

THD-meting met een oscilloscoop en FFT

gemakkelijke berekening van de vervormingsfactor

Sebastian Westerhold (AI5GW) (Duitsland)

Totale harmonische vervorming, kortweg THD, is een belangrijke maat voor de harmonische vervorming van signalen in voedingsnetwerken en elektronische assemblages, zoals audioversterkers. Meestal zijn speciale meetapparaten nodig om de THD te bepalen. Als je echter een digitale oscilloscoop met FFT-functie hebt, kun je met een beetje wiskunde de THD berekenen.

Eerst wat terminologie: harmonischen beschrijven zowel de grondfrequentie als de boventonen van een signaal door hun ordenummers. Boventonen beschrijven alle gehele veelvouden van de grondfrequentie, te beginnen met tweemaal de frequentie van de grondgolf. De eerste harmonische komt overeen met de grondtoon, de tweede harmonische komt overeen met de eerste boventoon.

Er zijn twee belangrijke vertegenwoordigers van de THD-familie, THD_R en THD_F . Voor beide geldt het volgende: Hoe kleiner de THD, hoe lager de harmonische inhoud van het gemeten signaal. Hoe groter de harmonische inhoud, hoe groter de THD. Omdat harmonischen typisch voorkomen als effect van vervorming, is het in feite een maat voor het kwantificeren van niet-lineaire vervorming.

In dit artikel wordt de term "boventonen" gebruikt als het gaat om veelvouden van de grondfrequentie in hun geheel. De term "harmonischen" wordt gebruikt als ofwel de totaliteit van alle frequentiecomponenten (inclusief de grondgolf) wordt bedoeld, ofwel een specifiek veelvoud van de grondfrequentie, gekenmerkt door een volgnummer. Voorbeeld: 3e harmonische = 3 maal de frequentie van de fundamentele golf.

THD_F geeft de verhouding aan tussen alle boventonen en de grondgolf. Deze grootheid wordt bijvoorbeeld gebruikt bij het meten van

harmonischen in voedingsnetten. THD_R daarentegen betekent de verhouding van alle boventooncomponenten tot het totale signaal. Deze grootheid is vooral populair in de geluidstechniek en wordt ook wel "vervormingsfactor" genoemd."

Het onderscheid tussen de twee metrieken is erg belangrijk omdat THD_F en THD_R , hoewel nauw verwant, verschillende resultaten opleveren. In literatuur en datasheets worden de twee waarden vaak met elkaar verward [1]. Op sommige plaatsen vind je alleen de term "THD" zonder verdere definitie van de gebruikte methode, bijvoorbeeld in het datablad van Texas Instruments voor de LM386.

In de praktijk kan THD_F relatief gemakkelijk worden berekend uit de som van de vermogensniveauverschillen van alle boventonen ten opzichte van de grondtoon. Hieruit kan dan weer THD_R berekend worden.

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

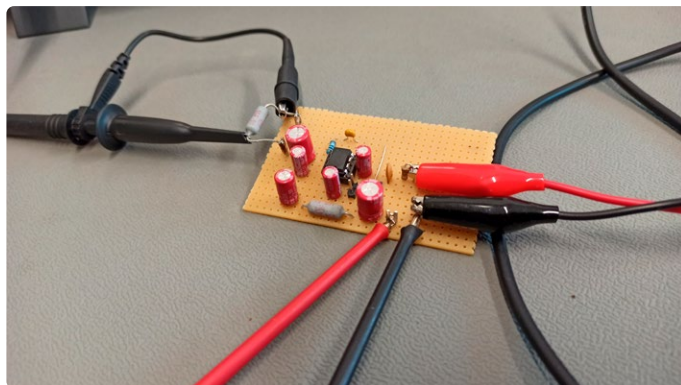
Formule 1: THD_F (in %), n = orde aantal harmonischen, P = vermogensverschil met fundamentele golf in dB

De formule die dit principe beschrijft kan op het eerste gezicht ontmoedigend lijken. In vereenvoudigde termen is THD_F de vierkantswortel van de som van alle spanningsverhoudingen berekend uit de relatieve vermogensverschillen van een oneindig aantal harmonischen ten opzichte van de grondgolf. Op het eerste gezicht lijkt deze zin misschien net zo ontmoedigend als de formule zelf. De materie is echter niet zo ingewikkeld als ze lijkt.

De aldus berekende THD_F -waarde kan dan worden omgezet in de vervormingsfactor met de volgende formule:

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

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



Figuur 1: Audioversterker met een LM386N-1 als DUT.

Het verschil tussen THD_F en THD_R neemt af naarmate de waarden zelf kleiner zijn. Onder de 1% is het verschil bijna verwaarloosbaar.

In voedingsnetwerken wordt, om voor de hand liggende redenen, de netfrequentie, bijvoorbeeld 50 Hz, gebruikt als grondfrequentie bij het berekenen van de THD. In de audiotechniek is 1 kHz een gebruikelijke standaard.

In de praktijk is het natuurlijk onmogelijk met een oneindig aantal harmonischen te rekenen. In voedingsnetwerken worden bijvoorbeeld maximaal 50 harmonischen beschouwd. In de audiotechniek ligt het voor de hand om onhoorbare harmonischen te verwaarlozen.

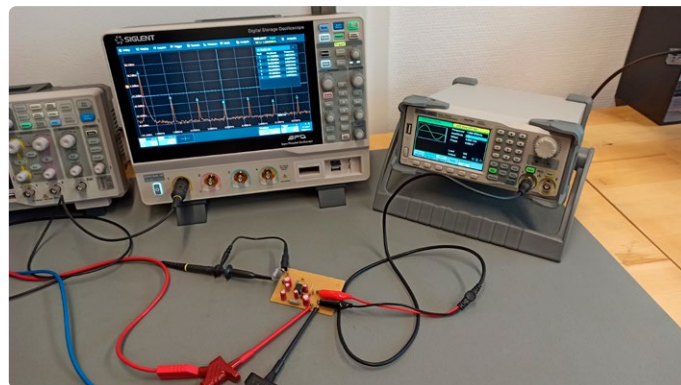
Praktijkvoorbeeld

Om te laten zien dat de saaie wiskundige theorie in de praktijk zo slecht nog niet is, bekijk je het volgende voorbeeld: een sinus signaal met een frequentie van 1 kHz wordt toegevoerd aan de ingang van een versterker (LM386N-1) (Figuur 1). Het uitgangssignaal van de versterker wordt verbonden met een weerstand van 10 Ω (die dient als ruwe vervanging voor de impedantie van een luidspreker) en via een 1:10 probe naar een Siglent SDS2104X HD oscilloscoop geleid (Figuur 2).

Bekeken in het tijddomein ziet het uitgangssignaal er aanvankelijk vrij schoon en sinusvormig uit (Figuur 3). Deze eerste indruk is echter



Figuur 3: Uitgangssignaal van de DUT in het tijddomein.



Figuur 2: Complete meetopstelling met signaalgenerator, oscilloscoop en DUT.

misleidend, zoals een blik op het FFT-spectrum duidelijk laat zien: de harmonische componenten - hier uitgesneden tot 7 kHz - zijn duidelijk zichtbaar naast de grondtoon op 1 kHz (Figuur 4).

Voor de duidelijkheid heb ik mijn aanvankelijke idee om het aantal beschouwde harmonischen tot in het oneindige te benaderen, althans tot aan de bandbreedtelimiet van de oscilloscoop, van tafel geveegd. Uiteindelijk registreerde ik de vermogensniveaus van de eerste zeven harmonischen, overeenkomend met het vermogensniveau van de grondgolf en de eerste zes boventonen.

De meeste oscilloscopen bieden de mogelijkheid om automatisch de gemeten vermogensniveaus weer te geven in een handige tabel. Vermogensniveaus worden meestal weergegeven in de eenheid dBm. Dit is tienmaal delogaritme bij grondtal 10 van de verhouding van de gemeten waarde ten opzichte van een referentiegrootheid. In het geval van dBm is de referentiegrootheid 1 mW.

Voordat berekeningen kunnen worden gemaakt, moeten de absolute vermogensniveaus worden omgezet in een signaalniveauverschil ten opzichte van de basisgolf. Hier wordt de eenheid dBc (dB ten opzichte van de draaggolf) gebruikt. Voor de omrekening moet het vermogensniveau van de fundamentele golf worden afgetrokken van de vermogensniveaus van alle harmonischen. Bijvoorbeeld, voor de 2e harmonische (= 1e boventoon): $-31,7 \text{ dBm} - 22,1 \text{ dBm} = -53,8 \text{ dBc}$.



Figuur 4: FFT-spectrum van het uitgangssignaal.

Tabel 1: Absolute en relatieve amplitudes van de eerste zeven harmonischen (afgerond).

Ordnummer van de harmonische	Vermogen (dBm)	Relatief vermogen (dBc)
1. (1 kHz) = grondtoon	22,1	0
2. (2 kHz) = 1e boventoon	-31,7	-53,8
3. (3 kHz) = 2e boventoon	-38,7	-60,8
4. (4 kHz) = 3e boventoon	-43,8	-65,9
5. (5 kHz) = 4e boventoon	-63,5	-85,6
6. (6 kHz) = 5e boventoon	-47,0	-69,1
7. (7 kHz) = 6e boventoon	-58,0	-80,1

Tabel 1 geeft een overzicht van de harmonischen met hun volgnummers, de absolute vermogensniveaus in dBm (afgerond) en de berekende vermogensniveauverschillen ten opzichte van de 1e harmonische. De relatieve vermogensniveaus uit Tabel 1 kunnen direct worden ingevoegd in Formule 1.

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

De THD_F-waarde van de versterker (beschouwd tot 7 kHz) is dus ongeveer 0,232%. Met de tweede formule kan dan ook THD_R (de vervormingsfactor) worden berekend.

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

De vervormingsfactor is dus ongeveer 0,239%. De datasheet van de LM386 specificeert een THD van 0,2%. Dit komt aardig in de buurt van de hier berekende waarden. Helaas onthult Texas Instruments niet welk type THD in de datasheet staat, noch hoeveel harmonischen in de meting zijn meegenomen.

Beperkingen en opmerkingen

De hier gepresenteerde methode vindt zijn grenzen in het dynamische bereik van de analoog-digitaal omzetter (ADC) van de gebruikte oscilloscoop. Gewoonlijk zijn dit 8-bits ADC's met een theoretisch dynamisch bereik van ongeveer 48 dB. Deze kunnen gebruikt worden tot een minimale THD van ongeveer 3%.

Oplettende lezers hebben misschien opgemerkt dat de THD die hierboven als voorbeeld is berekend duidelijk onder deze grens ligt. Dit is mogelijk omdat ik een 12bit-oscilloscoop heb gebruikt. Met 12bit-oscilloscopen is het theoretische dynamische bereik ongeveer 72 dB. Dit betekent dat THD-waarden van ongeveer 0,2% binnen de mogelijkheden liggen.

Voor een optimaal gebruik van deze grenzen is echter voorzichtigheid geboden: het werkelijk beschikbare dynamische bereik hangt ook sterk af van de verticale afbuiging! Als de ADC wordt overstuurd, treedt vervorming op; als hij niet genoeg wordt aangestuurd, gaat waardevol dynamisch bereik verloren.

Als je deze methode rechtstreeks wilt uitproberen, vraag je je misschien af waar je referentiesignalen met bekende THD-waarden kunt verkrijgen. Een eenvoudige signaalgenerator kan hierbij helpen: Een redelijk symmetrisch blokvolgsignaal met een duty cycle van 50% heeft een THD_F van ongeveer 48,3%. Met een even symmetrisch driehoekssignaal met dezelfde duty cycle is de THD_F nog steeds ongeveer 12,1%.

Als je wat dieper in de materie wilt duiken en ook de afleiding van de formules wilt begrijpen, kun je meer informatie vinden onder [2] en [3].

220398-03

Vragen of opmerkingen?

Heb je technische vragen of opmerkingen over dit artikel? E-mail de auteur op sebastian@baltic-lab.com of neem contact op met Elektor via redactie@elektor.com.

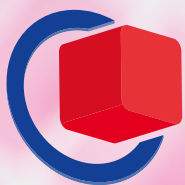


Gerelateerde producten

- > **Siglent SDS1204X-E 4-ch Oscilloscope (200 MHz)**
(SKU 18524)
www.elektor.nl/18524
- > **Siglent SDG1032X 2-ch Signal Generator (30 MHz)**
(SKU 20276)
www.elektor.nl/20276
- > **Adafruit 2.5 W Class D Mono Amplifier (PAM8302)**
(SKU 18745)
www.elektor.nl/18745

WEBLINKS

- [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>



embeddedworld2023

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
DER UNABHÄNGIGE WERKZEITUNG FÜR ELEKTRONIK

Elektronik

SmarterWorld
Solutions for a Smarter World

DESIGN &
ELEKTRONIK
KNOW-HOW FÜR ENTWICKLER

Elektronik
automotive

•medical-design

computer &
automation

elektroniknet.de

NÜRNBERG MESSE