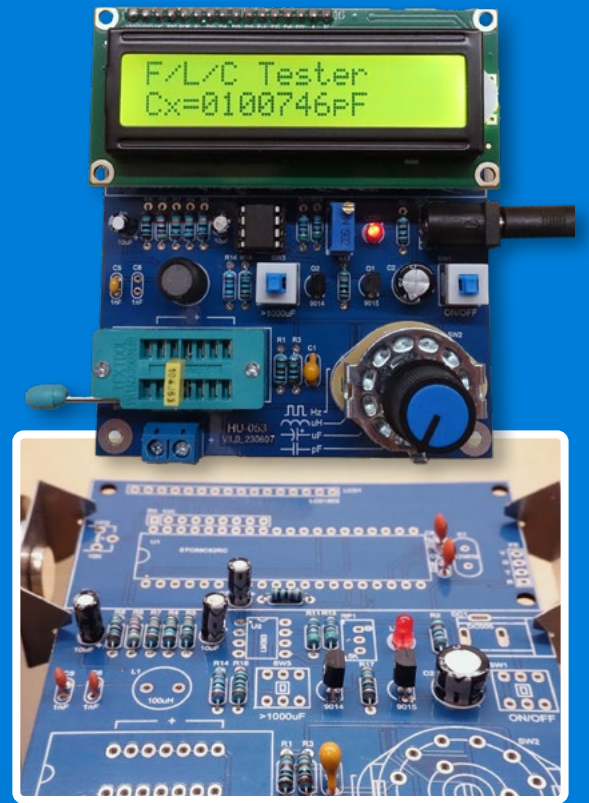


RÉTRO-INGÉNIERIE

D'UN LC-MÈTRE EN KIT

Et amélioration des performances =

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_5 + C_6)}}$$



$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_5 + C_6 + C_x)}}$$



INSCRIVEZ-VOUS À
www.elektormagazine.fr/elektor-newsletter

$$f_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_x)(C_5 + C_6)}}$$

Rétro-ingénierie d'un LC-mètre en kit

Et amélioration des performances

Jean-François Simon (Elektor)

Le HU-053 est un sympathique petit LC-mètre en kit, disponible en ligne et bon marché. Ses composants sont traversants et faciles à souder, et son boîtier est en acrylique transparent. L'appareil mesure la capacité, l'inductance et la fréquence, et constitue un projet idéal pour un dimanche après-midi ! Faisons un peu de rétro-ingénierie et explorons ses fonctionnalités, ses performances et les améliorations possibles.

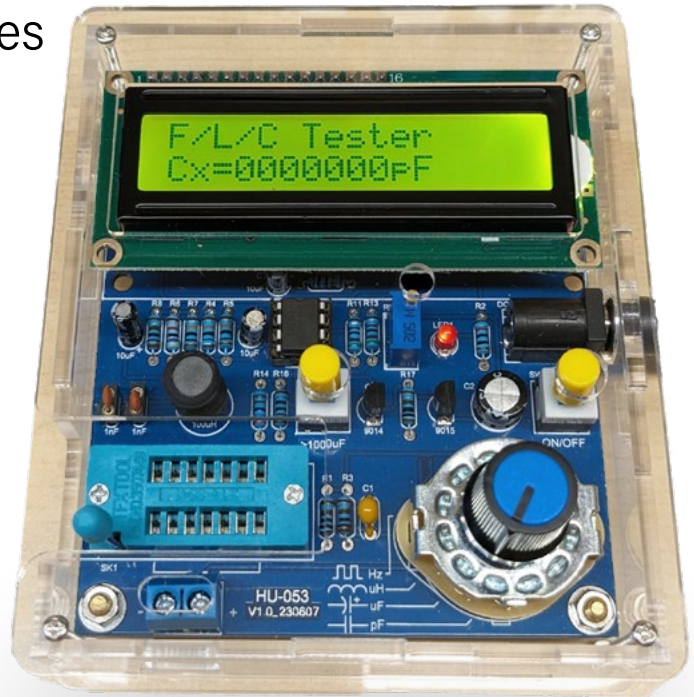


Figure 1. Le LC-mètre HU-053.

Le kit HU-053 se compose d'un circuit imprimé double face, d'une quarantaine de composants et d'un jeu de six plaques prédécoupées en acrylique transparent, avec toute la visserie nécessaire à l'assemblage. Le résultat est le petit appareil visible sur la **figure 1**, mesurant 91 mm × 106 mm pour une hauteur de 28 mm. Les composants les plus reconnaissables sont, bien sûr, le très classique écran LCD à deux rangées de 16 caractères, le microcontrôleur STC89C52RC dans son grand boîtier DIP-40, un commutateur rotatif à trois pôles et quatre positions (3P4T) pour la sélection des fonctions, et un support à force d'insertion nulle (ZIF) pour connecter les composants à tester. L'appareil sera alimenté par une alimentation de 5 V, comme un chargeur de téléphone. Un câble adaptateur USB vers fiche DC 5,5 mm est fourni.

Fonctions et calibres

Les quatre fonctions de l'appareil sont les suivantes : mesure de la capacité de petits condensateurs non polarisés (1 pF à 2200 pF), capacité des condensateurs électrolytiques (1 μ F à 12000 μ F), inductance (1 μ H à 1 H) et fréquencemètre (20 Hz à 400 kHz). Les gammes présentées ici sont celles indiquées sur la page produit du vendeur, mais il semble que la première gamme soit en fait beaucoup plus étendue. J'ai mesuré avec succès

des capacités de plus de 1 μ F dans ce mode. Il s'agit probablement d'une erreur de frappe sur l'unité de mesure qui n'a jamais été corrigée ! Je n'ai pas vérifié les autres calibres, car je n'avais pas de condensateurs et d'inductances suffisamment grands sous la main.

Cela dit, la précision des mesures, comme nous le verrons plus loin, peut laisser à désirer. Cet appareil est davantage un kit pédagogique et ludique sur les techniques de mesure et les circuits oscillants qu'un véritable outil professionnel. Si vous possédez déjà un LC(R)-mètre, vous pourrez vous amuser à comparer les mesures données par le HU-053 avec celles données par votre propre appareil.

Assemblage

Le montage est simple ; des instructions illustrées sont fournies. Comme d'habitude, la traduction chinois-anglais du fabricant est imparfaite, mais les photos peuvent aider. Un manuel en ligne est également disponible à l'adresse [1]. Commencez par souder les plus petits composants (**figure 2**), tels que les résistances, et installez les composants par ordre croissant de taille. Le kit contient une résistance de plus que nécessaire par valeur, ce qui est un peu trompeur... Inspectez les soudures à la loupe avant de mettre sous tension. Assurez-vous que votre

alimentation délivre bien 5 V, car il n'y a pas de régulateur de tension sur la carte ; toute tension d'entrée plus élevée détruirait le microcontrôleur. Ajustez le potentiomètre RP2 pour obtenir un bon contraste sur l'écran. Enfin, réglez le potentiomètre RP1 jusqu'à obtenir une tension de 3,16 V sur la broche 5 du comparateur U2.

Houston, on a un problème

Lors des premiers tests, la fonction « petits condensateurs » (pF) semble présenter une erreur de mesure significative. Bien que l'appareil ait été calibré en appuyant sur le bouton SW3 jusqu'à ce que l'écran affiche *Complete* avant de le relâcher, la mesure présente des écarts de plus de 30 % par rapport à mon fidèle DE-5000. Par exemple, il indique 64 pF pour un condensateur de 100 pF, 650 pF pour un 1 nF, 73 nF pour un 100 nF, etc. (figure 3). Que se passe-t-il ?

Problème résolu !

Des explications plus détaillées suivront ; voici une solution rapide pour l'instant. Il s'avère que les condensateurs C5 et C6 (deux condensateurs céramiques de 1 nF chacun) sont connectés en parallèle et servent de référence pour la mesure. Ce sont donc les premiers suspects. Leur valeur est vérifiée à l'aide d'un LCR-mètre DE-5000 et le résultat est présenté en figure 4. Comme on peut le constater, leur valeur est beaucoup plus grande que 1 nF : le premier fait 1,5 nF et le second presque 1,8 nF. Il s'agit probablement de condensateurs de classe Z, très bon marché (-20% à +80%), ou bien de condensateurs rejetés pour d'autres classes de tolérances et vendus en « deuxième choix ». En outre, leur type de diélectrique est très sensible aux variations de température ; on peut voir la valeur changer en tenant le composant entre les doigts. Tout cela en fait de mauvais candidats pour des condensateurs de référence. Hélas, les fabricants de ces kits n'accordent que peu d'attention à ces questions. Après avoir remplacé ces deux condensateurs par un seul condensateur de 2 nF fabriqué par Kemet, de type C0G (tolérance 5%), l'appareil devient utilisable : voir la figure 5 où un condensateur de 100 nF est mesuré. La classe C0G lui confère une bien meilleure stabilité en température et en fréquence. Bien sûr, on pourrait encore l'améliorer en choisissant une tolérance de 1% ou même mieux, mais je n'en avais pas sous la main. Ce condensateur fera l'affaire pour l'instant.

Principe de fonctionnement

Nous avons retracé le schéma : voir figure 6. Un circuit LC parallèle est construit, en utilisant l'inductance de référence L1 et les condensateurs de référence C5 et C6 (eux-mêmes en parallèle, de sorte qu'ils agissent comme un seul condensateur). Comme tous les circuits LC, ce circuit peut osciller, et sa fréquence de résonance est :

$$F_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_5 + C_6)}} \text{ (équation 1)}$$

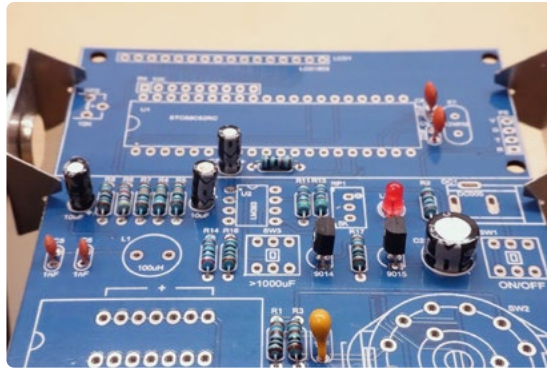


Figure 2. Commencez par les plus petits composants.

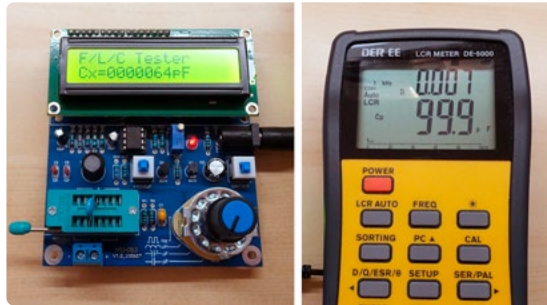


Figure 3. Mesure du même condensateur avec deux appareils différents : quelque chose ne va pas !



Figure 4. Ces condensateurs « de référence » de 1 nF chacun sont problématiques.

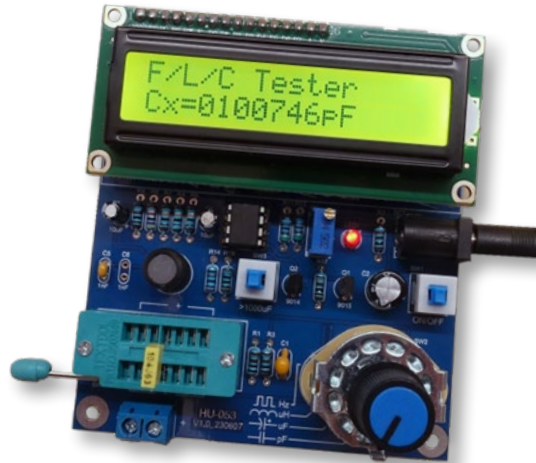


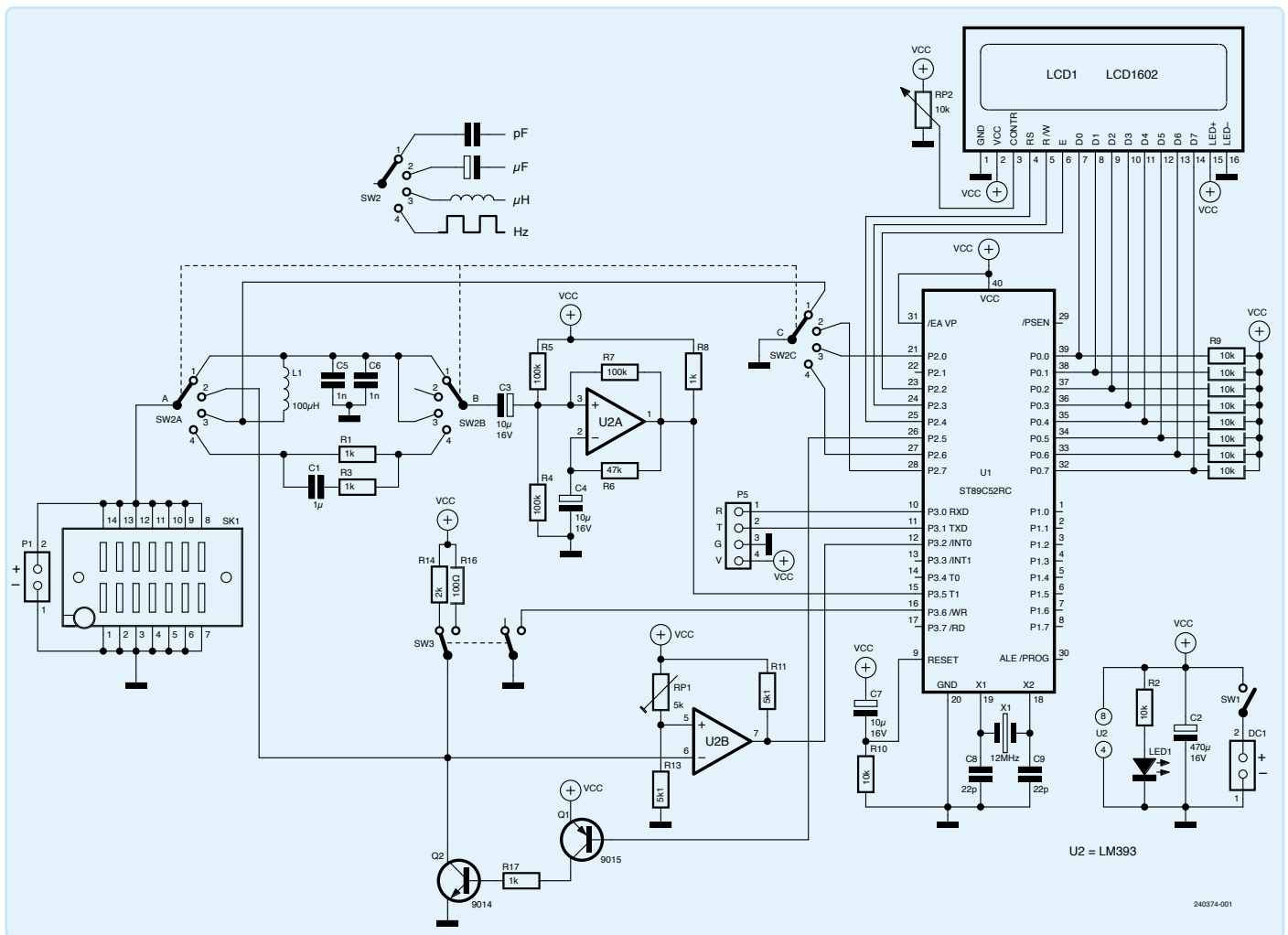
Figure 5. Avec un nouveau condensateur de référence, l'appareil est utilisable.

Les contacts du commutateur rotatif SW2 sont utilisés pour modifier ce circuit LC de référence :

- En mode pF, le condensateur à mesurer Cx est mis en parallèle avec les condensateurs de référence C5 et C6. La fréquence d'oscillation change et devient :

$$F_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_5 + C_6 + C_x)}} \text{ (équation 2)}$$

- En mode μH, l'inductance à mesurer Lx est connectée en série avec l'inductance de référence L1. La fréquence devient :



▲
Figure 6.
Schéma du circuit.

$$F_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_x)(C_5 + C_6)}} \quad (\text{équation 3})$$

Les valeurs de L1, C5 et C6 étant connues à l'avance, il suffit de mesurer les fréquences F1, F2 ou F3 pour calculer les valeurs de Cx ou Lx. Le circuit formé par la première moitié du comparateur U2 (un LM393) est chargé de maintenir les oscillations à la fréquence de résonance et de produire un signal carré de même fréquence sur sa broche de sortie. Ce signal est envoyé au microcontrôleur ST89C52RC, qui en mesure la fréquence, calcule les valeurs de capacité Cx ou d'inductance Lx correspondantes et les affiche sur l'écran LCD.

Un comparateur oscillant

Le circuit utilisant la première moitié du comparateur U2 est chargé de maintenir les oscillations, à la fréquence propre du réseau RC. Lorsque le circuit est mis sous tension, la tension à la broche 3 est de 2,5 V, en raison du diviseur R4/R5. Cependant, à cet instant, le condensateur C4 est déchargé (0 V). La tension de sortie de U2A est donc de 5 V. Ceci charge le condensateur C4 à travers la résistance R6 jusqu'à ce que la tension à la broche 2 soit égale à 2,5 V.

À ce moment-là, la sortie de U2A passe à l'état bas. À cause de la résistance R7, la tension à la broche 3 chute donc brusquement à environ 1,7 V. Ce transitoire est couplé, par l'intermédiaire de C3, au circuit LC oscillant, ce qui le fait résonner à sa fréquence naturelle.

Cette oscillation est elle-même couplée, toujours via C3, à l'entrée non inverseuse de U2A, provoquant l'apparition d'un signal carré à sa sortie. Ce signal de sortie, via R7 et C3, maintient les oscillations. Ce circuit astucieux a été introduit par le regretté Neil Heckt en 1998 pour son LC-mètre [2], qui n'est désormais plus disponible et qui a fait l'objet de nombreuses copies.

Mode de mesure de la fréquence

Dans ce mode, le circuit LC n'oscille plus, la deuxième borne de L1 étant laissée flottante. Au lieu de cela, un signal externe dont la fréquence doit être mesurée est injecté via le réseau C1/R1/R3. Un signal de fréquence identique est créé sur la broche 1 de U2A, et le microcontrôleur mesure et affiche cette fréquence sur l'écran LCD.

Mode µF

Une approche complètement différente est utilisée pour les condensateurs polarisés. En effet, les condensateurs électrolytiques ne sont pas vraiment adaptés à la réalisation d'oscillateurs, car leur facteur de qualité est de 10 à 100 fois inférieur à celui des condensateurs céramiques ou film. Par conséquent, les concepteurs de ce circuit ont opté pour une méthode simple et classique : une mesure en courant continu.

Le condensateur est chargé par une tension fixe (5 V) à travers une résistance fixe (2 kΩ ou 100 Ω, selon le calibre).

U1 contrôle le début de la charge via les transistors Q1 et Q2, qui connectent le pôle positif du condensateur à la masse ou le laissent flottant. Lorsque U1 désactive Q2, le condensateur commence à se charger et U1 démarre un timer. Lorsque la tension à ses bornes atteint 63% de Vcc, la sortie du comparateur U2B passe à l'état bas, signalant ainsi l'événement à U1, qui arrête le timer. De fait, le microcontrôleur mesure le temps de charge à tension constante jusqu'à 63% de la tension d'alimentation. Par définition, ce temps est égal à $\tau = R \times Cx$. Le microcontrôleur calcule $Cx = \tau / R$ et affiche le résultat. Deux gammes sont disponibles (0 à 1000 μF et >1000 μF), sélectionnées à l'aide du commutateur SW3. Le potentiomètre multitours RP1 permet de régler le rapport de 63%, voire d'étalonner la mesure si vous possédez un condensateur de référence.

Aller plus loin

Le HU-053 est un kit sympathique : il est facile à assembler, avec un PCB de bonne qualité en époxy (FR-4) et des pastilles faciles à souder. Il est très modulaire, avec un écran LCD enfichable, des circuits intégrés enfichables et un boîtier en acrylique maintenu par des vis. Il illustre bien les concepts de conversion de mesures physiques en mesures de temps et de fréquence, ainsi que les oscillateurs LC et les comparateurs à rétroaction positive. Pour plus d'informations sur l'utilisation de comparateurs comme oscillateurs, voir par exemple les notes d'application 41 et 74 du Linear Application Handbook [3]. C'est aussi une excellente occasion d'imaginer des améliorations possibles. Voici une liste non exhaustive, n'hésitez pas à réfléchir à d'autres idées.

- > Remplacer les condensateurs C5 et C6 par des condensateurs de référence de meilleure précision.
- > Concevoir une petite carte pour remplacer le microcontrôleur par un Arduino et réécrire un nouveau programme open-source.
- > Retravailler l'algorithme de mesure. Actuellement, la mesure de l'inductance dépend de l'inductance de L1, et son imprécision produit une erreur de mesure. Cependant, en utilisant les équations 1 et 3 d'une manière différente, il est possible d'exprimer L1 en fonction de C5, C6 et F1. Cela permet au microcontrôleur de calculer la valeur précise de L1, plutôt que de la traiter comme un « nombre magique » dans le programme. Cette technique est utilisée dans la plupart des variantes de ce LC-mètre, comme la version de Jiri Recek [4]. Elle permet


Un peu de maths

Comment sont calculés Cx et Lx ? En retravaillant l'équation 1, on peut écrire L1 en fonction de F1, C5 et C6. Ensuite, en remplaçant L1 par son expression dans l'équation 2, on peut montrer que $Cx = (C5+C6)(F1^2/F2^2 - 1)$. Au démarrage du HU-053, avant l'insertion de tout composant à mesurer, l'appareil mesure la fréquence F1. Ensuite, lorsque le condensateur à mesurer est inséré, l'appareil mesure F2 et affiche le résultat pour Cx.

De même, en retravaillant l'équation 1, C5+C6 peut être écrit comme une fonction de F1 et L1. Ensuite, en remplaçant C5+C6 par son expression dans l'équation 3, Lx s'écrit $Lx = L1(F1^2/F3^2 - 1)$. Comme la valeur de L1 est connue à l'avance, l'appareil mesure F1, puis F3, et enfin affiche le résultat pour Lx. Il est à noter qu'en mode pF, il est possible d'appuyer sur le bouton SW3 pour calibrer le zéro ; ce faisant, F1 est mesuré et stocké en mémoire. Cette valeur d'étalonnage mémorisée est également utilisée en mode μH .

d'utiliser n'importe quelle inductance, quelle que soit sa tolérance, sans affecter la précision. Dans tous les cas, cependant, la précision du condensateur détermine toujours la précision de la mesure.

- > Modifier le programme pour utiliser la première ligne de l'écran, qui n'affiche actuellement pas d'informations très utiles.
- > Ajouter un régulateur de tension et/ou une protection contre l'inversion de polarité pour une plus grande flexibilité et sécurité en termes de tension d'alimentation.
- > Trouver les valeurs de résistance pour fixer le déclenchement du comparateur U2B à 63% de VCC sans nécessiter de réglage manuel.
- > Atténuer l'erreur introduite par la tension de seuil de Q2 (V_{CE}) en mode μF .

En effet, avec ce circuit, la charge du condensateur ne commence pas à 0 V, mais à 0,2 V. Ceci pourra constituer un petit exercice pour nos lecteurs, tout comme les idées précédentes. Amusez-vous bien ! 

240374-04

Questions ou commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur à l'adresse jean-francois.simon@elektor.com ou contactez Elektor (redaction@elektor.fr).

Produits

- > **Kit LC-mètre**
www.elektor.fr/20868
- > **LCR-mètre (100 kHz) DER EE DE-5000**
www.elektor.fr/20675

LIENS

[1] Manuel du fabricant : <https://tinyurl.com/5hxvcxy3>

[2] LC-Mètre de Neil Heckt : <https://tinyurl.com/mv65tzc2>

[3] Linear Applications Handbook : <https://tinyurl.com/2hfmvr2c>

[4] LC-Mètre de Jiri Recek : <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/konstrukce/lc-metr-s-89c2051.html>