

**BREVET D'INVENTION**

P.V. n° 993.254

N° 1.420.571

Classification internationale :

G 01 r

**Perfectionnements aux convertisseurs numériques.** (Invention : Roger CHARBONNIER.)

Société dite : ROCHAR ÉLECTRONIQUE résidant en France (Seine).

Demandé le 30 octobre 1964, à 11 heures, à Paris.

Délivré par arrêté du 2 novembre 1965.

(Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 50 de 1965.)

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)

L'invention se rapporte à des perfectionnements aux convertisseurs numériques et, plus précisément, à des convertisseurs qui ont pour but de transformer en une valeur numérique une grandeur physique préalablement traduite, par un dispositif adapté à cet effet, en une information électrique analogique.

La mesure d'une grandeur physique non électrique se fait souvent au moyen de transducteurs qui fournissent une information électrique analogique, fonction de la grandeur mesurée. Les principes mis en œuvre dans de nombreux transducteurs n'étant généralement pas définis par des lois linéaires, l'information électrique qu'ils fournissent présente le même inconvénient. En conséquence, lorsque l'on convertit le signal de sortie d'un transducteur en une grandeur numérique, les non-linéarités inhérentes au transducteur se retrouvent dans la grandeur numérique obtenue. Ceci provient directement du fait que la plupart des convertisseurs analogiques-numériques que l'on associe aux transducteurs sont d'un type standard et ont été construits de manière que la grandeur numérique obtenue soit le plus possible proportionnelle à la grandeur analogique d'entrée.

Dans le cas de la mesure des grandeurs électriques (résistance, capacité, inductance), on a jusqu'à présent cherché par des circuits souvent assez complexes à convertir lesdites grandeurs en une tension ou un courant aussi proportionnel que possible à leur valeur. En associant ces circuits à un convertisseur analogique-numérique, on réalise ainsi dans le cas des résistances, un ohmmètre numérique précis mais qui présente l'inconvénient d'être relativement complexe et onéreux.

L'objet de l'invention est de proposer un procédé et un dispositif pour obtenir une grandeur numérique rigoureusement proportionnelle à la grandeur physique mesurée par un transducteur,

en corrigeant, au cours de la conversion analogique-numérique, la non-linéarité dudit transducteur.

L'objet de l'invention est également de réaliser un ohmmètre numérique à l'aide d'un voltmètre numérique de type connu auquel on associe un ensemble de circuits électroniques particulièrement simple.

Selon l'invention, un perfectionnement au procédé pour mesurer sous forme numérique la valeur d'une grandeur physique variant dans une plage déterminée et préalablement convertie en une information électrique analogique sensiblement, mais non exactement proportionnelle à ladite grandeur physique, ledit procédé étant du genre suivant lequel on engendre un signal électrique d'amplitude croissant en valeur absolue en fonction du temps et on compte au moyen d'un compteur d'impulsions le nombre d'impulsions fournies par une horloge entre le moment où ledit signal croissant en fonction du temps prend une valeur de référence et le moment où il atteint, en valeur absolue, la valeur de ladite information analogique, est caractérisé en ce que le signal croissant en fonction du temps suit une loi exponentielle déterminée de manière à corriger les erreurs introduites par la non-linéarité de la conversion de ladite grandeur physique en ladite information analogique.

Suivant une caractéristique particulière du procédé selon l'invention, la grandeur physique  $X$  étant préalablement convertie en une information électrique analogique suivant une loi sensiblement définie par  $Y = aX(1 + bX)$ , où  $a$  est une constante positive et  $b$  une constante qui peut être positive ou négative, le signal électrique croissant en fonction du temps est défini par  $Z = V_0 e^{at} - 1$ ,  $t$  étant le temps,  $V_0$  la tension définie par  $V_0 = a/2b$  et  $a$  une constante de même signe que  $b$ .

Grâce au procédé selon l'invention, la conversion de l'information analogique  $Y$  en un temps égal à

la durée d'ouverture d'un compteur d'impulsions est réalisée suivant une loi analogue à celle qui relie  $Y$  à  $X$ . En conséquence, ce temps  $t = kX$  puisque  $Z = 0$  pour  $t = 0$ ) et le nombre enregistré dans le compteur est donc bien proportionnel à la grandeur physique  $X$ . Ceci se démontre aisément. En effet, en développant  $e^{at}$ , on peut écrire  $Z = V_0[at(1 + at/2 + a^2t^2/6 + \dots)]$ .

Comme l'instant d'ouverture du compteur est l'instant où  $Z$  est égal à la tension de référence (ici la tension nulle) et que l'instant de fermeture du compteur est  $Z = Y$  on a, en identifiant les termes des premier et second degrés, des tensions analogiques  $Y$  et  $Z$  :  $aX = aV_0t$  et  $bX = at/2$ . Ces deux équations ont une condition de comptabilité qui s'écrit :  $V_0 = a/2b$ . En outre, comme  $X$  et  $t$  sont nécessairement positives, c'est donc que  $b$  et  $a$  sont de même signe.

La conversion de  $X$  en un nombre n'est évidemment pas parfaite, puisque le terme du troisième degré a été négligé, mais d'une manière générale, ce terme est petit et n'introduit qu'une erreur de l'ordre de  $10^{-3}$  si  $bX < 0,05$ .

Le procédé selon l'invention trouve une application particulière dans l'affichage numérique des températures mesurées par thermocouple. Suivant le type de thermocouple utilisé le terme  $b$  de la loi  $Y$  définie ci-dessus est positif ou négatif. C'est ainsi par exemple que pour une soudure chromel-alumel,  $b$  est négatif puisque la caractéristique qui relie la force électromotrice à la température, possède autour de  $1000^\circ\text{C}$ , une pente d'environ  $6,5\%$  inférieure à la pente autour de  $100^\circ\text{C}$ . Par contre, si le thermocouple utilisé est une soudure cuivre-constantan,  $b$  est positif puisque la sensibilité de ce thermocouple autour de  $100^\circ\text{C}$  est de  $8\%$  supérieure à sa sensibilité autour de  $10^\circ\text{C}$ .

On trouve un autre exemple de lois  $Y$  avec un coefficient  $b$  positif, dans le cas des transducteurs à capacité ou à inductance variable.

Pour mesurer la valeur d'une résistance électrique le moyen le plus simple est de faire traverser ladite résistance par un courant constant et de mesurer la tension ainsi créée à ses bornes. Pour obtenir d'une manière approchée un courant sensiblement constant, on alimente la résistance  $X$  à mesurer par une tension constante  $V_1$  à travers une résistance connue  $R$  dont la valeur est grande devant  $X$ . La tension  $Y$  aux bornes de  $X$  est donc  $Y_1 = V_1 \cdot X/(R + X)$  ou encore  $Y_1 = V_1 \cdot X/R \cdot (1 - X/R + X^2/R^2 \dots)$ . Cette expression est donc sensiblement de la forme  $Y = aX(1 - bX)$ .

En associant au circuit formé des résistances  $R$  et  $X$  un voltmètre numérique du type à conversion tension-temps dans lequel le signal-rampe a été modifié selon l'invention, on peut aisément transformer la tension  $Y_1$  en un nombre proportionnel à  $X$ .

Les caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront d'ailleurs d'une manière plus précise à la suite de la description qui va suivre donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif, en référence au dessin annexé dans lequel :

La figure 1 est le schéma fonctionnel d'un ohmmètre numérique.

Et la figure 2, le schéma fonctionnel d'un convertisseur numérique destiné à être associé à un transducteur dont la loi comprend un terme  $bX$  positif.

Selon la figure 1, en 10, 12 et 14 sont représentées trois résistances-étalons dont les valeurs sont respectivement  $R/10$ ,  $R$  et  $10R$ , 16 étant un commutateur adapté à connecter l'une desdites résistances à 18, la résistance  $X$  que l'on désire mesurer.

Sur la figure 1 la borne commune aux trois résistances 10, 12, 14 est reliée à une source de potentiel  $+V_1$  pendant que la borne libre de la résistance 18 est mise à la masse. En 20 est représentée une résistance de valeur  $2r$  dont une des bornes est reliée à une source de potentiel  $-V_1$  et dont l'autre borne est connectée à l'entrée d'un amplificateur opérationnel 22. Aux bornes de l'amplificateur 22 sont placées en contre-réaction une capacité 24 de valeur  $C$  et une résistance 26 dont la valeur est  $r$ . Le point commun au commutateur 16 et à la résistance 18 est relié à la première entrée d'un comparateur d'amplitudes 28, cependant que la seconde entrée dudit comparateur est reliée à la sortie de l'amplificateur opérationnel 22, ledit comparateur 28 étant à haute impédance d'entrée et adapté à fournir une impulsion de sortie lorsque les amplitudes des deux signaux appliqués à ses entrées, sont égales. Le comparateur 28 sera par exemple du type décrit dans la demande de brevet français PV 922.926 déposée le 28 janvier 1963 par la société demanderesse pour « Dispositif comparateur de niveaux à sortie logique ». L'entrée et la sortie de l'amplificateur 22 sont réunies par l'intermédiaire d'un interrupteur 30 qui possède une électrode de commande de fermeture, ladite électrode étant réunie par un conducteur 31 à un circuit cadenceur 32 adapté à délivrer des impulsions de commande à une fréquence de quelques cycles par seconde. Le cadenceur 32 possède, en outre, une seconde sortie connectée par le conducteur 33 aux électrodes de remise à zéro et de commande d'ouverture d'un compteur d'impulsions 34, l'électrode de commande de fermeture dudit compteur 34 étant réunie par une liaison 35 à la sortie du comparateur d'amplitudes 28. L'entrée du compteur 34 est réunie à la sortie d'un oscillateur pilote 36.

Sur la figure 2 qui représente un dispositif pour traduire en un nombre proportionnel à une grandeur physique les informations fournies par un transducteur 40 dont la caractéristique est non-linéaire et présente un terme  $b$  positif, les éléments

homologues à ceux de la figure 1 ont conservé la même référence. La sortie du transducteur 40 est réunie à la première entrée du comparateur 28. A la sortie de l'amplificateur 22 est placée une résistance 42 suivie d'un amplificateur opérationnel 44 identique à 22 et pourvu d'une résistance de contre-réaction 46 de valeur égale à celle de 42. La sortie de l'amplificateur 44 est, d'une part réunie à l'entrée de l'amplificateur 22 par une résistance de contre-réaction 48 de valeur  $r$ , et d'autre part connectée à la seconde entrée du comparateur d'amplitudes 28.

La valeur de la résistance 12 étant  $R$ , la tension appliquée à la première entrée du comparateur d'amplitudes 28 est, puisque  $X$  est petit devant  $R$ ,  $Y = V_1 \cdot X/R \cdot (1 - X/R + X^2/R^2 - \dots)$ .

Lorsque le cadenceur 32 délivre une impulsion, le compteur 34 est remis à zéro et l'interrupteur 30 est fermé, ce qui décharge le condensateur 24 et fixe au potentiel 0 la sortie de l'amplificateur 22. Au moment où l'impulsion délivrée par le cadenceur 32 s'interrompt, le compteur 34 s'ouvre et la tension de sortie de l'amplificateur 22 commence à croître. On remarquera que la différence essentielle qui existe entre le générateur de signal-rampe selon l'invention et un générateur de ce genre destiné à un voltmètre numérique du type à conversion tension-temps, réside dans la présence de la résistance de contre-réaction 26. Au lieu d'avoir en sortie de l'amplificateur 22 une tension  $V = V_1 \cdot t/2\tau$  (avec  $\tau = r C$ ) on a  $Z = (V_1/2) \cdot (1 - e^{t/\tau}) = V_1 \cdot t/2\tau \cdot (1 - t/2\tau + t^2/6\tau^2 - \dots)$ .

Au moment où  $Y = Z$ , le comparateur d'amplitudes 28 délivre une impulsion de sortie qui a pour effet de fermer l'entrée du compteur 34. Pendant le temps qui sépare ses instants d'ouverture et de fermeture, le compteur 34 a reçu les impulsions délivrées par l'oscillateur-pilote 36. L'égalité des termes de premier et de second ordres de  $Y$  et  $Z$  donne  $X/R = t/2\tau$ . Le temps d'ouverture du compteur 34 est donc, au troisième ordre près, proportionnel à la valeur  $X$  de la résistance 18 à mesurer : le nombre enregistré dans le compteur 34 traduit directement en ohms cette valeur  $X$  dans la mesure où l'on a donné les valeurs convenables à la constante de temps  $\tau$ , à la résistance  $R$  et à la fréquence de l'oscillateur 36. Il est aisé de calculer l'importance de l'erreur que l'on fait en négligeant les termes du troisième ordre. La différence entre ces termes est  $X^2/3R^2$ , ce qui fait que si  $X/R < 5,5 \cdot 10^{-2}$ , l'erreur sur le nombre affiché dans le compteur 34 est inférieure à  $10^{-3}$ . Cette erreur est quadratique et bien entendu conserve un signe constant. On peut, soit en diminuant légèrement la tension appliquée à l'entrée du circuit de résistances-étalons, soit en augmentant légèrement la tension appliquée à l'entrée de l'amplificateur opé-

rationnel ou la résistance de contre-réaction 26, obtenir une erreur nulle en un point particulier de la plage de mesure. De cette façon, on peut augmenter la valeur maximale du rapport  $X/R$  tout en conservant à la mesure une erreur négative ou positive toujours inférieure à la dernière unité du nombre affiché.

En plaçant le commutateur 16 en contact avec la borne libre des résistances 10 ou 14, on change la gamme de mesure. Ce changement s'accompagne d'un déplacement de la virgule sur le chiffre affiché ou encore d'un changement d'unité.

Grâce au procédé selon l'invention, il suffit donc d'ajouter à un voltmètre numérique du type à conversion tension-temps, d'une part un circuit composé de résistances-étalons, d'un commutateur et une source de tension continue, et d'autre part la résistance 26 en contre-réaction sur l'amplificateur opérationnel du générateur de signal-rampe dudit voltmètre pour transformer à volonté celui-ci en un ohmmètre numérique de précision.

On a représenté à la figure 2, le générateur de signal-rampe qui convient lorsque la tension analogique à convertir en un nombre est de la forme  $Y = a X (1 + bX)$ . L'amplificateur opérationnel 44 a, en boucle fermée, un gain de  $-1$ . En conséquence la tension qui apparaît à l'entrée de la seconde entrée du comparateur 28 est  $Z = (V_1/2) \cdot (e^{t/\tau} - 1)$ . Le processus de la mesure est dans le cas de la figure 2 identique à celui de la figure 1.

Dans ce cas comme dans l'autre le procédé selon l'invention est donc particulièrement simple à mettre en œuvre. Il suffit en effet d'ajouter à un voltmètre numérique du type à conversion tension-temps les résistances 42, 46 et 48 et l'amplificateur opérationnel 44 pour pouvoir afficher directement la valeur de la grandeur physique mesurée par un transducteur dont la caractéristique est non-linéaire et présente un terme quadratique positif.

L'invention n'est, bien entendu, pas limitée aux formes de réalisation décrites ci-dessus qui n'ont été présentées qu'à titre d'exemple non limitatif, mais au contraire peut faire l'objet de diverses variantes, notamment en remplaçant un ou plusieurs des circuits composant les réalisations présentées par un ou plusieurs circuits équivalents.

Dans les deux cas de figure, on peut évidemment modifier la valeur de la tension appliquée à l'entrée de l'amplificateur intégrateur et modifier en conséquence le rapport des résistances 20 et 26 ou 20 et 48 pour que la condition  $V_0 = a/2b$  soit cependant conservée. Ceci s'exprime, dans le cas d'un ohmmètre numérique, en disant que la tension maximale de sortie du générateur de signal-rampe est égale en valeur absolue à la moitié de la tension d'alimentation du circuit associé à la résistance  $X$  à mesurer.

## RÉSUMÉ

1° Perfectionnement au procédé pour mesurer sous forme numérique la valeur d'une grandeur physique variant dans une plage déterminée et préalablement convertie en une information électrique analogique sensiblement mais non exactement proportionnelle à ladite grandeur physique, ledit procédé étant du genre suivant lequel on engendre un signal électrique d'amplitude croissant en valeur absolue en fonction du temps et on compte au moyen d'un compteur d'impulsions le nombre d'impulsions fournies par une horloge entre le moment où ledit signal croissant en fonction du temps prend une valeur de référence et le moment où il atteint, en valeur absolue, la valeur de ladite information analogique, caractérisé en ce que le signal croissant en fonction du temps suit une loi exponentielle déterminée de manière à corriger les erreurs introduites par la non-linéarité de la conversion de ladite grandeur physique en ladite information analogique.

2° Suivant une caractéristique particulière du procédé selon l'invention, la grandeur physique  $X$  étant préalablement convertie en une information électrique analogique suivant une loi sensiblement définie par  $Y = aX(1 + bX)$ , le signal électrique croissant en fonction du temps est défini par  $Z = V_0 e^{at} - 1$ ,  $t$  étant le temps,  $V_0$  la tension définie par  $V_0 = a/2b$  et  $a$  une constante de même signe que  $b$ .

3° Dispositif pour la mise œuvre des procédés selon l'invention caractérisé par l'un ou l'autre des deux points suivants :

*a.* Le coefficient  $b$  de la loi  $Y$  étant négatif, le générateur qui produit le signal croissant avec le temps est un amplificateur opérationnel du type intégrateur dont la résistance d'entrée est reliée à une source de tension continue stable, la sortie et l'entrée dudit amplificateur étant en outre réunies l'une à l'autre par une résistance de contre-réaction et par un inter-

rupteur à fermeture commandée par un cadenceur;

*b.* Le coefficient  $b$  de la loi  $Y$  étant positif, le générateur qui produit le signal croissant avec le temps est constitué par un amplificateur opérationnel du type intégrateur dont la résistance d'entrée est reliée à une source de tension continue stable, la sortie et l'entrée dudit amplificateur étant en outre réunies l'une à l'autre par un interrupteur à fermeture commandée par un cadenceur, ladite sortie étant appliquée à un amplificateur opérationnel à gain négatif dont la sortie est reliée à l'entrée de l'amplificateur opérationnel intégrateur par une résistance de contre-réaction.

4° Un ohmmètre numérique réalisé au moyen d'un voltmètre numérique du type à conversion tension-temps est caractérisé par les points suivants pris séparément ou en combinaisons :

*a.* L'amplificateur opérationnel intégrateur qui fait partie du générateur de signal-rampe est adapté à recevoir une résistance de contre-réaction lorsque ledit voltmètre fonctionne en ohmmètre;

*b.* Le circuit d'alimentation de la résistance à mesurer comprend une source de tension continue stable  $V_1$ , un groupe de résistances-étalons et un commutateur;

*c.* La tension continue appliquée à l'entrée du générateur de signal-rampe et le rapport de la résistance placée en contre-réaction sur l'amplificateur opérationnel intégrateur et de la résistance d'entrée dudit amplificateur, ont des valeurs telles que la tension maximale de sortie dudit générateur est  $V_1/2$ ;

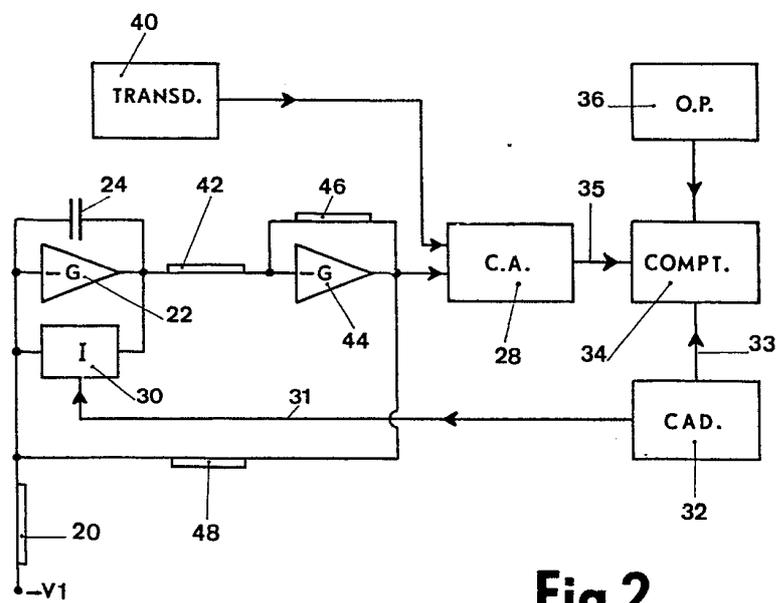
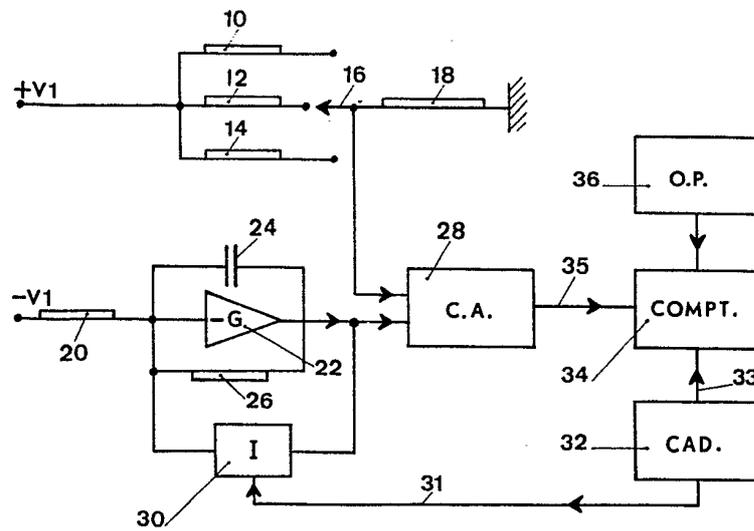
*d.* La résistance de contre-réaction placée sur l'amplificateur intégrateur a une valeur légèrement supérieure à sa valeur théorique de manière à réaliser une compensation totale de l'erreur de conversion, en un point particulier de la plage de mesure.

Société dite : ROCHAR ÉLECTRONIQUE

Par procuration :

A. CHARMEIL

**Fig 1**



**Fig 2**