

milli- Ω -mètre

la mesure des résistances les plus faibles



Audiophiles exigeants, acharnés de la micro-informatique, nous connaissons tous et toutes les inconvénients que présente inévitablement la mesure de contacts et de résistances à l'aide d'un multimètre: résultats peu fidèles voire faux dans la plupart des cas. Le milli- Ω -mètre proposé dans cet article et fonctionnant selon le principe de la mesure impulsionnelle "à 4 points", mettra fin à ce problème une fois pour toutes; il constituera en outre un acquis intéressant et pratique pour votre parc d'instruments de mesure et de test. Grâce aux 6 calibres couvrant une plage de résistances allant de 100 m Ω à 5 Ω dont il est doté, ce milli- Ω -mètre présente une résolution élevée garante d'affichages réalistes en particulier lorsqu'il s'agira de vérifier des résistances de contact et de passage.

Caractéristiques techniques:

Calibres:	100 m Ω , 200 m Ω , 500 m Ω , 1 Ω , 2 Ω , 5 Ω , pas prévu pour la mesure de charges inductives/capacitives.
Résolution:	2 m Ω environ.
Principe de mesure:	mesure impulsionnelle à 4 points, courant d'impulsion: 1 A, largeur d'impulsion: 1 ms environ, temps de rétablissement: 100 ms environ.
Circuit de mesure:	échantillonneur/bloqueur, affichage analogique, amplificateur de mesure pour les calibres les plus faibles.
Détection d'erreurs:	avertissement lumineux si courant d'impulsion erroné.
Consommation de courant:	70 mA au maximum.

Avez-vous déjà essayé de franchir la frontière du dixième d'ohm (0,1 Ω) en vous aidant d'un multimètre ordinaire? Si tel est le cas, il faut faire montre d'un certain "détachement" pour accepter sans plus les valeurs affichées!

Le dernier-né du laboratoire Elektor est un **vrai** milliohmètre qui, sur son calibre le plus sensible, fournira des valeurs de résistance reproductibles, à une tolérance de 0,002 Ω près. Pour obtenir, dans ce domaine, des valeurs fiables il est inévitable de faire appel à un processus de mesure par impulsions peu courant. Sachant que dans ce domaine des extrêmes il est plus facile d'effectuer des mesures erronées que bonnes - ne serait-ce qu'à la suite d'une connexion faite nonchalamment par

exemple - ce **milli- Ω -mètre** garde toutes vos mesures à l'oeil: il comporte en effet un système de détection d'erreur. À côté de ces caractéristiques, fort impressionnantes au demeurant, il faut admettre que l'utilisation de ce nouveau **milli- Ω -mètre** connaît une petite restriction: ce type de processus de mesure, mesure par impulsions de courant, **ne convient pas aux résistances** présentant une **composante inductive** ou **capacitive importante**.

Le synoptique

Pour arriver à comprendre rapidement un processus de mesure compliqué, rien de mieux que de se pencher sur le schéma synoptique correspondant (**figure 1**).

Les trois blocs les plus importants de cet instrument de mesure sont:

- le **générateur d'impulsions**,
- l'**échantillonneur/bloqueur** et
- la **source de courant**.

Nous avons fait de cet appareil un véritable instrument de mesure en le dotant en outre d'un sélecteur de calibre associé à un amplificateur de mesure pour les calibres les plus sensibles, d'une détection d'erreur, d'un affichage de la valeur mesurée et d'une LED de signalisation d'erreur.

Le générateur d'impulsions constitue, pour ainsi dire, le coeur du **milli- Ω -mètre**. Les impulsions produites par cette partie du circuit, commandent:

- la mesure (de la chute de tension aux bornes de la résistance à mesurer),

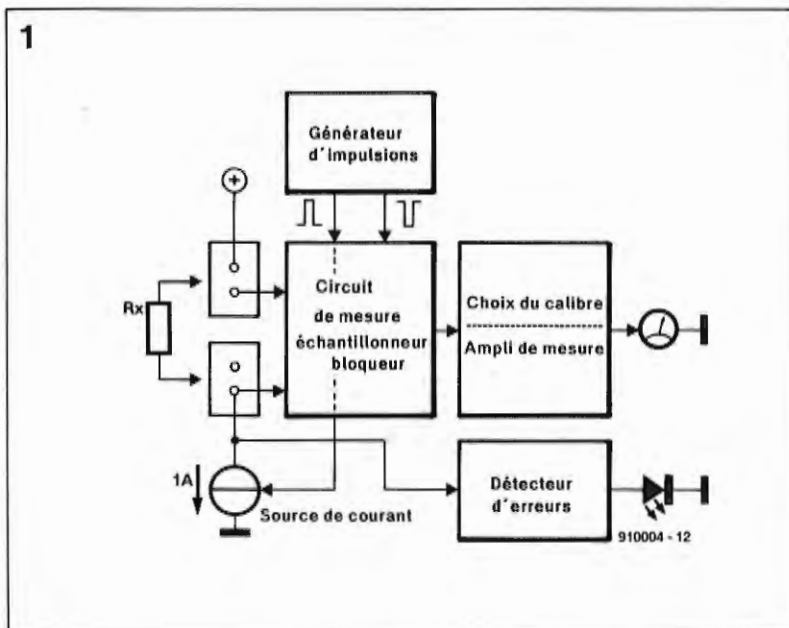
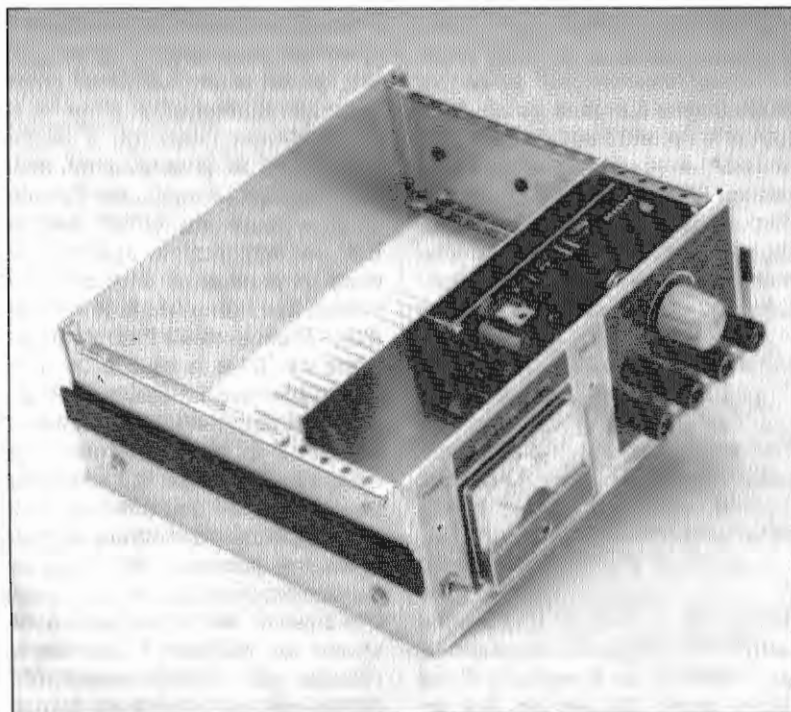


Figure 1. Nous avons décomposé le schéma synoptique du **milli- Ω -mètre** en un nombre de sous-ensembles simples qui permettent de mieux en saisir le fonctionnement.

■ la source de courant (courant impulsionnel de mesure) et

- le processus d'échantillonnage et de blocage (prise en compte de la valeur mesurée).

Lors de la mesure, le circuit de détection d'erreur vérifie en permanence si le courant impulsionnel de mesure est correct. Une LED-témoin, prise dans la face-avant du **milli- Ω -mètre**, s'illumine en cas d'erreur - due à un courant de mesure trop faible ou à un mauvais contact par exemple.

L'amplificateur de mesure se charge du transfert de la valeur mesurée et tamponnée vers le dispositif d'affichage. Pour les calibres inférieurs à 1Ω , cette grandeur subit un gain de 10; sur les autres calibres, le gain est unitaire.

L'électronique

Intéressons-nous maintenant à l'électronique (**figure 2**), constitutive des différents blocs du synoptique décrit plus haut. Commençons par le générateur d'impulsions.

L'amplificateur opérationnel IC2a fait office ici de trigger de Schmitt. À son entrée inverseuse, on découvre le condensateur C2 qui se charge, ou se décharge, à travers la résistance R5. La diode D1 et la résistance R4 facilitent la charge de C2. Les valeurs attribuées à ces composants entraînent de ce fait la production d'une impulsion d'une durée de 1 ms environ disponible à la sortie du circuit intégré IC2a. Le transistor T1 transforme ensuite cette impulsion positive en une impulsion négative. Puisqu'il s'agit dans le cas de notre **milli- Ω -mètre** d'une mesure relative, la longueur absolue de l'impulsion ne présente pas une grande importance.

Ces deux impulsions, produites par le générateur, sont appliquées ensuite au circuit de mesure à échantillonneur/bloqueur, basé sur le circuit intégré IC1 que l'on retrouve au centre de la figure 2. Hormis les interrupteurs électroniques (IC1a à IC1d), les condensateurs C3 et C4 méritent aussi que l'on s'intéresse à eux. En cas d'application d'une impulsion (d'horloge) aux broches 12 et 13 de IC1c et IC1a respectivement, ces deux interrupteurs électroniques se ferment; une chute de tension aux bornes de la résistance à mesurer (R_x) est transmise, à travers les résistances de limitation R8 et R9, au condensateur C3 qui la bloque pour le moment (fonction d'échantillonnage, *Sample*). Simultanément l'impulsion inversée est arrivée aux

Comme illustre cette photo, il reste suffisamment de place dans le boîtier pour y mettre une alimentation conçue selon les règles de l'art, mais on peut également utiliser, comme le recommande l'article, un module d'alimentation-secteur fournissant une douzaine de volts.

Figure 2. Au premier coup d'oeil, l'électronique du milli-Ω-mètre pourra sembler quelque peu complexe. On y retrouve pourtant relativement vite les différentes parties mentionnées dans le texte.

Liste des composants

Résistances:

- R1, R2 = 39 kΩ
- R3 = 27 kΩ
- R4, R6, R7, R15, R16 = 10 kΩ
- R5, R10, R26 = 1 MΩ
- R8, R9, R12 = 1 kΩ
- R11 = 8kΩ2
- R13, R14 = 12 kΩ
- R17 à R20 = 10 kΩ 1%
- R21, R27 = 6kΩ8
- R22, R28 = 3kΩ3
- R23 = 150 kΩ
- R24 = 100 Ω
- R25 = 0Ω56
- R29 = 470 Ω
- R30 = 6Ω8
- R31 = 22 MΩ
- P1, P3 = 2kΩ5 ajustable
- P2 = 1 kΩ ajustable
- P4 = 100 kΩ ajustable

Condensateurs:

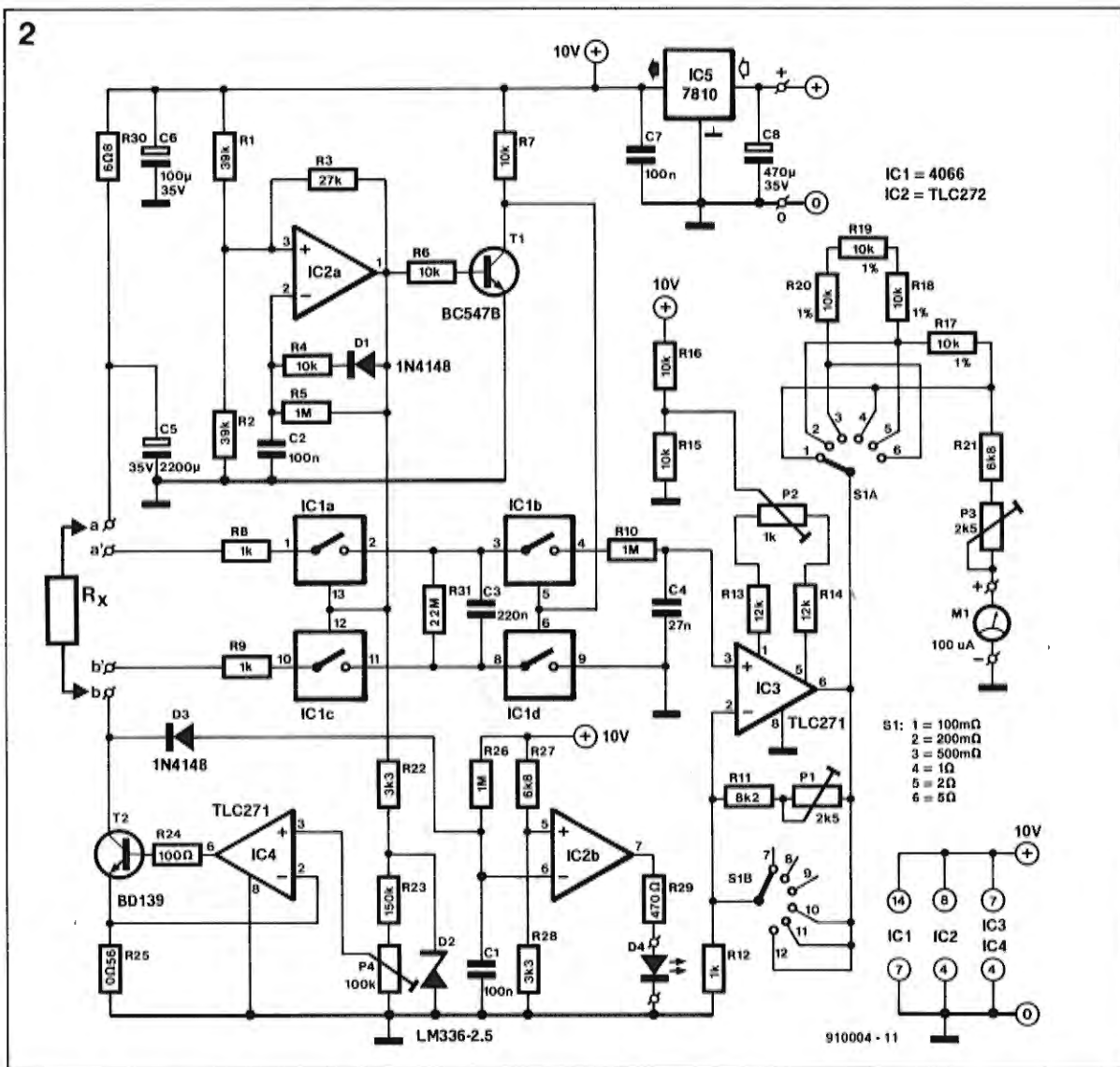
- C1, C2, C7 = 100 nF
- C3 = 220 nF
- C4 = 27 nF
- C5 = 2 200 μF/35 V axial
- C6 = 100 μF/35 V axial
- C8 = 470 μF/35 V axial

Semi-conducteurs:

- D1, D3 = 1N4148
- D2 = LM356-2.5 (National Semiconductor)
- D4 = LED rouge 3 mm
- T1 = BC547B
- T2 = BD139
- IC1 = 4066
- IC2 = TLC272
- IC3, IC4 = TLC271 (Texas Instruments)
- IC5 = 7810

Divers:

- M1 = galvanomètre à bobine mobile, 100 μA (tel que Monacor PM2 par exemple)
- S1 = commutateur rotatif 2 circuits à 6 contacts (tel que Monacor RSP-126 C/N par exemple)
- 1 bouton avec repère pour S1



broches 5 et 6, des interrupteurs IC1b et IC1d, produisant ainsi leur ouverture.

À la fin de l'impulsion, les interrupteurs IC1a et IC1c s'ouvrent alors que simultanément IC1b et IC1d se referment. La charge, acquise et conservée par le condensateur C3 est transférée vers le condensateur C4 d'où elle gagne l'entrée non-inverseuse de l'amplificateur de mesure, IC3. La résistance R10 sert à la compensation de variations faibles des durées de commutations qui peuvent se produire lors des phases d'ouverture et de fermeture des commutateurs électroniques.

Au début du cycle de mesure suivant (100 ms plus tard environ), les commutateurs électroniques isolent à nouveau le condensateur C4 (fonction de maintien d'où le terme de bloqueur, *Hold*) et le processus de mesure reprend.

Arrêtons-nous à l'amplificateur de mesure, construit autour du circuit intégré IC3. Le positionnement du commutateur S1 sur l'un des six cali-

bres définit le gain de cet amplificateur. Dans les positions 10, 11 et 12 (du commutateur S1B) la résistance R11 et l'ajustable P1 sont mises hors-jeu; le gain est de ce fait unitaire (égal à 1). Les autres calibres de mesure (de 100 mΩ à 500 mΩ) connaissent un gain de 10. La sortie de l'amplificateur est reliée au galvanomètre à bobine mobile M1 à travers le second étage de commutation (S1A), avec ses résistances d'atténuation R17 à R20. Pour s'assurer de disposer d'un instrument de mesure digne de ce nom, il est recommandé, en plus de l'emploi obligatoire de résistances de haute précision (tolérance de 1%), de faire appel également à un galvanomètre d'excellente qualité.

Tout comme le circuit échantillonneur/bloqueur, la source de courant est, elle aussi, commandée par le générateur d'impulsions. Appliquée à la résistance R23 et l'ajustable P4, l'impulsion d'horloge produit une tension de référence de 2,5 V. La source de référence, représentée sur le schéma par le symbole d'une diode zener, D2, est en fait un

composant qui intègre plusieurs dispositifs de compensation et se caractérise par une précision élevée; il s'agit de la fameuse LM336-2.5, une diode de référence dont s'enorgueillit, à juste titre, National Semiconductor. La figure 3 illustre le brochage de ce composant qui est vendu avec deux types de boîtier différents.

Une partie de la tension de référence attaque directement l'entrée non-inverseuse du circuit intégré IC4. Cet amplificateur opérationnel compare la chute de tension qui se produit aux bornes de la résistance R25 (1 A) connectée à l'entrée inverseuse de IC4 à la tension de référence. Dès que la tension de référence est plus élevée que la tension mesurée à laquelle elle est comparée, ce circuit fait passer le transistor T2 à l'état conducteur. Il n'existe pourtant de tension de référence que tant que l'impulsion de tension produite par le générateur d'impulsion est appliquée à la source de référence! Lors de la période de rétablissement (de 100 ms environ) le transistor bloque

de ce fait automatiquement. Simultanément, le condensateur électrochimique C5 se charge à travers la résistance R30. De ce fait il sera possible, lors de l'impulsion de mesure suivante, de produire l'écoulement d'un courant de 1 A exactement à travers l'objet de la mesure quel qu'il soit (résistance, contact, etc).

Le circuit de détection d'erreur, basé sur le circuit intégré IC2b, est activé, à travers la diode D3, dès que la tension au collecteur du transistor T2 tombe en-dessous de 4 V. Le point d'entrée en fonction de ce circuit est déterminé par le diviseur de tension que constituent les résistances R27 et R28, diviseur relié à l'entrée non-inverseuse de IC2b. En pratique, la diode électroluminescente (LED) D4 devrait se mettre à clignoter. La LED-témoin indique, sans équivoque possible, que le transistor T2 n'est pas capable de fournir un courant de 1 A ou encore que la résistance à mesurer possède une valeur supérieure à 5 Ω.

La réalisation

Il faudra commencer, en se référant à la représentation de la sérigraphie de l'implantation des composants de la **figure 4**, par la mise en place des trois ponts de câblage. On poursuit ensuite par celle des picots de soudure auxquels on connectera ultérieurement la LED-témoin D4, le galvanomètre M1 et les lignes d'alimentation. Il faudra ensuite implanter les supports pour les circuits intégrés, les résistances, les ajustables et les condensateurs. Avant de procéder à l'implantation des semi-conducteurs il est recommandé de vérifier les deux côtés de la platine, surtout celui des pistes, pour vérifier l'absence de court-circuit entre les pistes ou entre les ponts de câblage et les bornes des résistances proches. Après avoir implanté les semi-conducteurs en respectant leur polarité, on mettra en place, pour finir, le commutateur à deux circuits, S1.

Pour faciliter l'intégration de la platine dotée de ses composants dans le boîtier proposé dans la liste des composants, il sera nécessaire de découper un coin de la platine (celui à proximité de IC1) comme l'illustre nettement la photo de la **figure 5**. Si l'on fait appel à un autre type de coffret, cette "amputation" peut fort bien, selon le cas, ne pas être nécessaire.

La face avant au dessin bien ordonné (**figure 6**), disponible en version autocollante auprès des sources habituelles, fera de ce **milli-Ω-mètre**

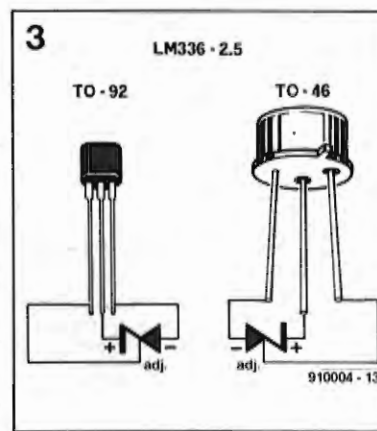
un digne représentant de la si fameuse série "bleue" d'instruments de mesure et de test d'Elektor dont l'éloge n'est plus à faire, du moins pas par nous.

Puisqu'il s'agit ici d'un instrument destiné à mesurer des résistances extrêmement faibles, il faut éviter, bien entendu, toute résistance parasite. De ce fait il est recommandé (voire obligatoire) de souder directement aux points a, a', b et b' de la platine des morceaux de fil de câblage de 1 mm de section (courant de 1 A !) pour relier les bornes universelles de la face avant au circuit.

Si l'on veut garantir le bon fonctionnement de cet instrument de mesure il est extrêmement important de bien choisir les points de mesure, choix qui fera l'objet du paragraphe ci-après.

Étalonnage et test

Après une dernière vérification visuelle de la platine, on mettra les curseurs de tous les ajustables à leur position milieu.



La première étape consiste à procéder au réglage de la tension de compensation du décalage (*offset*) de l'amplificateur de mesure. Court-circuitez à cet effet la boucle de mesure en interconnectant l'un avec l'autre les points a, a', b et b'. Utilisez à cet effet un morceau de fil de cuivre qui fait ici office de substitution de la résistance à mesurer. Il est important de connecter les pinces crocodile des quatre cordons de test de façon aussi rapprochée que possible sur le morceau de fil de cuivre, en respec-

4 bornes universelles femelles
1 interrupteur simple éventuellement boîtier 200 x 180 x 80 (tel que Telet LC-850 par exemple)

Figure 3. Brochage de la LM336-2.5, une source de tension de référence baptisée D2 dans le schéma. Ce composant existe en deux versions de boîtier au brochage différent comme l'illustre nettement cette figure.

Figure 4. Représentation de la sérigraphie de l'implantation des composants du milli-Ω-mètre.

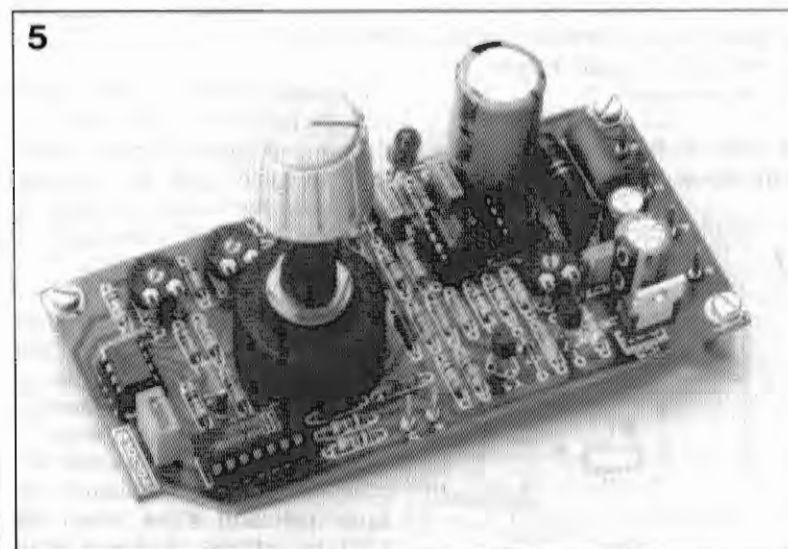
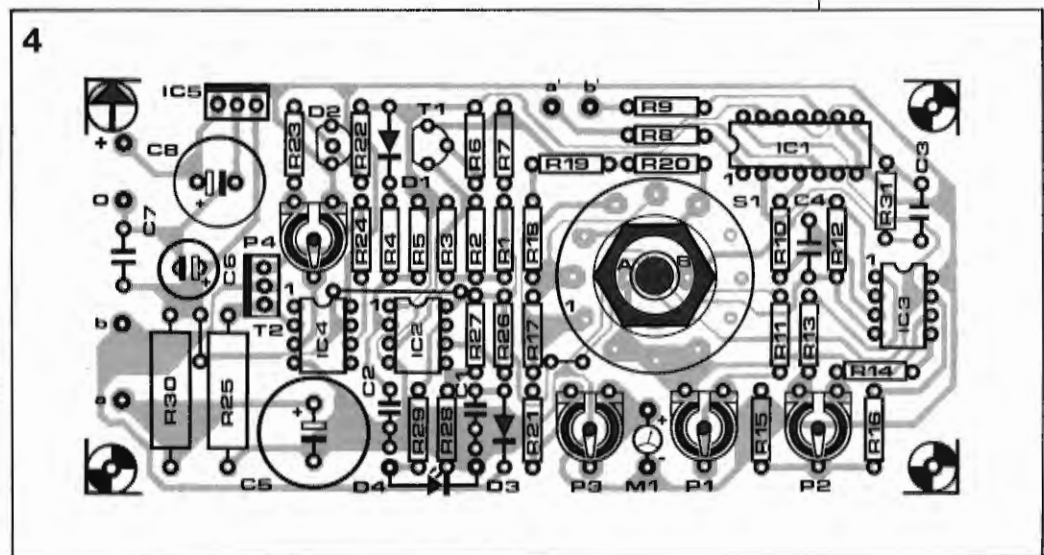
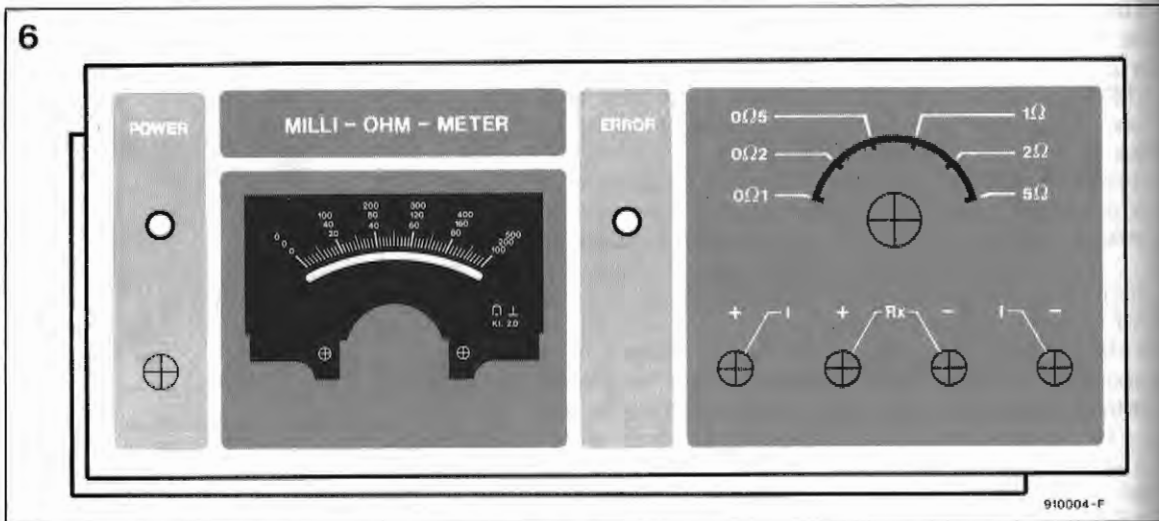


Figure 5. On voit nettement sur cette photo du prototype le coin enlevé au circuit imprimé. Cette modification est nécessaire lorsque l'on utilise le boîtier mentionné dans la liste des composants. Pour donner à ce montage l'aspect professionnel qu'il mérite on pourra le doter d'une face avant auto-collante disponible auprès des sources habituelles.

Figure 6. Représentation (à 70% de sa taille réelle) de la face avant auto-collante qui fera du milli-Ω-mètre un digne représentant de la série "bleue" des instruments de mesure et de test d'Elektor.



tant cependant l'ordre de branchement illustré en **figure 7**.

On choisit ensuite, à l'aide du commutateur de calibre S1, le calibre le plus sensible (100 mΩ) et on déplace alors le curseur de l'ajustable P2 de façon à obtenir un certain débattement de l'aiguille du galvanomètre. On continue l'étalonnage en tournant le curseur de P2 dans l'autre sens jusqu'au point **exact** où l'aiguille du galvanomètre cesse de bouger (qui n'est pas nécessairement le point 0 de l'échelle). Le point que l'on a déterminé de cette façon constitue le point zéro de l'échelle du galvanomètre ce qui signifie qu'en cas d'écart entre la position de l'aiguille et le zéro de l'échelle il faudra l'annuler par action sur la vis de réglage du zéro de l'échelle. Il faudra éviter absolument de poursuivre la rotation de l'ajustable au-delà du point d'arrêt de l'aiguille: on risquerait sinon de se retrouver avec un décalage négatif!

Pour continuer l'étalonnage on mettra le commutateur de calibre S1 en position 1 Ω et on connectera aux bornes de sortie une résistance de 1 Ω **très exactement**. Plus la valeur de cette résistance est précise, plus la précision du **milli-Ω-mètre** sera grande, elle aussi.

En règle générale il est très difficile, voire impossible, de se procurer une

résistance de haute précision, ayant une valeur de 1 Ω. Rien ne s'oppose pourtant à la fabrication-maison d'une telle résistance à l'aide de fil résistif (de 0,5 Ω par mètre de préférence pour se faciliter les calculs): on prendra alors un morceau de fil résistif d'une longueur nettement supérieure à 2 mètres et on connectera les pinces crocodile (ou grippes) des bornes R_x (a' et b') en deux points distants l'un de l'autre de 200 centimètres très précisément, si tant est que l'on utilise du fil résistif de 0,5 Ω/m bien entendu. Les points de connexion des deux autres pinces n'est pas très critique, à condition qu'elle se fasse hors du domaine défini par les bornes a' et b'. Référez-vous à la figure 7 qui montre clairement la façon de réaliser les dites connexions.

Il faudra ensuite connecter un oscilloscope en parallèle sur la résistance de 1 Ω et joner sur l'ajustable P4 pour obtenir une impulsion de 1 A très exactement. Bigre comment faire ça allez-vous dire? La visualisation d'une tension de 1 V sur l'écran de l'oscilloscope correspond à la circulation d'un courant de 1 A à travers une résistance de 1 Ω, n'est-ce pas; il s'agit là de la fameuse loi d'Ohm.

C'est maintenant au tour de l'ajustable P3: on s'en sert pour obtenir un débattement pleine échelle, qui correspond à une valeur de résistance de 1 Ω puisque l'on se trouve sur le calibre 1 Ω et que la résistance à mesurer présente cette valeur.

Après avoir substitué à la résistance de 1 Ω une résistance ayant une valeur de 0,333 Ω, on procède au réglage de l'ajustable P1. Il faudra à cet effet mettre le commutateur S1 sur le calibre 0,05. (Si l'on a des difficultés à obtenir une résistance de haute précision d'une valeur de 0,333 Ω, il suffit de prendre en paral-

lèle 3 morceaux de fil résistif (de 0,5 Ω/mètre) de 2 m (résistance de 1 Ω chacun). Attention cependant: le fil résistif n'est pas isolé; il faudra donc veiller absolument à ne pas torsader les trois fils pour ne pas créer de court-circuit et fausser la valeur de la résistance. Une fois cette résistance connectée aux bornes du **milli-Ω-mètre** (voir figure 7), on joue sur P1 de façon à obtenir l'affichage d'une valeur de "333" (qui sur le calibre 0,05, soit 500 mΩ, correspond à 0,333 Ω).

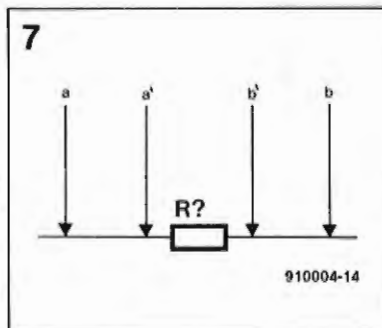
En ce qui concerne l'alimentation du **milli-Ω-mètre** quoi de plus facile que de faire appel à un petit module d'alimentation-secteur capable, par exemple, de fournir un courant de 300 mA, c'est bien plus qu'il ne nous en faut, à une tension de 12 V. L'intégration d'une embase mâle pour alimentation dans la face arrière du boîtier permet une connexion aisée du câble du module d'alimentation secteur au **milli-Ω-mètre**.

La face avant auto-collante destinée à ce montage présente une petite fenêtre derrière laquelle on pourra positionner une LED-témoin (avec sa résistance série) prise entre les lignes d'alimentation. (Cette LED et sa résistance-série ne figurent pas dans la liste des composants).

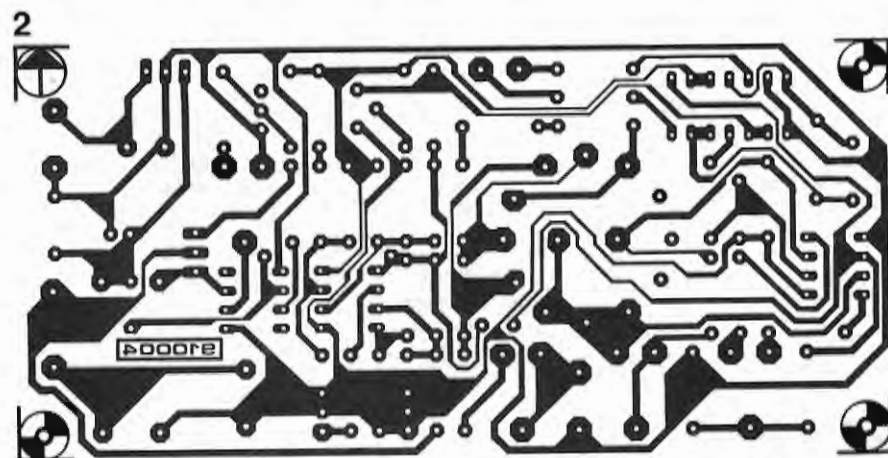
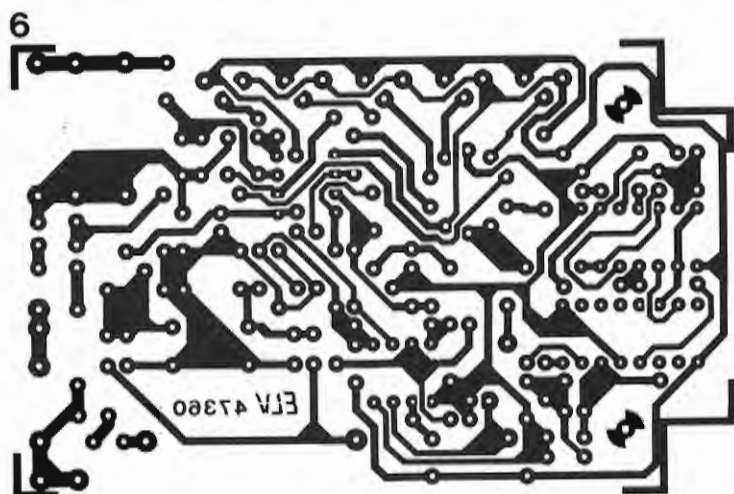
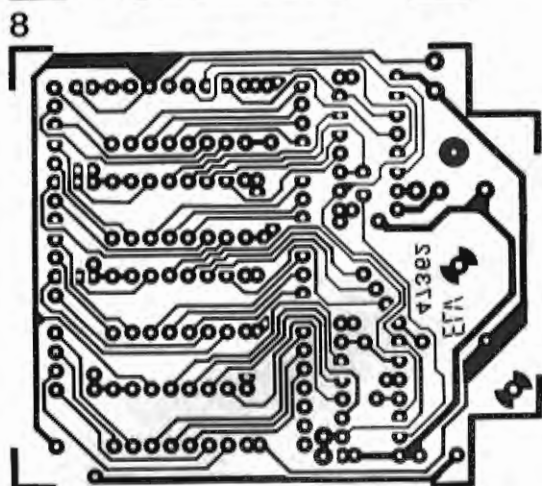
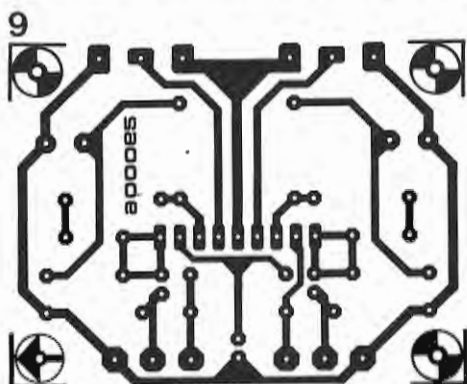
Et ceci termine la réalisation du **milli-Ω-mètre**, comme dirait le représentant du Jury Belge du Concours Eurovision de la Chanson 1991.

Vous voici pourvu un instrument fort précieux, complément indispensable de votre parc d'instruments de mesure et de test; il vous permettra de mesurer des résistances extrêmement faibles, celles que, jusqu'à présent, vous n'avez jamais pu afficher. Merci Elektor!

Figure 7. La connexion des quatre cordons de mesure à une résistance: les lignes a et b fournissent le courant impulsif de mesure et leur écartement par rapport à la résistance à mesurer n'est pas critique. Les deux lignes de mesure a' et b' sont elles à connecter impérativement le plus près possible de cette résistance pour éviter la prise en compte de résistances parasites. On travaille dans les mΩs, ne l'oublions pas!



SERVICE



- 1 The "Discret" : la platine des condensateur
- 2 milli-Ω-mètre
- 3 thermomètre Pt100
- 5 préampli MD haut de gamme
- 6 énergiegraphe: circuit principal
- 7 énergiegraphe: platine du commutateur
- 8 énergiegraphe: platine de l'affichage
- 9 préampli pour lecteur de cassettes

En raison d'un manque de place et de la complexité du dessin des pistes nous ne vous proposons pas ici les dessins des pistes de l'adaptateur de mesure encartable pour PC. Ceux d'entre vous qui se sont déjà tentés à la réalisation-maison d'une carte encartable dans un PC et ont eu des problèmes avec leur ordinateur comprendront notre circonspection...