

voltmètre numérique universel

La relève des instruments à aiguille

Dans le domaine des mesures électroniques, les instruments conventionnels à aiguille deviennent démodés. Dans beaucoup d'applications, l'instrument électromécanique de tableau, imprécis, mécaniquement fragile et de courte vie, est remplacé par un affichage digital robuste et clairement lisible. Jusqu'il y a peu de temps, les instruments conventionnels étaient bon marché; mais, les choses changent. Le délicat système mécanique est devenu cher (même s'il est 'Made in Hong-Kong') alors que son équivalent digital est de moins en moins cher. — 'Made in Singapore'? Adieu magnétisme, bonjour LED!

Il est peut-être exagéré de dire que notre vieil ami l'instrument à aiguille va bientôt disparaître complètement. Il a encore des avantages sur les afficheurs digitaux actuels. Dans quelques applications, particulièrement quand une grande précision n'est pas nécessaire — et c'est souvent le cas — l'instrument analogique à aiguille est encore préférable. Les opérations d'alignement nécessitant une perception précise des pics et des creux de tension (ou de toute autre grandeur physique), sont effectuées plus facilement avec une aiguille qui oscille qu'avec un nombre qui change rapidement. C'est aussi vrai quand il s'agit de détecter de brutales (et souvent inattendues) variations de niveau, et une aiguille sautant à pleine échelle, ou même se wrappant sur sa butée, attire décidément mieux l'attention qu'un affichage numérique passant de 153 à 999.

Pourtant, les instruments numériques ont leurs avantages. La lecture est claire et précise; l'échelle est habituellement clairement indiquée; l'ensemble est moins sensible aux chocs mécaniques (voir figure 1). De plus, les chiffres lumineux peuvent être lus dans la plupart des conditions d'éclairage. Quand il s'agit de précision, l'affichage numérique bat facilement son rival analogique. Au mieux, sur un instrument à aiguille avec une calibration à pleine échelle de 1000 unités, une lecture de, par exemple, 615 peut être obtenue: soit 3 chiffres significatifs. Sur un instrument numérique, comme le fréquencemètre 1/4 GHz (Elektor n° 5/6), il est possible d'obtenir une lecture fiable de six chiffres (par exemple 10,7234 MHz) où seul le dernier chiffre est susceptible d'erreur.

Comment fonctionnent-ils?

Si les instruments numériques sont si supérieurs, pourquoi ne sont-ils pas

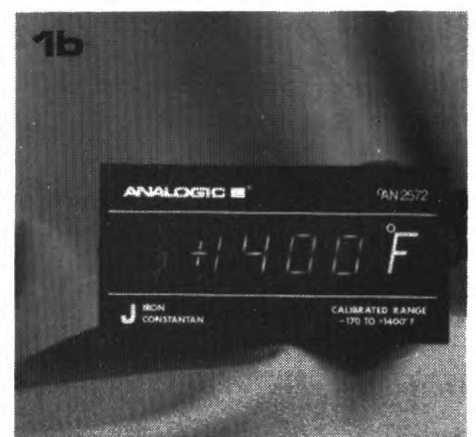
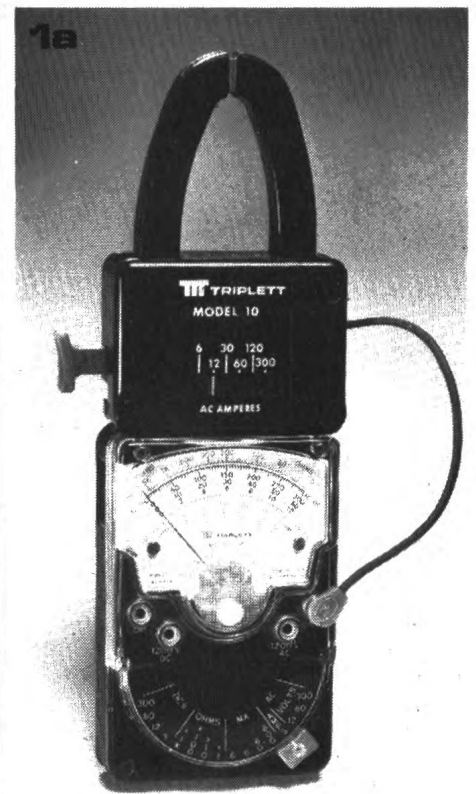


Figure 1. Un voltmètre analogique (figure 1a) n'est pas aussi facile à lire qu'un instrument numérique (figure 1b).

Figure 2. Un élément essentiel d'un instrument numérique: le convertisseur A/D. C'est la partie la plus difficile à concevoir.

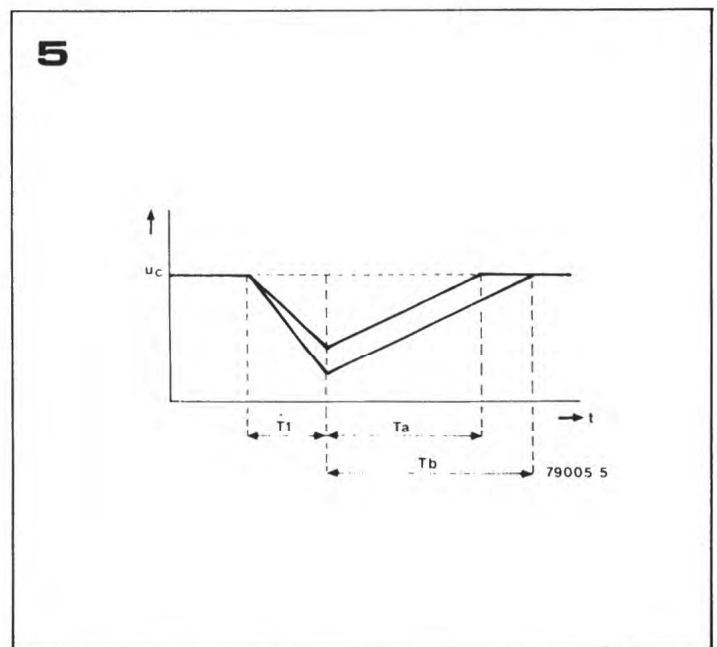
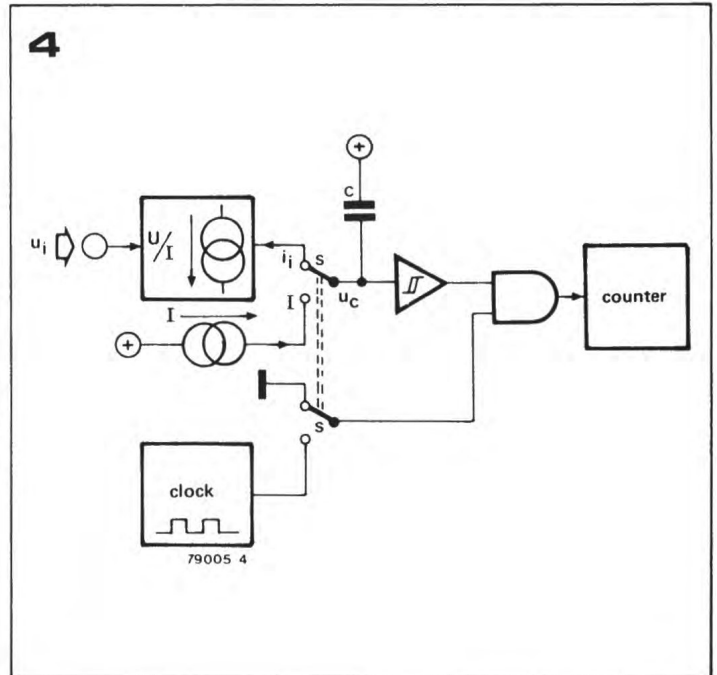
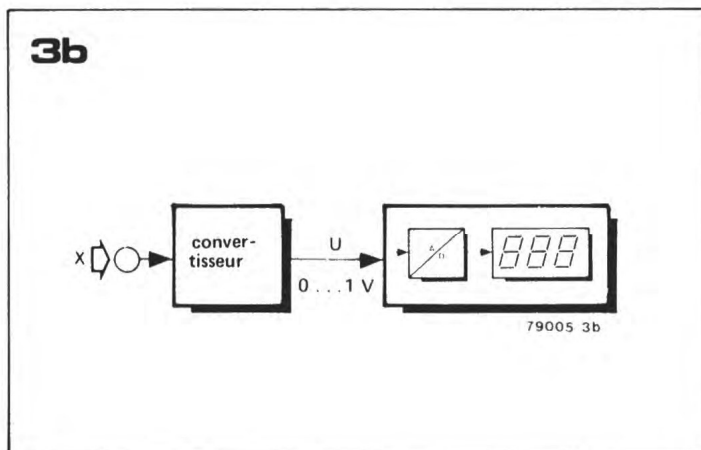
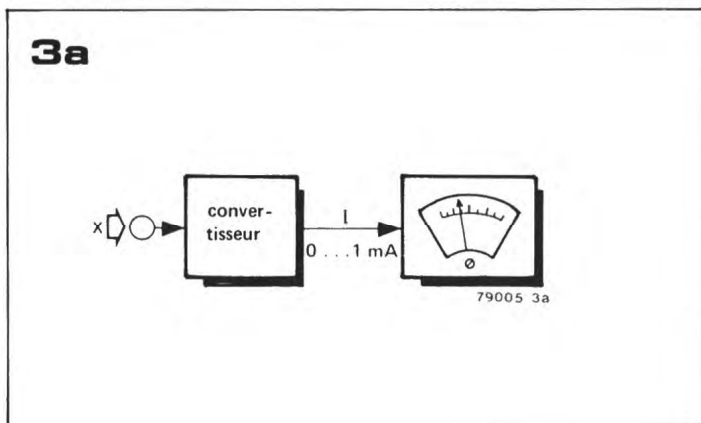
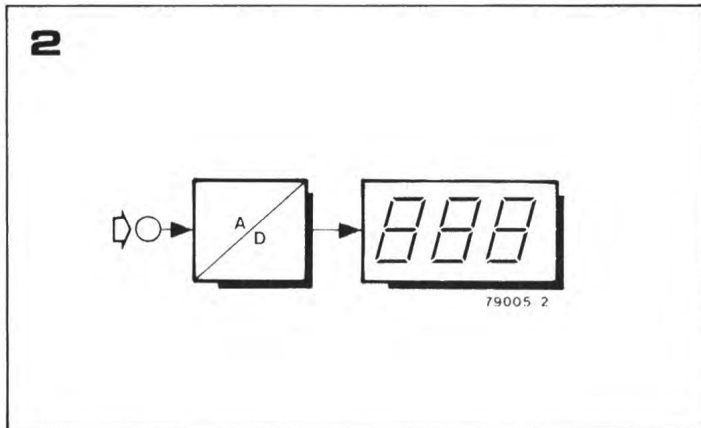
Figure 3. Beaucoup d'instruments de mesure consistent essentiellement en un convertisseur grandeur physique/courant, suivi par un milliampèremètre (figure 3a). Le même principe peut être utilisé pour les mesures numériques, pourvu que l'on dispose d'un 'Voltmètre numérique universel' (figure 3b).

Figure 4. Schéma simplifié du convertisseur A/D 'double-pente'.

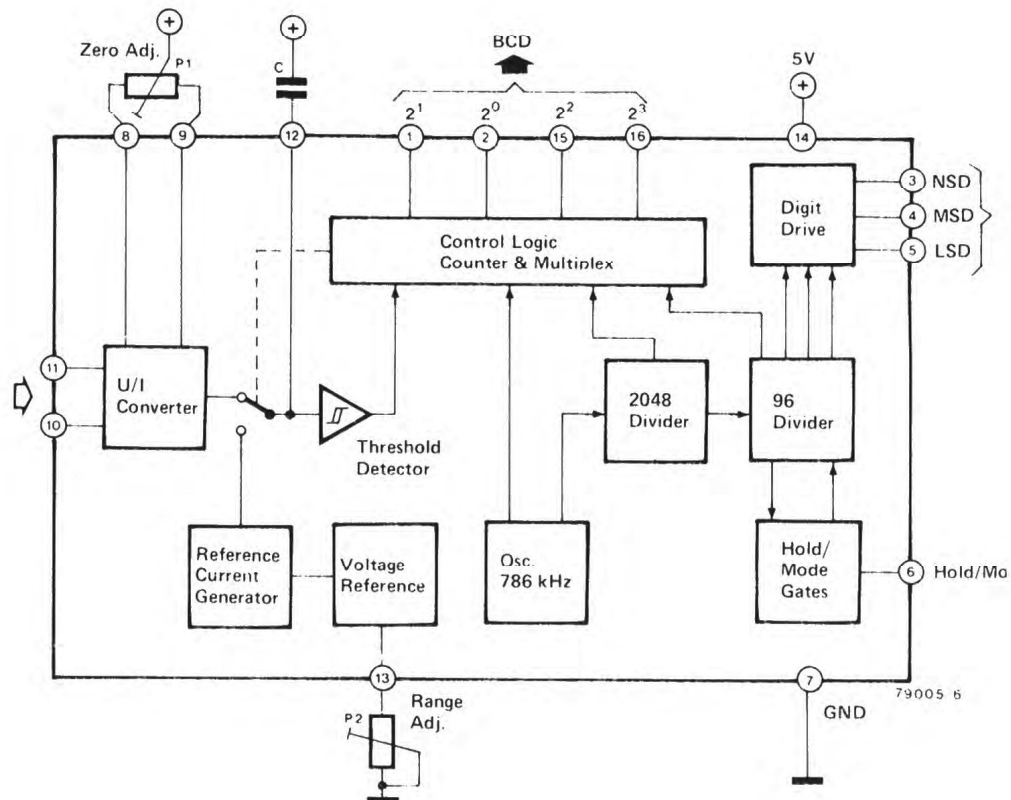
Figure 5. Pendant chaque cycle de conversion, la tension U_c de la figure 4 commence par chuter à un niveau déterminé par la tension d'entrée. Comme T_1 est constant, le temps de montée (T_a ou T_b) est proportionnel à la tension d'entrée.

utilisés plus souvent? La raison est simple: ils sont plus difficiles à concevoir. Pour les instruments analogiques, une conversion d'une grandeur analogique à une autre est nécessaire, (par exemple, d'un courant à la déviation d'une aiguille sur échelle). Dans beaucoup de cas, cette conversion est relativement directe. De l'autre côté, les instruments numériques nécessitent une conversion plus compliquée: la quantité analogique doit être convertie en une valeur numérique ('digitalisée', pour reprendre un mot horrible). Le système qui réalise cette conversion est nommé: 'Convertisseur Analogique Digital', ou en abrégé convertisseur A/D. Ce convertisseur A/D est une partie essentielle de la plupart des instruments numériques, la seule exception étant les instruments mesurant des quantités numériques. Une chaîne n'est jamais plus solide que son plus faible maillon, et les performances d'un instrument numérique sont habituellement déterminées par le convertisseur A/D.

Comme de plus en plus de 'digits' sont demandés, le cahier des charges de ce composant devient de plus en plus sévère: précision, linéarité, grande échelle, stabilité et haute résolution, tout à moins d'un dix-millième près pour un affichage à 6 chiffres. Cela a donné du travail à plein temps aux plus brillants cerveaux de l'électronique, témoin la prolifération ces dernières années, de nouveaux modes de conversion, de nouvelles conceptions, de nouveaux circuits intégrés et hybrides. Les circuits de convertisseurs A/D deviennent compliqués. Il est inutile d'essayer de les réaliser avec des composants discrets: les circuits intégrés sont la solution évidente, leur nombre est saisissant, et de nouveaux apparaissent presque tous les jours. Comme la technologie des circuits intégrés a progressé vers une intégration à une échelle de plus en plus grande, il était devenu tentant de faire un pas de plus: des instruments de mesure numériques complets sur une seule 'puce' sont



6



apparus. La rapide baisse des prix, un sous-produit bienvenu des progrès de la technologie des semiconducteurs, semble devoir hater la défaite des instruments à aiguille: un voltmètre numérique coûte maintenant vraiment moins cher que son rival analogique.

Un voltmètre numérique universel

Beaucoup d'appareils de mesure analogiques fonctionnent par la conversion de la grandeur à mesurer (tension, résistance, capacité, intensité d'un champ magnétique, niveau sonore, vitesse du vent etc...) en courant électrique; ce courant est ensuite affiché par un milliampèremètre. Dans une certaine mesure donc, un milliampèremètre est un instrument de mesure analogique universel: une fois la quantité mesurée convertie en courant, l'instrument à aiguille ne tient compte que de la véritable grandeur mesurée, et il affiche.

Il serait utile d'avoir un instrument de mesure universel à affichage numérique. Un tel instrument serait capable de mesurer une grandeur analogique de base (courant ou tension) et d'afficher le résultat numériquement. N'importe quelle autre grandeur analogique de base peut être mesurée, en utilisant les convertisseurs correspondants, conjointement au voltmètre numérique universel.

L'idée est illustrée par la figure 3. Le système traditionnel est montré à la

figure 3a: un voltmètre analogique universel précédé par le convertisseur nécessaire. La grandeur d'entrée, que ce soit des ohms, des candelas ou des pascals-seconde (oui, tout cela existe!), est convertie en courant et affichée par l'instrument à aiguille. La figure 3b représente l'autre version: encore la première conversion de la grandeur d'entrée en tension par exemple, puis l'affichage, cette fois sur un 'Voltmètre numérique universel'.

La deuxième partie de la figure 3b est le sujet principal de cet article. Récemment, quelques circuits intégrés qui réalisent la plupart des fonctions requises, ont été présentés. De plus, ils sont si bon marché que l'ensemble peut être construit pour pratiquement le même prix qu'un instrument à aiguille conventionnel.

Un de ces circuits est la RCA type CA3162E. Il comprend une entrée analogique (tension) et fournit en sortie 3 chiffres multiplexés BCD. Le circuit intégré est prévu pour fonctionner avec un décodeur-driver BCD-7 segments, le CA3161E. Seulement quelques autres composants sont nécessaires pour réaliser un instrument de mesure numérique universel, qui surpassera même un bon instrument à aiguille. Le seul inconvénient, en comparaison d'un instrument à aiguille, est la nécessité d'une alimentation.

Conversion A/D

Le convertisseur A/D du CA3162E

utilise un principe appelé intégration à double pente. Un synoptique est donné à la figure 4. Le principe de fonctionnement est le suivant:

La tension d'entrée, U_i , est d'abord convertie en un courant correspondant (I_i). Ce courant charge un condensateur C, faisant décroître la tension U_C . Une tension d'entrée plus importante produit un courant de charge plus important, et donc fait décroître plus rapidement la tension sur C (voir figure 5). Après un temps fixé, T_1 , l'interrupteur est actionné. Le condensateur est maintenant déchargé par un courant déterminé, I, le temps de décharge est donc proportionnel à la chute de tension initiale atteinte sur le condensateur. Cela est également montré par la figure 5: deux tensions d'entrée, U_a et U_b (U_b étant la plus grande) ont provoqué des chutes de tension sur C; les temps de décharge qui en résultent T_a et T_b , sont proportionnels à ces chutes. En définitive: I_i est proportionnel à U_i ; le temps de décharge est proportionnel à U_C minimum; U_C minimum est proportionnel à I_i ... en d'autres termes, le temps de décharge est proportionnel à la tension d'entrée! Pendant la période de décharge, la sortie d'un générateur d'horloge est comptée; à la fin de la période le total doit donc correspondre à la tension d'entrée. C'est ainsi que se fait la conversion A/D.

L'intégration à double pente a de nombreux avantages. La valeur du condensateur est relativement peu critique; la fréquence d'horloge n'a pas

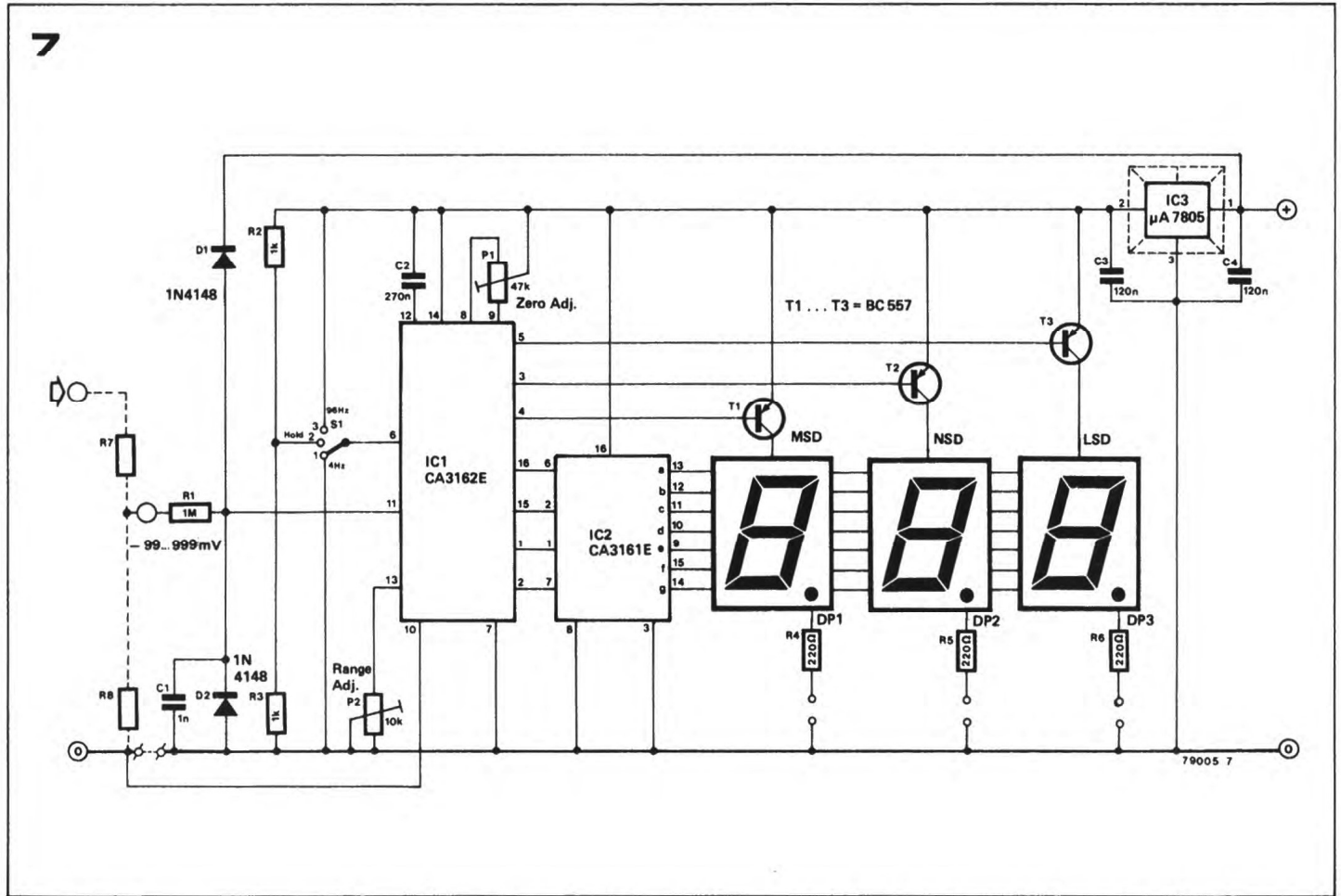


Figure 6. Synoptique du CA3162E.

Figure 7. Schéma complet du voltmètre numérique universel.

besoin d'être particulièrement constante, puisqu'elle sert seulement à définir le temps de charge initial (T_i); la mesure elle-même est intégrée, donc le bruit est atténué.

Le CA3162E

Le synoptique simplifié du circuit est donné à la figure 6. Le convertisseur U/I, le générateur de courant de référence, le détecteur de seuil et l'oscillateur 786 kHz peuvent être reconnus sur la figure 4; les portes, compteurs et interrupteurs de la figure 4 sont contenus dans le bloc 'Logique de commande, compteur et multiplexeur' de la figure 6. Le compteur consiste effectivement en 3 compteurs BCD, un par chiffre; les sorties apparaissent successivement sur les sorties BCD (multiplexage). Simultanément, la sortie 'validation du chiffre' correspondante passe à l'état bas. Les abréviations MSD, NSD, LSD signifient respectivement: chiffre de poids le plus fort, chiffre de poids suivant, chiffre de poids le plus faible, de gauche à droite dans le nombre à 3 chiffres.

Les divers intervalles de temps sont obtenus à partir de l'oscillateur 786 kHz. Une division par 2048 fournit la fréquence de multiplexage: 384 Hz. Une autre division par 96 donne la fréquence de conversion, 4 Hz; en d'autres termes, quatre mesures par seconde. Cette vitesse de conversion n'est obtenue qu'en laissant la broche 6 en l'air, ou en la reliant à la masse; en lui appliquant une tension de 2,5 V, on arrête la

conversion, mais l'affichage est maintenu; si la broche 6 est reliée au positif de l'alimentation la fréquence de conversion est portée à 96 Hz. La tension d'entrée admissible s'étend de -99 mV à +999 mV. Avec le décodeur-driver correspondant, une tension d'entrée trop faible est indiquée par '-', et une surcharge par 'EEE'. Les tensions négatives sont affichées avec un signe moins, par exemple '-55'. Les caractéristiques principales du CA3162E sont indiquées par le tableau 1.

Le CA3161E

Le CA3161E est un décodeur-driver BCD/7 segments particulièrement adapté au CA3162E. Les entrées sont compatibles TTL, et les sorties des segments 'bufferisées'. Les amplificateurs de sortie sont limités en courant, donc les LED des afficheurs peuvent être connectées directement au circuit, sans nécessiter de résistances de limitation. Ce circuit à le même brochage que les modèles classiques 7447 et 74247. Un code BCD à l'entrée provoque un affichage entre 0 et 9. Mais les combinaisons de 4 bits non utilisées par le code BCD provoquent également un affichage, comme le montre le tableau 2. Les principales caractéristiques électriques sont données par le tableau 3.

Le circuit

Le circuit complet est présenté figure 7. Comme on peut le voir, les deux circuits

Tableau 1

Convertisseur A/D CA3162E**Valeurs maximales:**

- Tension d'alimentation (Broches 14 et 7) + 7 V
- Tension d'entrée (Broches 10, 11 et 7) ± 15 V

Caractéristiques électriques (+U_B = 5 V, P1 à mi-course, P2 réglé à 2k4).

- Tension d'alimentation 4,5 ... 5,5 V
- Courant d'alimentation max 17 mA
- Impédance d'entrée typ 100 M
- Courant différentiel d'entrée typ -80 nA
- Tension d'offset ± 12 mV
- Gain (affichage pour U_{in} = 900 mV) 846 ... 954 mV
- Linéarité ± 1 unité
- Précision 0,1% ± 1 unité
- Tension d'entrée en mode commun ± 200 mV
- Courant de sortie BCD (Broches 1, 2, 15, 16) min 0,4 mA
- Courant de sortie sélection chiffre (broches 3, 4, 5) min 1,6 mA
- Coefficient de température du zéro typ 10 μV/°C
- Coefficient de température du gain typ 0,005%/°C

Liste des composants:**Résistances:**

- R1 = 1 M
- R2, R3 = 1 k
- R4 ... R6 = 220 Ω
- R7, R8 = voir tableau 5
- P1 = 47 k
- P2 = 10 k

Condensateurs:

- C1 = 1 n
- C2 = 270 n
- C3, C4 = 120 n

Semiconducteurs:

- T1 ... T3 - BC 177, BC 557 ou équiv.
- D1, D2 = 1N4148
- IC1 = CA 3162E
- IC2 = CA 3161E
- IC3 = μA 7805
- DP1 ... DP3 = voir tableau 4

Divers:

- Radiateur pour IC3
- S1 = 1 circuit 3 positions

8

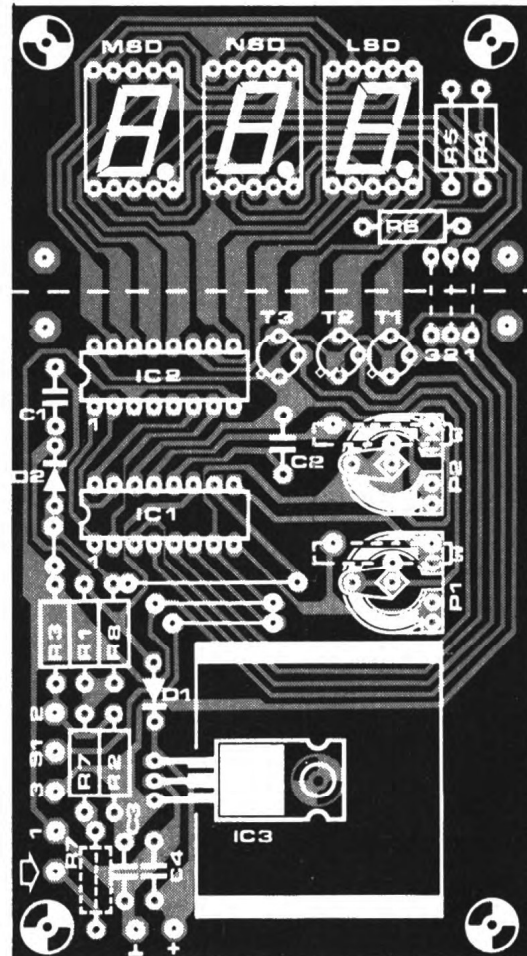
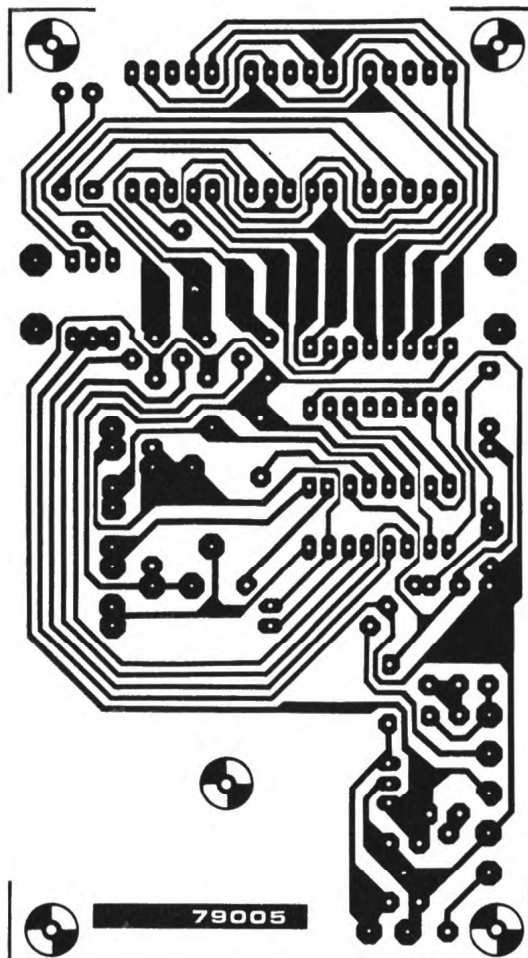


Tableau 2

Table de vérité du CA3161E.

| | |
|---------|---|
| 0 0 0 0 | 0 |
| 0 0 0 1 | 1 |
| 0 0 1 0 | 2 |
| 0 0 1 1 | 3 |
| 0 1 0 0 | 4 |
| 0 1 0 1 | 5 |
| 0 1 1 0 | 6 |
| 0 1 1 1 | 7 |
| 1 0 0 0 | 8 |
| 1 0 0 1 | 9 |
| 1 0 1 0 | - |
| 1 0 1 1 | E |
| 1 1 0 0 | H |
| 1 1 0 1 | L |
| 1 1 1 0 | P |
| 1 1 1 1 | |

Figure 8. Circuit imprimé et implantation des composants, du système complet (EPS 79005).

et les 3 afficheurs forment l'essentiel du circuit.

L'entrée analogique est appliquée, à travers R1, au convertisseur A/D. Deux diodes D1 et D2, protègent l'entrée; C1 contribue à 'épurer' le signal d'entrée - le circuit est conçu pour se débrouiller avec des tensions continues! Trois modes de fonctionnement peuvent être choisis par S1: En position 1, une fréquence de conversion de 4 Hz; en position 2, le maintien de l'affichage; et en position 3, une fréquence de conversion de 96 Hz. C2 est le condensateur d'intégration (C sur la figure 6); on parlera plus loin des deux potentiomètres d'étalonnage.

Les sorties BCD de IC1 sont reliées aux entrées correspondantes de IC2: le décodeur-driver BCD-7 segments. Les sorties de ce dernier circuit sont directement reliées aux segments correspondants des 3 afficheurs. Les sorties de sélection des 3 chiffres sont utilisées pour valider les afficheurs au bon moment du cycle de multiplexage, via les transistors T1... T3.

N'importe quel afficheur 7 segments à diodes électroluminescentes à anode commune peut être utilisé. Quelques types sont proposés au tableau 4. La broche 'point décimal' de chaque afficheur est équipée d'une résistance de limitation de courant. Suivant l'application ils pourront être sélectionnés à travers un commutateur, ou bien l'un d'eux constamment allumé par une connexion câblée au commun de l'alimentation.

La gamme de mesure du circuit est de -99... 999 mV. En ajoutant un diviseur de tension (R7 et R8), cette gamme peut être étendue comme on le désire. Le 'voltmètre universel' peut aussi servir à mesurer des courants. Dans ce cas, on donne à R8 la valeur voulue et on remplace R7 par un simple fil. La valeur de R8 est donnée par:

$$R8 = \frac{1}{I_{p.e.}}$$

où $I_{p.e.}$ est le courant désiré pour une lecture à pleine échelle. Par exemple, si on désire un instrument de 50 A, la valeur de R8 est de 20 K. Le tableau 5 donne les valeurs de R7 et R8 pour différentes gammes de tensions et de courants. Il est nécessaire d'utiliser des résistances de précision (1%); la précision du système de base est de 0,1% ± 1 mV et la linéarité meilleure que 0,1 mV! La place est prévue sur le circuit imprimé pour deux résistances montées en série pour R7. Si une seule est utilisée, la deuxième doit être remplacée par un fil.

Construction et étalonnage

Le circuit imprimé et l'implantation des composants sont montrés figure 8. La tension d'alimentation peut être de 7 à 15 V; la consommation est d'environ 200 mA (tous les segments étant allumés). Si l'appareil est utilisé dans un ensemble comprenant une alimentation

Tableau 3

Décodeur-driver CA3161E

Valeurs maximales:

- Tension d'alimentation (Broches 16 et 8) +7 V
- Tension d'entrée (Broches 1,2,6 et 7) +5,5 V
- Tensions de sortie:
 - Sortie 'off' +7 V
 - Sortie 'on' +10 V

Caractéristiques électriques:

- Tension d'alimentation 4,75... 5,25
- Courant d'alimentation (toutes les entrées à 1) typ 35 mA
- Courant de sortie ($U_o = 2 V$) typ 15 mA
- Tension d'entrée pour un niveau 1 min 2 V
- Tension d'entrée pour un niveau 0 max 0,8 V

Tableau 4

| Couleur de l'afficheur | modèle |
|------------------------|------------------|
| Rouge | CQY 91A, FND 557 |
| Vert | CQY 92A, FND 537 |
| Jaune | CQY 93A, FND 547 |

Tableau 5

Grandeur mesurée à pleine échelle.

| $V_{p.e.}$ | R7 | R8 | Rapport |
|------------|-----------------|--------------|---------|
| 1 V | court-circuit + | C.C. | 1.00 |
| 10 V | 820 k + 82 k | 100 k | 10.02 |
| 100 V | 820 k + 160 k | 10 k | 99.00 |
| 100 V | 1 M + C.C. | 10 k | 101.00 |
| 100 V | 560 k + 120 k | 6k8 | 101.00 |
| 100 V | 470 k + 82 k | 5k6 | 99.57 |
| 100 V | 560 k + 3M3 | 39 k | 99.97 |
| 1 A | C.C. + C.C. | 1 Ω | — |
| 100 mA | C.C. + C.C. | 10 Ω | — |
| 10 mA | C.C. + C.C. | 100 Ω | — |
| 2 mA* | C.C. + C.C. | 470 Ω | — |

* Avec le millivoltmètre alternatif

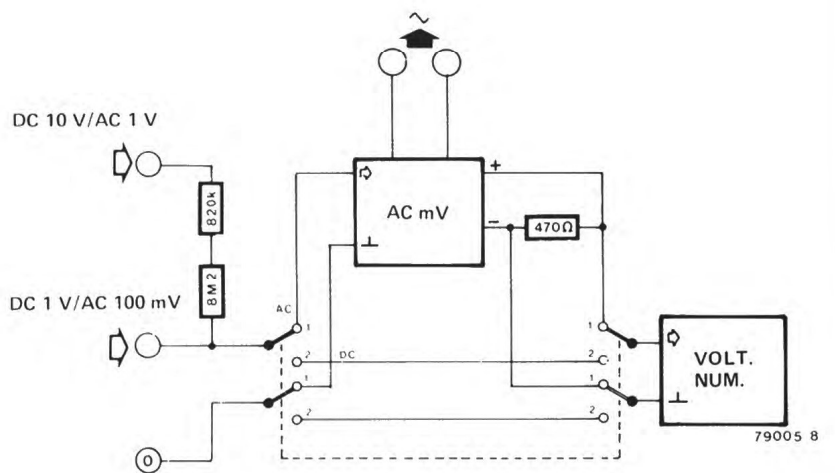
5 V, le régulateur est supprimé: IC3 est remplacé par un fil court-circuitant son entrée et sa sortie.

Comme on le voit sur la figure 7 la masse d'entrée est flottante, donc une entrée symétrique est possible (dans le cas par exemple d'une utilisation avec le millivoltmètre AC décrit par ailleurs).
 Noter que les valeurs de tension maximales ne doivent pas être dépassées! Dans de nombreux cas la masse d'entrée devra être connectée à la masse de l'alimentation. L'étalonnage est bien sûr, très important. Pour obtenir les meilleurs résultats, une référence précise est nécessaire, soit un voltmètre numérique étalonné avec précision, soit une pile étalon. On se doute qu'il n'est pas facile de se procurer une pile étalon. Les 'diodes Zener de référence' ne sont pas assez précises: leur tolérance habituelle est de 5%. Des sources de tension de référence conçues spécialement, comme la LH0070 de National et quelques modèles de chez Analog Devices, sont trop onéreuses pour cette application. Il y a pourtant deux solutions. Une pile au mercure miniature comme celles utilisées dans les appareils de photo, les prothèses auditives, ou les montres numériques fournissent une tension de 1,37 V à moins de 3%. En utilisant un diviseur, formé d'une résistance de 4k7 et une de 10 K, une référence suffisamment précise peut être obtenue: 0,93 V 5%, c'est suffisant dans la plupart des cas. On peut également utiliser un multimètre comme étalon. Dans les deux cas, cependant, on ne doit pas tenir compte du chiffre de plus faible poids.

Une fois le problème résolu, l'étalonnage est facile:

- Mettre l'entrée à la masse (un fil court-circuitant la résistance R8).
- Ajuster P1 pour lire '000'.
- Connecter la tension de référence.
- Ajuster P2 pour obtenir l'affichage correct.

9



10

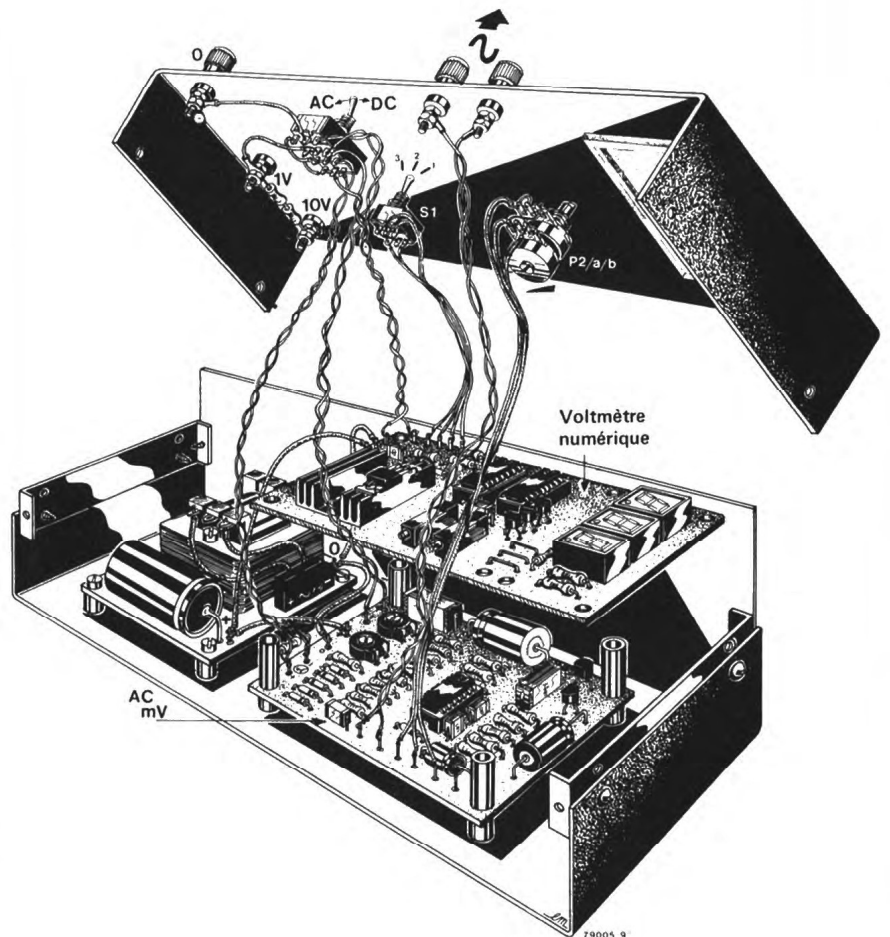


Figure 9. Milliampèremètre numérique avec le 'milliampèremètre alternatif' décrit par ailleurs dans la revue.

Figure 10. Plan de montage dans un boîtier.