

# Capteur de déplacement rectiligne à transformateur différentiel

par I. LEBRUN (\*)

*Plus connu sous l'abréviation anglo-saxonne de LVDT, le capteur de déplacement rectiligne à transformateur différentiel est un composant essentiel en asservissement. Le présent article expose ses particularités et fait un point complet sur ses principaux paramètres.*

## Principe de fonctionnement :

### Principe de fonctionnement du capteur :

Le capteur de déplacement rectiligne à transformateur différentiel se compose de deux parties physiquement distinctes :

- l'équipage mobile,
- le transformateur.

(Cf. figure 1).

### L'équipage mobile :

● Comme son nom l'indique, c'est la partie du capteur qui est généralement assujettie au déplacement rectiligne que l'on veut mesurer.

Il est généralement constitué d'un noyau (1) ferro-magnétique et d'une tige (2) amagnétique.

● Ces deux constituants principaux peuvent être complétés par des éléments assumant des fonctions mécaniques annexes telles que l'attelage à la pièce en mouvement ou l'amélioration du coefficient de frottement de l'équipage mobile dans le transformateur.

### Le transformateur :

● Il comporte trois enroulements [un primaire (P) et deux secondaires

(S1) et (S2)] bobinés concentriquement autour de l'axe de déplacement  $xOx'$  de l'équipage mobile ; l'ensemble du bobinage est symétrique par rapport au plan (II) perpendiculaire en O à  $xOx'$ .

Suivant le type de capteur, les supports de bobinage peuvent être très divers par la forme (mandrins, carcasses, etc...) et par la matière (matières plastiques, métaux amagnétiques, époxyds, etc.).

● Le bobinage est généralement protégé par un boîtier métallique cylindrique (corps) qui peut éventuellement assurer en même temps la protection contre les champs électriques et magnétiques extérieurs.

● L'accès extérieur aux bobinages est le plus souvent réalisé par l'intermédiaire de « fils de sortie » mais peut revêtir bien d'autres formes

(broches à souder, broches à wrapper, connecteur, etc.). Ces fils sortent du capteur le plus souvent par l'une des extrémités mais de nombreux modèles existent également avec « sortie latérale ».

### Fonctionnement :

● Les couples de bobinages (P, S1) et (P, S2) peuvent être considérés comme deux transformateurs construits symétriquement par rapport au plan  $\pi$ .

L'échange d'énergie entre le primaire et les deux secondaires est, pour la majeure partie, assuré par l'intermédiaire du noyau magnétique qui se déplace le long de l'axe  $x'Ox$ .

● Lorsque le noyau est centré sur le point O, les deux transformateurs sont équivalents. Pour une tension primaire ( $V_p$ ) constante, les ten-

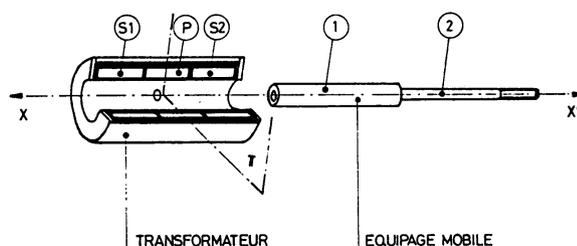


Fig. 1.

(\*) Chef de produit capteur Schaevitz LN.

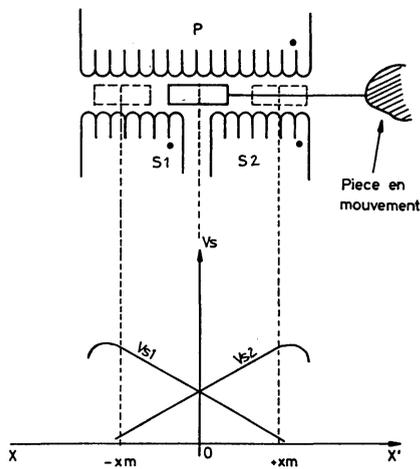


Fig. 2.

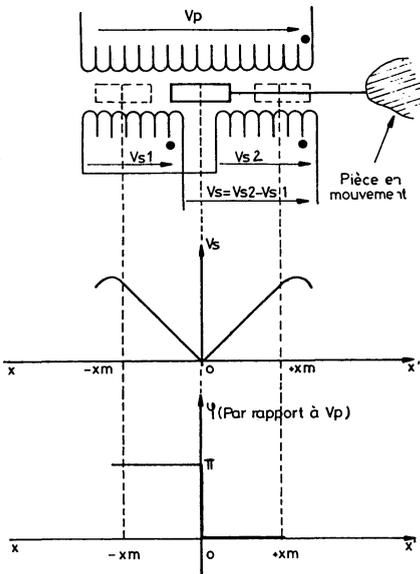


Fig. 3.

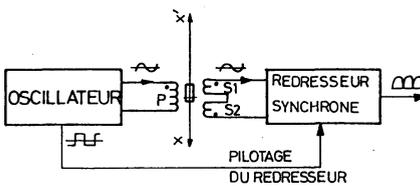


Fig. 4. - Electronique à sortie bidirectionnelle.

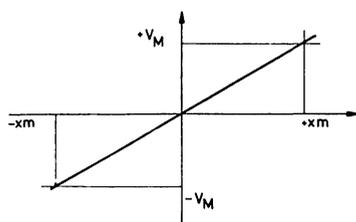


Fig. 5. - Synoptique d'un conditionneur élémentaire.

sions  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  recueillies sur les secondaires sont égales (voir figure 2).

● Lorsque le noyau se déplace du côté de S1, le couplage entre P et S1 croît tandis que le couplage entre P et S2 décroît. Le phénomène inverse se produit lorsque le déplacement est effectué du côté de S2.

● Le capteur est construit de telle façon que les variations de  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  qui en résultent soient les plus linéaires possible. La zone de linéarité détermine la « course maximale » (comprise entre  $-x_m$  et  $+x_m$ ) du capteur. La non linéarité aux extrémités est principalement due aux pertes de flux magnétique lorsque le noyau approche des extrémités des bobinages.

● Compte-tenu des conventions de phase adoptées sur la figure 2, si  $V_p$  est une tension sinusoïdale convenablement choisie,  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  le sont aussi et, de plus, sont pratiquement en phase avec  $V_p$ .

Leur différence  $V_s = V_{s2} - V_{s1}$ , sinusoïdale également, est en phase avec la tension du secondaire dont l'amplitude est la plus grande (cf. figure 3).

$V_s$  est donc en phase avec  $V_{s1}$  quand le noyau est déplacé du côté de S1, et en phase avec  $V_{s2}$  quand le noyau est déplacé du côté de S2. En d'autres termes, si l'on réfère la phase  $\Phi$  de  $V_s$  à celle de  $V_p$  et le déplacement  $x$  du noyau par rapport au point O, on a :

$$\Phi = 0 \text{ pour } x > 0$$

$$\Phi = \pi \text{ pour } x < 0$$

$V_s = 0$  pour  $x = 0$  (position « zéro électrique »)

$$V_s(x) = V_s(-x)$$

Le couple  $(V_s, \Phi)$ , qui constitue le signal de sortie du capteur, est donc en relation biunivoque avec le déplacement du noyau dans toute la zone où  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  sont des fonctions strictement monotones de  $X$ .

### Principe de fonctionnement du conditionneur :

L'électronique élémentaire associée au capteur de déplacement doit assurer deux fonctions bien distinctes :

- alimenter le capteur par le primaire,

- traiter le signal de sortie disponible aux secondaires sous sa double identité tension-phase pour le rendre plus aisément utilisable ; la conversion la plus répandue offre à l'utilisateur un signal de tension bidirectionnel (par exemple variant de  $-10\text{ V}$  à  $+10\text{ V}$ ), le signe étant lié à celui du déplacement  $x$ .

Une telle conversion a l'avantage de simplifier à l'extrême la correspondance déplacement-signal de sortie de l'électronique (Cf. figure 4). Les autres formes de sortie proposées (courant, fréquence, impédance, numérique) sont en général produites à l'aide d'un convertisseur disposé en aval de la sortie en tension.

### Alimentation du capteur :

● Elle est réalisée par un oscillateur sinusoïdal dont les stabilités de fréquence et de niveau de sortie en fonction de la température devront dans la plupart des applications être soigneusement étudiées.

● Les fréquences les plus courantes s'étalent entre 50 Hz et 10 kHz. Les tensions, quand à elles, sont en général inférieures à 50 VRMS.

### Traitement du signal de sortie :

● Les solutions de traitement de la valeur complexe  $V_s$ , même réduites à celles qui la convertissent en un signal de tension bidirectionnel, sont nombreuses et nous ne pouvons les évoquer toutes dans le cadre de cet exposé.

Nous porterons notre choix sur celle qui nous semble résoudre au mieux et avec le maximum de simplicité la plupart des problèmes qu'un tel traitement soulève dans la pratique. La figure 5 donne le synoptique du principe.

● L'oscillateur fournit un signal carré, synchrone du signal sinusoïdal qui alimente le capteur.

La différence  $V_{s2} - V_{s1}$  est réalisée directement par câblage des deux secondaires en série, de telle manière que  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  soient constamment en opposition de phase.

$V_s = V_{s2} - V_{s1}$  est recueillie par un redresseur synchrone, piloté par le signal carré issu de l'oscillateur.

Le signal  $V_s$  est alors en phase ou en opposition de phase avec le signal carré, suivant que le noyau se trouve du côté de S2 ou du côté de S1. Il s'ensuit que le redresseur synchrone produit un signal alternatif redressé, respectivement positif ou négatif, et dont l'amplitude crête est proportionnelle à l'éloignement du noyau par rapport au « zéro électrique ». Le diagramme des temps de la figure 6 complète l'illustration du principe.

● Bien qu'un tel signal redressé puisse être directement lu par certains appareils de lecture, le redresseur synchrone est en général complété par un filtre passe-bas qui, en l'intégrant, offre à l'utilisateur tous les avantages d'une sortie en tension continue.

● L'électronique peut alors être complétée par un « réglage de gain » et un « réglage de zéro ».

Le réglage de gain pourra affecter soit le niveau de sortie de l'oscillateur, soit celui du « démodulateur synchrone » (redresseur synchrone + filtre).

Il permet de compenser les dispersions sur les niveaux de sortie des capteurs et sur les gains des différents étages du conditionneur. Il permet également d'utiliser le capteur sur différentes courses tout en conservant le même niveau de tension maximale de sortie du démodulateur. Le réglage de zéro permet de compenser l'ensemble des petits décalages présentés par les différents étages du démodulateur synchrone ; il permet aussi de rattraper une éventuelle petite erreur de positionnement initial de l'équipage mobile au « zéro électrique ».

**Avantages :**

**Avantages liés au capteur :**

1) La simplicité du principe en fait un appareil robuste. Sa fiabilité, comparable à celle d'un transformateur d'alimentation basse tension travaillant très en dessous de sa puissance maximale admissible, permet d'avancer des M.T.B.F. pouvant atteindre 150 000 heures.

2) Son faible encombrement et sa légèreté permettent une utilisation dans des cas d'accès difficile à la pièce mobile dont on veut mesurer le déplacement ou lorsque le poids est un facteur important dans l'application considérée. En particulier l'extrême légèreté de l'équipage mobile (quelques grammes) autorise des mesures délicates et de larges bandes passantes mécaniques (applications dynamiques).

3) L'isolement galvanique entre l'enroulement primaire et les enroulements secondaires peut être avantageusement exploité lorsque pour des raisons de sécurité le circuit d'alimentation en amont doit être totalement isolé du circuit de traitement aval (par exemple dans le cas d'une alimentation par un réseau lié au secteur, associée à un traitement du signal par ordinateur).

4) La séparation physique totale entre l'équipage mobile et le transformateur permet des applications dans des milieux agressifs (huile, eaux, gaz, vapeurs) et dans des conditions climatiques difficiles sans modifications notables des performances. En particulier, les « capteurs étanches » peuvent sup-

porter des pressions de plusieurs centaines de bars.

5) L'insensibilité de nombreux modèles aux déplacements radiaux de l'équipage mobile, en facilite grandement la mise en œuvre et permet de faire des mesures très précises grâce à la sélectivité du système vis à vis du sens de déplacement, à l'absence d'hystérésis et à son excellente répétabilité.

6) La très faible consommation du capteur (quelques milliwatts) laisse place à des applications dans du matériel embarquable ou du matériel autonome devant fonctionner durant de longues périodes.

7) Son coût relativement faible lui permet de supporter avantageusement la comparaison à d'autres systèmes de mesure de déplacement dans les mêmes conditions de fonctionnement avec des performances généralement supérieures.

**Avantages liés au conditionneur :**

1) L'existence du conditionneur est en soi plutôt un désavantage : le capteur idéal serait celui qui ne nécessite pas d'électronique associée ! Ce n'est donc pas les avantages liés à la présence d'une électronique que nous discuterons ici, mais de ceux qui peuvent justifier le choix du principe exposé en I - B.

Deux idées maîtresses nous ont guidés :

- recherche d'une électronique qui « corrige » si possible les « imperfections liées au principe même du capteur.
- limitation à une électronique suffisamment simple pour demeurer robuste, fiable et d'encombrement réduit.

2) Les « imperfections » du capteur sont essentiellement :

- la non linéarité au passage au zéro électrique,
- la sensibilité du couplage par induction entre le primaire et les secondaires aux variations de fréquence du signal d'alimentation. Cette dépendance affecte les valeurs complexes  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  tant en module qu'en phase par rapport au primaire.

● La non linéarité au passage au zéro électrique est liée à deux faits principaux :

- d'une part  $V_{s1}$  et  $V_{s2}$  ne peuvent pas physiquement être rigoureusement en phase, et par conséquent le module  $V_s$  de leur différence ne peut jamais être nul et passe par un minimum  $V_{sm}$  en  $x = 0$  (la courbe de la figure 3 devient ainsi, de façon plus réelle, celle de la figure 7) ;
- d'autre part, lorsque la valeur de  $V_s$  approche de zéro le niveau du si-

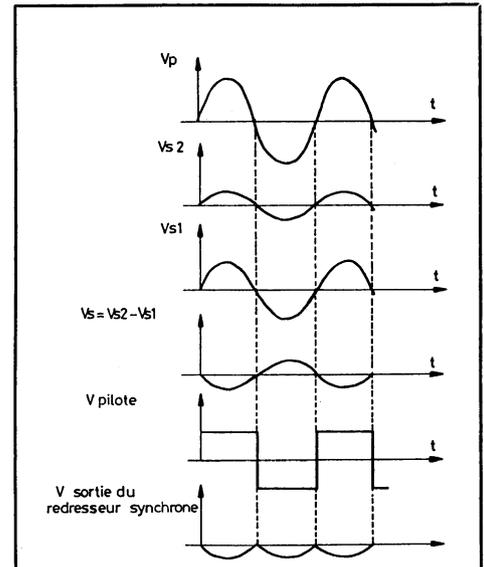


Fig. 6. - Diagramme des temps du conditionneur élémentaire.

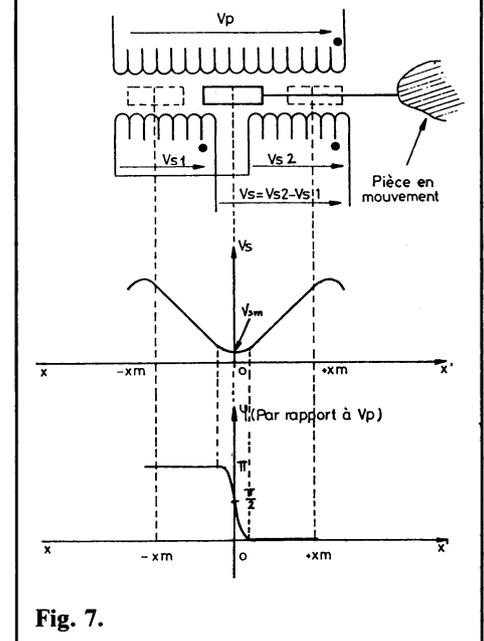


Fig. 7.

gnal recueilli au secondaire par capacité avec l'enroulement primaire n'est plus négligeable. Ce signal parasite est en général en quadrature avec le signal primaire (le passage par capacité jouant le rôle d'une dérivation du premier ordre) et sa présence augmente encore le niveau  $V_{sm}$ .

● Une démodulation non synchrone a dans ce cas le double désavantage de respecter cette non linéarité à l'approche du zéro et de présenter généralement un « seuil de détection » non nul qui laisse une zone d'indécision du signe autour du zéro électrique. La sortie d'un tel système est loin d'être satisfaisante (cf. figure 8). Si l'on veut utiliser la démodulation non synchrone il faut de ce fait recourir à deux démodulateurs traitant séparément chacun des deux signaux étant réalisée plus en aval. Outre que le système s'en

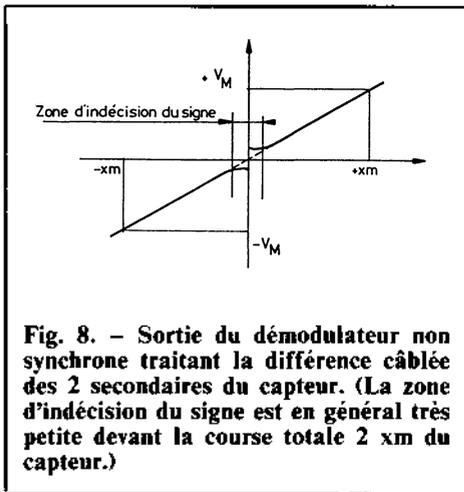


Fig. 8. — Sortie du démodulateur non synchrone traitant la différence câblée des 2 secondaires du capteur. (La zone d'indécision du signe est en général très petite devant la course totale  $2 x_m$  du capteur.)

trouve immédiatement alourdi, on rencontre alors les problèmes d'équilibre des gains et des dérives entre les deux démodulateurs.

● Considérons alors l'effet d'une démodulation synchrone appliquée directement sur  $V_s$  : à l'approche du zéro électrique, les variations de  $V_s$  deviennent faibles, ce qui pourrait encore accroître la perte de précision en ce point.

Mais si l'on considère la phase  $\Phi$  (cf. figure 7), on dispose au contraire d'une manifestation du capteur largement variable et donc susceptible d'être exploitée dans le sens d'une grande précision. Tenant compte du fait que le gain d'un démodulateur synchrone est proportionnel au cosinus du déphasage existant entre le signal sinusoïdal qu'il traite et le signal carré qui le pilote, on constate alors que le signal  $V = V_s \cdot \alpha \cos \Phi$  offert en sortie du démodulateur synchrone a recouvré sa linéarité et toute sa précision au point  $x = 0$  (notons que la démodulation synchrone élimine le signal parasite induit sur le secondaire par couplage capacitif, du fait que ce signal est en quadrature avec le signal carré de pilotage).

● La fonction de transfert du capteur étant sensible aux variations de fréquence du signal d'alimentation, il convient de choisir un type d'oscillateur stable aussi bien en fréquence qu'en tension, pour respecter la précision que peut offrir le capteur.

La nécessité de fournir un signal carré en phase avec le signal sinusoïdal peut conduire à la solution suivante :

Un signal « pseudo sinusoïdal » est obtenu en intégrant deux fois le signal carré produit par un « trigger de Schmidt » (Cf. diagramme des temps de la figure 9).

Ce pseudo sinus, constitué de sections de paraboles à concavités alternativement positives et négatives,

présente une distorsion harmonique de 3,5 %, ce qui n'affecte généralement pas la précision des capteurs.

Le signal triangulaire obtenu après la première intégration est utilisé pour fermer la boucle de contre réaction sur le trigger de Schmidt. Un choix convenable des composants peut assurer à un tel montage une excellente stabilité thermique. (150 ppm/°C pour des tensions inférieures à 10 V et moins de 1 Hz/°C pour des fréquences inférieures à 5 000 Hz).

### Limites d'utilisation :

#### Limites inhérentes au capteur :

1) La recherche d'un rapport longueur de course utile sur longueur totale du capteur le plus grand possible (il peut atteindre 0,6 à 0,7) a son revers : la « surcourse mécanique », parfois utile pour des mesures réalisées sur une petite portion d'une course importante, est évidemment réduite au strict nécessaire. Sans égards pour cette limite, on risque, dans les applications dynamiques, de détruire l'équipage mobile s'il n'est pas maintenu en partie dans le passage central du capteur, surtout lorsque le diamètre de ce passage est lui aussi réduit au strict minimum.

On devra alors avoir recours à un capteur de course supérieure ou faire usage d'un équipage mobile conçu spécialement pour l'application envisagée.

2) L'équipage mobile, de par sa légèreté, doit aussi être soigneusement considéré lorsque l'on destine le capteur à des mesures de chocs. En particulier l'attelage à la pièce en mouvement doit être réalisé par les moyens les plus directs possible (par exemple : bague de serrage) afin d'éviter les risques de mâtage liés à des accouplements mécaniques plus délicats (filets, rotules...).

3) Le passage central du capteur étant forcément ouvert vers l'extérieur au moins par l'une de ses extrémités, il est sensible aux champs magnétiques orientés selon son axe. Si des champs continus ont généralement peu d'effet (en général limité à un changement de sensibilité), les champs variables peuvent par contre apporter de fortes perturbations, en particulier dans le cas de champs basse fréquence.

Le choix d'un capteur dont le diamètre du passage central est le plus réduit possible s'impose dans ce cas. La préférence sera également donnée à un capteur comportant des

flasques magnétiques en ses extrémités.

4) L'impédance de sortie d'un capteur de déplacement rectiligne est généralement de plusieurs centaines d'ohms et pour la majeure partie réactive. Ceci impose certaines précautions : il faut veiller au choix du câble de liaison à l'électronique dès que l'on dépasse 2 ou 3 m, sous peine de perdre une partie de ses performances.

Réduire au minimum la charge capacitive du secondaire et dans le cas d'une lecture séparée des secondaires, prendre soin de présenter sur chacun d'eux des charges résistives et réactives respectivement égales.

5) Les limites d'utilisation en température sont dues à plusieurs éléments :

— d'une part les limites inhérentes au domaine d'utilisation des matériaux à fonction mécanique (il faut rester en deçà des limites de fluage, de cassure, de ramollissement...);

— d'autre part, les limites inhérentes au domaine d'utilisation des matériaux à fonction électromagnétique (rigidité diélectrique, résistivité et réluctance des isolants, conductivité des conducteurs, perméabilité et résistivité des matériaux magnétiques). On trouve actuellement des capteurs dont les gammes de température s'étalent entre  $-50^\circ\text{C}$  et  $+500^\circ\text{C}$  ;

— d'autre part, dans le cas d'une application dans un milieu de température variable, il faudra tenir compte de l'inertie thermique du capteur (en moyenne  $3 \text{ mn}/^\circ\text{C}$  pour atteindre la stabilisation).

#### Limites inhérentes au conditionneur :

1) Le capteur ayant une impédance de sortie relativement forte, sa sortie doit attaquer le démodulateur sur une impédance suffisamment élevée pour conserver la précision initiale du principe. L'entrée du démodulateur devient alors sensible aux parasites. L'utilisation en milieu industriel, présentant une ambiance radio électrique fortement perturbée, devra prévoir une électronique comportant les protections antiparasites adéquates. Il sera également souhaitable de protéger la sortie de l'oscillateur exposée à de fortes surtensions parasites pouvant être développées sur le primaire.

2) La précision du démodulateur est limitée par le bruit lié en majeure partie à l'utilisation de semi-conducteurs. A ce bruit se superpose une résiduelle de démodulation (fré-

quence double de celle de l'oscillateur qui peut être gênante lors d'applications rapides où la lecture est réalisée par échantillonnage (cas par exemple du « scanning » effectué sur une batterie de capteurs).

Cette résiduelle doit être minimisée en utilisant des capteurs à déphasage  $\Phi$  très faible pour la fréquence d'alimentation choisie, ou en compensant ce déphasage par un dispositif de retard convenable interposé sur le signal carré qui pilote le démodulateur.

3) Le choix de la fréquence de coupure du filtre disposé en sortie du démodulateur résulte d'un compromis entre la bande passante de la chaîne (que l'on désire généralement la plus large possible) et la résiduelle de démodulation (que l'on cherche à minimiser au maximum). Suivant le type d'application (dynamique ou statique), il faudra en général opter pour l'une ou l'autre ; il faut cependant noter que la bande

passante est limitée par la fréquence d'alimentation du capteur (« fréquence porteuse »), la fréquence de coupure ne pouvant guère dépasser le 1/5 de la fréquence porteuse.

4) La plage d'utilisation en température de l'électronique est généralement plus réduite que celle du capteur. On peut distinguer trois grandes classes dont les limites varient plus ou moins selon les constructeurs :

- classe « standard » : 0 à + 60 °C,
- classe « industrielle » : - 20 °C à + 75 °C,
- classe « militaire » : - 55 °C à + 125 °C.

Il faut cependant distinguer la « plage de fonctionnement » et la « plage où les performances sont garanties », celle-ci pouvant être fortement réduite dans certains cas. En conséquence, il sera parfois nécessaire d'éloigner l'électronique de l'ambiance « dure » dans laquelle le capteur peut être plongé.

Lors du choix d'une chaîne de mesure, il sera important de veiller à ce que les ordres de grandeur des différentes erreurs soient comparables ; l'excellente linéarité d'une électronique dont la fréquence ou la tension de sortie présentent de fortes dérives en température ne sert à rien dans le cas d'une utilisation en plein air !

- impédance d'entrée ( $\approx$  impédance primaire) ( $\Omega$ ),
- impédance de sortie ( $\approx$  impédance secondaire) ( $\Omega$ ),
- puissance max. admissible (W),
- course électrique (pour laquelle la linéarité est cotée) (mm),
- course mécanique totale (mm).

1) La sensibilité est exprimée en mV recueillis au secondaire par Volt injecté au primaire et par mm de déplacement.

La tension secondaire est ici supposée être  $V_s = V_{s2} - V_{s1}$ .

Il est important de se faire préciser si ce chiffre sous entend un traitement séparé des deux secondaires ou un câblage direct en opposition de phase.

La sensibilité dépendant également du niveau et de la fréquence d'attaque du primaire, les conditions de mesure doivent être précisées.

2) Le constructeur doit fournir clairement la définition de la linéarité qu'il adopte ; la linéarité étant exprimée sous forme d'un écart par rapport à une droite de référence dite « meilleure droite », il a lieu de préciser de quel écart il s'agit (écart type, écart maximum absolu, écart moyen absolu) et de quelle façon est choisie la droite de référence (méthode des moindres carrés, optimisation de l'écart maximum absolu, droite de pente moyenne passant par le zéro, etc.).

L'écart est généralement exprimé en % de la course ou de la demi course électrique totale.

De plus, la linéarité dépendant des mêmes paramètres que la sensibilité ainsi que du mode de traitement supposé pour le signal de sortie (démodulation synchrone ou non, mode de câblage des secondaires, conditions de charge), ces conditions de mesure doivent être naturellement précisées.

3) Si le déphasage secondaire/primaire est important à la fréquence d'utilisation, il faudra tenir compte de sa variation en fonction de la température qui peut affecter, suivant le mode de traitement, la linéarité et la sensibilité.

Dans le cas d'une démodulation synchrone, la sensibilité réelle du capteur est donnée par  $S \cdot \cos \Phi$ , avec  $S$  = transfert de tension primaire à secondaire en mV/V/mm et  $\Phi$  = déphasage secondaire/primaire.

**Paramètre définissant l'électronique :**

L'essentiel est décrit par les grandeurs suivantes :

**Principaux paramètres d'appréciation :**

**Paramètres définissant le capteur :**

L'essentiel est décrit par les grandeurs qui suivent et dont nous ne commenteront que celles qui peuvent présenter des problèmes d'interprétation :

- sensibilité (mV/V/mm),
- déphasage secondaire/primaire (degrés),
- linéarité, (% de la Pleine Echelle ou de la 1/2 Pleine Echelle),
- domaine d'emploi en température (°C - °C), (performances garanties),
- température de stockage (°C - °C),
- coefficients de dérive en température dans le domaine d'emploi garanti :
  - + du zéro (% de la Pleine Echelle/°C),
  - + de la sensibilité (% du nominal/°C),

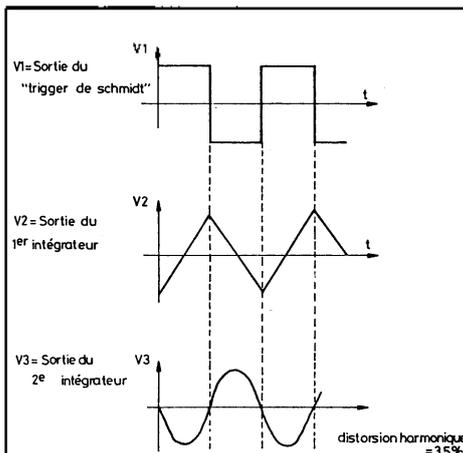


Fig. 9. - Diagramme des temps de l'oscillateur basé sur 2 intégrations successives d'un signal carré.

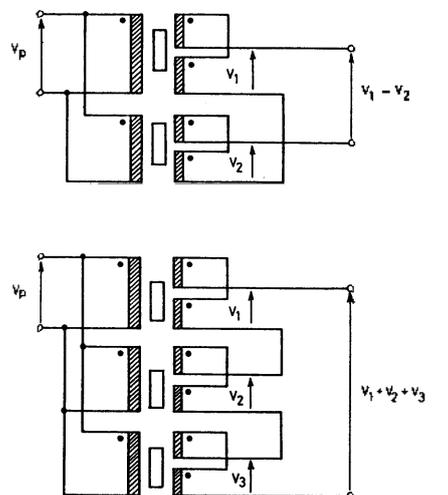


Fig. 10. - Exemples de montages économiques des secondaires.

### 1) Oscillateur :

- niveau de sortie (V),
- fréquence (Hz),
- débit admissible (mA),
- dérive en température de la fréquence (% /°C),
- dérive en température de la tension de sortie (% /°C).

### 2) Démodulateur :

- type de démodulation utilisé et mode de câblage du capteur,
- impédance d'entrée ( $\Omega$ ),
- niveau max. d'entrée (mV),
- fréquence de coupure du filtre de sortie (Hz),
- résiduelle + bruit en sortie (mV ou  $\mu$ A),
- réglages disponibles (gain, zéro, décalage),
- impédance de sortie, ( $\Omega$ )
- type et valeur nominale du signal de sortie,
- débit max. admissible en sortie,
- dérive en température du zéro et/ou du décalage,
- dérive en température du gain (% de la Pleine Echelle /°C),
- linéarité (% de la Pleine Echelle), (mêmes remarques à ce propos que pour le capteur - Cf. IV - A - 2.).

### 3) De plus il faudra connaître pour l'ensemble :

- les tensions d'alimentations (V),
- la réjection des sorties sur les variations de tension d'alimentation (%),
- la consommation (mA),
- le domaine d'emploi garanti en température,
- la plage de température de stockage autorisée.

## Problèmes liés à l'interchangeabilité

On considérera deux problèmes distincts :

- Interchangeabilité concernant des capteurs ou des électroniques de même type que l'on veut simplement remplacer dans le cadre d'une maintenance préventive ou obligée.
- Interchangeabilité entre capteurs ou électroniques de types différents, voire même provenant de constructeurs différents.

1) Le remplacement du capteur ou de l'électronique d'une chaîne de mesure exige en général le réétalonnage de cette dernière. Cependant il existe des solutions électroniques plus ou moins complexes qui évitent cette intervention.

Nous citerons pour mémoire la plus simple, qui consiste à utiliser des capteurs équipés d'un étage amplificateur de sortie dit « adaptateur » et qui joue le double rôle d'abaisseur d'impédance de sortie (peut être

rendue  $< 1 \Omega$ ) et de normalisation du niveau de sortie secondaire pour un niveau d'entrée primaire donné. Autrement dit, cet étage de sortie adjoint au capteur et préréglé en usine corrige les dispersions liées à la fabrication et qui affectent en général de façon non négligeable (plusieurs %) la sensibilité et la dérive en température.

Ceci permet alors de préréglé également les électroniques, résolvant de ce fait les problèmes d'interchangeabilité tant du capteur que de l'électronique.

2) L'interchangeabilité entre capteurs et électroniques de types ou de constructeurs différents ne peut se traiter qu'au « coup par coup », en s'entourant du maximum de conseils que les constructeurs peuvent donner. Une liste de base des points à étudier pourrait être la suivante (après s'être assuré que l'interchangeabilité mécanique est possible !):

- les éléments nouveaux peuvent-ils travailler dans les mêmes conditions d'ambiance que ceux que l'on désire remplacer ? (température, milieu, pression, vibrations...);
- l'oscillateur du conditionneur peut-il alimenter le capteur ? (fréquence, niveau, débit, impédances);
- le type de traitement du signal du conditionneur peut-il être appliqué au capteur ? (linéarité, stabilité en température).

2) Les constructeurs de capteur européens pouvant effectuer ces recherches sur fonds propres sont encore peu nombreux.

La majeure partie des progrès enregistrés sont des retombées de recherches spécifiques effectuées dans le cadre de marchés importants et correspondent donc à des besoins pressants de l'utilisateur.

3) C'est ainsi que les milieux spécialisés de la cryogénie et des hautes températures ont amené certains constructeurs à imaginer des solutions fiables pour l'utilisation sous des températures descendant jusqu'à  $-150^\circ\text{C}$  ou atteignant près de  $+1000^\circ\text{C}$  (suppression des matériaux magnétiques limités par leur point de Curie et remplacement du noyau par une bobine).

4) Les problèmes de fiabilité et de redondance posés par les industries aéronautiques et nucléaires ont poussé à la construction de capteurs « redondants » revêtant diverses formes (noyaux multiples, transformateurs multiples, électroniques redondantes, etc.).

5) La recherche scientifique, généralement consommatrice de grande

précision, a réclamé des capteurs étudiés spécialement dans le sens d'une grande stabilité en température (dérive de sensibilité inférieure à  $150 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) pour pouvoir tirer tout le bénéfice de l'excellente linéarité que peut atteindre le principe (écart absolu par rapport à la droite qui le minimise  $< 0,05\%$  de la Pleine Echelle dans certains cas).

6) La miniaturisation amène à des capteurs de diamètres de plus en plus petits (6 mm dans certains cas) et des rapports de course utile/longueur totale approchant 0,8.

L'électronique, de son côté, fait maintenant appel aux avantages de la technologie hybride pour bénéficier de ses nombreux avantages :

- miniaturisation poussée,
- fiabilité accrue,
- dérives en température améliorées,
- intégration de fonctions plus complètes offrant à l'utilisateur une chaîne plus versatile et dotée de performances moins dépendantes des éléments additionnels extérieurs;
- les caractéristiques du capteur sont-elles suffisantes dans le cadre de l'utilisation prévue et avec l'électronique en question ? (linéarité, stabilité en température, stabilité de la sensibilité, en fonction des conditions d'alimentation, de charge, de câblage et de traitement du signal);
- les performances en sortie de l'électronique sont-elles suffisantes pour l'électronique prévue plus en aval (niveau de sortie, niveau de bruit, niveau de la résiduelle, impédance de sortie, débit, conditions de charge);
- les performances d'ensemble de l'électronique sont-elles suffisantes ? (linéarité, bande passante, stabilité en température);
- pourra-t-on conserver l'alimentation initialement prévue pour la chaîne ?
- enfin, en regard du prix relativement bas d'une chaîne de mesure de ce type, il y a lieu d'analyser dans chaque cas si le coût d'une telle opération ne justifierait pas tout simplement le remplacement de la chaîne complète par un nouvel ensemble conçu par le constructeur pour fonctionner avec les meilleures garanties de performances ?

## Applications

— Les avantages et les limites exposés aux chapitres II et III permettent de se faire une idée du vaste champ d'applications auquel est voué le capteur de déplacement rectiligne à transformateur différentiel : aussi

## == Technique de base ==

bien dans le domaine de la recherche que dans celui de l'industrie en passant par les applications plus spécifiques de l'aéronautique, de la marine ainsi que les applications militaires.

— Petit et léger, ce capteur peut résoudre de nombreux problèmes d'asservissement de position (par exemple : laminoirs, aubes de compresseurs, vannes de sécurité, vérins hydrauliques, etc.).

— Précis et sensible il permet de remplacer avantageusement en laboratoire des appareils beaucoup plus coûteux et encombrants, (par d'erreurs de mobilité, d'hystérésis ou de répétabilité).

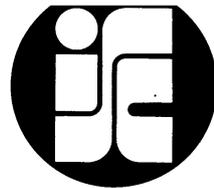
— La possibilité de câbler directement les secondaires en opposition de phase autorise de nombreux montages originaux et économiques pour faire la moyenne ou la somme de plusieurs mesures simultanées (cf. figure 10).

### Perspectives d'avenir

La construction des capteurs de déplacement rectiligne n'échappe pas aux tendances générales suivies par l'électronique et l'électrotechnique dans leur ensemble :

- miniaturisation,
- diminution des masses,
- amélioration des performances,
- fiabilisation croissante,
- automatisation du traitement du signal,
- recherche de rationalisation de la maintenance.

I.L.



ADATEK - ALPHA WIRE LTD - ASPO ELECTRONIC - BINDER - BOURNS - CERMETEK - CUFF - CML - CRYSTALOID - ECC - EDI - ELTEC - ELECTROTHERMAL - ESC - EURODIP - FIRST-OHM - FR ELECTRONICS - GM DELCO - GORDOS - GOWANDA - HUGHES MICROELECTRONICS - HUGHES SOLID STATE PRODUCTS - JAHRE - LANSDALE - LINEAR TECHNOLOGY - LSI COMPUTER SYSTEMS - MARLOW - MC MUROO - MICROELECTRONICS - MIDWEST COMPONENTS INC - MIPOT - PHER - PRECIS-ELPI - PRECISION-VARIOMICS - PTC - PTR - RCD - RENCO - SEMICONDUCTORS TECHNOLOGY INC - SOLID POWER CORPORATION - SSL - SMT - SULLINS - SUPERTEX - TELEDYNE SEMICONDUCTOR - THETA-J - ULTRA-SENSORS - VIKING - WOVEN ELECTRONICS

# ISC DISTRIBUTION

## EURO-DIP

Support pour circuits intégrés (série BU)

De 6 jusqu'à 48 contacts, à sonder ou à wrapper, 2 ou 3 niveaux

douille de précision  
tournée avec contact  
intérieur en BeCu

### Supports EURO-DIP

Qualité / prix  
Résistant aux températures de - 55° c à + 160° C  
Épaisseur de dorage respectée aux points de contact  
Douille de contact en laiton, étamée ou dorée  
Contact ressort en Bronze Béryllium toujours doré  
Support en Polysulfone renforcé de fibres de verre résistant  
aux agents chimiques de nettoyage les plus agressifs  
Profil super bas  
Meilleure circulation d'air pour le refroidissement des C.I  
Socles ouverts, au pas de 2,54 côte à côte, bout à bout

### Supports spéciaux

Barettes brisables de 20 et 32 contacts

Aucune perte de contacts lors du bris  
à la longueur désirée

Socles «carriers» transporteur de contacts



27, rue Yves Kermen  
92100 - BOULOGNE