

Initiation à la pratique de l'électronique

Les capteurs de position

Il est très souvent indispensable de connaître la position d'un mobile, soit parce que ce dernier est trop loin pour qu'on le voie (c'est le cas d'un satellite par exemple), soit parce que la simple observation ne renseignerait pas assez vite ni avec une précision suffisante sur les valeurs qui permettent de définir la position.

Quand il s'agit d'un corps libre dans l'espace, il faut six valeurs pour en définir la position sans ambiguïté. On peut, par exemple, donner la position d'un de ses points (trois coordonnées), la direction d'un axe lié au corps (deux angles) et la direction d'un autre axe également lié au corps (un angle).

Nous simplifierons donc le problème en supposant que nous souhaitons seulement repérer une grandeur donnant la position d'un corps. Il pourra s'agir d'une valeur algébrique définissant la position d'un point sur un axe (position linéaire) ou rotation d'un corps autour d'un axe (position angulaire).

Comment passer d'une position linéaire à une position angulaire et réciproquement ? Certains penseront à la crémaillère engrenant avec un pignon, ce qui est envisageable, mais les irrégularités de forme et de répartition des dents limitent la précision de ce système.

bande magnétique, le diamètre d'enroulement varierait en fonction du nombre de tours). Un ressort agissant sur le tambour maintient le ruban tendu et l'on a choisi une largeur de ruban très petite par rapport au diamètre du cylindre, pour minimiser l'inclinaison de ce dernier.

ment où le ruban quitte le cylindre ne varie pas quand le ruban s'enroule ou se déroule. Ainsi, on établit une correspondance parfaitement linéaire entre l'angle de rotation, a , du tambour et le déplacement linéaire, x , d'un point du ruban. Ce type de conversion de déplacement linéaire en déplacement angulaire se rencontre dans de nombreux ascenseurs : on peut voir, attaché sous la cage, le ruban métallique qui gagne la machinerie par un trou dans le sol.

Parmi les capteurs que nous rencontrerons, certains sont spécifiquement conçus pour détecter une position linéaire, mais, le plus souvent, ils sont mieux adaptés pour les transmissions de positions angulaires.

Une autre distinction importante entre les différents capteurs tient au fait que certains sont de type analogique, d'autres sont numériques.

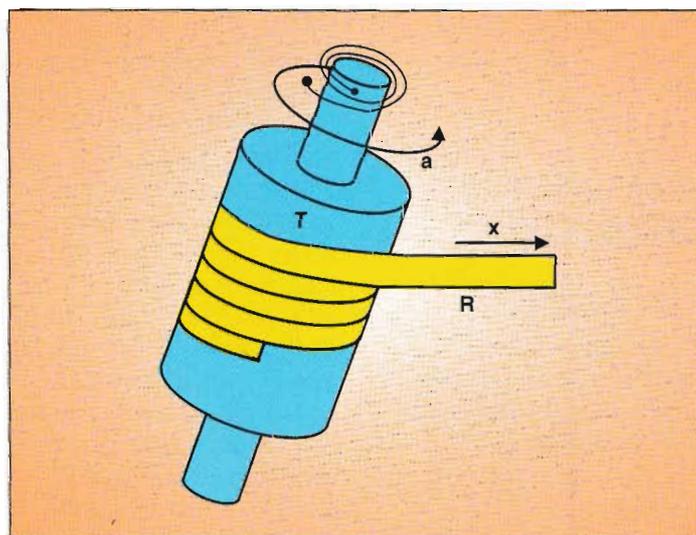


Fig. 1. - Pour passer d'un déplacement linéaire x à un déplacement angulaire a , une bonne solution consiste à faire enrouler en hélice un ruban métallique R sur un tambour T.

Si l'on veut une bonne conversion, le système de la figure 1 est un des meilleurs. Le ruban métallique R est enroulé en hélice autour du tambour T (si on l'enroulait en spires concentriques, à la façon d'une

Il arrive que l'on grave sur le tambour une rainure en hélice pour guider l'enroulement du ruban. On peut faire en sorte que le tambour se déplace le long de son axe quand il tourne, pour que l'emplace-

Le potentiomètre

Pour une rotation limitée, le potentiomètre constitue un capteur simple et économique (si l'on se contente d'une précision modeste). Il s'agit d'une

piste résistante, de résistance totale R , sur laquelle glisse un curseur. La partie de la piste comprise entre le curseur et le « bas » du potentiomètre a une résistance αR , donc, l'autre partie a une résistance $(1 - \alpha)R$, le coefficient α pouvant varier de 0 à 1.

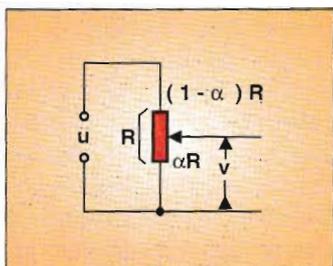


Fig. 2. - Le potentiomètre, utilisé ici en capteur de position, a un curseur qui délimite sur la piste résistante, de résistance R , une partie de résistance αR et une autre de résistance $(1 - \alpha)R$.

Si (fig. 2) l'on applique une tension continue bien déterminée, v , aux bornes de la piste résistante, on trouvera, entre le curseur et le bas du potentiomètre, une tension v , qui vaut αu (en supposant que l'on ne consomme aucun courant à cette source de tension v). Comme la valeur de α est liée à la rotation de l'axe du potentiomètre, la lecture de v nous indique la position de cet axe. Le déplacement du curseur, dans un potentiomètre, n'est pas forcément opéré par une rotation : dans les modèles « rectilignes » (il faut éviter la désignation « linéaires », et nous allons voir pourquoi), le curseur se déplace selon une trajectoire droite.

Une question de linéarité

Pour l'utilisation de ce potentiomètre comme capteur de position, la meilleure loi de variation de α en fonction de l'angle de rotation de l'axe, a , serait une proportionnalité : $\alpha = k a$

Dans ce cas, on dit que le potentiomètre est « linéaire »,

par opposition aux modèles « logarithmiques », dans lesquels la variation de α , en fonction de a , est très lente au début de la course et rapide à la fin (ces modèles sont plus adaptés à la commande de volume dans les amplificateurs audiofréquence).

Pour l'utilisation en capteur, il est important de savoir jusqu'à quel point un potentiomètre est effectivement linéaire, autrement dit, avec quelle précision a-t-on un quotient constant quand on divise α par l'angle a .

Sur la figure 3, la droite en trait plein représente la loi de correspondance entre α et a dans le cas d'un potentiomètre parfaitement linéaire. Quand l'angle a varie entre sa valeur minimale (zéro) et maximale (m), le coefficient α reste rigoureusement proportionnel à a , et la courbe en trait plein est donc une droite.

Mais, la perfection n'étant pas de ce monde, le potentiomètre réel a une courbe donnant α en fonction de a qui n'est pas rigoureusement une droite : cette courbe peut, par exemple, présenter l'aspect de celle qui est tracée en pointillés sur la figure 3.

Dans ce cas, on dit que la « non-linéarité » du potentiomètre s'exprime par la longueur maximale du segment tracé en gras sur la figure 3, mesurant l'écart entre la droite théorique et la courbe réelle. D'où vient cette non-linéarité ? Si le potentiomètre est du type « à couche » (le curseur glisse sur une couche résistante déposée sur un substrat isolant), elle peut provenir des irrégularités d'épaisseur, de largeur et de nature de la couche. Mais, en général, on n'utilise pas les potentiomètres à couche comme capteurs de position, car leur non-linéarité est trop grande.

Dans un potentiomètre bobiné, on utilise, comme piste résistante, du fil résistant re-

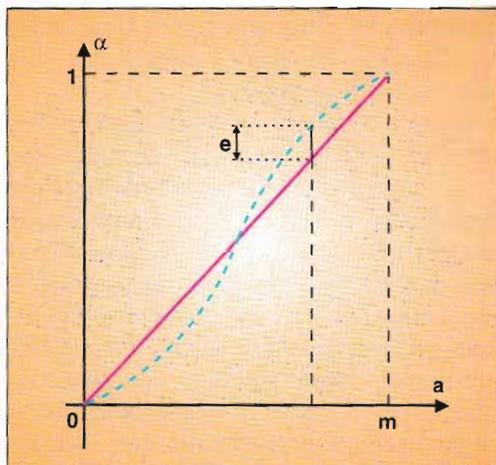


Fig. 3. - On souhaite qu'un potentiomètre utilisé comme capteur de position soit « linéaire », c'est-à-dire que la valeur du coefficient α de la figure 2 varie proportionnellement à l'angle de rotation a .

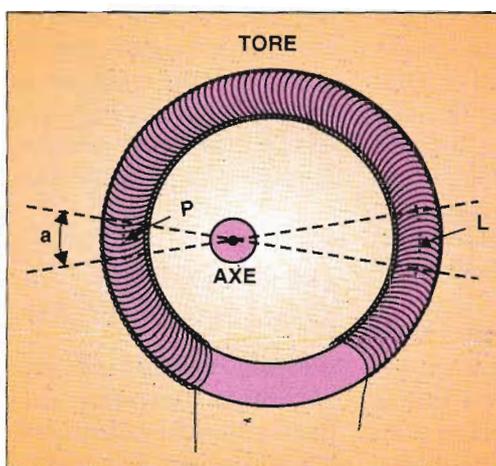


Fig. 4. - Une des causes possibles de non-linéarité pour un potentiomètre est un mauvais centrage de l'axe par rapport au tore isolant sur lequel est bobiné le fil résistant.

couvert d'une couche isolante. Ce fil est bobiné sur un support adéquat. Dans ce cas des potentiomètres bobinés économiques, ce support est ce que l'on nomme une « carte », c'est-à-dire une bande de plastique qui sera recourbée en cylindre. Pour les modèles de meilleure qualité, le fil résistant est bobiné sur un tore (souvent appelé « jonc »), c'est-à-dire un anneau à section circulaire.

Il y a plusieurs causes possibles de non-linéarité dans les potentiomètres bobinés. D'abord, le pas de l'enroulement du fil peut varier (le nombre de spires par millimètres n'est pas constant). Ensuite, le tore portant le fil peut ne pas être centré exactement sur l'axe qui entraîne le curseur : comme le montre la figure 4, la même rotation α de l'axe provoque un déplace-

ment du curseur plus petit dans la zone P (proche de l'axe) que dans la zone L (loin de l'axe).

Que peut-on espérer ?

L'auteur ne voudrait pas que l'énumération de ces différents défauts de linéarité fasse considérer le potentiomètre comme un capteur de position lamentable. Tant s'en faut, heureusement.

Un bon potentiomètre de mesure, avec son axe monté sur roulements à billes, a une linéarité qui est toujours meilleure que 1 %. Dans les modèles de précision, on arrive à deux pour mille.

Nous n'entrerons pas dans le détail des méthodes mécaniques (ou électriques), dont certaines sont fort ingénieuses, qui permettent d'améliorer la

précision des potentiomètres utilisés comme capteurs de position. On peut, à l'aide de ces corrections, obtenir une non-linéarité bien inférieure à 1/2000.

Les deux reproches principaux que l'on fait au potentiomètre utilisé comme capteur de position sont que sa rotation est limitée et que le frottement du curseur use la piste résistante. Revenons sur le premier défaut. On ne fait que déplacer le problème en utilisant des modèles « multitours », dans lesquels le curseur se déplace non sur un tore mais sur une hélice à plusieurs tours. Il est préférable d'utiliser des modèles dans lesquels la partie « utile » de la rotation de l'axe (rotation pendant laquelle le curseur touche le fil résistant) peut atteindre 350° ou même un peu plus.

Il y a toujours un petit « angle mort », dans lequel le curseur n'est plus en contact avec la piste résistante, mais on peut, dans les modèles dits « à rotation continue », franchir ce petit angle mort (à l'intérieur duquel le capteur ne peut pas servir, bien entendu). Dans ces modèles, la rotation de l'axe n'est donc pas limitée mécaniquement, mais l'angle mort constitue une zone inutilisable.

Enfin, il y a bien des cas où la position angulaire que l'on veut retransmettre reste comprise entre certaines limites, par exemple, s'il s'agit de la position de l'aiguille d'un instrument de mesure ou du « site »

d'une antenne de radar (angle de l'axe de l'antenne avec l'horizontale).

Il est à noter que, dans certains cas, il est indispensable que l'on puisse faire tourner l'axe du potentiomètre sans avoir à vaincre un couple résistant important (ce dernier, inévitable, est dû au frottement du curseur sur la piste). On a réalisé, dans ce but, des potentiomètres dits « à microfriction ». Précisons enfin que, dans un potentiomètre bobiné, la variation de potentiel du curseur ne peut être une fonction continue de l'angle de rotation du fait de la discontinuité des spires. Plus ces dernières sont en fil fin, meilleure est la « résolution » du potentiomètre.

L'ex-problème de la charge

Autrefois, une difficulté supplémentaire intervenait dans l'utilisation des potentiomètres en capteurs de position : pour mesurer la tension v de la figure 2, on était obligé de consommer à cette tension une intensité non négligeable, autrement dit de « charger » cette tension par un résistor d'une résistance non infinie. Or, on peut montrer facilement que la résistance interne de la source de tension, constituée par le curseur du potentiomètre et une extrémité de la piste résistante, correspond à la mise en parallèle de αR et de $(1 - \alpha)R$, ce qui donne : $r = \alpha(1 - \alpha)R$

Cette valeur, nulle pour α nul ou égal à 1, passe par un maximum, valant $R/4$, pour $\alpha = 1/2$ (curseur à mi-course). Donc, si l'on charge la source de tension v par un résistor de résistance $R' = (k - 1)R/4$, on déforme la courbe de réponse de la figure 3. En effet, on réduit dans le rapport $(k - 1)/k$ la tension quand le curseur est à mi-course, alors qu'on la réduit moins si le curseur va vers les extrémités de la piste, et plus du tout quand il arrive à ces extrémités. La courbe devient alors une parabole avec sa concavité vers le haut.

Quand la nature des systèmes électroniques utilisés interdisait d'augmenter le facteur k , on devait donc utiliser des potentiomètres dont la courbe de réponse (tracée comme sur la fig. 3) était relevée en son milieu, et indiquer la valeur précise de la charge à utiliser pour obtenir le maximum de linéarité du potentiomètre.

Avec l'apparition des amplificateurs opérationnels à énorme impédance d'entrée, on peut donner au facteur k des valeurs telles que la charge est à considérer comme infinie. Les lecteurs seront donc tentés de demander : « Alors, pourquoi évoquer ce défaut, puisqu'on peut l'éviter maintenant ? » Tout simplement parce que, si l'on trouve des potentiomètres de haute qualité dans les surplus militaires, il faut se méfier : ils sont peut-être faits pour être chargés sur un résistor de résistance donnée. Il suffira de brancher le-

dit résistor pour améliorer notablement la qualité du capteur.

L'usure de la piste

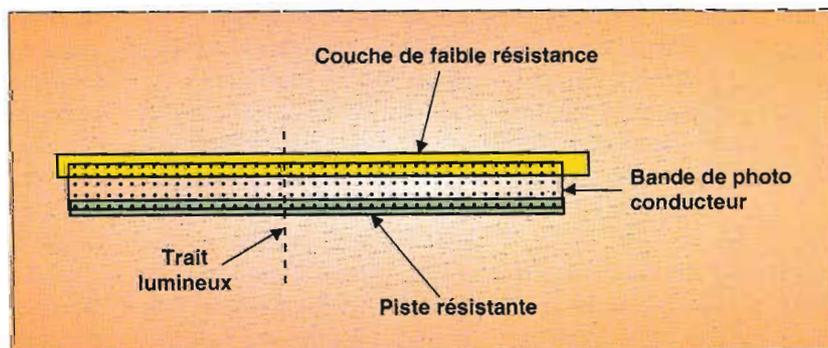
Comme nous l'avons vu plus haut, le frottement du curseur sur la piste résistante use forcément cette dernière. C'est l'origine de la panne qui s'est produite chez un grand constructeur d'automobiles, ayant utilisé, dans un véhicule témoin, quatre capteurs à potentiomètres, pour donner à chaque instant, pendant les essais sur route, les positions des roues par rapport au châssis. En dehors des élongations particulières, dues à des accidents de terrain, la position de chaque roue par rapport à la caisse reste très proche de sa valeur moyenne, mais en ayant de très nombreux mouvements de faible amplitude. Les potentiomètres s'usaient donc énormément en un point donné de leur piste résistante : au bout de quelques heures d'essais, ils étaient hors d'usage.

Peut-on éliminer ce défaut ? C'est tout à fait possible. Une première solution, approximative, consiste à utiliser comme piste résistante un dépôt de métal très dur sur un substrat de céramique ou de verre. Mais on ne fait que retarder l'usure, sans la supprimer.

Or, il y a un moyen de supprimer totalement l'usure, et l'auteur ignore pourquoi cette solution technique, fort ingénieuse, est autant dire inconnue (en tout cas pratiquement introuvable) : le « potentiomètre à curseur lumineux ». La figure 5 indique la structure d'un tel instrument. Nous avons supposé, pour la commodité de la représentation, un potentiomètre rectiligne, mais cela s'adapte parfaitement au cas d'un modèle circulaire.

On voit que l'on trouve côte à

Fig. 5. - L'optopotentiomètre, supprimant l'usure de la piste par le curseur, utilise un trait lumineux qui, rendant conductrice la couche de photoconducteur, connecte le point éclairé de la piste résistante à la piste métallique.



côte une piste métallisée de faible résistance et la piste résistante proprement dite. Débordant sur l'une et l'autre, se trouve une zone sur laquelle on a déposé un matériau « photoconducteur ». Un tel produit, on le sait, est pratiquement isolant dans l'obscurité et devient de plus en plus conducteur quand il reçoit un éclairissement croissant.

Donc, si l'on illumine la couche photoconductrice le long d'un « trait lumineux », la zone ainsi éclairée est seule conductrice, et tout se passe comme si l'on avait relié, par un fil conducteur, la couche de faible résistance et le point de la piste résistante où se projette le trait lumineux.

Un tel potentiomètre est, évidemment, inusable, ignore les « crachements » qui sont la plaie des potentiomètres classiques des studios d'enregistrement sonore. Bref, c'est un instrument idéal pour de nombreuses applications, en particulier pour son emploi comme capteur. Une firme française a réalisé de tels potentiomètres (plus exactement la partie formée par les trois pistes), et il semble que le tout soit tombé dans un oubli total (si ce n'était pas le cas, l'auteur présente, à l'avance, ses excuses... et ses félicitations à la firme qui a relevé le défi).

Utilisation sur 360 degrés

Dans le potentiomètre dit « à rotation continue » dont nous avons parlé plus haut, la disposition du bobinage de fil résistant faisait que le curseur pouvait tourner d'un angle quelconque sans dégradation mécanique. Mais ce type présente quand même un « angle mort », correspondant à la partie du « jonc » située entre la fin du bobinage et son début. Même si l'on réduit cet angle

mort à très peu, il y aura toujours une sorte de discontinuité quand le curseur franchira l'angle en question. En modifiant nettement la nature du potentiomètre, on peut arriver à un type qui n'a pas d'angle mort. Il s'agit du « potentiomètre sinus-cosinus » (que le nom ne vous effraie pas !), que l'on peut trouver dans les stocks de surplus militaires, essentiellement dans les pièces venant du démontage de vieux radars.

On le réalise de deux façons. La plus « logique » consiste à bobiner du fil résistant sur une carte de largeur L , le bobinage couvrant une longueur L , inférieure à L , comme le montre la figure 6.

Soit O le milieu de la zone couverte par le fil résistant. On fait mouvoir deux curseurs, A et B , sur un cercle C , de centre O et de rayon très légèrement inférieur à $L/2$, de telle sorte que, dans leur mouvement, ils restent toujours sur le fil résistant, en arrivant très près des spires extrêmes, sans déborder de la zone du bobinage.

Nous repérerons la direction de l'axe par l'angle a que fait la ligne OA avec les spires de fil résistant. Si le bobinage est alimenté, sur ses deux extrémités, par des tensions $+u$ et $-u$, symétriques par rapport à zéro, il est facile de voir que le potentiel du curseur A est proportionnel au sinus de l'angle a , celui du curseur B étant proportionnel au cosinus de cet angle.

Détails mécaniques et autres réalisations

En fait, au lieu des deux curseurs A et B , le potentiomètre sinus-cosinus en comporte quatre, les deux autres, A' et B' , étant dans des positions diamétralement opposées à A et B respectivement. Le curseur A' est nommé « moins sinus »

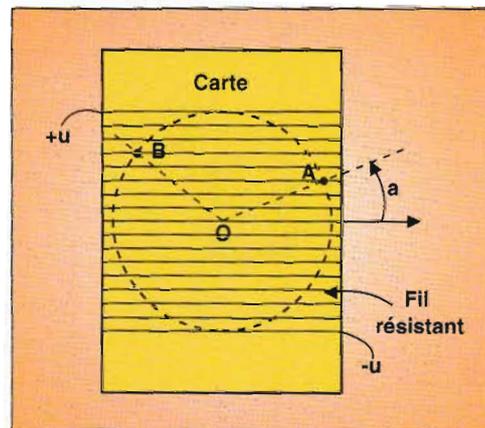


Fig. 6. - Dans le potentiomètre « sinus-cosinus », on utilise deux curseurs se déplaçant sur un cercle et frottant sur le fil résistant.

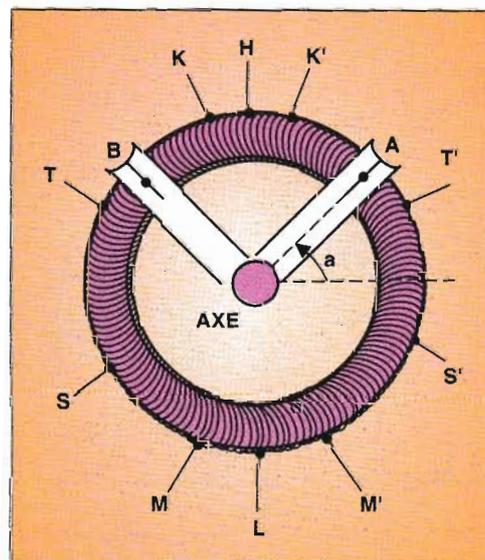


Fig. 7. - Sur un toré isolant, on a réalisé un bobinage « sans fin » de fil résistant, en deux moitiés égales, entre les points H et L . Des prises intermédiaires sur le bobinage permettent, par adjonction de résistances, de modifier la répartition des potentiels le long des enroulements. Ainsi, sur le curseur A et B , on trouve, à peu de chose près, des tensions variant comme le sinus et le cosinus de l'angle a .

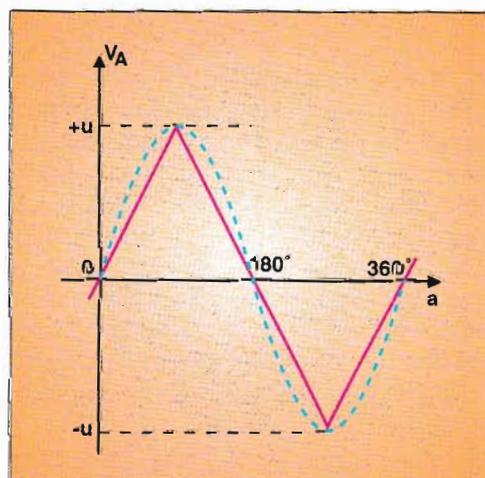


Fig. 8. - Sans les résistances ajoutées aux enroulements de la figure 7, on aurait, comme variation de tension du curseur en fonction de l'angle a , la courbe en trait plein. Les résistances arrivant sur les prises intermédiaires donnent à cette variation la loi représentée en pointillé.

et le B' est le « moins cosinus ». On trouve, en effet, sur A' un potentiel opposé à celui de A , et le potentiel de B' est l'opposé de celui de B .

Comme cela ferait trop de curseurs à faire tourner, on préfère, dans le potentiomètre, faire tourner la carte, montée au bout de l'axe, alimentée par deux balais frottant sur des

bagues isolées. Les quatre curseurs sont fixes et appuient sur le fil résistant.

Comme la réalisation d'un tel potentiomètre est assez délicate, on a imaginé une autre solution, un peu moins complexe du point de vue mécanique mais qui est cependant loin d'être simple.

Imaginons (fig. 7) un enroule-

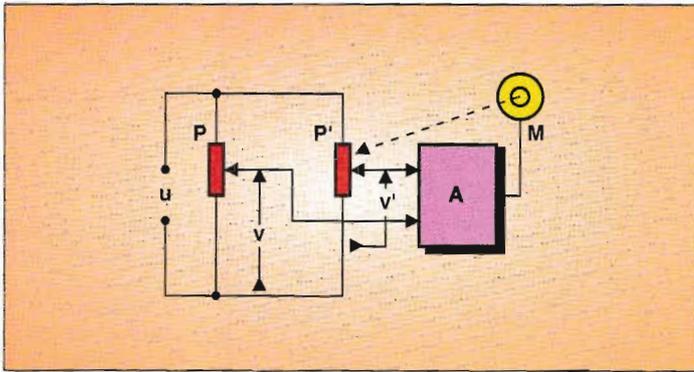


Fig. 9. - On réalise souvent un asservissement, la position du potentiomètre P' à celle du potentiomètre P, en faisant agir sur un moteur M, via un amplificateur A, la différence des potentiels de leurs curseurs.

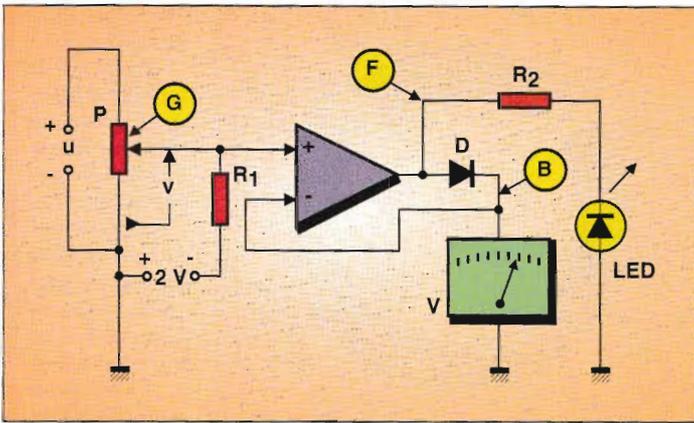


Fig. 10. - Le voltmètre V indique la position du curseur du potentiomètre. Si ce curseur arrive sur une zone hors du bobinage de fil résistif, le point (G) devient négatif et la LED s'allume.

ment de fil résistif « sans fin », couvrant donc 360° sur un « jonc » isolant ayant la forme d'un tore. La fin de l'enroulement est donc connectée au début de ce dernier. Au point de jonction, il y a une prise, nommée H, et, au point diamétralement opposé, une autre prise sur le fil résistif, nommée L.

Si l'on appliquait une tension + u sur H et - u sur L, on recueillerait sur l'un des deux curseurs perpendiculaires, A par exemple, une tension qui, en fonction de l'angle α , varierait en dents de scie symétriques, comme le montre la courbe en trait plein de la figure 8, qui n'est pas une sinusoïde.

Alors, on utilise de nombreuses prises intermédiaires, comme K et K', T et T', etc., pour modifier la répartition du

potentiel le long des deux demi-tours. En connectant des résistances selon un réseau adéquat, on arrive à faire en sorte que le potentiel du curseur A varie à peu de choses près comme le sinus de l'angle α (courbe en pointillés sur la fig. 8). Alors, automatiquement, le potentiel du curseur B variera comme le cosinus de cet angle.

En fait, on a réalisé ainsi une sinusoïde « de synthèse », qui est en réalité une succession de petits segments de droites, et qui peut s'approcher très près d'une vraie sinusoïde. La méthode est assez analogue à celle que l'on emploie dans les circuits permettant la réalisation des générateurs de fonctions (ICL 8038, XR 2208, par exemple), où l'on passe de la forme d'onde triangulaire à la sinusoïde quasi parfaite.

Comment utiliser le potentiomètre

Comme nous l'avons dit, une simple mesure de la tension entre le curseur et une extrémité de la piste résistive suffit pour connaître la position du curseur, mais cela nécessite que l'on connaisse exactement la tension appliquée à la piste résistive.

On emploie souvent les potentiomètres en capteurs de position dans le but de réaliser un asservissement de position. Le montage est alors celui de la figure 9.

On utilise un amplificateur, A, commandé par la différence des tensions v et v' correspondant aux curseurs des deux potentiomètres (dont les pistes résistives sont alimentées par la même tension u). La sortie de l'amplificateur commande un moteur M, qui agit sur l'axe du potentiomètre P', tenant à ramener à zéro la différence $v - v'$.

Comme tout servomécanisme, ce système doit, pour être stable, utiliser une indication de la vitesse du moteur M, sous forme d'une tension proportionnelle à cette vitesse, que l'on ajoute à la « tension d'erreur », $v - v'$, pour obtenir un fonctionnement sans oscillations.

Si l'on fait une simple mesure de tension, il est important de savoir si le curseur est bien sur la piste résistive. Nous avons évoqué plus haut ces potentiomètres à rotation continue, dans lesquels le curseur peut, pour une rotation de 10°, se trouver hors de la piste.

Une solution simple pour lever le doute est l'utilisation du montage de la figure 10. La tension entre le curseur, (G), du potentiomètre et le point (M) est toujours positive quand le curseur est sur la piste résistive. Cette tension est « recopiée » entre (B) et (M)

par l'amplificateur opérationnel A, qui s'arrange à maintenir toujours le point (B) au même potentiel que le point (G).

Il faut, pour cela, que le point (F) soit amené à un potentiel un peu supérieur (de 0,6 V environ) à celui du point (B), pour que la diode D puisse être conductrice.

Tant que le curseur est effectivement en contact avec la piste résistive, l'effet du courant passant dans le résistor R_1 sous la tension $(v + 2)$ est totalement négligeable, car on a choisi pour R_1 une valeur de résistance très élevée (10 M Ω ou plus).

Mais si le curseur ne se trouve plus sur la piste résistive, il est « en l'air », et le résistor R_1 amène le point (G) à un potentiel négatif, entre 0 et -2 V, par rapport au point (M). L'amplificateur opérationnel, alors, ne peut plus maintenir le potentiel du point (B) (qui ne peut être que positif) à la même valeur que celui du point (G). Il se bloque, allant en « butée basse », le point (F) devient alors fortement négatif par rapport au point (M) et, à travers la diode D' et le résistor R_2 , un courant passe dans la LED.

L'allumage de cette dernière signale donc que le potentiomètre est dans la zone où il ne donne pas d'indication valable.

Dans le cas de l'utilisation d'un potentiomètre sinus-cosinus, la connaissance des valeurs du sinus et du cosinus de l'angle, valeurs données par les tensions recueillies sur les curseurs adéquats, permet de connaître immédiatement l'angle en question. Si ces valeurs, fournies sous forme de tensions continues, sont appliquées à des convertisseurs analogiques-numériques, les sorties de ces convertisseurs permettent de très nombreux calculs simples et efficaces.

(à suivre)

J.-P. EHMICHEN