

Frekvensanalys och auditiv perception av distorsion i operationsförstärkare

Dennis Kristiansson (denkri@student.chalmers.se) och
Nils Patriksson (panils@student.chalmers.se)

12 november 2021

Sammanfattning

Rapporten behandlar vissa icke-idealas egenskaper hos en operationsförstärkare. Detta testas genom uppmätning av harmonisk distorsjon och analys ur ett frekvensperspektiv. Inverkan från clipping och slew-rate har testats ihop och var för sig. Hur distorsion förhåller sig till auditiv perception av signaler har också testats. Det visade sig att operationsförstärkaren har ett begränsat område inom vilket den kan användas utan att för mycket distorsjon uppstår. Något som observerades var också att soft-clipping har en relativt hög harmonisk distorsjon men inte uppfattas som lika distorderad jämfört med hard-clipping.

Innehåll

1	Introduktion	1
2	Teori	1
2.1	Grunduppgift	1
2.2	Extrauppgift	2
3	Metod	3
3.1	Försöksuppställning	3
3.1.1	Grunduppgift	3
3.1.2	Extrauppgift	3
3.2	Utförande	4
3.2.1	Grunduppgift	4
3.2.2	Extrauppgift	5
4	Resultat	6
4.1	Grunduppgift	6
4.2	Extrauppgift	6
4.2.1	Tester av hard-clipping	6
4.2.2	Tester av soft-clipping	9
5	Diskussion	12
5.1	Grunduppgift	12
5.2	Extrauppgift	12
6	Referenser	13
A	Inledande uppgift	14
B	Labblogg 2019-02-07	15
C	Bilder exporterade från oscilloskop	32

1 Introduktion

Operationsförstärkare är en av de viktigaste komponenterna i modern elnästeknik. De används i många tillämpningar för att förstärka signaler. För att förstå signalförstärkning behövs vetskaps om operationsförstärkares icke-ideala egenskaper. Dessa egenskaper ger upphov till så kallad distorsion, som är förvrängning av signalen. Ett användningsområde är ljudförstärkning där det är viktigt att signalen ej skadas. Syftet med rapporten är att undersöka vad som ger upphov till distorsion i en operationsförstärkare och hur det är möjligt att påverka den. Speciellt är också en frågeställning hur distorsion upplevs av en mänsklig lyssnare.

2 Teori

2.1 Grunduppgift

Allmänt är distorsion när en viss frekvens i en insignal ger upphov till andra frekvenser i en utsignal. De nya frekvenserna hos utsignalen är oönskade, då utsignalens form nu skiljer sig från insignalen. Dessa frekvenser kommer i frekvensdomänet vara multipler av infrekvensen. Om förändringen av signalen ser likadan ut för positiva som negativa inspänningar uppstår en symmetrisk utsignal. Detta ger upphov till frekvenser med endast udda multipler av infrekvensen [1].

Total Harmonisk Distorsion (THD) är ett mått på den relativa förvrängningen av signalen. För att definiera THD tas en insignal bestående av en frekvens f_1 som ger upphov till en utsignal med flera frekvenser f_n (n positivt heltal), där $f_n = n f_1$. H_n är amplituden i frekvensdomänen hos den del av utsignalen med frekvens f_n , då gäller att

$$THD = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}}{\sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

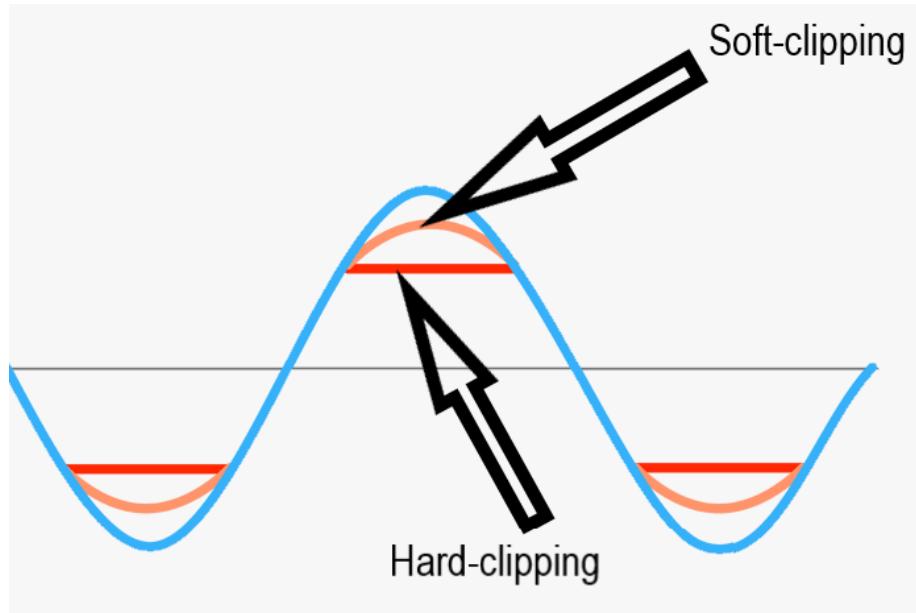
Distorsion i en OP-förstärkare kan uppstå på grund av clipping. Det kan uppstå då den teoretiska utspänningen $U_{ut} = F \cdot U_{in}$ (spänningen vid OP-förstärkarens utgång, F är förstärkningen se figur (2) överskrider matningsspänningen. OP-förstärkaren kan inte förstärka utspänningen till belopp större än matningsspänningen. Detta medför att om insignalen är till belopp för stor kommer en del av utsignalen klippas av. utsignalens form kan då förändras. Exempelvis förändras formen på toppen av en sinussignal. Clipping kommer därför medföra olika sorters förändringar i signalens frekvensinnehåll. För kopplingen i figur (2) förväntas detta inträffa då $|U_{in}| > 4.6V$. Vid demonstration av clipping väljs en liten frekvens, för att undvika påverkan av slew-rate.

En annan källa till distorsion är slew-rate som är OP-förstärkarens förmåga att ändra utspänningen i tiden, hastighetsbegränsningen kallas t_{sr} . När t_{sr} understiger den ideala utsignalens tidsderivata hinner inte OP-förstärkaren med

att förstärka utsignalen. Detta leder till en förvrängning av utsignalen. För påvisning av distorsion från slew-rate i kopplingen som visas i figur (2) används exempelvis en insignal $U_{in} = V_0 \sin(2\pi ft)$ vilket ger $\frac{dU_{ut}}{dt}|_{max} = 2\pi fV_0|F|$ där $F = -3, 3$. LM741:s slew-rate är $t_{sr} \approx 0,5V/\mu s$ [2]. Med inspänningen $V_0 = 3,15V$ fås utspänningen $V_1 = V_0|F| \approx 10V$. Distorsion från slew-rate bör då uppstå för $f > 8kHz$ [3]. För höga frekvenser kan V_1 bli mindre, $f > 100kHz$. Detta fenomen inträffar när insignalen byter tecken så frekvent att utsignalen aldrig hinner nå sin fulla förstärkning.

2.2 Extrauppgift

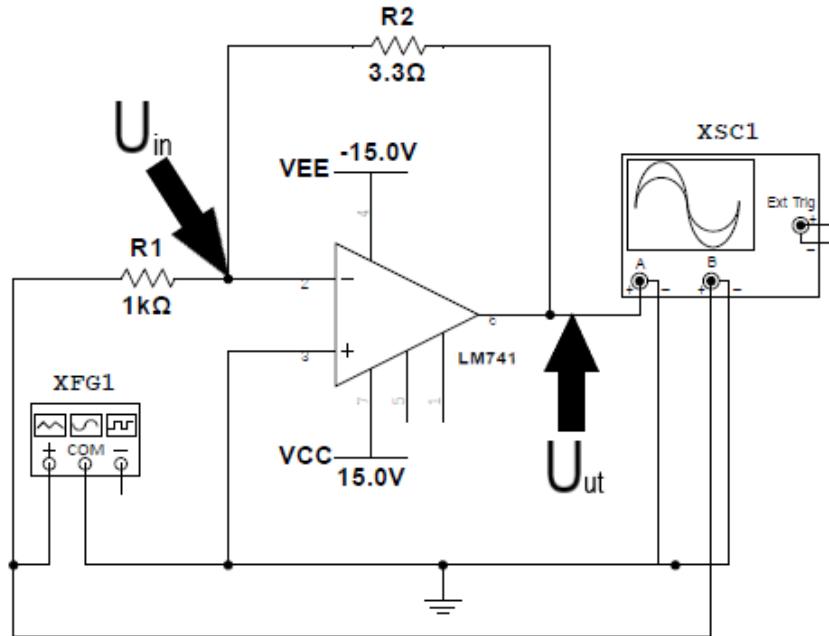
Två varianter av clipping är soft- och hard-clipping. Hard-clipping är när signalen, till exempel en ren sinusvåg, blir klippt på toppen. För en sinusvåg visas detta i figur 1. Detta påverkar frekvensdomänet genom att toner med udda mul-



Figur 1: Visar en sinusvåg som klipps på två olika sätt, dels med hard-clipping och med soft-clipping. Detta förändrar alltså vågen på olika sätt.

tipler av grundtonen uppstår om clippingen är symmetrisk [1], alltså begränsas både för positiva och negativa spänningar. Om clippingen är osymmetrisk kommer däremot endast jämna multipler av grundtonen uppstå [1].

Soft-clipping är däremot då en sinussignal klipps fast toppens form blir rundad, som i figur (1). Detta gör att större del av magnituden hos övertonerna koncentreras närmare den ursprungliga grundtonen än vid hard-clipping. [1]



Figur 2: Negativt återkopplad LM741, rent resistivt. Förstärkningen $F = -3,3$ gånger. Oscilloskopet kopplas till funktionsgeneratorn och OP-förstärkarens utgång.

3 Metod

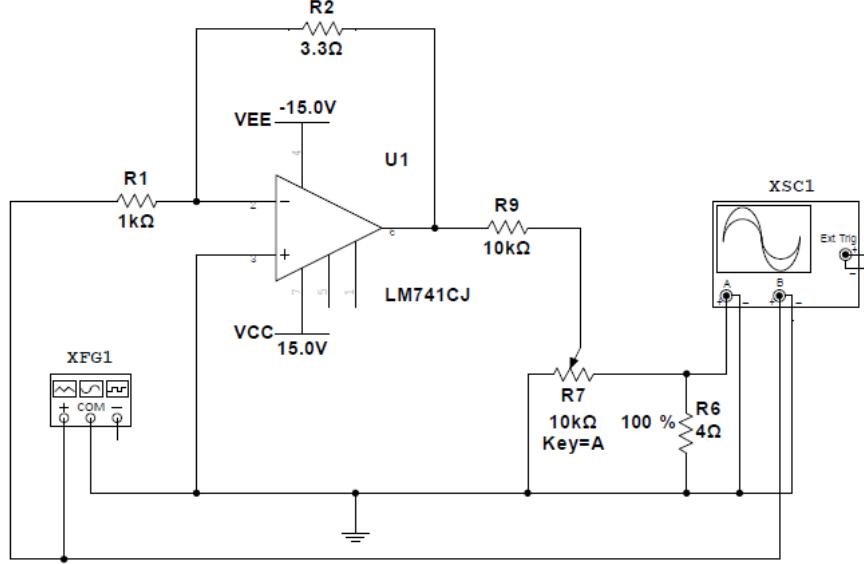
3.1 Försöksuppställning

3.1.1 Grunduppgift

Slew-rate och clipping testades genom att en operationsförstärkare av typ LM741 återkopplades negativt, rent resistivt enligt figur (2). Två resistanser $R_2 = 3,3\text{k}\Omega$ och $R_1 = 1\text{k}\Omega$ kopplades ihop med OP-förstärkaren. Förstärkningen blev då $F = -3,3$ gånger. Funktionsgeneratoren genererade en sinusformad våg, $U_{in} = V_0 \sin(2\pi ft)$. Oscilloskopet Tektronix TDS5032B användes för mätning av spänningen U_{ut} . OP-förstärkaren matades med spänningen $\pm 15V$.

3.1.2 Extrauppgift

För att undersöka hard-clipping användes kretsen i figur (3). Uppställningen liknade den i grunduppgiften fast med potentiometer (R7) och hörlurar (R6) inkopplade. Oscilloskopet Tektronix TDS5032B (XSC1) användes för att mäta spänningen över hörlurarna. OP-förstärkaren matades med spänningen $\pm 15V$.



Figur 3: Koppling för demonstration av hard-clipping. Potentiometern (R7) ställs in för att erhålla önskad volym i hörlurarna (R6).

Uppställningen för soft-clipping visas i figur (4). Ett förstärkarsteg med förstärkning $F \approx -3$ kopplades till diodkopplingen i figuren. Diodkopplingen leder för potentialer till beloppet större än ungefär 5V i Nod A. Dioderna är två kiseldioder.

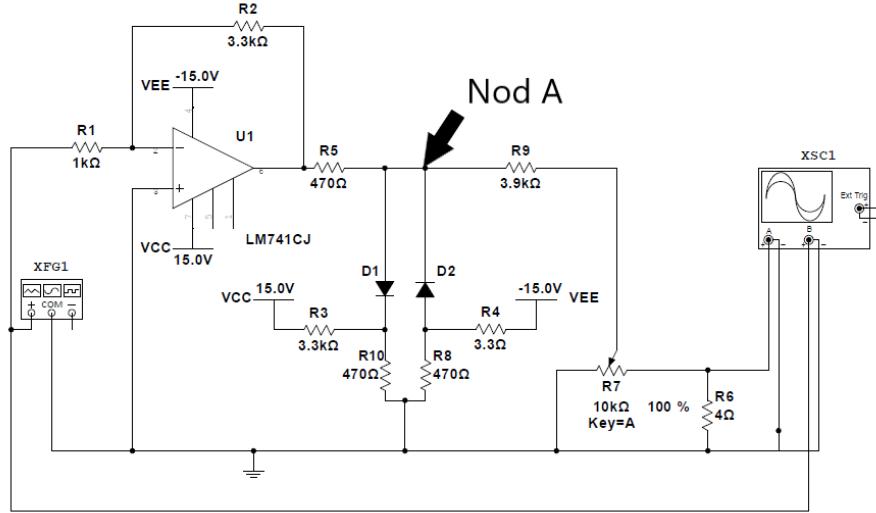
3.2 Utförande

3.2.1 Grunduppgift

För att demonstrera clipping testades olika amplituder hos $U_{in} = V_0 \sin(2\pi ft)$. Frekvensen sattes till $2kHz$ så att distorsion från slew-rate undveks. Mätning av frekvensinnehållet hos U_{ut} för $V_0 = 1,6V$ utfördes med oscilloskopet och antecknades för att kunna bekräfta clipping. V_0 ökades sedan successivt medans samma mätningar utfördes. Vid $V_0 = 7V$ togs sista mätningen.

Vid demonstration av distorsion från slew-rate användes $V_0 = 3,15V$. Frekvensen sattes till $2kHz$ och ökades sedan successivt. Amplituderna hos frekvensinnehållet vid U_{ut} uppmätttes och skrevs ner för att kunna beräkna THD och bekräfta distorsion. Högsta frekvensen som mättes var $f = 1MHz$.

Under mätning av hur THD beror av frekvens och utamplitud V_1 varierades både V_0 och f . Utamplituden V_1 och frekvensinnehållets amplituder uppmätttes och antecknades. Mätningar utfördes för $V_0 = (3, 4, 5, 7)V$ samt $f = (25, 150, 200, 275)kHz$. Sedan beräknades THD av uppmätt distorsion med



Figur 4: Koppling för demonstration av soft-clipping. Potentiometern (R7) ställs in för att erhålla önskad hörlursvolym. XFG1 betecknar funktionsgenerator och XSC1 ett Tetroxix TDS5032 oscilloskop.

hjälp av matlab och värdena 3D-plottades mot frekvens och utamplitud.

3.2.2 Extrauppgift

För att testa hard-clipping kontra soft-clipping i ljud användes oscilloskop, hörlurar. För detta användes de två kretsarna i figur (3) (hard-clipping) och figur (4) (soft-clipping).

Först undersöktes hard-clipping genom att det genererades en sinussignal med frekvensen 440Hz . Med hörlurarna på ökades insignalens spänning tills distorsion hördes och störde nämnvärt. THD beräknades, frekvensinnehållets utseende och upplevelsen av ljudet antecknades.

Fortsättningsvis testades den auditiva upplevelsen av en triangel- och fyrkantsvåg med och utan hard-clipping. Frekvensen valdes till 440Hz , frekvensinnehållets utseende exporterades till bilder och upplevelsen antecknades också.

Sedan testades soft-clipping för en sinussignal med frekvensen 440Hz . Spänningen ökades tills distorsion precis hördes. Spänningen ökades sedan tills distorsionen upplevdes som ej tolererbar. För båda fallen antecknades frekvensinnehållets utseende och THD beräknades.

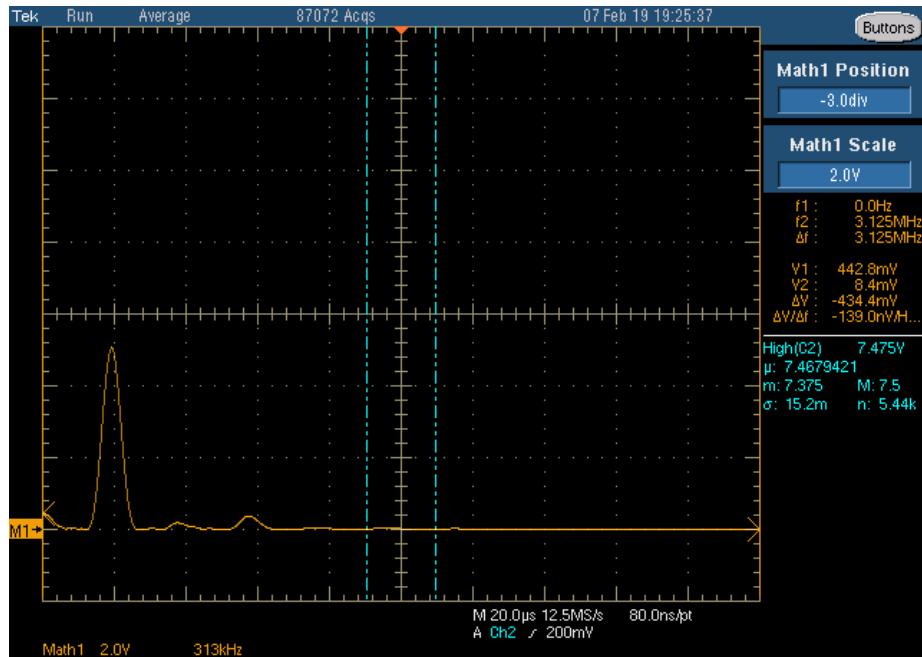
Vidare undersöktes hur den auditiva upplevelsen av en triangel- och fyrkantsvåg påverkades av soft-clipping. Samma frekvens som innan användes, upplevelsen och utseendet antecknades.

4 Resultat

4.1 Grunduppgift

Distorsion från clipping kan observeras då $V_0 = 5V$ som ger THD= 7,0%. För $V_0 = 7V$ ges THD= 18.0%. Samtliga oönskade utfrekvenser är av udda multipler av infrekvensen.

Distorsion orsakad av slew-rate kan observeras för $f = 200kHz$, som ger THD= 2,9%. Med $f = 400kHz$ fås THD= 9,2%. De oönskade utfrekvenserna består av jämnna och udda multipler av infrekvensen, se figur (5).



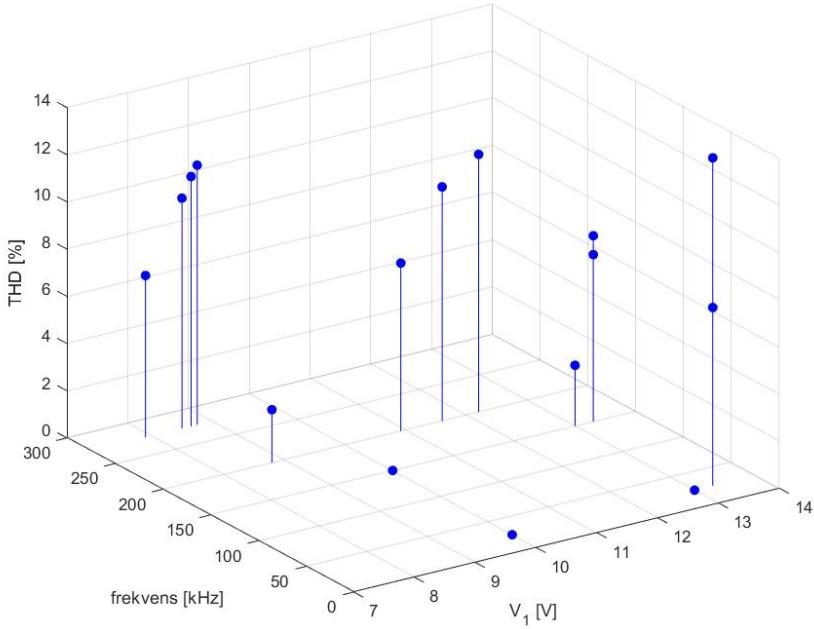
Figur 5: Frekvensspektrat för $V_0 = 3,15$ och $f = 300kHz$ vid demonstration av slew-rate, linjärskala med 2V/ruta. Här kan två sidlober ses, en med jämn multipel av infrekvensen och en udda.

THD av olika frekvenser f och utspänningar V_1 visas i figur 6. För de högre frekvenserna begränsas V_1 . THD kan ses bero av både f och V_1 .

4.2 Extrauppgift

4.2.1 Tester av hard-clipping

Då hard-clipping uppstår upplevs ljudet annorlunda jämfört med en ren sinus. Den auditiva upplevelsen är att tonen låter mer jäll, högre och lite raspig. Då distorsionen först upplevs är då inspänningen $V_0 = 3,7V$ och i figur (7) finns det



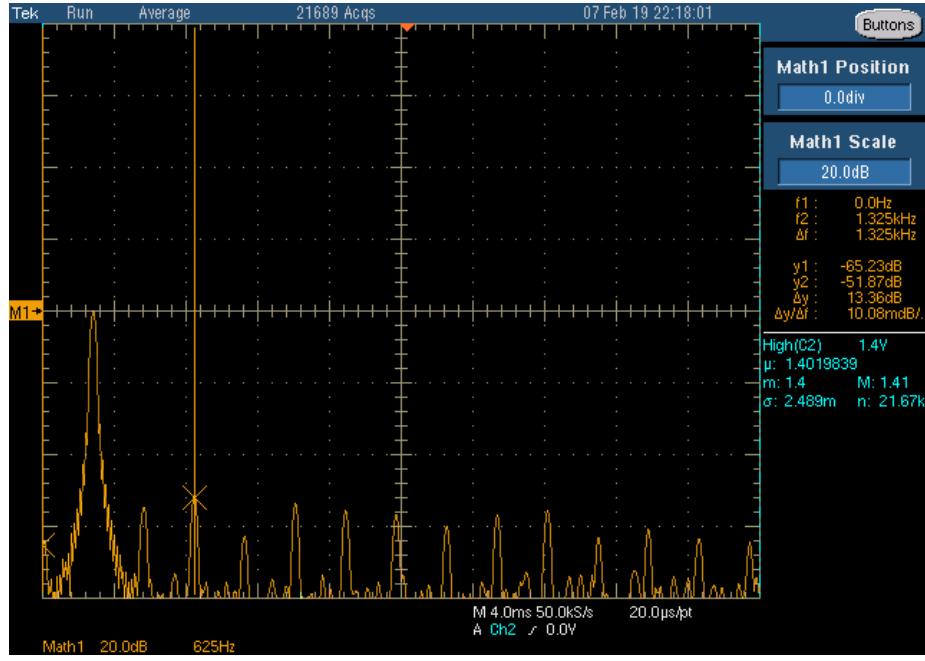
Figur 6: 3D-plot av THD som funktion av utamplitud V_1 och frekvens f . Diskreta punkter ritas från mätdata. Mätningar har utförts i intervallen $10V < V_1 < 13.3V$ samt $25kHz < f < 275kHz$. Det kan ses att THD är beroende av både f och V_1 .

observerade frekvensspektrat. I tabell (1) finns uppmätta THD för hard-clipping som stör.

THD för hard-clipping precis hörbar och som stör	0,52 %
THD för soft-clipping precis hörbar	1,46 %
THD för soft-clipping som stör	8,81 %

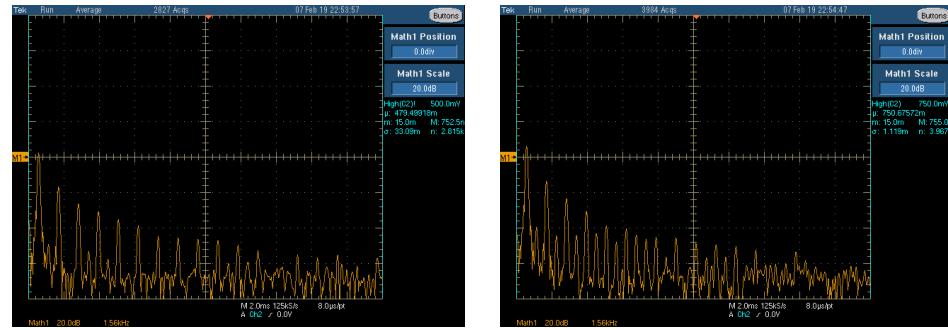
Tabell 1: De uppmätta THD-värdena för då hard-clipping hörs och stör, då soft-clipping är precis hörbart och då soft-clipping stör.

Upplevelsen av hard-clipping hos en fyrkants- och en triangelvåg med frekvens $440Hz$ är mycket olik den för en sinus. Upplevelsen av fyrkantsvågen förändras inte vid hard-clipping. Ljudet liknar dock distorsionsljudet i sinusvågsfallet. Endast amplituden ändras i frekvensspektrat. För triangelvågen upplevs clipping inte lika mycket jämfört med en sinusvåg. Distorsionen upplevs renare än den vanliga triangelvågen. I figur (8a) visas frekvensspektrat för ren triang-



Figur 7: Frekvensspektrat enligt oscilloskopets FFT-funktion för då hard-clipping upplevs som störande, observera dB-skalan med 20dB/ruta.

elvåg. Figur (8b) visar en distorderad triangelvåg.

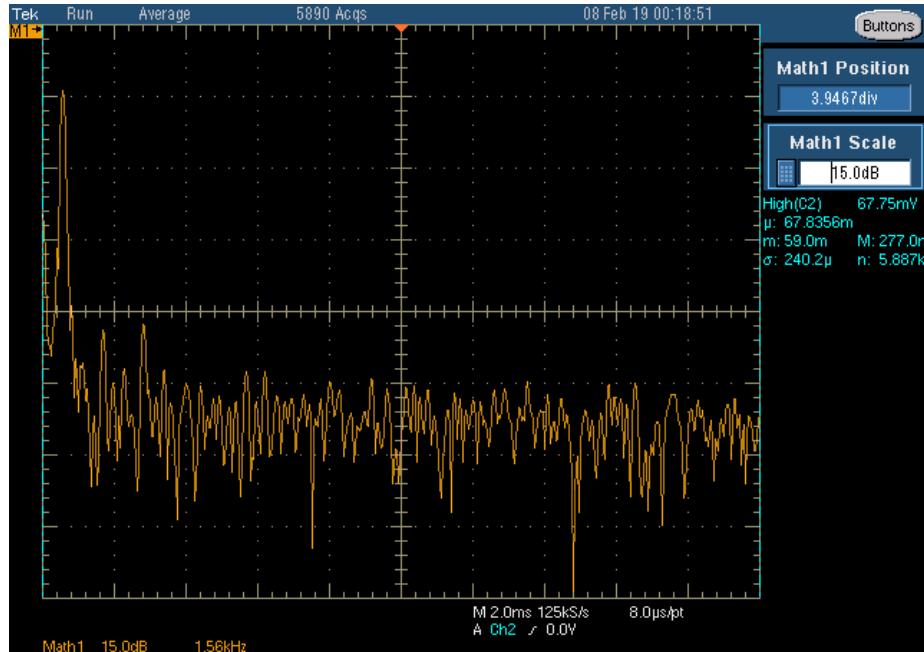


(a) Frekvensspektrat för en ren triangelvåg enligt oscilloskopets FFT-funktion, dB-skala med 20dB/ruta.

(b) Frekvensspektrat för en triangelvåg med hörbar hard-clipping enligt oscilloskopets FFT-funktion. dB-skala med 20dB/ruta.

4.2.2 Tester av soft-clipping

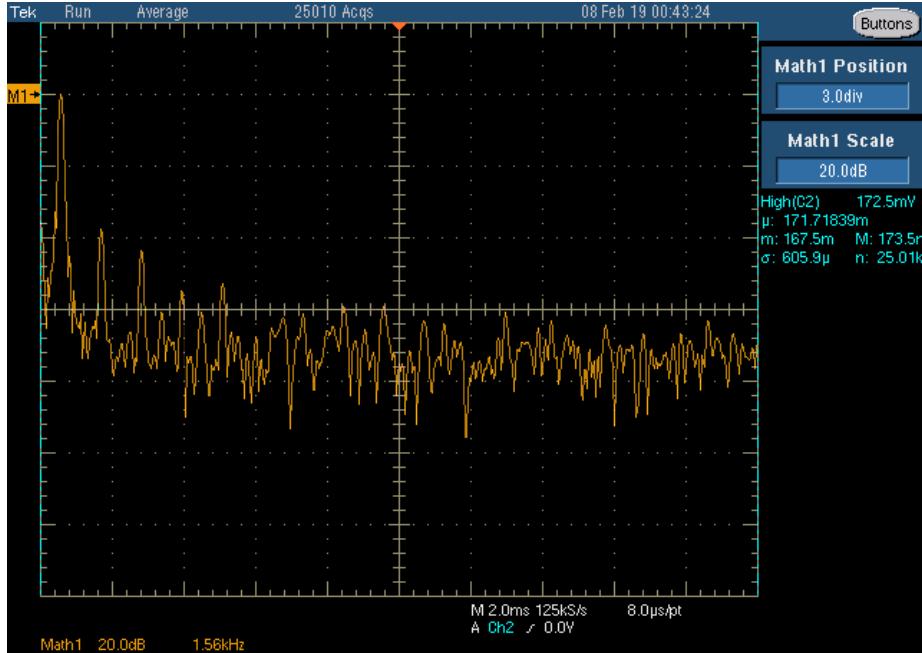
Soft-clipping för en sinusvåg av frekvens 440Hz hörs precis när inspänningen är $V_0 = 0,9\text{V}$. Det låter som att ljudet ekar och blir högre men den låter inte lika förvrängd som den utsatt för hard-clipping. I figur (9) och (10) visas en ren respektive distorderad sinussignal. I figur (12) visas frekvensspektrat då distorsionen uppfattas som störande. I tabell (1) visas THD för de två fallen.



Figur 9: Frekvensspektrat för en sinusvåg enligt oscilloskopets FFT-funktion. dB-skala med 15 dB/ruta.

När en fyrkantsvåg utsätts för soft-clipping så upplevs inte ljudet på något annorlunda sätt. I figur (13a) och (13b) visas fyrkantsvågågs frekvensspektra utan respektive med soft-clipping.

Då en triangolvåg utsätts för soft-clipping så låter det nämligen annorlunda. Vid inspänning $V_0 = 1,7\text{V}$ så upplevs ljudet som högre och mindre ekande. I figur (11a) och (11b) visas frekvensspektrat då soft-clipping inte hörs respektive hörs.

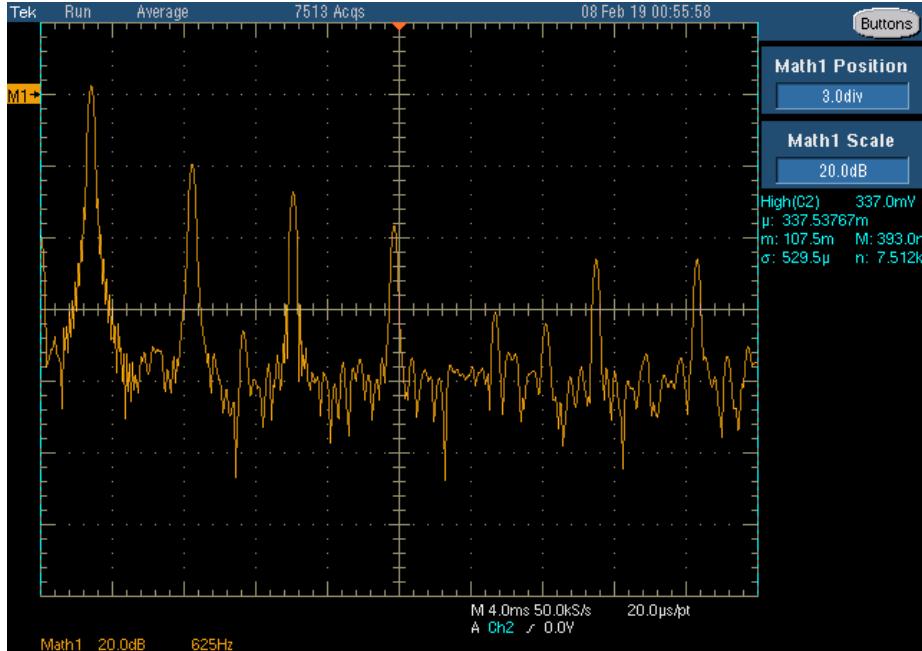


Figur 10: Frekvensspektrat för en sinusvåg med soft-clipping precis hörbar, observera dB-skalan med 20dB/ruta.

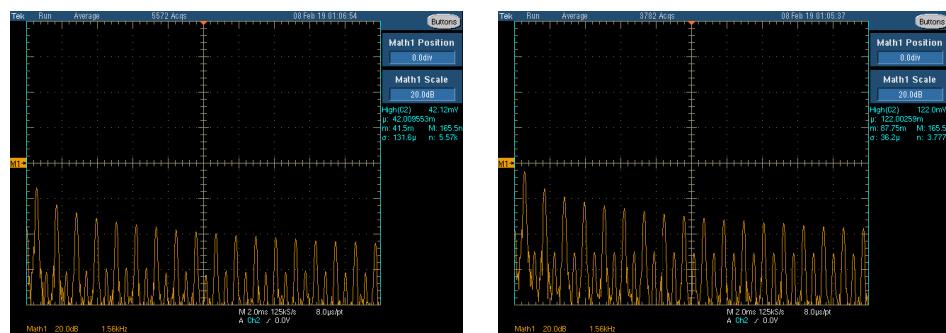


(a) Frekvensspektrat för en vanlig trianglevåg enligt oscilloskopets FFT-funktion, observera dB-skalan med 20dB/ruta.

(b) Frekvensspektrat för en soft-clipped trianglevåg enligt oscilloskopets FFT-funktion, observera dB-skalan med 20dB/ruta.



Figur 12: Frekvensspektrat för en sinusvåg med soft-clipping uppskattningsvis lika störande som för hard-clipping, observera dB-skalan med 20dB/ruta.



(a) Frekvensspektrat för en vanlig fyrkantsvåg enligt oscilloskopets FFT-funktion, observera dB-skalan med 20dB/ruta.

(b) Frekvensspektrat för en soft-clipped fyrkantsvåg enligt oscilloskopets FFT-funktion, observera dB-skalan med 20dB/ruta.

5 Diskussion

5.1 Grunduppgift

Clipping sker tidigare än förväntat. Maxvärdena för utamplituden i grunduppgiften är $V_1 = 13,3V$ inte $15V$ som matningsspänningen. Att symmetrisk clipping endast ger upphov till udda multipler av infrekvensen stämmer överens med teorin.

Inverkan av slew-rate uppmäts senare än väntat som kan bero på att noggrannheten i mätningarna var begränsad. Att det uppstår både udda och jämma övertoner kan visa på en osymmetri i distorsionen, men exakt varför är oklart. Inverkan av slew-rate förvrängde sinussignalen så att den liknade mer och mer en triangelvåg.

I figur (6) visas THD:s beroende av frekvens och utspänning. För höga frekvenser begränsas utspänningen vilket stämmer överens med teorin. För $f = 275kHz$ blev $V_1 \approx 8,7V$ för stora inspänningar. Hur THD beror av frekvens och utspänning V_1 motsvarade förväntningarna. Det är tydligt att OP-förstärkarens arbetsområde är begränsat med avseende på distorsion.

5.2 Extrauppgift

Med hjälp av de erhållna resultaten så kan det bestämmas ungefär hur mycket distorsion som kan tillåtas utan att det hörs. I tabell (1) visas THD för hard- respektive soft-clipping. En viss THD stör mer hos hard-clipping än soft-clipping. Detta tyder på att THD inte är något fullgott mått på hur signalen uppfattas av mänskliga lyssnare. I figur (10) för soft-clipping syns att övertonernas amplitud är höga men avtar snabbt med högre frekvenser. Övertonernas amplitud är mer utspridd i hard-clippingfallet, se figur (7). Detta stämmer bra med teorin och förklarar varför soft-clipping låter bättre med samma THD.

Däremot finns både udda och jämma övertoner med i hard-clipping-fallet i figur (7). Detta tyder på en asymmetri i den kretsen på grund av att symmetriska signaler endast ger upphov till udda övertoner.

Att jämföra soft- och hard-clipping har också gjorts för en fyrkants- och triangelvåg. Att ingen skillnad hördes för en fyrkantsvåg är väntat eftersom formen och frekvensinnehållet ej ändras nämnvärt vid någon clippning. Fyrkantsvågen innehåller redan övertoner med höga amplituder där distorsionen annars synts. Det låter därför oren även utan clipping.

För triangelvågen så syns hard-clippingen i figur (8b) där udda övertoners amplitud ökar och vissa jämma övertoner uppstår men det är svårt att dra några slutsatser från detta. Soft-clippingen visas i figur (11b) och där syns att frekvensinnehållet koncentreras närmare grundfrekvensen. Det kan vara orsaken till att detta låter renare än den vanliga triangelvågen i figur (11a).

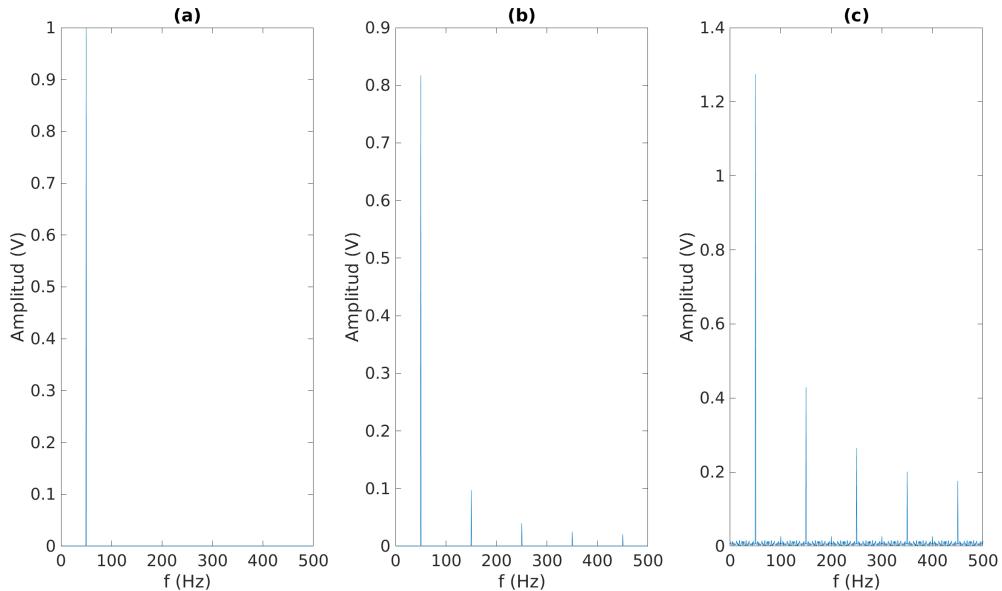
Referenser

- [1] Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för fysik, Experimentell fysik 1, *Application notes I: OPERATIONAL AMPLIFIER AUDIO DISTORTIONS MUSIC & PSYCHOACOUSTICS*, 2014,[citerad 2019, 3 Feb]
<https://pingpong.chalmers.se/courseId/10412/node.do?id=5111566&ts=1546380806571&u=1529224769>
- [2] Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för fysik, Experimentell fysik 1, *Application notes: DATABLAD*, 2014,[citerad 2019, 3 Feb]
<https://pingpong.chalmers.se/courseId/10412/node.do?id=5111572&ts=1546380806578&u=1529224769>
- [3] Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för fysik, Experimentell fysik 1, *Uppgift1-2019*, 2019, 23 Jan,[citerad 2019, 3 Feb]
<https://pingpong.chalmers.se/courseId/10412/node.do?id=5154158&ts=1548244717672&u=1529224769>
- [4] Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för fysik, Experimentell fysik 1, *Made to Measure*, [citerad 2019, 3 Feb]
<https://pingpong.chalmers.se/courseId/10412/node.do?id=5111573&ts=1546380806579&u=1529224769>
- [5] Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för fysik, Experimentell fysik 1, *Application notes basics: FOURIER THEORY & PRACTICE FFTWINDOWS*, 2014,[citerad 2019, 3 Feb]
<https://pingpong.chalmers.se/courseId/10412/node.do?id=5111565&ts=1546380806569&u=1529224769>
- [6] Tektronix, Inc.
TDS5000B Series Online Help PHP0237 (User's Manual), 2004, Jan, [citerad 2019, 3 Feb]
<https://pingpong.chalmers.se/courseId/10412/node.do?id=5111421&ts=1546380806347&u=-1970986652>

A Inledande uppgift

Fast fourier transform (FFT) är diskreta och beräknas numeriskt, till skillnad från den analytiska fouriertransformen [4]. För att demonstrera några fouriertransformer används funktionen FFT på oscilloskopet för sinus-, triangel- och fyrkantsvågor, se labbloggens blad 1-3.

DFT i MATLAB av en sinussignal, triangelvåg och fyrkantsvåg visas i figur 14. Triangelvågen består av udda övertoner med avtagande amplitud som $1/n^2$ och fyrkantsvågen detsamma fast som $1/n$.



Figur 14: I graferna visas signalernas fouriertransformer. Signalerna har frekvenserna $f = 50\text{Hz}$ och amplituden 1V . (a) är en sinussignal, (b) är en triangelvåg, och (c) är en fyrkantsvåg.

Vikning (aliasing) är då signalfrekvenser högre än Nyqvist-frekvensen $f_N = f_{eff}/2$ visas som lägre i frekvensplanet. En åtgärd är att lägga på ett lågpassfilter eller att höja den effektiva samplingshastigheten genom ”random-repetitive sampling technique” som väntar med nästkommande sampling en vågperiod. För att identifiera aliasing kan samplingshastigheten ändras och lober i FFT-plotten observeras eftersom den observerade frekvensen hos en vikt frekvens beror av samplingshastigheten [4]. Aliasing testades också under laborationstillfällets första del och observerade data stämde väl överens med teorin, se blad 5 i labblogen.

Ett annat problem som kan uppstå när DFT/FFT används är leakage. Till exempel kan ett oscilloskops FFT ha en tidssektion som inte överensstämmer

med signalens period. Leakage kan åtgärdas genom att ändra tidsintervallet för mätningen. Det går också att applicera ett fönster (window) som är en funktion som appliceras på tidssektionen i tidsdomänet (alltså på signalen). Tre fönster är Hanning- (ekvation 2), Gaussian- (ekvation 3) och Rektangulärfönster (ekvation 4). [5]

$$\begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{\pi t}{T}\right), & \text{för } |t| < T \\ 0, & \text{annars} \end{cases} \quad (2)$$

$$e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{n-(N-1)/2}{\sigma(N-1)/2}\right)^2}, \quad \text{för } \sigma > 0.5 \quad (3)$$

$$\begin{cases} 1, & \text{för } 0 \leq t < T \\ 0, & \text{annars} \end{cases} \quad (4)$$

För att testa leakage applicerades under laborationstillfället ett antal olika fönster på en fyrkantsvåg, observationer stämmer med de förväntade resultaten. Se blad 23 i labbloggen.

Med hjälp av funktionen Acquisition mode på oscilloskopet kan bruset reduceras genom medelvärdesbildning. [6] Detta testades genom att mäta bruset med och utan funktionen påslagen under laborationstillfället. Brusgolvet sänktes från -40dB till -60dB. Se labbloggen, blad 6-7.

B Labblogg 2019-02-07

Nedan återfinns labbloggen från laborationstillfälle 2019-02-07. Bladnummer anges ovanför respektive blad. Labbloggen är i helt kronologisk ordning varför inledande uppgift finns på flera platser då tester gjordes under flera tillfällen under labben. I labbloggen refereras vid flertalet tillfällen till figurer (till exempel ”fig14”). Dessa är exporterade ur oscilloskopet och finns i appendix C.

Blad 1

Vyg A

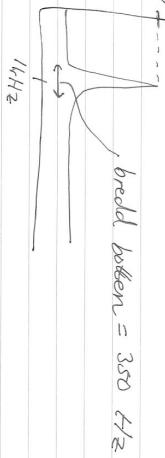
Funktionsgeneratorn hopplas direkt
i i oscilloskopet.

1 kHz, 1 Vpp genereras

Fast rönt sinusvag: 0,5 V.

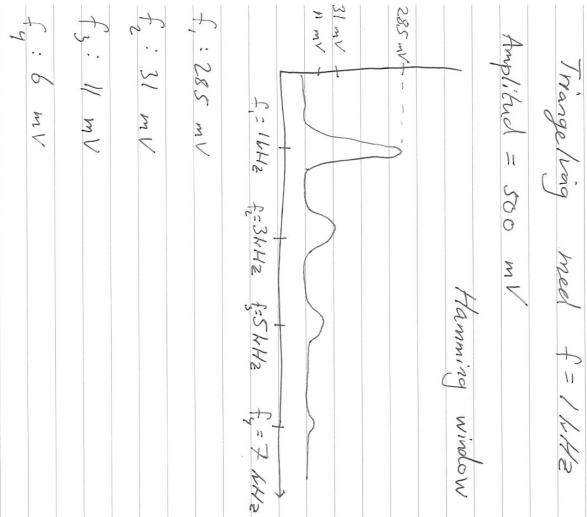
Hanning window

354 mV + ---



bredd botten = 350 t/2

14Hz



285 mV = - - -
Amplitud = 500 mV

Hanning window

Trianglening med $f = 1 \text{ kHz}$

$f_1: 28.5 \text{ mV}$

$f_2: 31 \text{ mV}$

$f_3: 41 \text{ mV}$

$f_4: 6 \text{ mV}$

Amplitud = 354 mV

Endast en frekvens = 1 kHz

Blad 3

fyrkantvag, $f = 1 \text{ kHz}$
 Amplitud: 320 mV
 Hamming

$f_1 = 1 \text{ kHz}$, $f_2 = 3 \text{ kHz}$, $f_3 = 5 \text{ kHz}$, $f_4 = 7 \text{ kHz}$, $f_5 = 9 \text{ kHz}$, $f_6 = 11 \text{ kHz}$
 $f_1: 450 \text{ mV}$
 $f_2: 150 \text{ mV}$
 $f_3 = 5 \text{ kHz} : 91 \text{ mV}$
 $f_4 = 7 \text{ kHz} : 66 \text{ mV}$
 $f_5 = 9 \text{ kHz} : 52 \text{ mV}$
 $f_6 = 11 \text{ kHz} : 44 \text{ mV}$

På jämna frekvenser ex 2 kHz , 4 kHz , ...
 kan observeras små typer med Amplitud
 $\approx 29 \text{ mV}$

Med rectangular window blir
 amplitud likadan, men sidor
 uppsätta.

Blad 4

Blad 5

3.) Vibrering går att åstadkomma

med låg v_i resp hög frekvens.

v_i använde $f_i = 60 \text{ kHz}$, sinusignal.

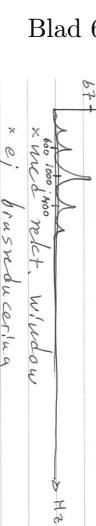
12.5 kS/s .

Detta gav en topp vid 2.5 kHz ,

med rebandvärkt försläp.

4.) Förslaget parsnar formen (bredd)

och antalet siffror.



* med relat. window

* ej brusreducering

$f = 600 \text{ Hz}$ per $u = 3.8 \text{ mV}$

$f = 1000 \text{ Hz}$ per $u = 6.2 \text{ mV}$

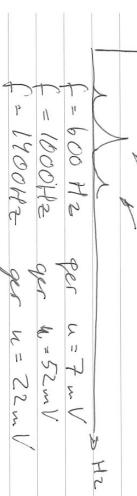
$f = 1400 \text{ Hz}$ per $u = 3.9 \text{ mV}$

med brusreducering akt! Åtagande mode

→ Sample ger:

$u_v \uparrow$

1000 Hz

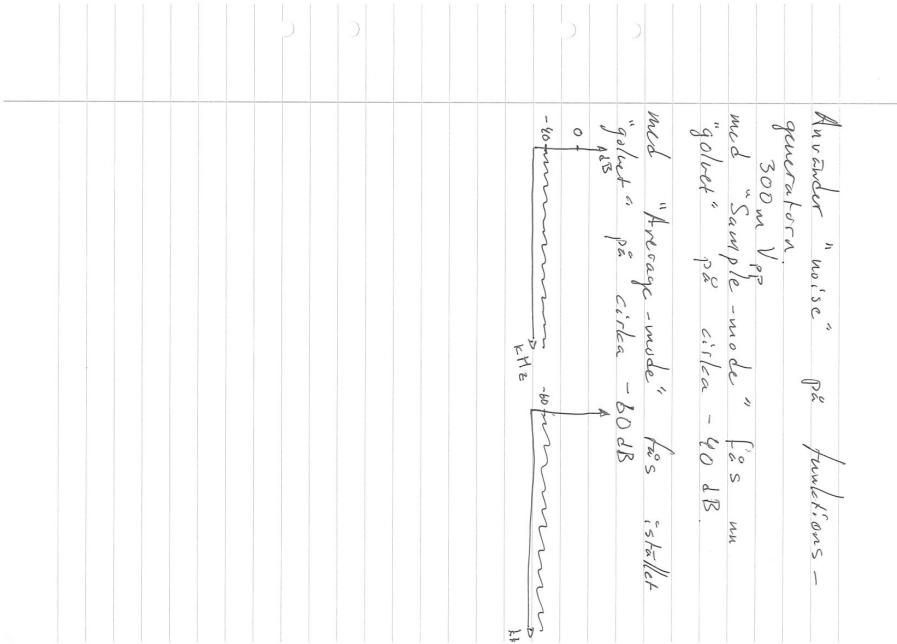


$f = 600 \text{ Hz}$ per $u = 7 \text{ mV}$

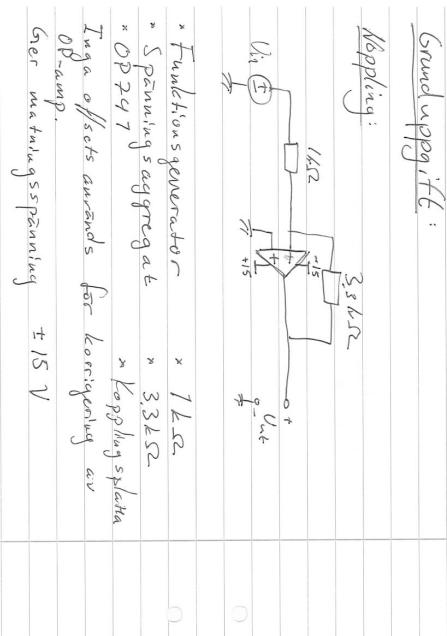
$f = 1000 \text{ Hz}$ per $u = 5.2 \text{ mV}$

$f = 1400 \text{ Hz}$ per $u = 2.2 \text{ mV}$

Blad 7



Blad 8



Blad 9

$f = 2 \text{ kHz}$, fläckning vidan används

$V_0 = 1,5 \text{ V}$

$V = 5 \text{ V}$: $f_1 = 2 \text{ kHz} : 3,44 \text{ V}$, inga andra

$V_0 = 3,15 \text{ V}$

$V = 10 \text{ V}$: $f_1 = 2 \text{ kHz} : 7,04 \text{ V}$

~~Stimma föl i sättet
hur matningsstilen stimma sätts ihop.~~

$V_0 = 4,5 \text{ V}$: $f_1 = 2 \text{ kHz} : 2,3 \text{ V}$

$f_2 = 6 \text{ kHz} : 7,10 \text{ mV}$

$f_3 = 10 \text{ kHz} : 3,68 \text{ mV}$

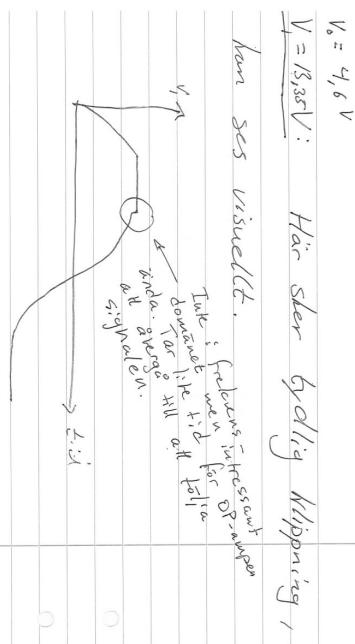
$f_4 = 14 \text{ kHz} : 2,09 \text{ mV}$

$f_5 = 18 \text{ kHz} : 1,15 \text{ mV}$

$f_6 = 22 \text{ kHz} : 5,2 \text{ mV}$

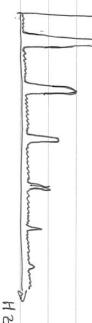
V_0 av 2 kHz görs ty "slow-rate"
inte ska upphöra.

Blad 10



Blad 11

$V_o = 6V$	$V_i = 13,35 V$: Stor synlig clipping.
$f_1 = 2,0 \text{ kHz} : 2,3 V$	
$f_2 = 6,0 \text{ kHz} : 740 \text{ mV}$	
$f_3 = 10 \text{ kHz} : 415 \text{ mV}$	
$f_4 = 14 \text{ kHz} : 272 \text{ mV}$	
$f_5 = 18 \text{ kHz} : 189 \text{ mV}$	
$f_6 = 22 \text{ kHz} : 132 \text{ mV}$	
$f_7 = 26 \text{ kHz} : 80 \text{ mV}$	
$f_8 = 30 \text{ kHz} : 60 \text{ mV}$	
Detta liknar: \approx	(50 kS _s)



Observera att clipping uppstår (nödlast) när man utspänningen är 15 V.
Vad kan det beror på?

Lös Verkar lända mest mellan 10 V till 12,5 V.

Blad 12

$Ny mätning av$	$V_o = 3,15 V$
	$V_i = 10 V$
	$f_1 = 2 \text{ kHz} : 2,22 V$
	$f_2 = 6 \text{ kHz} : 686 \text{ mV}$
	$f_3 = 10 \text{ kHz} : 330 \text{ mV}$
	$f_4 = 14 \text{ kHz} : 187 \text{ mV}$
	$f_5 = 18 \text{ kHz} : 70 \text{ mV}$

Blad 13

Ny mätning av

$$V_o = 1,6 \text{ V}$$

$$V_i = 5 \text{ V}$$

$$f_1 = 2 \text{ kHz} : 2,2 \text{ V}$$

$$f_2 = 6 \text{ kHz} : 480 \text{ mV}$$

$$f_3 = 10 \text{ kHz} : 85 \text{ mV}$$

$$f_4 = 14 \text{ kHz} : 40 \text{ mV}$$

$$V_o = 0,85 \text{ V}$$

$$V_i = 2,2 \text{ V}$$

$$f_1 = 2 \text{ kHz} : 1,88 \text{ V}$$

$$f_2 = 6 \text{ kHz} : 630 \text{ mV}$$

$$f_3 = 10 \text{ kHz} : 330 \text{ mV}$$

Här kan inget annat frekvensmehörl
ses på oscilloskopet än grundfrekvensen.

Amplituderna har mots med för
relation till amplitud hos sinusvignen.

Blad 14

Mätningar har varit fel för $V_i \geq 12,5 \text{ V}$

Dessa

görs om. Vertical-/skalen sätts till

$5 \text{ V}/div$

för samma

specimen

ska fås.

$$V_o = 3,25 \text{ V}$$

$$V_i = 12,5 \text{ V}$$

$$f_1 = 2 \text{ kHz} : 8,7 \text{ V}$$

$$f_2 = 5 \text{ V}$$

$$V_i = 13,4 \text{ V}$$

$$f_1 = 2 \text{ kHz} : 10,2 \text{ V}$$

$$f_2 = 2 \text{ kHz} : 10,2 \text{ V}$$

$$f_3 = 6 \text{ kHz} : 630 \text{ mV}$$

$$f_4 = 10 \text{ kHz} : 330 \text{ mV}$$

Här kan clipping ses i tidsdimensionen.

Här ses grov clipping.

$$\begin{aligned}V_0 &= 2 \text{ V.} \\V_i &= 13,4 \text{ V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}f_1 &= 2 \text{ kHz : } 11,03 \text{ V} \\f_2 &= 6 \text{ kHz : } 2 \text{ V} \\f_3 &= 10 \text{ kHz : } 0 \text{ V} \quad \text{konstigt}\end{aligned}$$

$$f_4 = 14 \text{ kHz : } 290 \text{ mV}$$

Demonstration av slew rate:
 $V_o = 3,15 \text{ V}$ hålls konstant, ger $V_o \approx 10 \text{ V}_i$,
iaf $f_{0+} = f = 2 \text{ kHz}$. Hanning window
används.

$$f_{in} = 2 \text{ kHz} \quad V_i = 10 \text{ V}$$

$$f_1 = 2 \text{ kHz : } 6,8 \text{ V}$$

Enda frekvensen.

$$f_{in} = 5 \text{ kHz} \quad V_i \approx 10 \text{ V}$$

$$f_1 = 5 \text{ kHz : } 6,9 \text{ V}$$

Enda loben i frekvensspektret.

$$f_{in} = 9 \text{ kHz} \quad V_i = 10 \text{ V}$$

$$f_1 = 9 \text{ kHz : } 6,99 \text{ V}$$

Enda loben i frekvensspektret.

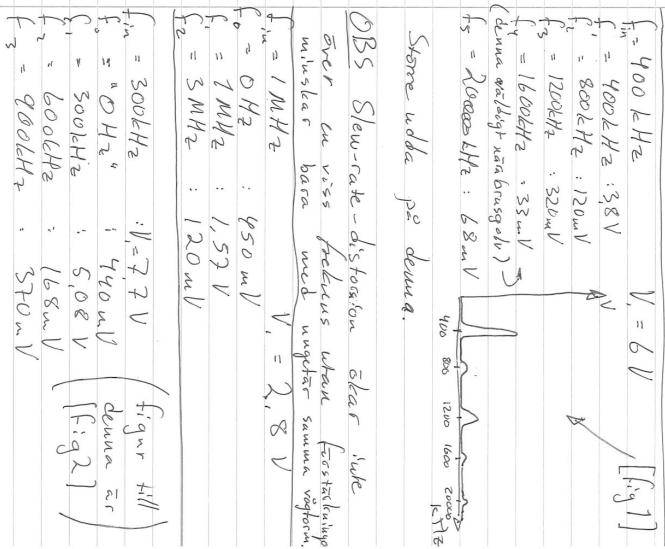
$$\begin{aligned}f_{in} &= 200 \text{ kHz} \quad V_i = 9,7 \text{ V} \\f_1 &= 200 \text{ kHz : } 6,58 \text{ V} \\f_2 &= 400 \text{ kHz : } 12 \text{ mV} \\f_3 &= 600 \text{ kHz : } 141 \text{ mV}\end{aligned}$$

OBZ jämn multipel
och enda multipel

Blad 15

Blad 16

Blad 17



Större udde på denne.

$$\begin{aligned}
 & \text{OBS Steu-rate-distorsion är liten} \\
 & \text{över en viss frekvens utan förstöring} \\
 & \text{minskar bara med ungefärligen} \\
 & f_{\text{in}} = 1 \text{ MHz} \quad V_i = 2,8 \text{ V} \\
 & f_o = 0,1 \text{ Hz} \quad : 150 \text{ mV} \\
 & = 1 \text{ MHz} \quad : 1,57 \text{ V} \\
 & f_2 = 3 \text{ MHz} \quad : 120 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & f_{\text{in}} = 300 \text{ kHz} \quad V_i = 7,7 \text{ V} \\
 & = "0 \text{ Hz}" \quad : 440 \text{ mV} \\
 & f_1 = 300 \text{ kHz} \quad : 5,0 \text{ eV} \\
 & f_2 = 600 \text{ kHz} \quad : 168 \text{ mV} \\
 & f_3 = 900 \text{ kHz} \quad : 370 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

Blad 18

Ty: Steu-rate föändras ej stäckigt mycket efter 400 kHz.
Böjor ändras vid ca 160 kHz men utspänningarna spelar också in.
Därför kanske 25 kHz är lagom att börja på:
...
25kHz $f = 400 \text{ kHz}$

Spannningen påminner först efter utspänning cirka 10 V därför rulligt att ha metervärden kan $V_o = 3 \text{ V}$ till $V_o = 7 \text{ V}$ som "höchstet" ger $V_i = 10 \text{ V}$ till $V_i = 23 \text{ V}$.

OBS verkar finnas lite offset-spänning men så liten så tas inte hänsyn till det + 10 V & - 9,2 V i sändömnat [fig 2]

3D-plot, vad du måste rida:

Blad 19

	f_{frekvens}	V_o
$V_i = 3V$	25kHz	150mV
$V_i = 10V$	$f_1 = 25\text{kHz}$ (ungek. u_{clip})	1.25V
$V_o = 4V$	$f_2 = 25\text{kHz}$ (ungek. u_{clip})	$4V$
$V_i = 13V$	$f_3 = 25\text{kHz}$ (ungek. u_{clip})	$8.57V$
$V_o = 5.0V$	$f_4 = 25\text{kHz}$ (ungek. u_{clip})	$5.0V$
$V_i = 12.3V$	$f_5 = 25\text{kHz}$ (ungek. u_{clip})	$12.3V$
$V_o = 7V$	$f_6 = 25\text{kHz}$ (ungek. u_{clip})	$7V$
$V_i = 13.3V$	$f_7 = 25\text{kHz}$ (ungek. u_{clip})	$13.3V$
<i>idamplitud</i>		
$V_o = 12.3V$	$*1$	$*14$
$V_o = 7V$	$*5$	$*8$
$V_o = 5.0V$	$*9$	$*12$
$V_o = 4V$	$*10$	$*13$

Blad 20

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
*2	$f_1 = 25\text{kHz} \Rightarrow 11.05\text{ V}$	$f_2 = 50\text{kHz} \Rightarrow 200\text{ mV}$	$f_3 = 75\text{kHz} \Rightarrow 640\text{ mV}$	$f_4 = 100\text{kHz} \Rightarrow 95\text{ mV}$	$f_5 = 125\text{kHz} \Rightarrow 45\text{ mV}$	$f_6 = 150\text{kHz} \Rightarrow 10\text{ mV}$	$f_7 = 175\text{kHz} \Rightarrow 340\text{ mV}$
*3	$f_1 = 150\text{kHz} \Rightarrow 8.57\text{ V}$	$f_2 = 300\text{kHz} \Rightarrow 140\text{ mV}$	$f_3 = 450\text{kHz} \Rightarrow 170\text{ mV}$	$f_4 = 600\text{kHz} \Rightarrow 95\text{ mV}$	$f_5 = 750\text{kHz} \Rightarrow 320\text{ mV}$	$f_6 = 900\text{kHz} \Rightarrow 170\text{ mV}$	$f_7 = 1050\text{kHz} \Rightarrow 130\text{ mV}$
*4	$f_1 = 150\text{kHz} \Rightarrow 8.57\text{ V}$	$f_2 = 300\text{kHz} \Rightarrow 150\text{ mV}$	$f_3 = 450\text{kHz} \Rightarrow 150\text{ mV}$	$f_4 = 600\text{kHz} \Rightarrow 95\text{ mV}$	$f_5 = 750\text{kHz} \Rightarrow 320\text{ mV}$	$f_6 = 900\text{kHz} \Rightarrow 170\text{ mV}$	$f_7 = 1050\text{kHz} \Rightarrow 130\text{ mV}$
*5	$f_1 = 150\text{kHz} \Rightarrow 9.62\text{ V}$	$f_2 = 300\text{kHz} \Rightarrow 140\text{ mV}$	$f_3 = 450\text{kHz} \Rightarrow 240\text{ mV}$	$f_4 = 600\text{kHz} \Rightarrow 340\text{ mV}$	$f_5 = 750\text{kHz} \Rightarrow 210\text{ mV}$	$f_6 = 900\text{kHz} \Rightarrow 120\text{ mV}$	$f_7 = 1050\text{kHz} \Rightarrow 120\text{ mV}$

Blad 21

<u>OBS</u>		$V_1 = 9 \text{ V}$
*6	$f_1 = 275 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 538 \text{ V}$
$f_2 = 550 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 110 \text{ mV}$	
$f_3 = 825 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 310 \text{ mV}$	
*7	<u>OBS</u>	$V_1 = 9.2 \text{ V}$
*8	<u>OBS</u>	$V_1 = 8.5 \text{ V}$
$f_1 = 275 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 5.4 \text{ V}$	
$f_2 = 550 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 170 \text{ mV}$	
$f_3 = 825 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 330 \text{ mV}$	
*9	<u>OBS</u>	$V_1 = 8.8 \text{ V}$
$f_1 = 275 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 5.63 \text{ V}$	
$f_2 = 550 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 180 \text{ mV}$	
$f_3 = 825 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 310 \text{ mV}$	
*10	<u>OBS</u>	$V_1 = 10.92 \text{ V}$
$f_1 = 200 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 7.46 \text{ V}$	
$f_2 = 400 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 250 \text{ mV}$	
$f_3 = 600 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 470 \text{ mV}$	

Blad 22

<u>OBS</u>		$V_1 = 11.6 \text{ V}$
*11	<u>OBS</u>	$V_1 = 11.6 \text{ V}$
$f_1 = 275 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 7.71 \text{ V}$	
$f_2 = 550 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 300 \text{ mV}$	
$f_3 = 825 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 680 \text{ mV}$	
*12	<u>OBS</u>	$V_1 = 11.6 \text{ V}$
$f_1 = 200 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 7.71 \text{ V}$	
$f_2 = 400 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 300 \text{ mV}$	
$f_3 = 600 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 680 \text{ mV}$	
*13	<u>OBS</u>	$V_1 = 12.2 \text{ V}$
$f_1 = 200 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 7.79 \text{ V}$	
$f_2 = 400 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 280 \text{ mV}$	
$f_3 = 600 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 770 \text{ mV}$	
$f_4 = 1000 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 235 \text{ mV}$	
$f_5 = 1400 \text{ kHz}$	$\Rightarrow 80 \text{ mV}$	

Inledande uppgift

a) Fyrkantsvag

fig 4 - rektangulärt fönster

fig 4b - rektangulär, dB

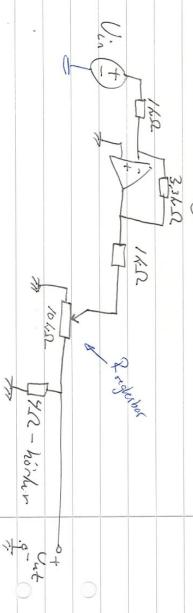
fig 4c - rektangulär, dB

fig 5 - hanning, dB

fig 6 - gaussisk, dB

Extrauppgift :

a) Hard clipping hets end. figur 2.



Kläng:

Fall: Vanlig sinus heter ren

När distorsion först hörts ser
jag det som att något annat
stör. Tonen blir högre och läter
oren, mer jäll. Låtta rasping läter den också.

b) Då distorsion först hörts är

$$V_o = 3,2 \text{ V}, f = 440 \text{ Hz}$$

$$U_{ut} = 1,4 \text{ V}$$

$$\text{Reaktiver } \approx 4500 \Omega, 500 \Omega \text{ mot högtalaren}$$

Blad 25

$$\begin{aligned}
 & \xrightarrow{\text{SvR}} 0 \text{ dB} + 11 \text{ V. } \text{dB} = 20 \log x \\
 f_1 &= 440 \text{ Hz : } -60 \text{ dB} \quad -60 \text{ dB} \\
 f_2 &= 880 \text{ Hz : } -54 \text{ dB} \quad -54 \text{ dB} \\
 f_3 &= 1320 \text{ Hz : } -52 \text{ dB} \quad -52 \text{ dB} \\
 C_4 &= 1763 \text{ kHz : } -74 \text{ dB} \quad -63 \text{ dB} \\
 f_5 &= 2,2 \text{ kHz : } -53 \text{ dB} \quad - \\
 f_6 &= 2,63 \text{ kHz : } -57 \text{ dB} \quad \text{(se fig 7)} \\
 f_7 &= 3,1 \text{ kHz : } -55 \text{ dB} \\
 f_8 &= 3,96 \text{ kHz : } -57 \text{ dB} \\
 f_9 &= 4,4 \text{ kHz : } -56 \text{ dB} \\
 f_{10} &= 5,25 \text{ kHz : } -60 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Vanu utmärkta mätvärden är tagen ur fig 2. $V_o = 7,4 \text{ V}$, $V_i = 1,4 \text{ V}$

Blad 26

Hard-clipping av fyskauts & triangulation

Testar först att ge en insignal med fyrkantsväg.

För samma parametrar ska behöver man sänka voly inspanningarna för en fyskautsväg. Annars löper det för mycket i höglutet.

Alltså: Polymeren för samma inspanning blir högre.

Hard-clipping av fyskautsväg häter inte att annostända en vanlig fyskautsväg.

Däremot prävarer ljudet av fyskautsvägen MARKET om kring "distorsionsläget" för en ren sinus.

I fyskautsvägen andades inget fyskantvag.

Blad 27

Triangelväg:

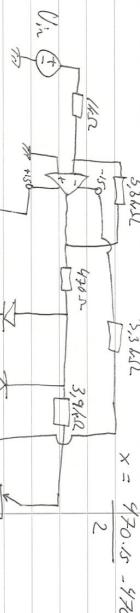
Vanlig triangel låter ganska bra, liknar en sinus ungefär men är en fyrkantsväg. Men ändå står skillnad mot sinussen.

Hörding till de clipping uppgörs ger en upplevelse av att det är mindre skillnad mot clipping för en sinus. Tonen är ändå mer "fin" än uppgörs som mindre ful.

Denvis tycker om distorsionstonaen men är vanlig triangelväg.

Fig 8 visar en "ren" triangelväg då distorsion uppgörs först.

Blad 28



Upplevelsen av sinusväg utan soft-clipping.

Låter ren ut som en sinusväg. Man kansele låte låg volym.

Sinus låter injukt och senn baca "en" fraktaus.

Med upspänningarna ökas över sig. Låter tonen mer "burkig". Känns som att det "junktäck" inget mer än bara en fraktaus.

Det låter som att tonen blir högre.

Tonen som upptäts låter finare än tonen för hard-clipping

Blad 29

fig 10 - sinus utan distorsion, soft-clipp

fig 11 - sinus med distorsion, soft clip

Då distorsionen hörs är

$$V_o = 0,9 \text{ V} , \quad R_{\text{gryter}} \approx 0 \Omega$$

$$U_{\text{ut}} = 172 \text{ mV}$$

$$f_1 = 440 \text{ Hz} : 126 \text{ mV}$$

$$f_2 = 1320 : 126 \text{ mV}$$

$$f_3 = 2,2 \text{ kHz} : 126 \text{ mV}$$

$$f_4 = 30,5 \text{ kHz} : 126 \text{ mV}$$

$$f_5 = 4,84 \text{ kHz} : 126 \text{ mV}$$

$$f_6 = 5,72 \text{ kHz} : 126 \text{ mV}$$

$$f_7 = 2200 \text{ Hz} : 0,82 \text{ mV}$$

$$f_8 = 3960 \text{ Hz} : 0,3 \text{ mV}$$

fig 12 - sinus med distorsion, soft-clip

fig 13 visar distorsion i tidsdomänet

för att pröva kretens karakteristik

Blad 30

En annan uppskattning är förd, de dämpningar uppkörs som stårande. De riktades THD (med hela skalan) som en hard-clipping-funktion; figur av matrisen finns i figur 14.

$$\begin{aligned} f_1 &= 440 \text{ Hz} &\Rightarrow 254 \text{ mV} \\ f_2 &= 1320 \text{ Hz} &\Rightarrow 20,8 \text{ mV} \\ f_3 &= 2,2 \text{ kHz} &\Rightarrow 8 \text{ mV} \\ f_4 &= 30,5 \text{ kHz} &\Rightarrow 2,6 \text{ mV} \\ f_5 &= 4,84 \text{ kHz} &\Rightarrow 0,8 \text{ mV} \\ f_6 &= 5,72 \text{ kHz} &\Rightarrow 0,8 \text{ mV} \end{aligned}$$

Nu märks förstärknings- och upphöjningen beskrivs i soft-clipping-karakter.

För $V_o = 2 \text{ V}$ och $U_{\text{ut}} = 120 \text{ mV}$ så häger det som en fränktvåg, se figur 15.

Icke-klipt häger PO samma sätt. Fig 16 visar detta, $V_o = 0,5 \text{ V}$

OBS sinus frekvenser mellan $U_{\text{ut}} = 98 \text{ mV}$ till 120 mV händer nästan ingen förändring.

Frekvensvägen förändras inte försiktigt med detta omsoft-clipping-karakter.

Blad 31

$V_o = 0,5 \text{ V}$ & $U_{ac} = \cancel{95 \text{ mV}}$
 för saunna rest är triangulväg.
 Ingen klippning upplevs för
 bild 17 (fig 7).

Upplevs förändring da
 $V_o = 7,2 \text{ V}$ & $U_{ac} = 250 \text{ mV}$.
 Tonen känns högre och inte
 lika "burkig". Läser mer
 jättesöt ut
 Figur fig 18 visar frekvens-
 domänut ur denna.

Fig 19 visar dessutom hur
 triangulvägen klipps i tids-
 domänet.

OK! Pontus.

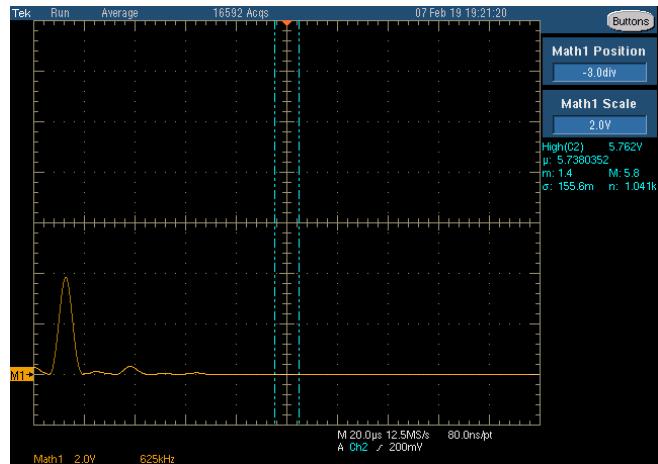
Blad 32

Slut tillbörg:

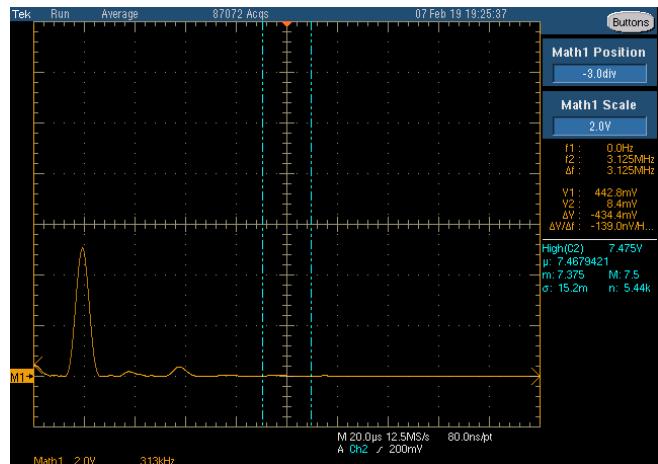


C Bilder exporterade från oscilloskop

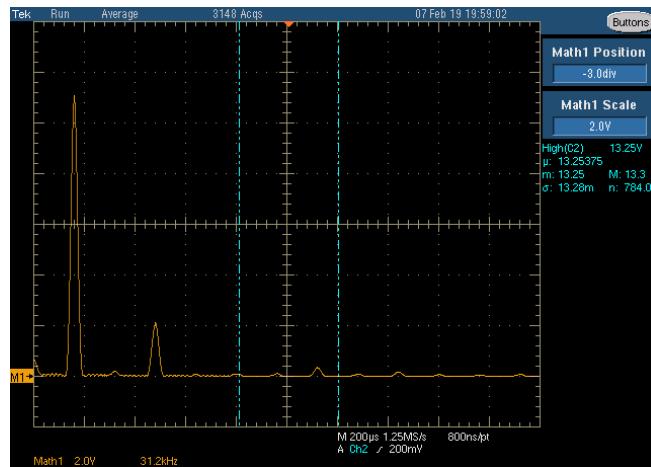
Oscilloskop-figur 1



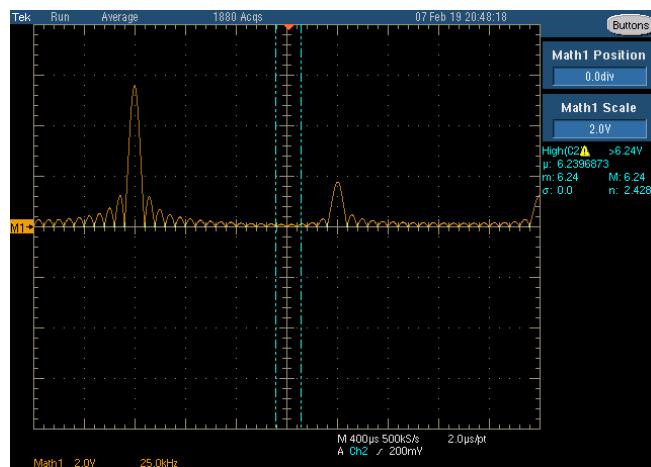
Oscilloskop-figur 2



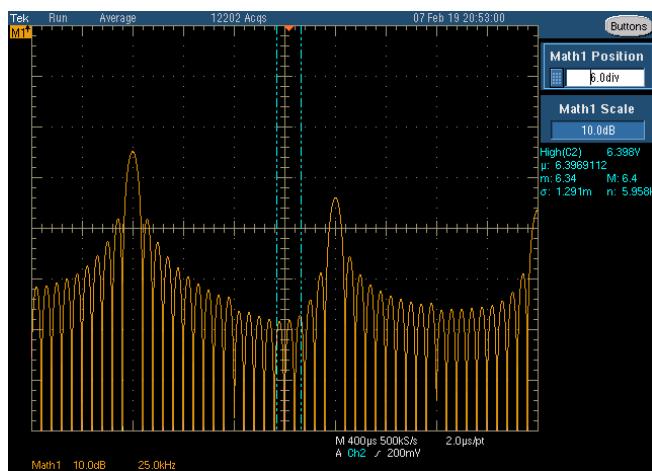
Oscilloskop-figur 3



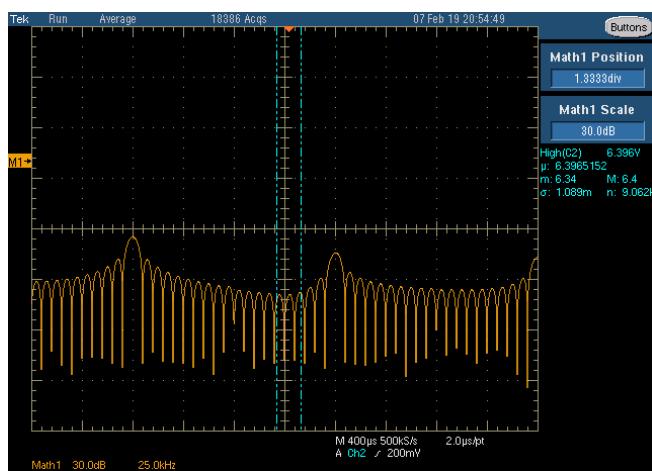
Oscilloskop-figur 4



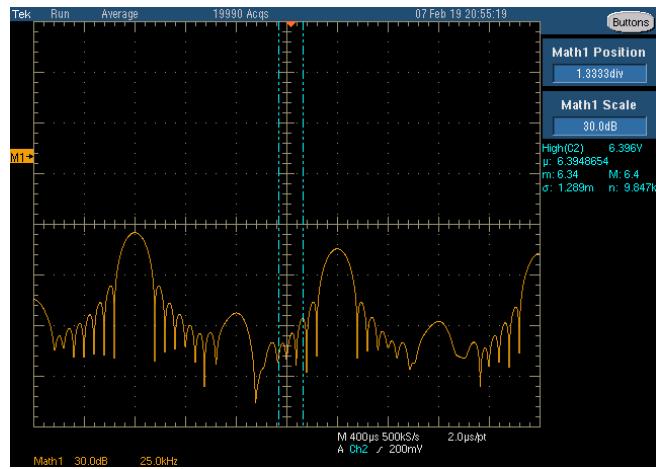
Oscilloskop-figur 4b



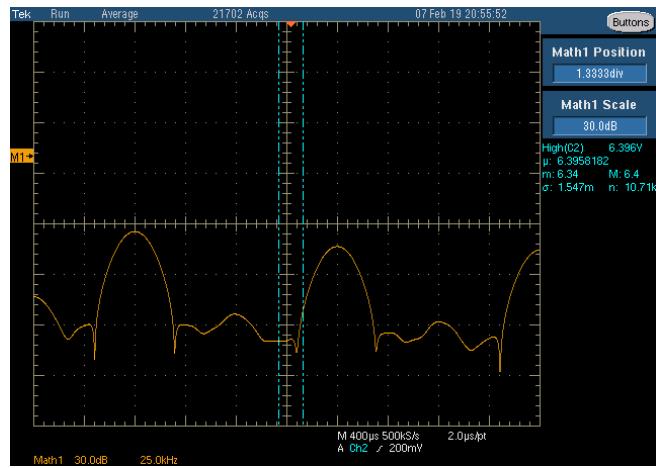
Oscilloskop-figur 4c



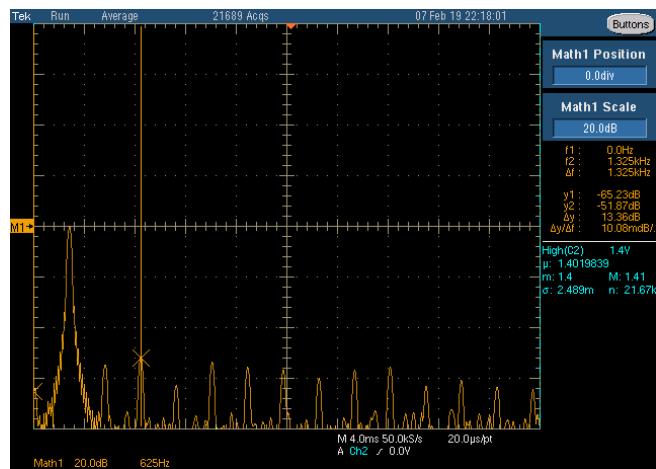
Oscilloskop-figur 5



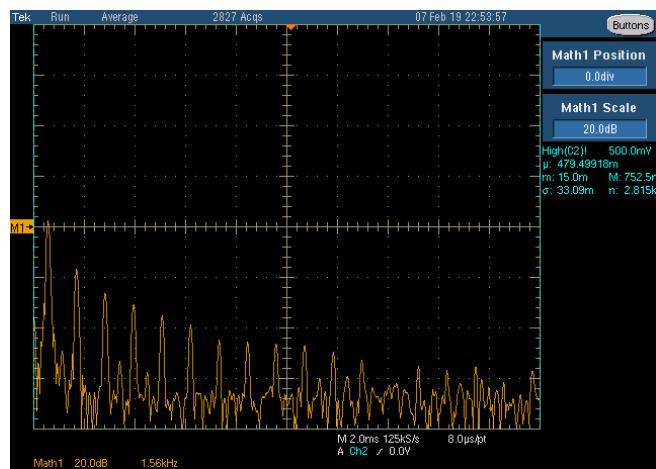
Oscilloskop-figur 6



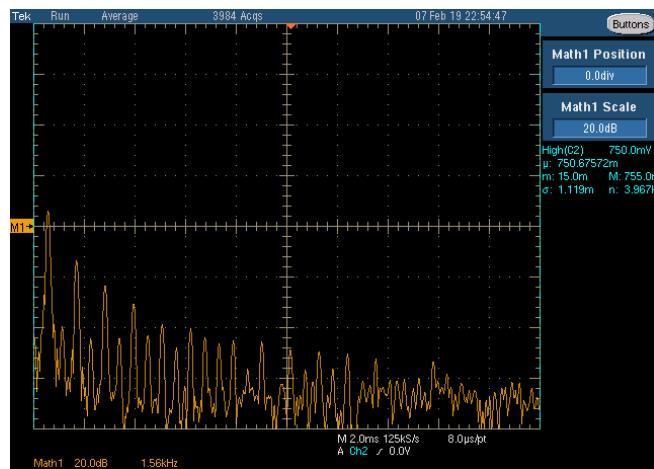
Oscilloskop-figur 7



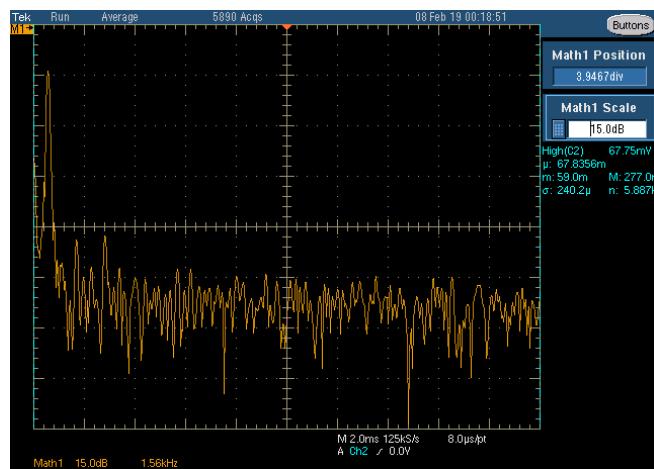
Oscilloskop-figur 8



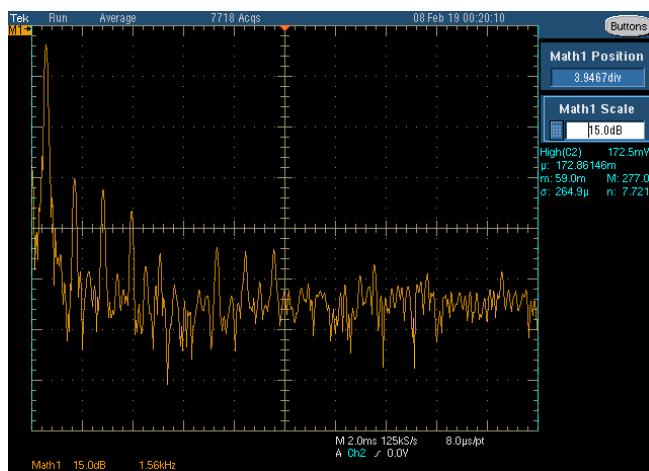
Oscilloskop-figur 9



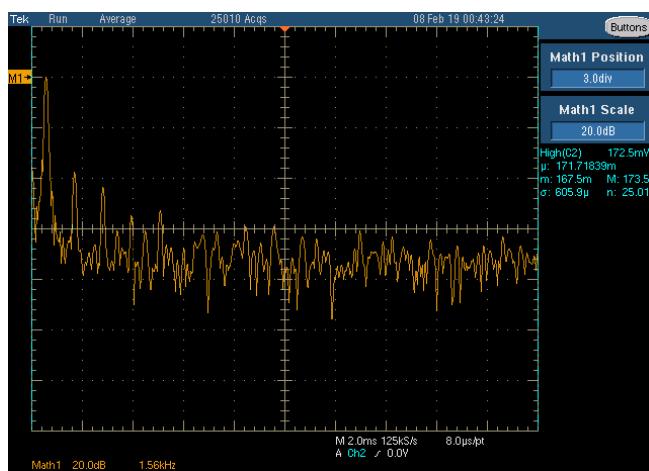
Oscilloskop-figur 10



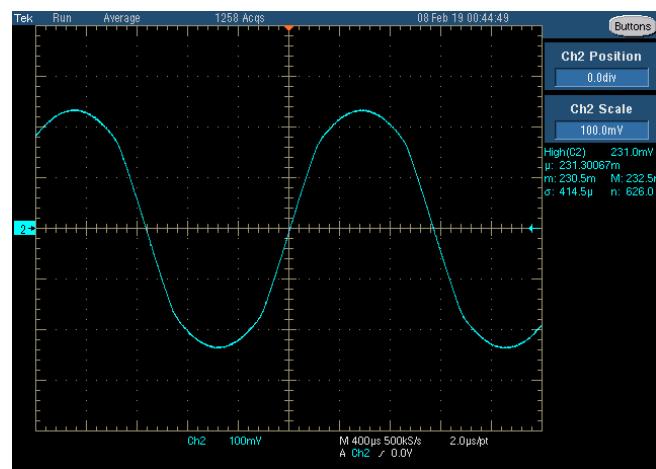
Oscilloskop-figur 11



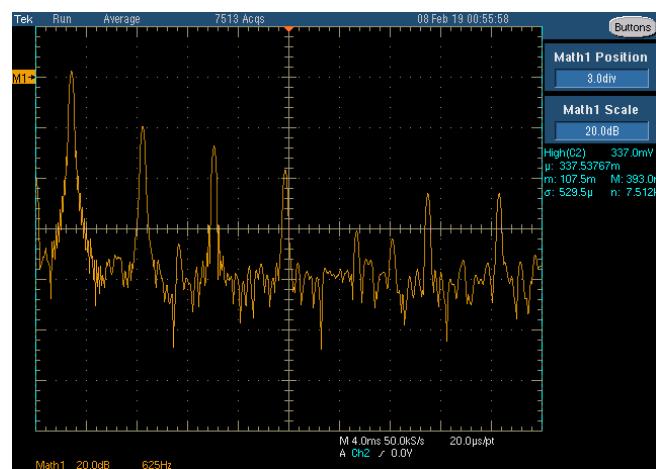
Oscilloskop-figur 12



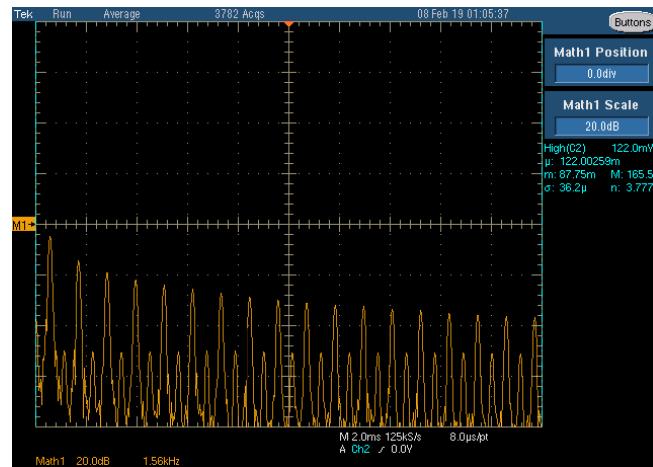
Oscilloskop-figur 13



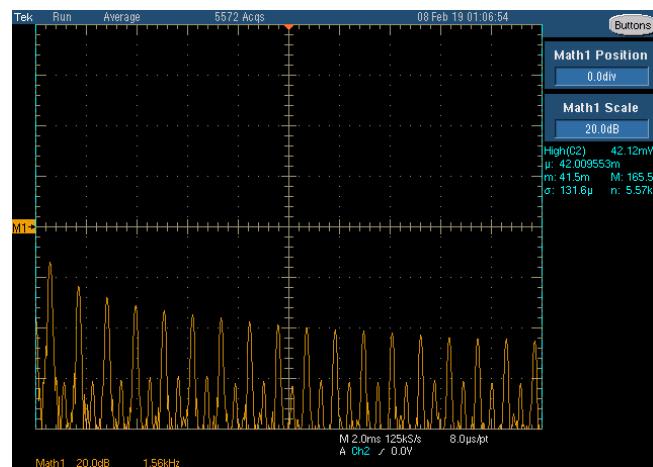
Oscilloskop-figur 14



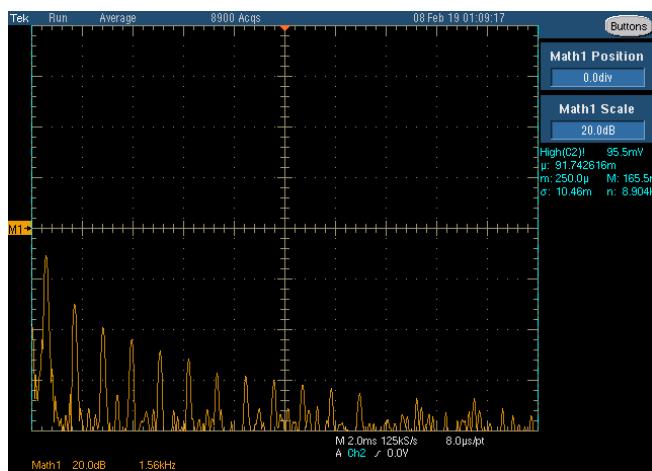
Oscilloskop-figur 15



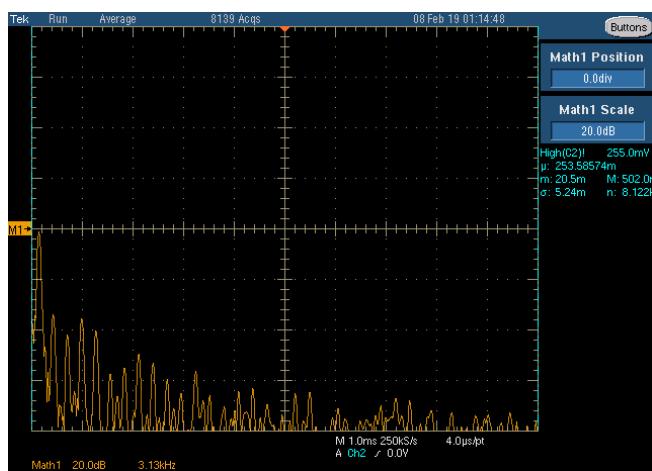
Oscilloskop-figur 16



Oscilloskop-figur 17



Oscilloskop-figur 18



Oscilloskop-figur 19

