

analyseur de puissance multicanal

Avec affichage graphique et alphanumérique de la puissance sur 3 canaux

Wil Dijkman (Pays-Bas)

C'est une chose que de mesurer la tension, le courant et la puissance d'appareils alimentés en courant continu, c'en est une autre, plus ardue, en courant alternatif, en raison de la forme d'onde et du déphasage entre tension et courant. Cet instrument ne se contente pas de mesurer et de calculer des quantités, mais affiche également les formes d'onde et le spectre des signaux alternatifs sur un LCD graphique.

Ce projet a été inspiré par le wattmètre CA/CC publié dans Elektor en septembre 2015 [1]. À première vue, il m'a plu, et j'ai souhaité le construire moi-même, mais je lui ai trouvé des inconvénients qui m'ont conduit à essayer de l'améliorer. Voici comment :

- circuit d'entrée : je souhaite mesurer le courant et la tension indépendamment l'un de l'autre : le courant à travers les lignes d'alimentation ne doit pas influencer la lecture de la tension.
- échantillonnage : au lieu de me contenter des huit premières harmoniques d'un signal de 50 Hz (avec un filtre parfait), j'augmente la fréquence d'échantillonnage pour mesurer les 40 premières harmoniques.
- changement de calibre et correction de décalage (*offset*) automatiques

Cela implique une révision totale du circuit d'entrée et d'amplification. Côté chaud, il faut un microcontrôleur pour la correction automatique du décalage et pour l'autoréglage. La **figure 1** montre la carte principale et (jusqu'à) trois cartes satellites.

Carte principale

Le schéma (**fig. 2**) est en grande partie une copie de la carte EasyPIC V7, avec comme interface utilisateur un afficheur LCD graphique tactile. Le générateur d'ondes carrées (autour d'I_{C1}) alimente les cartes satellites avec un signal de 12 V_{cac} d'environ 150 kHz. La communication des données avec les cartes satellites passe par une interface I²C, où le µC de la carte principale est le maître et les cartes satellites sont les esclaves.

Selon que le point de soudure SJ1 est présent ou pas, la carte principale accepte une alimentation de 12 V stabilisés ou de 15 à 18 V non stabilisés. Les deux autres points de soudure, MAX1 et MAX2, permettent d'indiquer le nombre de canaux pour le maître : MAX1 court-circuité = un seul canal, MAX2 court-circuté = deux canaux, MAX1 et MAX2 court-circuités = trois canaux (cartes satellites). Grâce aux cavaliers marqués Jx sur les schémas et sur le circuit imprimé principal, on peut se contenter d'un circuit imprimé à une seule couche.

Carte satellite

Sur les cartes satellites (**fig. 3**), je souhaite mesurer indépendamment la tension et le courant. Ce n'est réalisable qu'en partie : l'entrée V basse et l'entrée I peuvent flotter à +/−1 V l'une par rapport à l'autre, grâce aux diodes D3, D4, D7 et D8. En l'absence de précautions, ce circuit pourrait être endommagé par une mauvaise connexion : un potentiel élevé à l'entrée basse tension et aussi l'entrée de courant du côté basse tension. Pour prévenir ce risque, j'ai rajouté le circuit T10 à T14 et le relais Reed K1. Une première limitation de courant est assurée par R11 : sous une tension d'entrée de 750 V, l'intensité maximale du courant est de 0,5 A. Quand le courant à travers R11 dépasse 10 à 20 mA, il circule à travers R34 un faible courant est détecté par T11 et T13. Cela déclenche le circuit du thyristor avec T10 et T12. Une fois

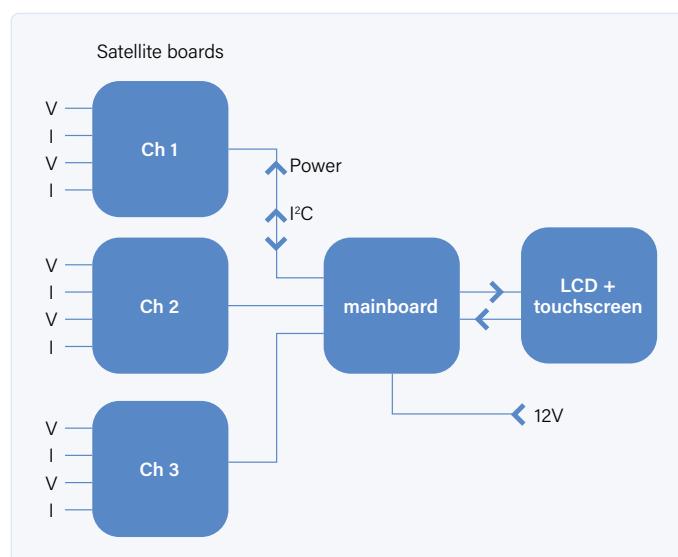
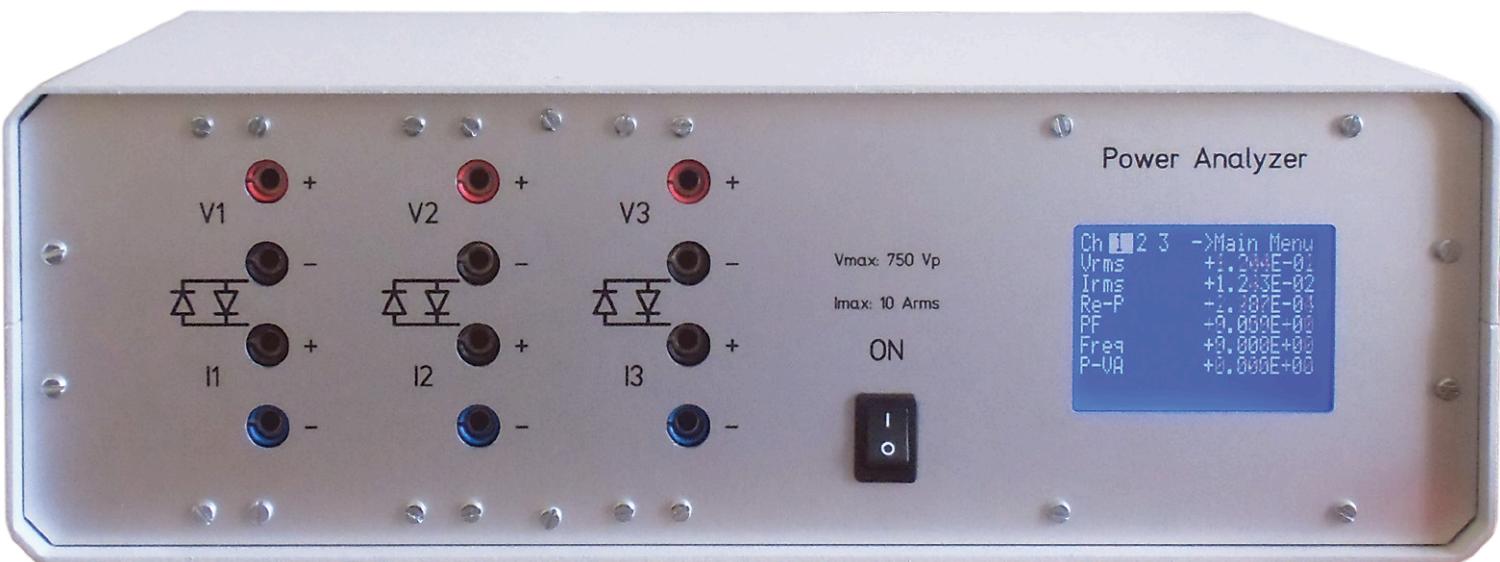


Figure 1. Schéma de l'analyseur de puissance.



amorcé, ce circuit à thyristor reste dans cet état et coupe T14 et K1. Le signal OC indique au µC que la protection est déclenchée. En l'absence de courant, K1 est également désactivé (V-low est déconnecté), de sorte que le circuit est en sécurité. Pour le remettre en fonction, il faut déconnecter l'alimentation du circuit puis la reconnecter.

Le diviseur de tension donne 100 mV quand la tension d'entrée atteint le maximum de 750 V (CC), la tension alternative maximale étant d'environ 500 V. La chute de tension sur R62, la résistance de détection de courant de 6,5 mΩ, est d'environ 100 mV à 15 A CC (environ 10 A CA). Les amplificateurs de tension et de courant sont identiques, je ne décrirai donc que l'amplificateur de tension. T1, T2, T4 et T6 servent d'interrupteurs pour relier l'amplificateur différentiel soit au signal du circuit d'entrée, soit pour court-circuiter l'entrée afin de rendre possible la mesure du décalage (*offset*) dont la valeur pourra être mémorisée. Ce décalage pourra être soustrait ultérieurement pour affiner la mesure. T3 et T5 permettent de choisir entre 1x ou 25x pour le gain du premier étage de l'amplificateur d'instrumentation ordinaire. IC5 rend asymétrique le signal différentiel. Le gain du dernier étage avec IC4 sera de 1x ou 5x. De sorte qu'il y a quatre gains possibles : 1x, 5x, 25x ou 125x. C'est le microcontrôleur IC13 qui fixe le gain. L'amplificateur délivre un signal positif ou négatif par rapport à COMV. Ce signal est 0,5 fois VREF, délivré par le circuit autour d'IC3. VREF est de 4,5 V, donc COMV, COM1 et CINV sont de 2,25 V. VREF et CINV sont connectés au CA/N du contrôleur PIC18F26K80. Ce convertisseur peut opérer sur 13 bits s'il est utilisé de la manière indiquée (12 bits + 1 bit de signe). Pour 750 V, cela donne une résolution d'environ 200 mV par bit. Pour 6 V, cela donne environ 1,6 mV/bit. Cela me suffit.

Pour fixer l'adresse I²C d'une carte satellite, il faut fermer ou ouvrir SJ1 et SJ2 : SJ1 fermé = canal 1, SJ2 fermé = canal 2, SJ1 et SJ2 fermés = canal 3.

Isolation galvanique

Le signal carré provenant de la carte mère est envoyé au transformateur de droite (rapport 1:1). La tension sur les redresseurs est alors un peu inférieure à 6 V. Les régulateurs en parallèle la mettent +/- 5 V.

ATTENTION ! Les tensions élevées sont mortelles. Le circuit décrit ici ne convient donc pas aux débutants. Ne le construisez et ne l'utilisez que si vous connaissez toutes les règles à appliquer en présence de tensions dangereuses.

Le seuil d'isolation des enroulements du transformateur est de 900 V, donc l'isolation totale sera de 1800 V_{crête}, à condition que le reste de la construction soit conforme. Le signal I²C passera par le circuit IC14 dont la valeur d'isolation est de 4 kV_{crête}. Les cartes satellites seront donc complètement flottantes à la fois par rapport à la carte principale, et les unes par rapport aux autres.

Mise à jour de la carte satellite

Des tests sur le prototype ont montré que des corrections étaient nécessaires. Il a fallu réduire la diaphonie entre signal de commutation et signal de mesure dans les commutateurs de décalage. C'est la fonction de C41-R102 et C40-R103. Le condensateur C33 réduit les déclenchements intempestifs du circuit de protection, par exemple lors du branchement d'un cordon de mesure. D14 et R101 limitent également la sensibilité pour les signaux positifs.

Avec le gain le plus élevé des amplificateurs (environ 2750x), il faut un contrôle de décalage. Cette commande est désactivée lorsque le gain est plus faible. Selon le signe du décalage, une sélection doit être faite avec le cavalier à souder.

J'avais oublié quelques condensateurs de découplage dans le circuit d'alimentation, il a fallu les ajouter aussi. La liste des composants de ce projet est téléchargeable [2] avec les références de Farnell, ou n'importe quel autre fournisseur.

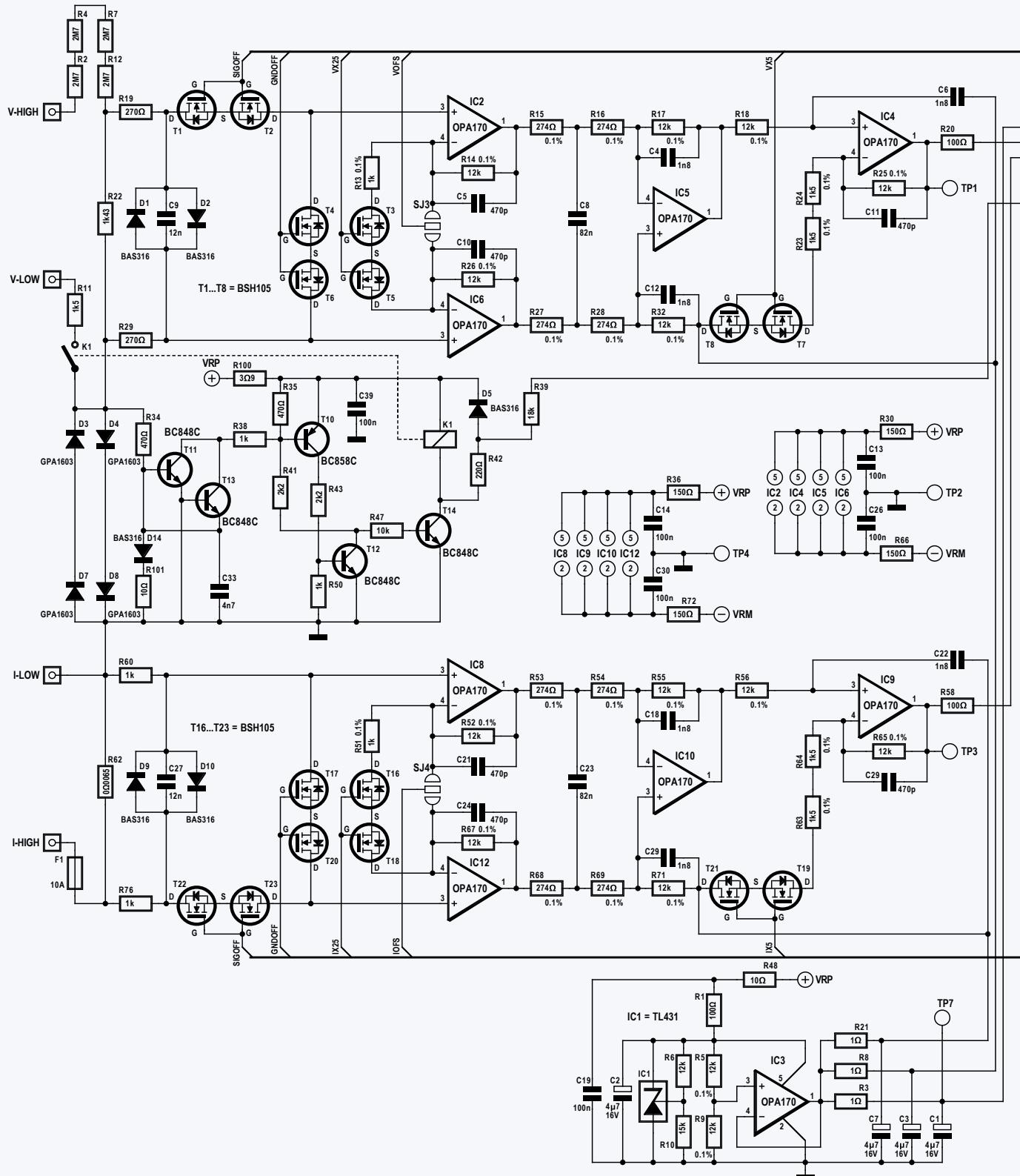
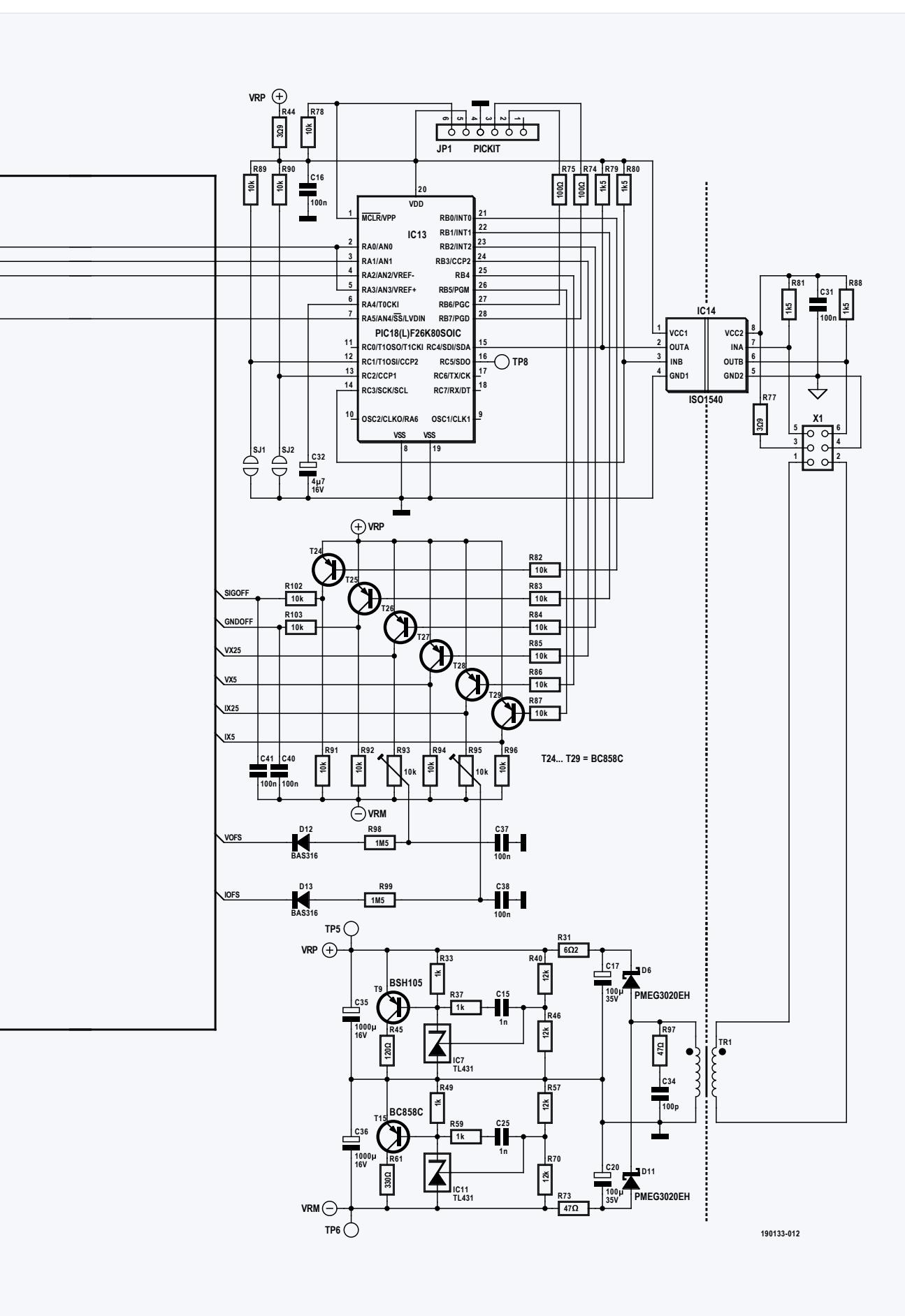


Figure 2. Schéma de la carte mère.



190133-012

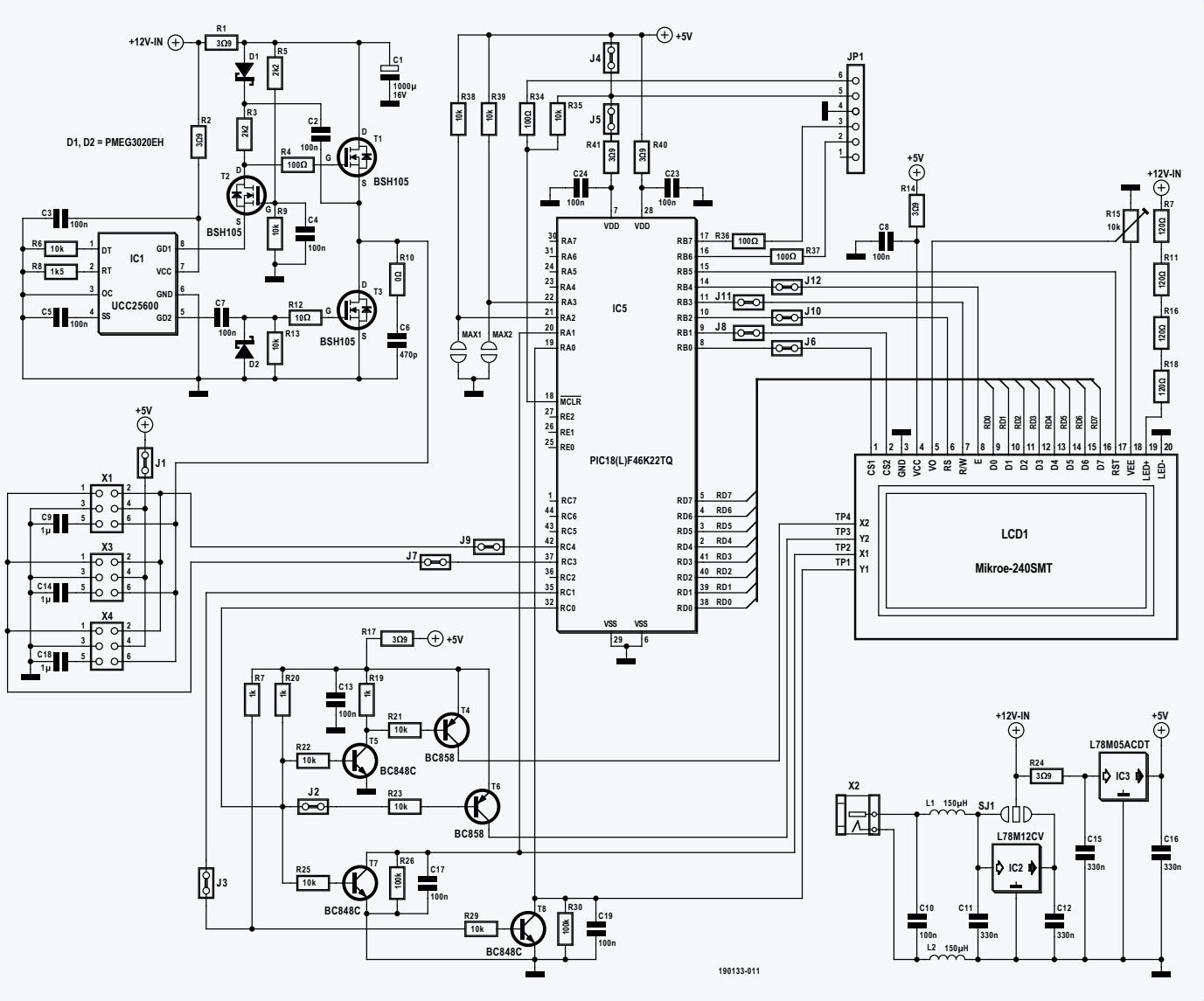


Figure 3. Schéma de la carte satellite.

Logiciel pour la carte satellite

Le programme est écrit en mikroBasic pour PIC (V5.6.1) de MikroElektronika, un langage de programmation relativement facile d'accès.

Je voulais une gamme de fréquences d'un peu moins de 50 Hz à quelques centaines de Hz. Par conséquent, le signal devait être échantillonné pendant au moins 30 ms. À 50 Hz, ça fait au moins trois passages par zéro, assez pour détecter une période. Du moins tant que ces passages à zéro sont équidistants. Avec un rapport cyclique différent de 50 % à 50 Hz, 30 ms est une durée d'échantillonnage insuffisante, et je suis donc passé à 35 ms. Avec un rapport cyclique inférieur à 25 %, il est possible qu'à 50 Hz la détermination de la fréquence soit incertaine. À des fréquences plus élevées, il n'y a pas de problème. Les signaux ayant moins de trois passages par zéro durant la fenêtre d'échantillonnage sont traités comme du CC.

La deuxième question est de savoir combien d'échantillons seront

prélevés au cours de ces 35 ms. Une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz ou plus serait idéale. J'ai opté pour 357 échantillons à 10,2 Kéch/s. Cela donne un multiple entier d'échantillons pour les signaux de 50 et 60 Hz, fréquences auxquelles sera obtenue la plus grande précision de l'analyse du signal.

Il existe dans mikroBasic une bibliothèque avec des commandes I²C, hélas réservées à un maître I²C. J'ai dû écrire mes propres procédures pour un esclave I²C. Ces procédures sont nécessaires pour établir et contrôler la communication avec la carte mère, le maître I²C. Ce dernier ne fait que demander et afficher les informations des cartes satellites, le calibre (automatique) et le décalage. Tout le traitement du signal, échantillonnage et filtrage compris, est effectué sur la ou les cartes satellites.

Les transformées de Fourier rapides sont également calculées sur les tableaux des satellites. Les calculs sont empruntés [3]. Le filtrage numérique est basé sur le chapitre 16 du *The Scientist and*



Figure 4a. La carte principale et l'afficheur en façade.

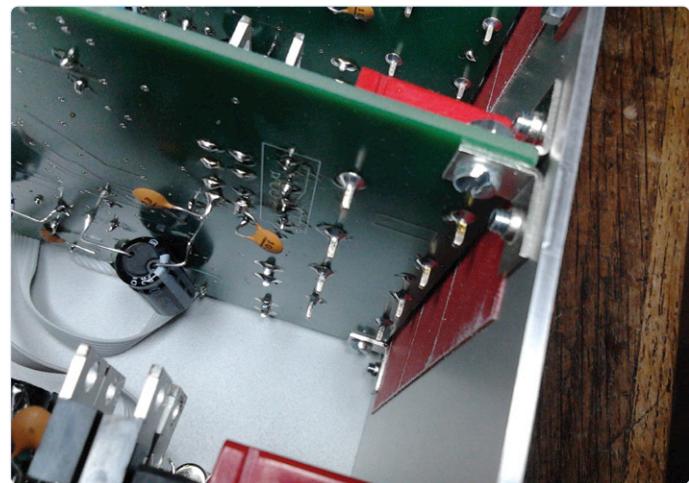


Figure 4b. Une carte satellite à l'avant. Notez l'isolation supplémentaire (ruban rouge épais) entre la carte et la façade.

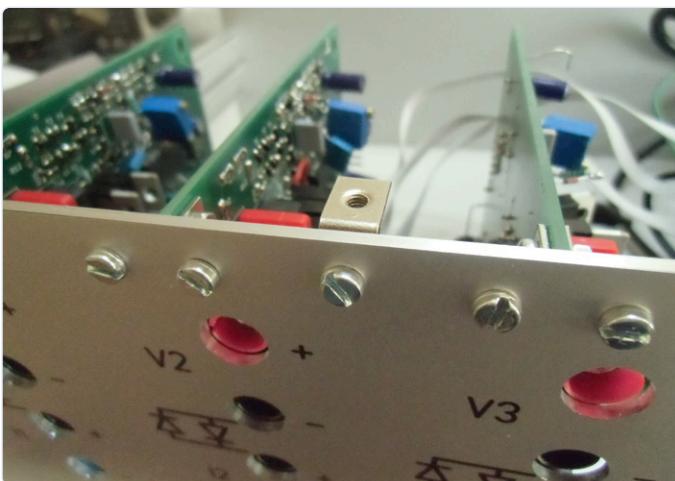


Figure 4c. Une des équerres de renfort entre façade et couvercle.

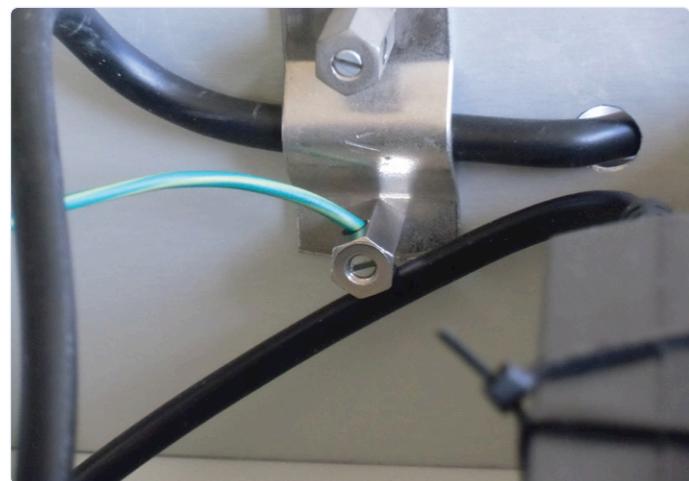


Figure 4d. Connexion PE

Engineer's Guide to Digital Signal Processing [4]. Une fenêtre de Blackman est utilisée et le filtre a 13 coefficients ($M=12$). Le choix de la longueur du filtre est un compromis entre temps de calcul, mémoire nécessaire et performances (c'est-à-dire la suppression des signaux supérieurs à 2,55 kHz et l'atténuation des signaux inférieurs à 2,55 kHz).

Assemblage

J'ai dessiné une façade pour trois canaux, qui peut être commandée chez Schaeffer, pour un boîtier métallique Metcase M5503110 (réf. 1510827 chez Farnell).

La **figure 4** montre le matériel dans ce boîtier. On y voit l'agencement de mon *Power Meter*. Notez le bloc d'alimentation standard utilisé pour alimenter l'analyseur de puissance.

La **figure 4c** montre l'une des deux équerres ajoutées sous la façade pour la rigidifier, notamment pour lui permettre de résister aux tractions

mécaniques quand on branche et débranche les cordons de mesure. Il faut percer un trou dans le couvercle et le fond pour visser ces équerres. Comme le boîtier est métallique, il doit être connecté à la terre du secteur (**fig. 4d**).

Utilisation

Après la mise en marche, l'écran de mesure apparaît. Il affiche quelques unités et leurs valeurs pour le canal sélectionné. En haut, vous pouvez sélectionner d'autres canaux (s'ils existent).

L'écran affiche jusqu'à sept valeurs de mesure, sélectionnées dans l'écran de configuration.

Dans le *menu principal* (en haut à droite), choisissez *Configuration* : l'écran de configuration apparaîtra avec 16 valeurs à choisir. Les valeurs sélectionnées à afficher seront surlignées.

Certaines de ces valeurs vont de soi, d'autres nécessitent des explications. Ainsi *Vdis* et *Idis* (distorsion) sont calculés à l'aide de :

COMMENT CONNECTER L'ANALYSEUR ENTRE CHARGE ET SOURCE

Comme le montre ce croquis, on ne connecte pas les cordons de mesure de la même manière selon que l'on mesure la consommation d'une charge ou la puissance fournie par une source. Il s'agit d'éviter que la chute de tension dans les cordons ne fausse les mesures du courant. La différence de potentiel entre les connexions I et la connexion V- doit rester inférieure à 0,5 V. Sinon, le circuit de protection sera déclenché et il faudra initialiser l'alimentation.

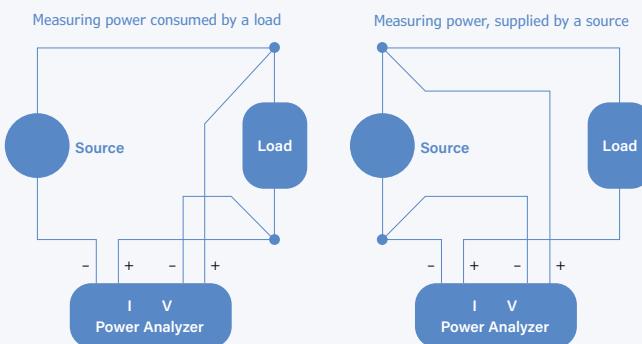


Figure 5. Connexion de la source, de la charge et de l'analyseur

$$V_{dis} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} V_n^2}$$

où VN = amplitude de l'harmonique N du signal

Re-P = puissance réelle,

P-VA = Vrms x Irms,

Im-P = puissance imaginaire

PF = facteur de puissance, c'est-à-dire Re-P / P-VA.

Si vous choisissez *Eff->*, vous entrez dans l'écran Efficacité pour y choisir la formule qui décrit la relation de puissance recherchée, puis vous retournez à l'écran de configuration. Si vous revenez à l'écran de mesure, la formule choisie avec la valeur calculée est affichée pour tous les canaux.

De retour dans l'écran de configuration, vous pouvez également choisir *Graphs->* qui permet de choisir entre *Scope* et *FFT*. Appuyez

sur *Scope*. Cela vous permet de sélectionner les traces. Trace1 sera toujours affichée. Une trace sélectionnée sera surlignée. Toutes les traces peuvent être «connectées» à un canal, et à V, I ou P de ce canal. L'affichage sera «déclenché» par un passage par zéro positif de Trace1. L'affichage vous donnera une impression de la forme d'onde des signaux et de leur relation de phase. Deux périodes du signal seront affichées. L'amplitude des signaux est toujours la même : elle est maximale pour les signaux de tension. Pour distinguer des signaux de tension, l'amplitude des signaux de courant est de 80 %, celle des signaux de puissance de 60 %. Voir p. ex. **fig. 6** les formes d'onde d'un transformateur qui entre en saturation. L'affichage de *Scope* ne donne pas de valeurs absolues, c'est une indication de la forme et de la relation de phase.

De retour dans l'écran graphique, appuyez sur *FFT*. Ceci affiche les composantes FFT d'un signal sélectionné. En haut de l'écran, vous pouvez sélectionner le canal, l'affichage LINear ou LOGarithmique et soit V soit I. L'harmonique la plus forte, généralement mais pas nécessairement la première, est affichée à 100 % ou 0 dB. L'échelle horizontale donne le rang des harmoniques, et non leur fréquence. Lorsque vous accédez à la fonction d'enregistrement, vous devez d'abord choisir la période concernée. Les valeurs possibles sont comprises entre 0,25 h et 128 h par pas d'un facteur 2. L'étape suivante consiste à fixer le nombre de traces à enregistrer (trois au maximum). Chaque trace peut être liée à un canal et dans ce canal, vous pouvez choisir V, I ou P. En appuyant sur *Continue*, vous lancez l'enregistrement. Un écran alphanumérique s'affiche, dans lequel vous pouvez voir les valeurs moyenne, maximale et minimale ainsi que le temps écoulé. Vous pouvez également passer à l'écran graphique. En haut, vous pouvez choisir une autre trace, si elle est activée. En appuyant sur *Return*, vous revenez à l'écran principal, les données collectées sont perdues.

Vous pouvez sélectionner le facteur de crête (*V-CF* ou *I-CF*) dans l'écran de configuration. Il divise simplement la valeur de crête la plus élevée (positive ou négative) par la valeur efficace du signal (RMS). N'oubliez pas que la largeur de bande des amplificateurs de mesure est de 2,5 kHz, cette fonction n'est donc pas adaptée à l'audio. Seulement jusqu'à, disons, 250 Hz selon vos goûts.

Étaloner et régler

Depuis l'écran principal, vous pouvez accéder à l'écran d'étalement (*Calibration*). Vous pouvez choisir entre calibrage de l'écran tactile et

BOBINER LE TRANSFORMATEUR

Le transformateur TR1 est fait maison. En voici la recette.

Ingrédients (cf la nomenclature) : deux moitiés de noyau, deux clips, un support de bobine, pour EF20, fil avec isolation de 900 V et diamètre de 1,3 mm maximum.

- › Prenez le corps de bobine et coupez les broches 2, 3, 4, 7, 8 et 9.
- › Faites 9 tours de fil entre les broches 1 et 10. Ces spires doivent faire exactement une couche.
- › Répétez pour faire 9 tours de fil entre les broches 5 et 6. Là encore, ces spires doivent remplir une couche exactement.
- › Mettez les moitiés de noyau et les clips. Il n'y a pas de vide.
- › Si tout s'est bien passé, vous aurez un transformateur avec une inductance primaire et secondaire égale d'environ 125 µH. La capacité entre primaire et secondaire sera de l'ordre de 30 pF.

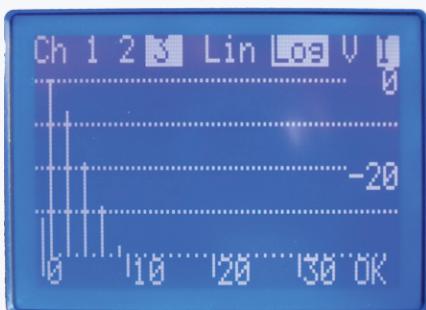


Figure 6a. Mesure d'un transformateur en saturation, FFT du courant.

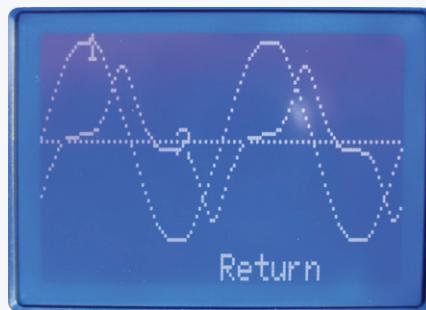


Figure 6b. Mesure d'un transformateur en saturation, tension et courant.



Figure 6c. Mesure d'un transformateur en saturation, tension et puissance.

calibrage des canaux. La première fois, c'est la procédure de calibrage de l'écran tactile qui apparaît automatiquement. Utilisez un crayon ou un stylet en bois pour calibrer (et utiliser) l'écran tactile. Dans le calibrage du canal, vous serez d'abord invité à sélectionner un canal. Ensuite, le logiciel présente un écran de mesure et d'étalonnage de la tension, du courant et de la fréquence. Sur cet écran, le calibre automatique pour V et I est désactivé, ce qui permet d'étalonner facilement chaque gamme. Avec les flèches (< et >), vous pouvez changer de calibre et ajuster la valeur mesurée.

La meilleure méthode pour étalonner la fréquence est de connecter un oscilloscope numérique à TP8 (signal) et TP2 (GND) sur la carte satellite du canal sélectionné. Ajustez la largeur d'impulsion visible à 35,00 ms à l'aide des flèches sur la ligne de fréquence. La deuxième meilleure méthode pour étalonner la fréquence est d'utiliser une source de signal avec une fréquence calibrée de 50 ou 60 Hz et de régler l'affichage sur 50,00 ou 60,00 Hz. Une erreur de $\pm 0,5\%$ est admissible. Une fois l'étalonnage d'un canal effectué, appuyez sur $>\text{OK}$. Les données de calibrage sont alors stockées sur la carte satellite de la chaîne sélectionnée.

Mon projet est terminé, il n'y aura plus d'ajouts ni de changements significatifs, mais je répondrai volontiers à toutes les questions.

Cet article est basé sur le contenu de la page du projet Elektor Labs [2] où l'on trouvera des informations plus détaillées sur cet analyseur de puissance. Son logiciel, ses fichiers de PCB et la nomenclature sont téléchargeables. Les fichiers CAO Eagle sur Elektor Labs sont à jour, mais les nouvelles versions des PCB n'ont pas été testées !

190133-B-02

Votre avis, s'il vous plaît ?

N'hésitez pas à poser vos questions ou envoyer vos commentaires sur cet article, en anglais à l'auteur w.j.dijkman@onsbrabantnet.nl ou en français à redaction@elektor.fr

Ont contribué à cet article

Auteur : **Wil Dijkman**

Rédaction :

Luc Lemmens, CJ Abate

chéma : **Patrick Wielders**

Maquette : **Giel Dols**

Traduction : **Maya Zep**



PRODUITS

- Livre : **Les microcontrôleurs PIC pour les débutants (Rémy Mallard)**
www.elektor.fr/15959

LIENS

- [1] wattmètre CA/CC : www.elektrormagazine.fr/magazine/elektor-201509/28016
- [2] Power Analyzer : www.elektrormagazine.fr/labs/power-analyzer
- [3] calcul de FFT : www.nicholson.com/dsp.fft1.html
- [4] The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, by Steven W. Smith, Ph.D. : www.dspguide.com/pdfbook.htm