

mesure du THD avec un oscilloscope et une FFT

calculer facilement le facteur de distorsion

Sebastian Westerhold (AI5GW) (Allemagne)

La distorsion harmonique totale, ou THD en abrégé, est une mesure importante du contenu harmonique des signaux dans les réseaux d'alimentation et les assemblages électroniques, tels que les amplificateurs audio. En général, des appareils de mesure spéciaux sont nécessaires pour la déterminer. Toutefois, si vous disposez d'un oscilloscope numérique doté de la fonction FFT, vous pouvez la calculer avec un peu de mathématiques.

Tout d'abord, un peu de terminologie : une onde est constituée d'une fréquence fondamentale et des harmoniques. Les harmoniques sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Le premier harmonique est le double de la fréquence de l'onde fondamentale. La 3^{ème} harmonique = 4 fois la fréquence de l'onde fondamentale.

Il existe deux représentants importants de la famille THD, la THD_R et la THD_F. La règle suivante s'applique aux deux : plus la THD est petite, plus le contenu harmonique du signal mesuré est faible. Plus le contenu harmonique est important, plus la THD est élevée. Les harmoniques étant généralement un effet de la distorsion, il s'agit essentiellement d'une mesure permettant de quantifier la distorsion non linéaire.

La THD_F désigne le rapport entre tous les harmoniques et l'onde fondamentale. Cette quantité est utilisée, par exemple, dans la mesure des harmoniques dans les réseaux d'alimentation électrique. La THD_R, quant à elle, désigne le rapport de tous les harmoniques sur le signal total. Cette quantité est particulièrement populaire dans l'ingénierie audio et est également connue sous le nom de « facteur de distorsion ».

La distinction entre les deux métriques est très importante, car la THD_F et la THD_R, bien qu' étroitement liées, produisent des résultats

différents. Dans la littérature et les fiches techniques, les deux valeurs sont souvent confondues l'une avec l'autre [1]. Dans certains endroits, vous pouvez trouver uniquement le terme « THD » sans autre définition de la méthode utilisée, par exemple, dans la fiche technique de Texas Instruments du LM386.

En pratique, la THD_F peut être calculée facilement à partir de la somme des différences de niveau de puissance de tous les harmoniques par rapport à la fondamentale. Avec cela, on peut calculer la THD_R.

$$THD_F = 100 \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} 10^{\frac{(P_n)}{10}}} = 100 \cdot \sqrt{10^{\frac{(P_2)}{10}} + 10^{\frac{(P_3)}{10}} + 10^{\frac{(P_4)}{10}} \dots}$$

Formule 1 : THD_F (en %), n = numéro de l'harmonique de tableau 1, P = différence de niveau de puissance par rapport à l'onde fondamentale en dBc.

La formule décrivant ce principe peut sembler déconcertante à première vue. En termes simplifiés, la THD_F est la racine carrée de la somme de tous les rapports de tension calculés à partir des différences de niveau de puissance relative d'un nombre infini d'harmoniques par rapport à l'onde fondamentale. Cette phrase peut sembler tout aussi déconcertante que la formule, mais elle n'est pas aussi complexe qu'elle n'y paraît.

La valeur de la THD_F calculée de cette manière peut ensuite être convertie en facteur de distorsion à l'aide de la formule suivante :

$$THD_R = \frac{THD_F}{\sqrt{1 - THD_F^2}}$$

Formule 2 : THD_R (en %), THD_F (en %).

La différence entre la THD_F et la THD_R diminue à mesure que les valeurs elles-mêmes sont plus petites. En dessous de 1 %, la différence est presque négligeable.

Dans les réseaux d'alimentation électrique, pour des raisons évidentes, la fréquence du secteur, par exemple 50 Hz, est utilisée comme fréquence fondamentale lors du calcul de la THD. Dans la technologie audio, 1 kHz est une norme courante.

$$dW = \left[\psi(x_0, y_0, z_0) \right] dV = 4 \pi dV$$

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x$$

$$F(h, k, l)$$

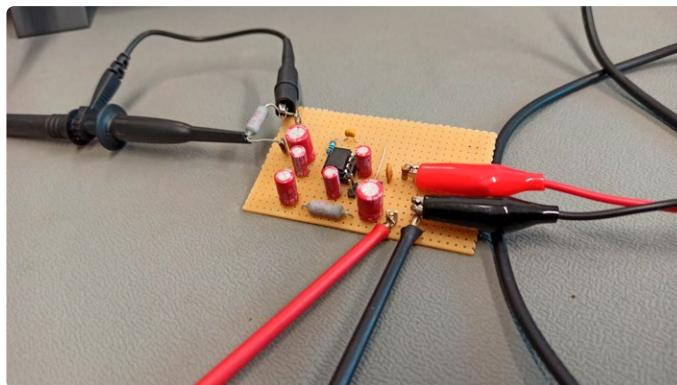


Figure 1. Amplificateur audio avec un LM386N-1 comme cobaye.

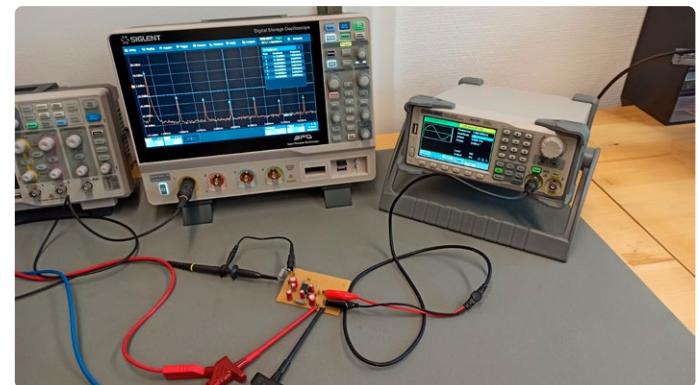


Figure 2. Configuration de mesure complète avec générateur de signaux, oscilloscope et circuit de test.

En pratique, il est bien sûr impossible de prendre en compte un nombre infini d'harmoniques. Par exemple, 50 harmoniques sont le maximum considéré dans les réseaux d'alimentation électrique. En technologie audio, il est logique de négliger ceux non audibles.

Exemple pratique

Pour montrer que la théorie mathématique n'est pas si mauvaise en pratique, considérons l'exemple suivant : un signal sinusoïdal de fréquence 1 kHz est envoyé à l'entrée d'un amplificateur (LM386N-1) (figure 1). Le signal de sortie de l'amplificateur est connecté à une résistance de 10Ω (servant de substitut approximatif à l'impédance d'un haut-parleur) et acheminé par une sonde 1:10 à un oscilloscope HD Siglent SDS2104X (figure 2).

Vu dans le domaine temporel, le signal de sortie semble assez propre et sinusoïdal (figure 3). Cependant, cette première impression est trompeuse, comme le montre un coup d'œil sur le spectre FFT : les harmoniques, ici extraites jusqu'à 7 kHz, sont clairement visibles à côté de la fondamentale à 1 kHz (figure 4).

Pour des raisons de clarté, j'ai écarté mon idée initiale d'approcher l'infini dans le nombre d'harmoniques considérés, au moins jusqu'à

la limite de la bande passante de l'oscilloscope. J'ai fini par enregistrer les niveaux de puissance des sept premiers composants, correspondant au niveau de puissance de l'onde fondamentale et des six premiers harmoniques.

La plupart des oscilloscopes offrent la possibilité d'afficher automatiquement les niveaux de puissance mesurés dans un tableau pratique. Ils sont généralement affichés dans l'unité dBm. Il s'agit de dix fois le logarithme décimal du rapport de la valeur mesurée par rapport à une quantité de référence. Dans le cas du dBm, la quantité de référence est 1 mW.

Avant de pouvoir effectuer des calculs, les niveaux de puissance absolue doivent être convertis en une différence de niveau de signal par rapport à l'onde fondamentale. L'unité dBc (dB par rapport à la porteuse) est utilisée ici. Pour la conversion, le niveau de puissance de l'onde fondamentale doit être soustrait des niveaux de puissance de tous les harmoniques. Par exemple, pour le premier harmonique : $-31,7 \text{ dBm} - 22,1 \text{ dBm} = -53,8 \text{ dBc}$.

Le tableau 1 résume les harmoniques avec leurs numéros d'ordre, les niveaux de puissance absolue en dBm (arrondis) et les différences



Figure 3. Signal de sortie du circuit de test dans le domaine temporel.



Figure 4. Spectre FFT du signal de sortie.

$$F(h, k, \ell) = A + i \cdot B \quad F(h, k, \ell, t) = \sum_{j=1}^n T_j \cdot \cos(j \omega t)$$

Tableau 1. Amplitudes absolues et relatives des six premiers harmoniques (arrondies).

Numéro d'ordre de l'harmonique	Niveau de puissance (dBm)	Niveau de puissance relative (dBc)
1. (1 kHz) = fondamentale	22,1	0
2. (2 kHz) = 1 ^{er} harmonique	-31,7	-53,8
3. (3 kHz) = 2 ^{ème} harmonique	-38,7	-60,8
4. (4 kHz) = 3 ^{ème} harmonique	-43,8	-65,9
5. (5 kHz) = 4 ^{ème} harmonique	-63,5	-85,6
6. (6 kHz) = 5 ^{ème} harmonique	-47,0	-69,1
7. (7 kHz) = 6 ^{ème} harmonique	-58,0	-80,1

de niveau de puissance calculées par rapport à la fondamentale. Les niveaux de puissance relatifs du **tableau 1** peuvent être directement insérés dans la formule 1.

$$100 \cdot \sqrt{10^{\left(\frac{-53,8}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-60,8}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-65,9}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-85,6}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-69,1}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{-80,1}{10}\right)}} \approx 0,232\%$$

La valeur THD_F de l'amplificateur (considérée jusqu'à 7 kHz) est donc d'environ 0,232 %. Avec la deuxième formule, la THD_R (le facteur de distorsion) peut alors également être calculée.

$$THD_R = \frac{0,232}{\sqrt{1-0,232^2}} \approx 0,239\%$$

Le facteur de distorsion est donc d'environ 0,239 %. La fiche technique du LM386 spécifie une THD de 0,2 %. Ceci est assez proche des valeurs calculées ici. Malheureusement, Texas Instruments ne révèle pas le type de THD indiqué dans la fiche technique, ni le nombre d'harmoniques inclus dans la mesure.

Limites et notes

La méthode présentée ici trouve ses limites dans la plage dynamique du convertisseur analogique-numérique (CA/N) de l'oscilloscope utilisé. En général, il s'agit d'un 8 bits avec une gamme dynamique théorique d'environ 48 dB. Ils peuvent être utilisés jusqu'à une THD minimum d'environ 3 %.

Les lecteurs attentifs auront peut-être remarqué que la THD calculée ci-dessus à titre d'exemple est nettement inférieure à cette limite. Cela est possible car j'ai utilisé un oscilloscope à 12 bits, qui a une gamme dynamique théorique d'environ 72 dB. Cela signifie que des valeurs de THD d'environ 0,2 % sont dans le domaine du possible.

Toutefois, pour tirer le meilleur parti de ces limites, la prudence est de mise : la plage dynamique réellement disponible dépend également de manière significative de la déviation verticale. Si le CA/N est sur-dirigé, des distorsions se produisent ; s'il est sous-dirigé, une gamme dynamique précieuse est perdue.

Si vous voulez essayer cette méthode directement, vous pouvez vous demander où obtenir des signaux de référence avec des valeurs de THD connues. Un simple générateur de signaux peut vous aider : un signal carré raisonnablement symétrique avec un rapport cyclique de 50 % a un THD_F d'environ 48,3 %. Avec un signal triangulaire également symétrique avec le même rapport cyclique, le THD_F est encore d'environ 12,1 %.

Si vous souhaitez approfondir la question et comprendre la dérivation des formules, vous trouverez de plus amples informations sous [2] et [3].

220398-04 — VF : Maxime Valens

Des questions, des commentaires ?

Envoyez un courriel à l'auteur (sebastian@baltic-lab.com) ou contactez Elektor à (redaction@elektor.fr).

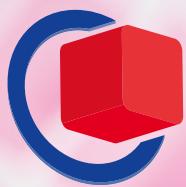


Produits

- **Siglent SDS1204X-E oscilloscope 4 voies (200 MHz) (SKU 18524)**
www.elektor.fr/18524
- **Siglent SDG1032X générateur de fonctions arbitraires double canal (30 MHz) (SKU 20276)**
www.elektor.fr/20276
- **Adafruit 2.5 W ampli mono classe D (PAM8302) (SKU 18745)**
www.elektor.fr/18745

LIENS

- [1] Doron Shmilovitz, "On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation," *Power Delivery, IEEE Transactions*, S. 526 – 528, 2005: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839744>
- [2] Sebastian Westerhold, "Total Harmonic Distortion (THD) from dBc," 2022: <https://baltic-lab.com/thd/>
- [3] Sebastian Westerhold, "Total Harmonic Distortion (THD) analysis utilizing the FFT capabilities of modern digital storage oscilloscopes," 2022: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.6969825>



embeddedworld 2023

Exhibition & Conference

... it's a smarter world



JOIN THE EMBEDDED
COMMUNITY
14–16.3.2023

Get your
free ticket now!

embedded-world.com/voucher
Use the voucher code **GG4ew23**



Media partners

Markt&Technik
DES UNABHÄNGIGEN WOCHENZEITUNG FÜR ELEKTRONIK

**DESIGN &
ELEKTRONIK**
KNOW-HOW FÜR ENTWICKLER

**computer &
automation**

Elektronik

**Elektronik
automotive**

elektroniknet.de

SmarterWorld
Solutions for a Smarter World

•medical•design

NÜRNBERG MESSE