

Rochar

électronique

N.G.

100

PRINCIPES GÉNÉRAUX DES FRÉQUENCÉMÈTRES, TACHYMÈTRES, CHRONOMÈTRES ET PÉRIODEMÈTRES ÉLECTRONIQUES A COMPTEURS D'IMPULSIONS

L'existence des compteurs électroniques d'impulsions, dont l'une des caractéristiques essentielles est la brièveté du temps de réponse, permet de concevoir aisément la réalisation de fréquencemètres, tachymètres, chronomètres et périodémètres de haute précision dont nous exposons, ci-après, les principes généraux.

I - FRÉQUENCÉMÈTRES

Le principe d'un fréquencemètre électronique à compteurs d'impulsions découle de la définition même de la fréquence, à savoir : le nombre d'alternance d'un phénomène périodique pendant l'unité de temps.

Nous admettrons, pour la clarté de l'exposé, que ce phénomène se traduit sous la forme d'une tension électrique.

Dès lors, sa fréquence s'exprimera en "cycles/seconde" ou "périodes/seconde" ou encore "Hertz" (Hz).

De même, nous admettrons que les compteurs électroniques utilisés sont du type "Décimal" ou à base 10 (Décades).

Nous dirons donc qu'un compteur électronique comporte 3, 4 ou 5 décades, suivant que sa capacité de comptage est de 999, 9.999 ou 99.999.

Dès lors, pour qu'un fréquencemètre électronique permette d'effectuer la mesure du nombre d'alternances d'une tension électrique pendant l'unité de temps de 1 seconde, cet appareil doit nécessairement comporter :

- a - Un compteur à décades.
- b - Un générateur chronométrique, terminé par un relais sans inertie, laissant accéder les impulsions au compteur pendant un temps exactement défini, égal à 1 seconde.

Cet organe porte la dénomination de "base de temps".

- c - Un amplificateur-normalisateur d'impulsions destiné à rendre, dans de larges limites, le fonctionnement rigoureusement indépendant de l'amplitude du signal reçu.

Généralisation

Les intervalles de temps définis par le générateur chronométrique ne seront pas, obligatoirement, égaux à 1 seconde et peuvent, suivant certains types d'applications, avoir des valeurs très différentes, inférieures ou supérieures.

Dans le cas général d'une base de temps définissant des intervalles de temps égaux à T, la fréquence F et le nombre lu N seront liés par l'expression :

$$F = \frac{N}{T}$$

Précision de mesure

On peut déduire de l'expression précédente celle de l'erreur commise dans une telle mesure.

On a :
$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta T}{T}$$

L'erreur ΔN commise sur la lecture du nombre N est, par principe, égale à ± 1 .

Le nombre lu peut, en effet, s'écarter de ± 1 unité du nombre vrai, suivant la phase du phénomène mesuré avec l'instant du déclenchement de la base de temps.

Par ailleurs, $\frac{\Delta T}{T}$ représente l'erreur relative existant sur la détermination du temps T.

Soit $\pm \xi = \frac{\Delta T}{T}$ cette erreur relative.

On a alors :
$$\frac{\Delta F}{F} = \pm \frac{1}{N} \pm \xi$$

Dans le cas particulier d'une base de temps de 1 seconde, on peut écrire $F = N$ (*) et l'expression de l'erreur devient :

$$\Delta F = \pm 1 \pm F \xi$$

Conclusion

Dans l'expression générale $\frac{\Delta F}{F} = \pm \frac{1}{N} \pm \xi$, remplaçons N par F.T.,

on obtient :
$$\frac{\Delta F}{F} = \pm \frac{1}{F.T.} \pm \xi$$

Ce qui nous montre que la précision de mesure est d'autant meilleure :

- 1° - que la valeur de ξ est faible - (Base de temps de grande précision),
- 2° - que la fréquence mesurée F est élevée,
- 3° - que la durée de comptage T est élevée.

Mode de réalisation des générateurs chronométriques ou "bases de temps"

On peut concevoir la réalisation d'une base de temps de différentes façons.

La méthode la plus couramment employée consiste à utiliser un maître oscillateur de haute précision (Oscillateur électronique utilisant un quartz étalon) suivi d'une chaîne de diviseurs de fréquence, permettant d'obtenir finalement des impulsions électriques brèves d'intervalle de temps T.

(*) en nombre

Exemples

Soit à obtenir une base de temps de 1 seconde.

On peut, par exemple, utiliser un quartz oscillateur de fréquence égale à 4.096 Hz, suivi d'une chaîne de 12 diviseurs binaires ($2^{12} = 4.096$).

Une telle base de temps possède, sans précautions particulières, une précision courante de :

$$\pm 5.10^{-5} \text{ ou } \frac{\pm 1}{20.000} \text{ ème.}$$

On peut, également, utiliser un quartz oscillateur thermostaté de fréquence égale à 100 KHz, suivi d'une chaîne de 5 diviseurs décimaux ($10^{+5} = 100.000$).

Cette dernière base de temps donne facilement une précision meilleure que

$$\pm 10^{-5}; \left(\frac{\pm 1}{100.000} \text{ ème} \right).$$

Bases de temps multiples

Il est aisé de disposer, sur un même générateur chronométrique, d'un de ces deux types, de signaux de base de temps de valeur inférieure à 1 seconde.

Ainsi, sur la base de temps à diviseurs binaires (1/2), les diviseurs précédant le dernier étage donneront les intervalles de 1/2 S., 1/4 S., 1/8 S., 1/16 S., etc...

Sur la base de temps à diviseurs décimaux, on obtiendra les intervalles de temps de 1/10 S., 1/100 S., etc...

De même, pour obtenir des intervalles de base de temps supérieurs à 1 seconde, il suffira de compléter la chaîne des diviseurs par de nouveaux diviseurs binaires, décimaux, ou de tout autre type, permettant d'obtenir les valeurs suivantes :

1 S., 2 S., 4 S., 8 S., etc...

ou 1 S., 10 S., 100 S., etc...

ou 1 S., 2 S., 6 S., 30 S., 60 S.

Si l'on désire obtenir des précisions supérieures à celles que nous venons de donner, il suffira d'utiliser des signaux étalons convenables.

(Par exemple : 100 KHz, de précision $\pm 10^{-6}$ ou $\pm 10^{-7}$).

Indépendamment de ces types de base de temps couramment employés, on peut concevoir l'utilisation d'autres maîtres oscillateurs tels, par exemple, que les diapasons à oscillation entretenue.

II - TACHYMÈTRES

L'emploi d'un fréquencesmètre électronique en tachymètre ou, si l'on préfère, en compteur instantané de nombre de tours, ne présente aucune difficulté.

Il suffit, tout simplement, de créer un signal électrique périodique de fréquence liée à la vitesse de rotation de l'organe contrôlé (Moteur électrique, moteur d'avion, turbine, etc...).

Pour ce faire, on utilise des convertisseurs spéciaux, dénommés couramment "capteurs d'impulsions" ou "transmetteurs d'impulsions", ou encore "génératrices tachymétriques", organes que l'on monte directement sur une extrémité de l'organe en rotation (arbre ou prise de mouvement).

Soit n le nombre d'impulsions délivré par le capteur pour 1 tour de l'organe tournant, on aura :

$$F = n \cdot v.$$

Si v est la vitesse en tours par seconde (t/sec.)

Si la vitesse est exprimée, comme il est d'usage, en tours par minute (t/m.), on a :

$$V = 60 \cdot v$$

$$F = \frac{n \cdot V}{60}$$

Portons cette valeur dans l'expression : $F = \frac{N}{T}$

$$F = \frac{N}{T} = \frac{n \cdot V}{60}$$

$$\text{ou } V = \frac{60 N}{n \cdot T}$$

Cette nouvelle forme nous montre que, pour obtenir un nombre N affiché donnant directement la valeur de la vitesse de rotation en tours/minute, on doit avoir :

$$n \cdot T = 60$$

Entre autre, pour une base de temps de 1 seconde, on prendra $n = 60$. Inversement, pour $n = 1$, on choisira un temps de comptage de 1 minute.

Capteurs d'impulsions

Ces organes sont généralement de 2 types :

a - Capteurs magnétiques, ou "à réluctance variable".

Dans lesquels une roue dentée, liée au mouvement de rotation, fait partie d'un circuit magnétique comportant un aimant permanent et une bobine concentrique.

On dispose finalement, aux bornes de cette bobine, d'une tension électrique de fréquence liée à la vitesse où n est le nombre de dents de la roue dentée.

b - Capteurs photo-électriques

Dans lesquels on utilise les variations de la lumière reçue sur une cellule photo-électrique à partir d'une source lumineuse à faisceau concentré.

On peut employer :

- soit la lumière réfléchiée par un organe tournant présentant des discontinuités de surfaces naturelles ou provoquées (capteurs à réflexion),
- soit la coupure directe du faisceau par un organe auxiliaire lié au mouvement (roue dentée, disque perforé, etc...) - (capteurs à obturation).

III - CHRONOMÈTRES

Le principe des chronomètres électroniques à compteurs d'impulsions s'apparente intimement à celui des fréquencesmètres.

Mais, alors que, dans un fréquencesmètre de ce type, on effectue un comptage d'impulsions à temps constant, dans un chronomètre on effectue un comptage d'impulsions de fréquence constante pendant l'intervalle de temps à mesurer.

On intervertit simplement les rôles respectifs du signal et de la base de temps.

Un chronomètre électronique à compteurs d'impulsions comprendra donc :

- a - Un compteur à décades,
- b - Un générateur chronométrique délivrant une tension périodique étalon de fréquence f ,
- c - Des circuits auxiliaires recevant les signaux extérieurs (impulsions ou signaux de tension rectangulaires) dont on désire mesurer l'intervalle de temps ou la durée, reliés à un amplificateur commandé livrant ou non passage au signal fourni par le générateur chronométrique.

Expression générale

Si f est la fréquence de l'oscillateur étalon, N le nombre lu et t le temps mesuré, on a, comme précédemment :

$$f = \frac{N}{t}$$

$$t = \frac{N}{f}$$

Précision de mesure

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t}{t} &= \pm \frac{\Delta N}{N} \pm \frac{\Delta f}{f} \\ &= \pm \frac{1}{N} \pm \delta \\ &= \pm \frac{1}{f \cdot t} \pm \delta \end{aligned}$$

On voit également que la précision de mesure est d'autant meilleure :

- 1° - que la valeur δ est faible (Signal étalon de grande précision),
- 2° - que la fréquence étalon f est élevée,
- 3° - que le temps mesuré t est élevé.

Nature des mesures chronométriques

Les mesures chronométriques généralement rencontrées dans la pratique courante, sont de trois types :

- 1° - Mesure de l'intervalle de temps séparant deux impulsions provenant de 2 voies différentes (Balistique - Mesure d'un déphasage).
- 2° - Mesure de l'intervalle de temps séparant deux impulsions provenant d'une même voie (Balistique - Mesure d'une période).
- 3° - Mesure de la durée d'un signal continu appliqué et interrompu (Mesure du temps de réponse de relais électromagnétiques).

IV - PÉRIODEMÈTRES

L'utilisation d'un chronomètre électronique en périodemètre, découle du deuxième mode d'utilisation précédemment cité.

Il est toutefois à noter que, dans ce cas précis, il est possible d'augmenter la précision de mesure en ne se limitant pas à la mesure d'une période unique, mais en totalisant plusieurs périodes successives.

Si k est le nombre de périodes totalisées, on a alors :

$$t = \frac{1}{k} \cdot \frac{N}{f} \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta t}{t} = \pm \frac{1}{k.t.f.} \pm \delta$$

L'erreur due au compteur est elle-même réduite dans le rapport k .

Exemple

Soit un chronomètre électronique possédant un oscillateur étalon de 100 KHz permettant d'effectuer la mesure des intervalles de temps au 1/100,000ème de seconde.

Si ce chronomètre possède par ailleurs un diviseur décimal aperiodique interposé entre les signaux d'entrée et le compteur, il est clair que l'on pourra ainsi mesurer la durée de 10 périodes successives d'un signal incident.

La précision obtenue est alors de $\frac{1}{100.000}$ ème de seconde, pour 10 périodes ou

de $\frac{1}{1.000.000}$ ème de seconde pour 1 période.

La période est ainsi mesurée, artificiellement, en micro-secondes, et la précision finale décuplée.

Dualité des mesures de fréquences et de temps (ou de périodes)

L'expression de l'erreur des mesures fréquentométriques nous a montré que la précision relative était d'autant meilleure que la fréquence mesurée était élevée.

Inversement, l'expression de l'erreur des mesures chronométriques nous a montré que la précision relative était d'autant meilleure que la durée mesurée était élevée.

Si donc l'on dispose d'un équipement mixte, fréquencemètre-chronomètre, permettant d'effectuer les 2 modes de mesures, il est clair qu'en dessous d'une certaine fréquence on aura intérêt à fonctionner en périodemètre.

Cette fréquence seuil au-dessus de laquelle il y a intérêt à fonctionner en fréquencesmètre et au-dessous de laquelle il y a intérêt à fonctionner en périodesmètre, est déterminée exactement par les caractéristiques technologiques de l'appareil et sa valeur fixée par le point d'intersection des 2 courbes d'erreur (toutes deux exprimées en fonction de F, par exemple).

Ce point d'intersection donne la valeur maximum de l'erreur fournie par l'appareil dans le cas le plus défavorable.

Voyons comment est déterminée cette valeur critique F_c dans le cas type d'un équipement mixte fréquencesmètre-chronomètre-périodesmètre ayant les caractéristiques suivantes :

- a - Oscillateur 100 KHz suivi de 5 diviseurs décimaux donnant des intervalles de base de temps de 1 seconde.

- Précision de l'oscillateur : $\pm 10^{-5}$

Le même oscillateur sert d'étalon de temps pour les mesures chronométriques ($\xi = \delta$).

- b - Un diviseur décimal aperiodique supplémentaire permet, en fréquencesmètre, d'effectuer des mesures sur une durée de 10 secondes, en périodesmètre, d'effectuer la totalisation de 10 périodes successives.

L'expression de l'erreur relative en fréquencesmètre donne :

$$e_f = \pm \frac{1}{10 \cdot F \cdot T} \pm \xi$$

en périodesmètre

$$e_p = \pm \frac{1}{10 \cdot t \cdot f} \pm \xi \quad (\text{ici } \xi = \delta)$$

mais $t = \frac{1}{F}$

$$\text{d'où : } e_p = \pm \frac{F}{10 f} \pm \xi$$

la valeur critique est donnée par $|e_f| = |e_p|$

ou encore :

$$\frac{1}{10 \cdot F_c \cdot T} = \frac{F_c}{10 f}$$

$$F_c^2 = \frac{f}{T} \quad \text{ou} \quad F_c = \sqrt{\frac{f}{T}}$$

puisque $f = 100.000$ et $T = 1$

$$F_c \approx 320 \text{ Hz}$$

Pour cette valeur de F l'erreur de mesure est donnée par la valeur :

$$e = \pm \frac{1}{3.200} \pm \frac{1}{100.000} \approx \frac{1}{3.100}$$

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES CARACTÉRISANT LES PERFORMANCES DES FRÉQUENCÉMÈTRES-CHRONOMÈTRES ÉLECTRONIQUES

FRÉQUENCÉMÈTRES

1° - Base de temps

- a - Nombre et valeur des intervalles de temps délivrés.
- b - Précision de l'oscillateur.

2° - Compteur

- a - Nombre de décades ou capacité de comptage.
- b - Fréquence limite admise par le compteur des unités (ou "temps de résolution").

CHRONOMÈTRES-PÉRIODEMÈTRES

1° - Générateur chronométrique

- a - Fréquence (limitée par les performances de la décade des unités et de l'amplificateur à verrouillage).
- b - Précision.

2° - Compteur

- a - Nombre de décades ou capacité de comptage.

3° - Circuits auxiliaires

- a - Existence d'un diviseur apériodique auxiliaire permettant de totaliser les temps de plusieurs périodes (facteur de division k).
- b - Modes de mesures chronométriques (intervalles, durées).

JR. 15/9/58