

Les capteurs de vitesse

Les capteurs qui nous donnent la valeur d'une vitesse (de rotation ou de déplacement linéaire) sont d'une grande importance. Il y a, en effet, bien des cas où il est essentiel de connaître avec précision la vitesse de rotation d'un axe, l'exemple le plus caractéristique étant sans doute celui des axes de turboréacteurs d'avions, car on sait que ces derniers fonctionnent souvent à une vitesse inférieure de 20 % seulement à celle qui entraînerait leur détérioration par force centrifuge. On retrouve ces capteurs dans l'industrie sidérurgique : la vitesse de rotation des cylindres de laminoir doit être parfaitement connue. On les voit jouer un rôle essentiel dans les papeteries, dans l'industrie du verre... Bref, on n'en finirait pas de citer des exemples. Un autre rôle très important des capteurs de vitesse est la stabilisation des servomécanismes, et il semble utile de s'arrêter un peu sur cet aspect de leur utilisation.

Le terme d'amortissement

On sait qu'un système asservi comporte toujours (fig. 1) un « organe de commande », un « organe asservi » et ce qu'il faut pour amener l'organe asservi à « recopier » la position de l'organe de commande. Pour cela, on compare les deux positions, il en résulte une « tension d'erreur » (fonction de la différence des positions), qui, amplifiée, est envoyée à un moteur. Ce dernier agit sur la position de l'organe asservi, tendant donc à réduire la tension d'erreur en dessous d'un certain minimum. Quand on voit un tel schéma, tout semble parfaitement simple. Malheureusement, lorsque l'on réalise l'asservissement, on s'aperçoit souvent qu'il y a des phénomènes parasites qui viennent nettement compliquer les choses. Le perturbateur le plus gênant est l'effet de l'inertie des pièces

en mouvement. En effet, lorsque l'organe asservi est mis en route par le moteur, toute la partie mobile a une certaine inertie. On la met en mouvement pour l'amener à la position souhaitée, et elle y arrive, mais, à ce moment, elle a de l'élan, et, du fait de son inertie, elle dépasse la position où elle devait s'arrêter.

Le système, alors, « a du remords », la force (ou le couple) qui agit sur l'organe asservi change de sens, ramène l'organe asservi à la bonne position... mais il y arrive avec une vitesse notable, et l'inertie des pièces en mouvement lui fait alors dépasser la position où elle devrait s'arrêter, dans le sens opposé.

Il en résulte des oscillations de l'organe asservi, de part et d'autre de sa position finale. Dans le meilleur cas, ces oscillations sont amorties, et si l'on attend assez longtemps, le résultat souhaité est obtenu. Mais, hélas ! il y a aussi des cas très fréquents où les oscilla-

tions évoquées ci-dessus ne sont pas amorties.

L'organe asservi se met alors à osciller indéfiniment autour de la position qu'on avait voulu lui faire occuper. On dit alors que le servomécanisme « pompe », émettant un bruit assez caractéristique, particulièrement déprimant pour le malheureux ingénieur chargé de mettre l'ensemble au point. Que faut-il faire pour que les oscillations soient amorties ou, de préférence, pour qu'il n'y ait même pas d'oscillation ? Il faut, pour commander l'organe asservi, tenir compte, indépendamment de sa position, de sa vitesse.

Si la tension d'erreur est grande, autrement dit s'il y a un écart important entre la position réelle et la position souhaitée, on peut se permettre de communiquer à l'organe asservi une vitesse élevée. C'est même recommandé, pour minimiser le temps dit « de ralliement », c'est-à-dire le temps mis par l'organe mobile pour

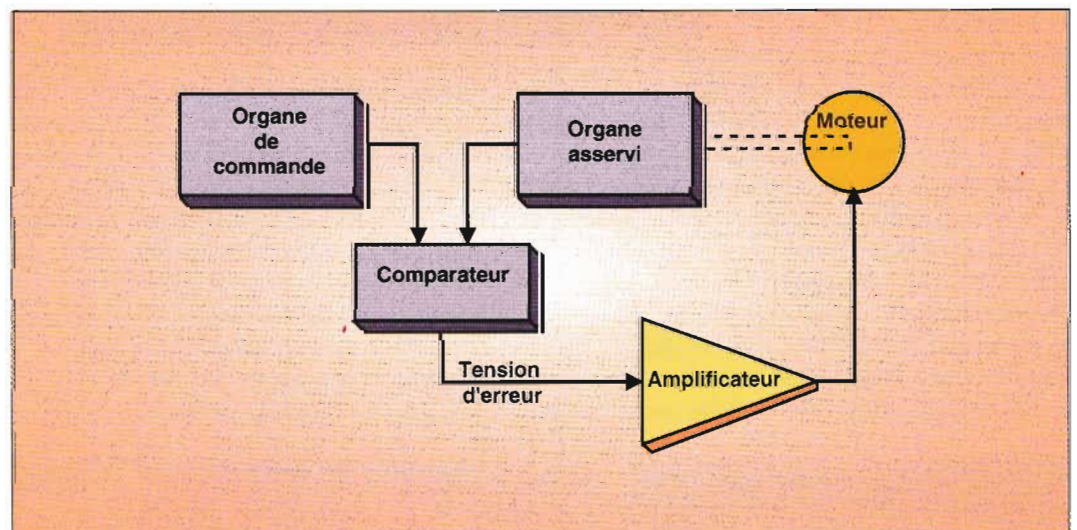


Fig. 1. - Dans un servomécanisme, on utilise un comparateur, appréciant, sous forme d'une « tension d'erreur », l'écart entre l'organe de commande et l'organe asservi. Un moteur, commandé par la tension d'erreur, via un amplificateur, et déplaçant l'organe asservi tend à réduire cette tension presque à zéro.

arriver à la position désirée et y rester.

En revanche, si l'organe asservi occupe une position relativement proche de celle où l'on veut l'amener, il faut éviter de le déplacer trop vite.

On voit donc que, en réalité, il faut faire agir, à l'entrée de l'amplificateur qui est représenté sur la figure 1, non pas la simple tension d'erreur, mais une tension complexe, comportant d'une part la sortie du comparateur et d'autre part une tension fonction de la vitesse. En première approximation, disons que l'on retranchera la tension proportionnelle à la vitesse de la tension d'erreur et que l'on appliquera la différence à l'entrée de l'amplificateur.

Ainsi, quand la tension d'erreur est élevée, l'organe asservi peut aller vite, car l'amplificateur reçoit, malgré la tension proportionnelle à la vitesse, une commande positive, mais, au fur et à mesure que l'organe asservi se rapproche de sa position finale, l'effet de la tension liée à la vitesse limite à une valeur de plus en plus basse la rapidité de son déplacement.

Le tout agit donc comme le fait, intuitivement, celui qui amène un bateau à quai, par exemple. Tant qu'il est loin de l'accostage, il met le moteur à plein régime, mais, au fur et à mesure qu'il se rapproche, il baisse les gaz, pour arriver, s'il est bien entraîné, à toucher le quai avec une vitesse presque nulle, mettant alors le moteur en marche arrière pour une courte durée.

Le terme qui agit en réduisant le couple appliqué à l'organe asservi selon la vitesse de cet organe a exactement la même action que celle d'un système « à frottement visqueux ». Rappelons que, pour un objet mobile, il y a deux types de frottements : le frottement sec, indépendant de la vitesse, et le frottement visqueux, croissant

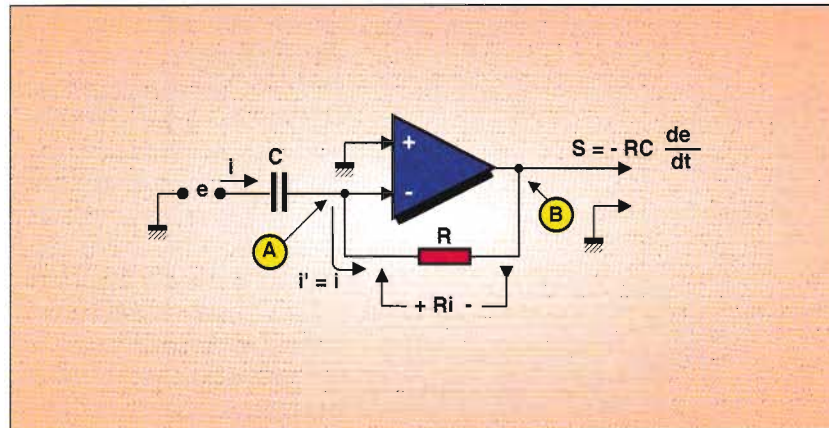


Fig. 2. – Ce montage est un dérivateur : la tension de sortie S est proportionnelle à la vitesse de variation de la tension d'entrée e (en volts par seconde). Son emploi pour obtenir la vitesse à partir d'un capteur de position est souvent déconseillé.

avec la vitesse. Introduire un tel frottement revient donc à doter la partie mobile d'un amortissement, ce qui est, on le sait, la meilleure méthode pour lutter contre les oscillations.

Pourquoi ne pas dériver ?

Souvent, les gens demandent : « Pourquoi réaliser des capteurs de vitesse ? Puisque l'on dispose de capteurs de position, on peut déduire la vitesse de la position, par dérivation. » Théoriquement, c'est tout à fait exact. Si nous disposons, par exemple, d'une tension proportionnelle au déplacement mobile, le fait de disposer, à chaque instant, de la vitesse de variation de cette tension, en volts par seconde (autrement dit, connaître sa dérivée), nous permet de nous passer de capteur de vitesse. Le terme de « dérivée » fait souvent peur à bien des gens. Il s'agit, cependant, d'une notion très simple. Il s'agit de déterminer, à chaque instant, la rapidité de variation d'une tension, en volts par seconde. Or il est très simple de réaliser une telle « dérivation » en utilisant le montage de la figure 2. Comme un amplificateur opérationnel maintient toujours, s'il le peut, le potentiel de son entrée « - » à la même valeur que celui de son entrée « + », il maintiendra, tant qu'il le

peut, le potentiel du point (A) à zéro. Par ailleurs, il faut considérer que les courants d'entrée sont négligeables, donc l'intensité i' qui traverse le résistor R est égale à l'intensité i qui traverse le condensateur C .

Comme le point (A) est à potentiel fixe (et nul), la tension e est appliquée en totalité au condensateur C , donc le courant i qui traverse ce dernier est le courant de charge (si e croît) ou de décharge (si e décroît). On peut montrer qu'il est :

$$i = C \, de/dt$$

Il est donc proportionnel à la rapidité de variation de e . Or ce même courant i passe dans le résistor R , déterminant à ses bornes une tension Ri . Comme l'extrémité gauche de R est maintenue au potentiel zéro, son extrémité droite, soit le point (B), se trouve au potentiel $- Ri$, donc :

$$S = - RC \, de/dt$$

Donc, le « circuit dérivateur » existe et il fonctionne parfaitement.

Où intervient le bruit ?

L'utilisation d'un dérivateur, pour obtenir une tension proportionnelle à la vitesse à partir d'un capteur de position, est envisageable et se pratique quelquefois. Mais les possibilités en sont très limitées, pour une raison qui se comprend aisément.

Le montage de la figure 2 est, au fond, un amplificateur dont le gain est proportionnel à la fréquence du signal d'entrée. C'est là que se trouve le point faible de la méthode.

En effet, toute tension donnée par un capteur comporte, outre la partie « utile », une composante parasite dite « bruit », souvent aléatoire. Par exemple, si le capteur de position est numérique, même en utilisant un convertisseur numérique-analogique et en « lissant » un peu le signal obtenu, il reste toujours dans ce dernier des résidus des « marches d'escalier » dues aux discontinuités inhérentes aux systèmes numériques.

Dans d'autres cas, nous pouvons considérer comme « bruit » les « marches d'escalier » qui correspondent, dans un capteur de position à potentiomètre bobiné, au franchissement des spires du bobinage résistif.

Le bruit a, presque toujours, une large gamme de fréquences et, en particulier, des composantes à fréquence élevée. Le dérivateur, ayant un gain proportionnel à la fréquence, va donc amplifier ces composantes beaucoup plus que le signal utile. Nous aurons alors, en sortie, un signal entaché d'un bruit souvent prohibitif. On dit, pour résumer, que la dérivation abaisse fortement le rapport signal/bruit, et c'est ce qui explique la rareté de son utilisation.

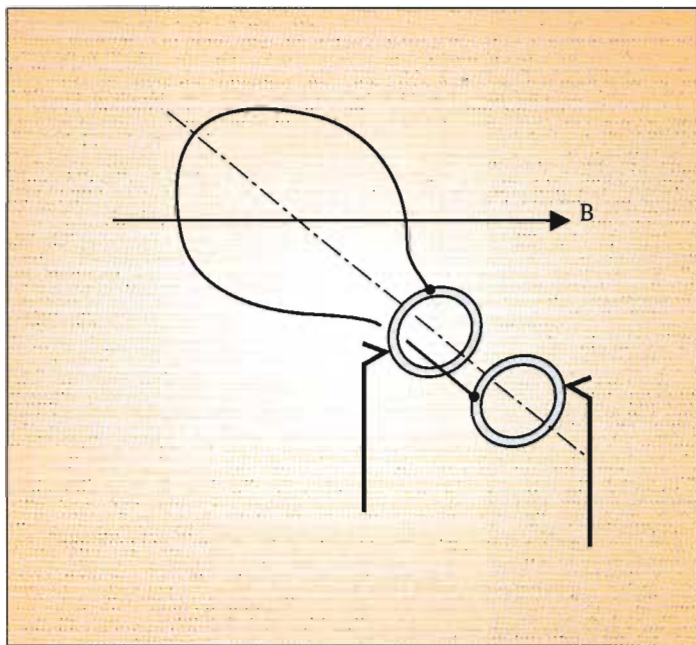


Fig. 3. - Une boucle tournant dans un champ magnétique produit, entre les balais frottant sur les bagues, une tension alternative.

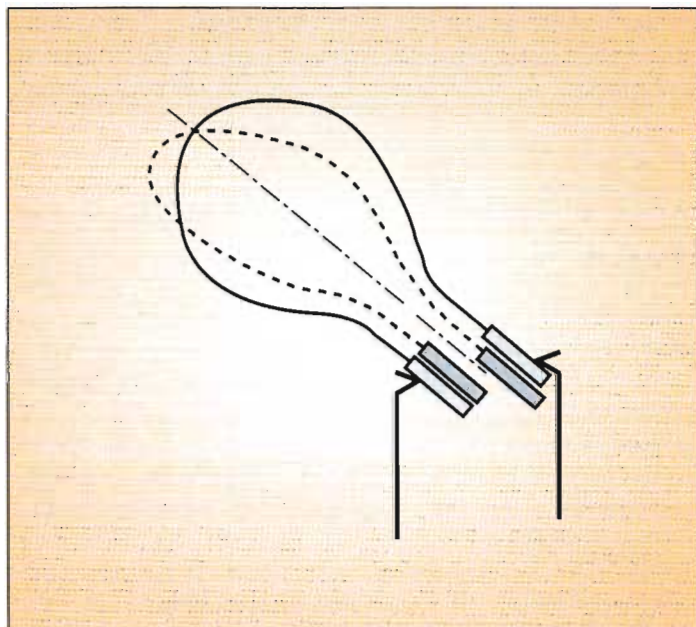


Fig. 4. - Avec plusieurs boucles comme celle de la figure 3, décalées l'une par rapport à l'autre de $1/n$ de tour, reliées à $2n$ lames de collecteur, on obtient une dynamo dont la tension est très proche du continu.

La brave dynamo

Comme premier capteur de vitesse, nous allons rencontrer une bien vieille connaissance : la dynamo à collecteur, à peu près telle que l'a imaginée Zénobe (quel prénom splendide !) Gramme, il y a près de 120 ans.

On en connaît bien le principe, nous ne ferons que le rappeler sommairement. Si

(fig. 3) un anneau de fil conducteur tourne autour d'un axe de son plan passant par son centre, dans un champ magnétique perpendiculaire à l'axe, il y naît une tension induite qui est alternative. Si l'anneau est ouvert, les deux extrémités étant reliées à des bagues sur lesquelles frottent des balais, on recueille sur ces derniers une tension alternative. La tension induite passe

par un maximum quand le plan de l'anneau contient la direction du champ magnétique. Imaginons alors (fig. 4) plusieurs anneaux du même type, décalés l'un par rapport à l'autre de $1/n$ de tour, reliés chacun à deux petites lames, diamétralement opposées, placées sur un cylindre isolant. Deux balais frottent sur les lames en question. Ainsi, les balais se trouvent connectés successivement sur un anneau, puis sur un autre, et ce juste au moment où la tension induite dans chaque anneau passe par son maximum.

Le résultat est une tension entre les balais analogue à celle que l'on obtiendrait en redressant, par un pont de $2n$ diodes, une tension à n phases. On sait que, avec $n = 3$ (du triphasé), la tension redressée ne présente que $\pm 7,2\%$ de variation (nous précisons que c'est sans filtrage). Avec de l'hexaphasé, on tombe à environ $\pm 5\%$, et ce pourcentage décroît très vite avec le nombre de phases.

Donc (et c'est là un résultat qui surprend bien des gens) une dynamo comportant, pour chaque tour, seize enroulements (donc avec collecteur à 32 lames), donne une tension de sortie qui est si proche du continu qu'on a bien de la peine à voir la fluctuation de cette tension.

Précisons toutefois qu'il s'agit là d'une dynamo réalisée spécialement pour la mesure, que l'on nomme « dynamo tachymétrique », avec des enroulements de rotor parfaitement équilibrés, un champ magnétique réalisé par un bon aimant, donnant une valeur de champ parfaitement connue et stable. Sur une telle dynamo, on peut lire, par exemple :

$$V = 0,273 \text{ V par t/s}$$

Et ne vous y trompez pas : faites-la tourner à 10 t/s exactement, vous trouverez une tension de 2,73 V à 0,01 V près. Il s'agit donc d'un capteur très précis.

Bien entendu, la tension dont nous parlons est la valeur « à vide » (on devrait plutôt parler de « force électromotrice »). Mais il faut noter que les dynamos de ce type sont fort peu « malades de la résistance interne » et qu'une consommation modérée de courant sur la tension qu'elles fournissent influe fort peu sur cette tension.

L'utilisation de cette dynamo pour la stabilisation des servomécanismes est si fréquente qu'il y a de nombreux moteurs spécialement réalisés pour les servomécanismes (moteurs à très faible moment d'inertie) qui sont munis d'une telle dynamo directement montée sur l'axe du moteur.

Où interviennent MM. Wirbel, Eddy et Foucault ?

Un autre capteur de vitesse analogique, un peu particulier parce qu'il ne fournit pas directement une tension, utilise les courants de Foucault. Il s'agit des courants qui circulent dans une masse conductrice quand on la soumet à un champ magnétique variable. On peut, en effet, imaginer des bobinages court-circuités dans cette masse et les tensions induites par les variations de flux dans ces bobines font circuler des courants dans le métal.

Ce sont ces courants que l'on trouve quelquefois nommés « courants de Wirbel », tout simplement parce qu'il s'agit d'un traducteur... moyen, qui, ne pensant pas que, en allemand, les noms communs prennent une majuscule, a traduit le mot « *Wirbelströme* » par « courants de Wirbel », alors que le mot signifie simplement « courants tourbillonnaires ». De même, dans les ouvrages américains, on trouve les « *eddy currents* »,

mais on ne fait pas allusion à un certain M. Eddy, car « eddy » signifie simplement, là aussi, « tourbillon ». Mais c'est là l'origine des « courants d'Eddy » que l'on peut voir dans certains traités.

Comment ces courants vont-ils agir ? C'est simple : ils suivent la loi physique de la « protestation universelle » : les courants engendrés par induction produisent des champs qui s'opposent aux variations de champ qui leur ont donné naissance. Des courants « paricides », en quelque sorte.

Quand ces courants sont produits par le déplacement d'un aimant près d'un bloc conducteur, comment peuvent-ils s'opposer au phénomène qui leur a donné naissance ? Tout simplement en produisant une force qui freine le déplacement de l'aimant. L'expérience est facile à faire : prenez une bonne plaque d'aluminium (3 à 4 mm d'épaisseur), remuez-la dans l'air pour vous habituer à son inertie, puis placez-la dans l'entrefer d'un puissant aimant et agitez-la de nouveau : vous aurez l'impression que vous la déplacez dans de la graisse consistante : le mouvement est freiné, et ce d'autant plus énergiquement qu'il est plus rapide.

Ces courants sont souvent utilisés pour réaliser un amortissement ou un freinage. On peut aussi réaliser l'ensemble de la figure 5. Au bout d'un axe tournant A, on a placé un aimant NS, ce dernier tournant dans une cloche de cuivre C. Cette cloche est fixée sur un axe A', dans le prolongement de A, rappelé à une position donnée par un ressort spiral S'.

Quand l'aimant tourne, les courants de Foucault font que tout se passe comme si, entre l'aimant et la cloche, il y avait un fluide visqueux. Donc, la cloche est d'autant plus entraînée que l'aimant tourne plus vite.

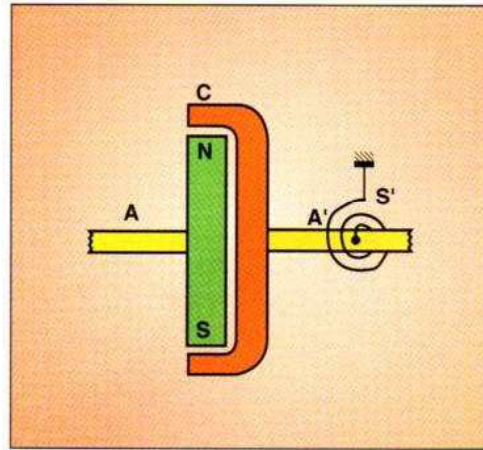


Fig. 5. - Quand l'aimant NS tourne, les courants de Foucault induits dans la cloche en cuivre C tendent à entraîner cette dernière.

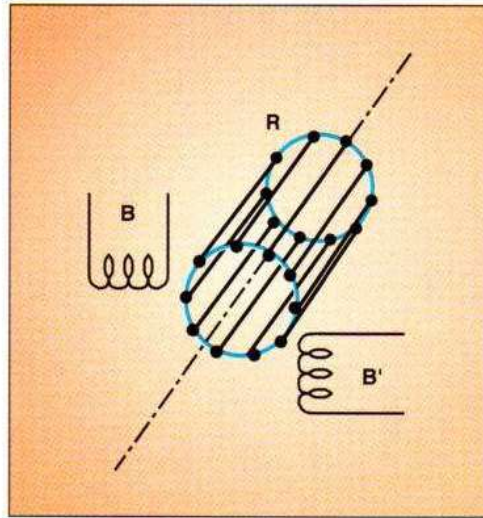


Fig. 6. - Un moteur diphasé se compose de deux enroulements statiques perpendiculaires et d'un rotor en « cage d'écureuil ». Il peut aussi être utilisé comme capteur de vitesse.

En mettant un capteur de position angulaire sur l'axe A', on réalise un bon capteur de vitesse. Il est à signaler que ce système est souvent utilisé pour déplacer une aiguille indiquant la vitesse, par exemple dans les tachymètres des automobiles.

Emploi anormal d'un moteur diphasé

Nous avons déjà parlé du moteur diphasé, très employé dans les servomécanismes. Il comporte (fig. 6) deux enroulements B et B' pour son stator, dont les axes sont perpendiculaires. Le rotor R est une « cage d'écureuil », ensemble de barres conductrices court-circuitées par deux anneaux. On peut remplacer le moteur diphasé par un « resolver », l'engin dont nous avons déjà

parlé dans *Le Haut-Parleur*, n° 1834, page 96. Il faut alors court-circuiter ses enroulements de rotor, pour qu'ils agissent comme une cage d'écureuil.

L'emploi normal de ce moteur consiste à envoyer une tension alternative sur B, une autre, déphasée de 90° par rapport à la précédente, sur B'. On produit ainsi un champ tournant, qui induit des courants dans la cage d'écureuil, l'action des champs produits par ces courants tendant à entraîner la cage, qui se met à tourner. Mais, maintenant, nous allons l'employer d'une toute autre façon. Imaginons que l'on applique une tension alternative à B seulement et que l'on examine s'il y a une tension induite dans B'.

Evidemment, si la cage ne tourne pas, cette tension est nulle : les axes des bobinages sont perpendiculaires, ils n'ont

donc aucun couplage entre eux. Les courants induits dans la cage se contentent de diminuer le champ magnétique inducteur, mais sans en modifier la direction.

Seulement, si la cage tourne, l'effet combiné de la circulation des courants induits et de la rotation de la cage va produire un champ magnétique alternatif qui ne sera plus exactement dirigé comme le champ inducteur. Il va donc apparaître, dans la bobine B', une tension induite, d'autant plus forte que la cage tourne plus vite (en se limitant, toutefois, à un nombre de tours par seconde bien inférieur au nombre de périodes par seconde de la tension appliquée à B').

Suivant le sens de la rotation de la cage, la tension induite dans B' sera en phase ou en opposition de phase avec la tension appliquée à B. Il faudra donc, pour utiliser la tension induite, employer, là encore, une « démodulation cohérente » (nous en avons déjà parlé à propos des capteurs de position).

Signalons que, si l'on désire produire un terme d'amortissement dans un servomécanisme utilisant des selsyns avec un montage en synchronodétection (voir *Le Haut-Parleur* n° 1834, page 100), il ne faut pas oublier que la « tension d'erreur » produite par le selsyn est déjà alternative.

On peut donc utiliser, dans ce cas, un moteur diphasé comme capteur de vitesse, car il donne une indication qui est une tension alternative (on applique à son enroulement B la même tension alternative qu'au stator du selsyn émetteur). Il est alors possible d'ajouter tout simplement la tension alternative du moteur diphasé servant de capteur de vitesse à celle qui est induite dans le rotor du selsyn asservi.

(à suivre)

J.P. Cehmichen