troisième commute des 100, 200, ... 900 Ω, etc.

Le rectangle Z désigne le dipôle dont on veut mesurer l'impédance. Les deux potentiomètres P_1 et P_2 ont exactement la même résistance. On trouve donc, au point (D) une tension égale U/2.

Sur les curseurs des potentiomètres, on trouve :

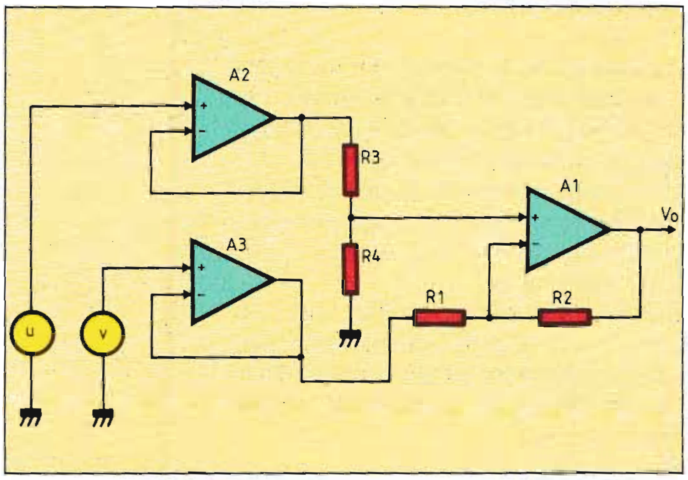
– en (F), une tension allant de 0 à U/2 ;
– en (E), une tension allant de U/2 à U.

On dispose de deux amplificateurs de différence, du type de celui de la figure 54. Chacun est suivi d'un système de détection (simplifié), et l'on peut ainsi comparer les tensions de sortie alternatives de ces deux amplificateurs.

Quelques vecteurs

On commence par ajuster la valeur de R pour que la tension aux bornes de ce résisteur ait la même valeur efficace (ou rms) que la tension aux bornes de Z.

Pour cela, on branche les entrées du



De haut en bas
Fig. 54
Le montage en amplificateur de différence de la figure 53 présente l'inconvénient d'avoir des résistances d'entrées non infinies (et éventuellement différentes) pour les tensions u et v. On lui ajoute deux « suiveurs », A_2 et A_3, qui permettent d'avoir des résistances d'entrée infinies pour u et pour v.

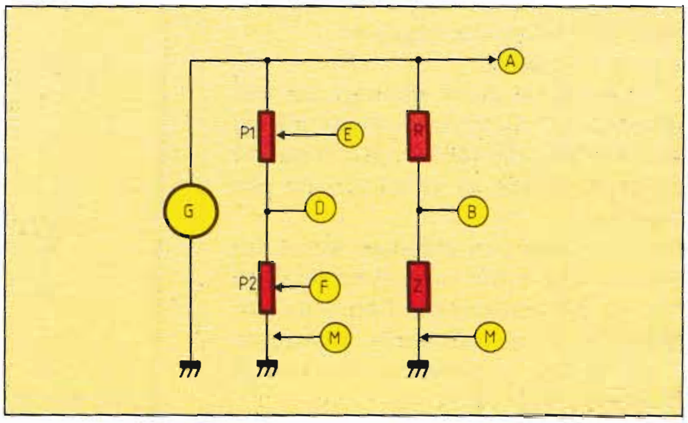


Fig. 55
Le principe de l'impédancemètre « Blet-Rochar » consiste à mesurer différentes tensions dans un ensemble comportant Z (l'impédance à mesurer), R (une boîte de résistances à décades), P_1 et P_2, deux potentiomètres d'égale résistance. On commence par rendre égales, par ajustage de R, les tensions aux bornes de R et de Z, alors R est égale au module de Z.

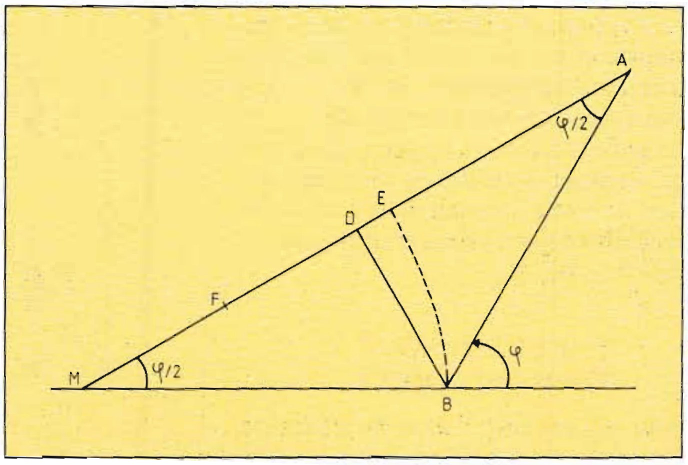


Fig. 56 (ci-contre)
Diagramme vectoriel (construction de Fresnel), montrant les amplitudes et phases des différentes tensions rencontrées dans le montage de la figure 55.

premier amplificateur de différence en (A) et (B) : la sortie détectée indique donc la tension rms aux bornes de R. Le second amplificateur de différence a ses entrées connectées en (B) et (M).

On modifie la valeur de R jusqu'à ce que les tensions détectées en sortie des deux amplificateurs soient égales, alors, comme le même courant parcourt R et Z, on sait que, maintenant, la résistance de R est égale au module de l'impédance de Z.

On peut donc lire, sur les commutateurs des boîtes à décades de R, la valeur de cette impédance.

Pour comprendre la mesure de phase, il faut maintenant utiliser la construction vectorielle, dite « de Fresnel », de la figure 56.

On y représente les diverses tensions, mesurées par rapport à la masse, par des vecteurs. La longueur de chaque vecteur est proportionnelle à la valeur rms de la tension, l'orientation de chaque vecteur donne la phase de cette tension.

Pour comprendre ce qu'est cette construction, il faut imaginer que l'ensemble de la figure 56, tracée sur un calque, tourne autour du point fixe M et que l'on considère les projections des différents vecteurs sur une droite fixe. Chaque projection a donc une longueur qui varie suivant une loi sinusoïdale.

La vitesse de rotation du diagramme est égale (en tours par seconde) à la fréquence de la tension U (en hertz).

Les deux vecteurs MB et BA, représentant respectivement les tensions aux bornes de Z et de R, sont de même longueur. Ils forment entre eux l'angle Φ, qui est le déphasage (que nous voulons mesurer) entre le courant dans Z et la tension aux bornes de Z.

Comment mesurer cet angle ? S'il est grand (entre 60° et 90°), le vecteur MA, qui représente la tension U du générateur, a une longueur nettement plus petite que le double de celle des vecteurs MB et BA.

Le triangle MAB est isocèle. Les angles BMA et BAM sont donc égaux, or leur somme est égale à Φ, donc ils valent chacun $\Phi/2$.

Si l'on appelle v la tension aux bornes de R et de Z (elles ont la même valeur rms, du fait du réglage de R), on voit donc que la tension rms U est telle que :

$U = 2\ v \cos(\Phi/2)$

Le rapport U/v, qui vaut $2 \cos(\Phi/2)$, va donc varier de 1,414 (pour $\Phi = 90°$) à 1,732 (pour $\Phi = 60°$).

La mesure du cosinus et du sinus

Il s'agit de mesurer le rapport U/v. Pour cela, on va donc brancher le premier amplificateur de différence avec une de ses entrées en (M) et l'autre en (E). Le second sera branché avec une entrée en (M), l'autre en (B).

On règle la position du curseur de P_1, jusqu'à ce que les tensions détectées en sortie des deux amplificateurs soient les mêmes. L'axe de ce potentiomètre P_1 entraîne une aiguille sur un cadran gradué en valeurs de $\cos(\Phi)$.

Théoriquement, on devrait pouvoir mesurer un déphasage faible, mais, quand Φ est petit, le rapport U/v est très proche de 2 et varie à peine avec Φ, la mesure serait donc très imprécise.

Par exemple, pour $\Phi = 20°$ U/v vaut 1,97, alors qu'il vaut 2 pour $\Phi = 0$.

Pour un déphasage petit, il vaut mieux comparer les longueurs des vecteurs BD et MB.

En effet, on voit, sur la figure 56, que BD, hauteur (et médiatrice) du triangle MBA, a une longueur qui est égale à celle de MB multipliée par le sinus de l'angle BMD, qui vaut $\Phi/2$.

On va donc relier les deux entrées du premier amplificateur aux points (B) et (D), les deux entrées du second aux points M et F. On ajustera alors la position du curseur de P_2 jusqu'à ce que les tensions de sortie de ces deux amplificateurs aient la même amplitude.

L'axe de P_2 entraîne une aiguille sur un cadran gradué en valeurs de $\sin(\Phi)$. En fait, c'est surtout cette mesure qui est bonne, car, pour une variation de Φ de 0 à 90°, le rapport BD/MB varie de 0 à 0,707, et, même pour Φ voisin de 90°, il varie encore notablement avec Φ.

La mesure de $\cos(\Phi)$ n'est là que pour une confirmation de la validité des mesures.

Comme on le voit, l'un des deux amplificateurs de différence est toujours utilisé avec une de ses entrées en (M), donc il n'a pas réellement besoin d'être du type « différence », un simple amplificateur du type de celui de la figure 46 (a) suffit.

On peut donc, plus facilement, ajuster son gain, puisqu'il n'y a qu'une valeur de résistance à modifier (alors que, dans un amplificateur du type de la figure 54, il faut modifier deux valeurs de résistance en même temps pour changer son gain en ayant toujours un amplificateur sensible uniquement à la différence).

Le tarage et les mesures

Pour s'assurer que les deux amplificateurs, ainsi que les systèmes de détection de leurs tensions de sortie, sont bien identiques (et modifier le gain du second amplificateur si ce n'est pas le cas), on peut faire un tarage très simple.

Il suffit de brancher le premier (celui qui est réellement un amplificateur de différence) entre les points (A) et (D), le second entre les points (D) et (M).

Comme les tensions aux bornes de P_1 et P_2 sont égales, on doit lire une différence nulle entre les deux tensions détectées. Si ce n'est pas le cas, on retouche le gain de l'amplificateur le plus simple. L'emploi de l'impédancemètre est donc le suivant :

Tarage. Le premier amplificateur est branché entre (A) et (D), le second entre (D) et (M), on doit avoir les mêmes tensions détectées, sinon on retouche le gain de l'amplificateur à gain ajustable.

Mesure du module de l'impédance. On branche le premier amplificateur entre (A) et (B), le second entre (B) et (M), et l'on ajuste la valeur de R jusqu'à ce que les tensions détectées soient les mêmes. On lit alors le module de l'impédance sur les boîtes à décades de R.

Mesure du cosinus de Φ. Le premier amplificateur est branché entre (M) et (A), le second entre (M) et (E), on règle P_1 jusqu'à ce que les tensions détectées soient les mêmes, on lit $\cos(\Phi)$ sur P_1.

Mesure du sinus de Φ. Le premier amplificateur est branché entre (B) et (D), le second entre (M) et (E). On règle P_2 jusqu'à ce que les tensions détectées soient les mêmes, on lit $\sin(\Phi)$ sur P_2.

(à suivre)

J.-P. Œhmichen