Mäta fält - lögn eller sanning

Clas Tegenfeldt
Image Processing Group
Dept. EE., Linköping University
S-581 83 LINKÖPING , Sweden

Teknisk människa
eller
Mänsklig teknik

1 Inledning

Föreliggande rapport kom till tack vare frågeställningen, "hur kommer det sig att en "lågstrålande" skärm som klarar MPR-II kraven kan ha en uppmätt tidsderivata som inte klarar MPR-I kravet?".

Vid en första anblick ser det hela både enkelt och självklart ut:
Det går inte att ur ett RMS medelvärde säga något om signalens tidsvariationer!
Men då infinner sig genast följdfrågan, varför mäter man överhuvudtaget på detta sätt? Det verkar kort sagt ogrundat.

Det visar sig att historian är lång och krokig. Till slut hamnar vi där vi står idag, och de flesta verkar ha glömt varför mätrekommendationerna kom till och vad de egentligen kan användas till.

Idag har vi en olustig situation där man använder mätinstrument specifikt framtagna för att mäta enligt MPR-II, inte bara för att mäta på bildskärmar, utan man mäter allt från kraftledningar till golvvärmekablar med dessa. Detta utan att fundera på vad man mäter och hur man skall tolka resultaten. Man jämför med siffror andra mätt upp med liknande instrument. Man genomför till och med vetenskapliga undersökningar där man mäter med dessa instrument. Om man kritiskt granskar mätmetoden, och instrumenten, framgår det som tydligt att dessa *icke är lämpliga att grunda vetenskapliga slutsatser på.*

2 Bakgrund

Det började i slutet av sjuttiotalet och i början av åttiotalet dyka upp allt fler fall av besvär vid bildskärmsarbete. Dessa besvär bestod oftast av hudbesvär. Det handlade om en brännande och stickande känsla och besvären liknades vid "solbränna". Vad berodde det på?

Ett politiskt beslut togs av arbetsmarknadsminister Anna-Greta Leijon, det uppdrogs 850905 åt Arbetarskyddsstyrelsen att i samråd med Statens Strålskyddsinstitut (SSI) och Statens Mät och Provningsråd (MPR) att utreda "behovet av, förutsättningarna för och konsekvenserna av att införa provning – frivillig eller obligatorisk – av bildskärmsterminaler". Syftet med mätmetoden var att underlätta för arbetsgivare och arbetstagare att bedömma bildskärmsterminaler och deras lämplighet från *arbetsmiljösynpunkt.*

En arbetsgrupp bildades 860522 bestående av representanter från MPR[1], Statens Strålskyddsinstitut (SSI), Arbetarskyddsstyrelsen, Leverantörsföreningen för Kontors- och Datautrustning (LKD), Statens Provningsanstalt, samt Statshälsan[2]. I regeringsuppdraget angavs vidare att arbetet skulle genomföras i nära samarbete med arbetsmarknadens parter och övriga intressenter.

[1] Numera Sveriges Ackrediteringsanstalt – Swedac
[2] Numera Previa

Diskussionen vid denna tidpunkt var öppen för vad och hur man skulle mäta. Av någon anledning, som idag är svår att få grepp om, valde man att koncentrera sig på lågfrekventa[3] fält. Det man ville mäta var de linjefrekventa linjesvepens fält. Man definierade ett förslag till mätmetod som skulle utvärderas under tre år. Så skedde också och 1990 reviderades mätmetoden och går numera under benämningen MPR-II[4]. I efterhand kallas det första förslaget MPR-P 1987:1 i konsekvenshetens namn MPR-I.

2.1 MPR-I

Mätmetoden som man använde från början gick ut på att mäta både tidsderivatans toppvärde (se ekv. 12) och flödet (se ekv. 9) inom intervallet 0-400 KHz, på ett stort antal punkter runt om objektet. Det visade sig snart att metoden var klumpig och besvärlig, det tog lång tid att utföra en mätserie. Man hade även vissa betänkligheter vad gällde noggrannheten vid mätning av tidsderivatorerna. Naturligt nog har man lägre noggrannhet för detektion av derivatans toppvärde än det integrerade RMS-värdet. Man hade även problem med den definierade geometrin för mätpunkterna, det hände att större skärmar hade mätpunkter som enligt geometrin föll innanför höljet. Man använde vid denna tidpunkt en sfärisk geometri vilket ställde till praktiska problem. Därför gick man över till att använda cylindrisk geometri när man reviderade metoden.

Man designade mätmetoden med den utgångspunkten att man trodde det var intressant att se på bildskärmens linjesvep, framförallt dess återsvep. Varför var det intressant? Man ansåg helt enkelt att den troligaste interaktionen mellan elektromagnetiska fält och kroppen var de inducerade strömmarna. Det är grundläggande fysik att man får inducerade strömmar i kroppen, det är däremot ett enormt komplicerat arbete att utreda hur de fördelas och vilken inverkan på de biologiska systemen de får. Lars-Erik Paulsson på Statens Strålskyddsinstitut (SSI) utförde senare en litteraturstudie som bidrog till slutsatsen att dessa inducerade strömmar var för små för att vara intressanta som förklaringsmekanism. Det var det huvudsakliga skälet till att man övergav derivata mätningen när MPR-II reviderades.

Fokus var alltså på linjesvepet och även på bildsvepets återgång. Detta på grund av att man vid dessa återfinner de kraftigaste tidsderivatorna på fälten och därmed maximalt med inducerad ström i kroppen. Det gav i sin tur upphov till att man ville spärra mätinstrumentet under bildsvepets återgång för att det ej skulle inverka på mätresultatet av linjesvepet. Detta medförde givetvis att mätningen blev onödigt komplicerad. Man insåg först senare att man inte har anledning eller nytta av att särskilja olika faktorer från varandra, när man inte ens vet om man mäter rätt sak. Man övergav alltså denna linje, och resonerade som så att det går lika bra att jämföra skärmar med varandra om vi mäter allt på en gång.

Till en början trodde man säkert att man lätt skulle finna orsaken till att människor mådde dåligt vid bildskärmarna. Tyvärr visade det sig med tiden att man inte såg några tydliga samband med de valda mätmetoderna. Det som man då valde var att betrakta mätmetoden som ett sätt att jämföra bildskärmar med varandra. Det var ju ändå det som man hade fått i uppdrag att göra till en början.

För att kunna jämföra skärmar med varandra hade man nu en mätmetod som i någon mening skulle ge ett mått på bildskärmen. Givetvis ville man också ha ett mått på vad som var normalt. Detta uppnåddes genom att mäta ett antal på marknaden då förekommande bildskärmar. En icke-verifierad siffra som nämnts är 46 stycken. Man tog sedan medianvärdet av dessa mätningar såsom riktvärde för normen.

Det fanns då inte heller längre kvar intresse att mäta tidsderivatan. Man antog nämligen att alla skärmar är likartade, och att man därigenom kan anta att förhållandet mellan flödets RMS och derivatans toppvärde torde vara lika mellan skärmar.

2.2 MPR-II

MPR-I ansågs alltså för besvärlig och svårtolkad, därför reviderades mätmetoden. Den mest grundläggande förändringen man genomförde var att frångå mätning av tidsderivatan till att mäta ett RMS medelvärde på flödet.

[3] En viss begreppsförvirring har infunnit sig. Med lågfrekventa fält innefattas både band I och II, 0-400KHz, medan man i MPR sammanhang ofta talar om band II 2-400KHz, något felaktigt, som högfrekvens.

[4] Mer exakt benämning är MPR 1990:8

De som satt med i kommittén denna gången var Swedac[5], Statens Strålskyddsinstitut (SSI), Semko, Combinova, TCO, SEF[6], IBM, EIZO, HP, ICL, Previa[7], Radians Innova, samt SEK.

Som nämnts ovan förändrade man mätmetoden en hel del och resultatet blev det vi idag kallar för MPR-II. En av orsakerna, förutom praktiska detaljer, var att Paulsson på SSI gjorde en litteraturstudie vad gäller biologiska effekter av elektromagnetiska fält. Ett resultat var att inducerad ström i kroppen inte längre ansågs vara ett möjligt orsakssamband. Argumentet var att strömmarna för de aktuella fekvenserna skulle vara mindre än de kroppsegna signalerna.

Detta argument har aldrig visats. Alla beräkningar vid denna tidpunkt var baserade på kraftiga förenklingar. Man antog oftast att kroppen var en mer eller mindre homogen ellipsoid med standardmått. Man beräknade inducerade strömmar på ett parallellt infallande fjärrfält. De resulterande strömmarna antogs jämnt fördelade över tvärsnittet. Vid tiden 1986-87 presenterades rapporter som redovisade beräkningar på mer realistiska människomodeller. Värden runt 1400nA/cm^2 på inducerad strömtäthet uppgavs vid 60Hz fält från en normal kraftledning. För elektriska fält på 1KV/m beräknades värden på 18μA. Man visade även att en förenklad formel för strömmen I_h genom foten på en stående människa är approximativt

$$\frac{I_h}{E} = 0,108 h_m^2 f_{MHz}, \frac{mA}{V/m} \tag{1}$$

där E är den plana infallande vågens elektriska fältstyrka, h_m är personens längd, och f_{MHz} är frekvensen i megahertz. Det man ser är att inducerad ström är direkt proportionell mot frekvensen. Det innebär att när vi idag har högupplösande skärmar, så har vi högre grundfrekvens, men även högre övertoner, vilka både kraftigt bidrar till ökad inducerad ström. Men som lätt inses (se annars appendix E) förändras inte det uppmätta rms medelvärdet nämnvärt.

Det intryck man får när man pratar med personer inom MPR-II, SEK[8], eller TCO, är de ointresserade av att studera inducerade strömmar. För det första måste det klargöras att dessa överslagsberäkningar antagligen baserades på lågfrekventa sinussignaler. Om vi inte begränsar oss till intervallet 0-400 KHz så inser vi att de störningar som en typisk bildskärm ger kan ligga en faktor 1000 högre i frekvens. Givetvis sjunker amplituden för dessa övertoner med ökad frekvens men motverkas av linjärt mot frekvens ökad inducerad ström. Till exempel en smal spik kan alltså ge upphov till ett mycket högt frekvensinnehåll och därmed hög inducerad ström. En dirac puls har matematiskt sett ett oändligt frekvensinnehåll.

Idag har vi klart mer förfinade simuleringar över inducerade strömmar i kroppen. En nyligen publicerad rapport rapporterar starkt inhomogena fördelningar över strömtäthetens fördelning över kroppstvärsnittet. Detta är intuitivt självklart eftersom ledningsförmågan i olika vävnader varierar i hög grad[9]. För varje förfinad simuleringsmetod ser man en ökad inhomogenitet, dvs en ökad koncentration av ström i vissa strukturer. Det borde föranleda en omvärdering av betydelsen av inducerade strömmars betydelse. När man talar om tiotals pikoampere för signaltransport i nervceller, bör man fundera över betydelsen av inducerade strömmar som kan vara många potenser större. För radiofrekvensområdet kan en arbetare vid en plastsvets utsättas för elektriska fält (typiskt 27MHz) av sådan styrka att inducerad ström i fotlederna är i storleksordningen 780mA. Detta utan att ANSI C95.1-1982 RF säkerhetsnormerna överskrides. Om vi räknar om de använda värdena på elektriska fält genom att gå ner i frekvens enligt ekvation 1, får vi ett approximativt värde på 0,6V/m för 400KHz.

Det synes fortfarande i högsta grad intressant att studera inducerade strömmar i kroppen. Det är dock hos Svenska forskargrupper en allenarådande uppfattning att inducerade strömmar är ointressanta och ett dött spår.

Man skall vara medveten om att i kommitteerna som tog fram MPR-II satt representanter för bildskärmstillverkare. Att detta styrt mätmetodens formgivning torde vara klart. Ett

[5] fd. MPR

[6] Stockholms Energi

[7] fd. Statshälsan

[8] Man står i begrepp att revidera en oanvänd Svensk standard till att motsvara MPR-II. Detta beräknas slutfört under 1995. Se sekt. 3.

[9] I mitt tycke är det givet att en struktur såsom nervtrådar, som är utvecklade för att leda elektrokemisk signal snabbt genom kroppen, också leder externt inducerade strömmar.

mycket *fundamentalt* antagande är just något som bildskärmstillverkare, även idag, hävdar, nämligen att skillnaderna mellan olika bildskärmar och bildskärmstyper är små. Att de alla bygger på samma teknologi och komponentval. Detta är de facto det enda och starkaste försvaret för att använda RMS medelvärden för att jäamföra skärmar med varandra. (Se vidare sektionen 6 om frukterna nedan.)

Detta konformitetsantagande rimmar illa med rapporterade upplevda skillnader mellan enstaka bildskärmsexemplar. Det finns även mätningar som uppvisar mycket markanta skillnader mellan exemplar av samma typ.

Det anses lätt att mäta RMS värdet på magnetflödet, det är i hög grad reproducerbart med hög noggrannhet. Toppvärden ses som besvärligare, i MPR-I utförde man detta med oscilloskop. Däremot är det svårare att mäta RMS värdet för de elektriska fälten på grund av den höga crestfaktorn[10], ofta har man crest-faktorer över 10. Det är allstå lätt att få överstyrda förstärkare. Tidsderivatan ses också som svår eftersom den kan variera inom mycket vida intervall vilket ställer till problem med förstärkare, mätspolen, och frekvensgången.

Ordföranden i MPR-II kommittén påtalar att valet av mätning av RMS effektivvärden var en i hög grad ekonomisk fråga. Det har inte att göra med biologisk relevans eller vad som teknisk möjligt.

Enligt Torbjörn Klittervall, Previa, som var med när MPR-II togs fram, var inte valet av effektivvärdet (rms) så lyckat. SSI och bildskärmstillverkarna IBM och HP var starka förespråkare för att övergå från tidsderivatan $\frac{d\vec{b}}{dt}$ till effektivvärdet B_{RMS}. Tyvärr ger inte ett RMS värde någon bra bild av den underliggande signalens utseende. Det uttrycktes även intresse att mäta högre upp i frekvens, men något stöd för detta fanns inte hos kommittén.

Enligt Yngve Hamnerius, Chalmers, måste Lars-Erik Paulsson gjort ett räknefel när värdena från MPR-I översattes till MPR-II. "Det var inte meningen att MPR-II skulle vara lättare att uppnå än MPR-I".

Men såvitt jag kan se utifrån rapporterna om MPR-I och MPR-II, så ser det ut som ett enkelt antagande om 2μs återsvep och en därpå följande omvandling mellan tidsmedelvärde och rms-medelvärde. Det hela rör sig antagligen om en mer fundamental orsak än ett enkelt räknefel.

[10] Kvoten mellan toppvärde och rms värde.

3 Standardisering

MPR-II har genom åren kopierats eller tolkats på olika sätt, bland annat har grupperingar som IEEE, EKMA, JEDA[11], skapat sina egna versioner.

Under våren 1994 framkom det frågetecken om det var vettigt. MPR-II är inte ens en standard, men betraktas som en de facto standard i praktiken. Påtryckningar från industri och standardiseringsorganisationer gjorde att man ånyo påbörjade arbetet. Det man bestämde sig för var att "revidera" en gammal Svensk standard SS 436 14 90. Denna standard från 1989 (890607) var en oanvänd skrivbordsprodukt, och det man beslutade sig för var att återanvända denna standards nummer. Det innebär en kraftig förenklad process, i annat fall hade man tvingats genom en lång process för att skapa en ny standard. I praktiken kastar man inkråmet i standarden och stoppar dit MPR-II mem mer formell.

Vi kommer alltså att få MPR-II som Svensk standard under 1995. Detta kommer att få långt gående konsekvenser eftersom det i sin tur leder till kopior över världen. EU har antagit en resolution som innebär bland annat innebär att den Svenska standarden bör antas till EU reglementet. Man förväntar sig även att IEC skall kopiera SS 436 14 90.

Praktiskt sett blir då MPR-II ett *obligatorium*. Det kommer dock inte vara ett krav att klara riktvärdena, det kommer även att finnas en öppen klass utan riktvärden men med samma mätmetod.

Detta är i mitt tycke högst olyckligt, inte att man äntligen får en standard på det lågfrekventa området, utan att den är så dåligt underbyggd.

4 Varför mäter man?

Vad är orsaken till att man mäter? Det enda rimliga svaret är att man mäter på grund av om-

[11] EKMA och JEDA är internationella tillverkningsorganisationer.

sorg om människans hälsa. Andra svar skulle kunna vara att det är intressant, att det är lönsamt att utföra mätuppdrag, att det är ett bra sätt att få tyst på folks klagomål. Men i grund och botten är det hela tiden de återkommande referenserna till att bildskärmsarbete ger mer klagomål på hälsan. Dessa ligger alltså inte bara till grund för att man en gång tog fram de mätmetoder som idag användes, utan även för att mätningarna i sig utföres idag.

> *Men om det nu är så att man mäter utan att kunna se en direkt koppling till vad människor klagar över, eller symptomens omfattning, om man inte kan korrelera symptom och mätresultat, borde man då inte stanna upp och fundera över om man inte borde mäta på ett annat sätt?*

Det är idag ett faktum att de flesta forskningsprojekt som utföres använder sig utav mätinstrument framtagna för att mäta enligt MPR-II normen. Det innebär de facto att man begränsat sitt sökande till den domän som dessa instrument mäter.

Slutsatsen blir att vi idag mäter för nöjes skull. Om man godtar grunden att vi försöker sörja för folks hälsa, så måste slutsatsen bli att vi inte mäter rätt. Om någon kritiserar denna slutsats är mitt försvar följande: *Om vi nu mäter rätt, bör vi kunna redovisa ett statistiskt säkerställt samband mellan våra mätresultat och subjektivt upplevda besvär.* Mäter man fel, kan man inte se ett direkt samband med mätresultaten, men man kan fortfarande se statistiska samband mellan tex. bildskärmsarbete och besvär.

Vi mäter fel.

5 Vad mäter man egentligen?

Det är inte lätt att förklara vad man egentligen mäter. Vi får inducerad ström i tre ortogonala spolar, vi förstärker och integrerar dessa, för att sedan filtrera ut ett frekvensintervall och därefter presentera ett rms värde sammanvägt över de tre uppmätta axlarna. Vi mäter alltså inte tidsvariationer, modulation, fasskillnader, vektorvariationer eller en lång rad andra faktorer. För skarpa inducerade derivator, har man ett frekvensinnehåll med signifikanta bidrag långt över 400KHz, det är tveksamt om spolarnas egenresonans ligger tillräckligt högt.

Den övre gränsfrekvensen på 400 KHz har fått stor spridning. MPR-I, MPR-II, TCO-92/95, SS 436 14 90, och de internationella kopiorna har alla låst sig till detta intervall. Frekvensbanden I&II valdes med utgångspunkt från spektralanalys av en typisk bildskärm 1985-86. Man hade då typiskt en bildfrekvens av 50Hz, och en upplösning av 25x80 tecken, eller PC:ns VGA 640x480. Linjefrekvensen var med andra ord låg. Idag är situationen radikalt förändrad, bildfrekvens på 80-100Hz är normalt, och en upplösning i normalfallet överstiger 640x480, vanligt är 1024x768, 1152x900 eller 1280x1024.

I och med ökade bild- och linje-frekvenser flyttar man övertonerna uppåt i frekvens och de får större separation. Det medför att färre övertoner kommer att rymmas iom frekvensbandet. Då vi förr fick med 20 övertoner får vi idag med 3-4 stycken. Mätningen visar inte längre ett värde som motsvarar det fysiska fältet.

Antagandet att bildfrekvensens och linjefrekvensens övertoner ligger inom band I (5 Hz-2 KHz) respektive band II (2 KHz-400 KHz) är inte längre korrekt.

6 Äpplen och päron

Vid ett samtal med ordföranden i MPR-II kommitten och nuvarande SEK-gruppen, framkom det att de är medvetna om att det finns en lång rad antaganden. Det viktigaste är att antagandet om att man med rms mätning fortfarande kan jämföra två bildskärmar med varandra vilar på att skärmarna är likvärdiga. OM alla faktorer i övrigt är lika, dvs om stig och falltiderna är lika, så bör man kunna jämföra två rms värden med varandra och därur hävda att förhållandet för derivatorna är detsamma som förhållandet mellan rms värdena. Detta resonemang är grundläggande och leder till att att en jämförelse mellan två bildskärmar endast är meningsfull när dessa är likvärdiga. Vad menas med likvärdiga? Räcker det med att säga att det är VGA upplösning? Nej, det gör det inte, man måste även ha med bildfrekvens. Faktum är att man måste driva skärmarna med samma drivkort för att verkligen kunna påstå att man jämför äpplen med äpplen.

Hur är det då med de rekommenderade gränsvärdena? De faller tyvärr platt till marken. Detta eftersom de representerar ett värde, men man jämför en lång rad olika skärmar mot detta. Man jämför äpplen och påron.

Det är alltså grundläggande felaktigt att jämföra alla olika bildskärmstyper mot ett gränsvärde.

7 Rekommenderade gränsvärden

Rekommenderade gränsvärden innebär att man sätter en gräns för vad som är acceptabelt. Men hur skall man avgöra vad som är acceptabelt? Varken MPR-II, TCO-95 eller SS 436 14 90 kan hävda någon vetenskaplig, medicinsk, pragmatisk eller empirisk grund för sina rekommenderade gränsvärden. De baseras endast, i slutändan, på mätningar av typiska skärmar på marknaden 1986, gjorda enligt MPR-I mätmetoden. Det som sedan hände var att man räknade om dessa värden när MPR-II fastslogs. TCO i sin tur räknade återigen om när de justerade mätavstånden, genom att minska avståndet ville man göra kraven strängare än motsvarande MPR-II. Men i grund och botten är dessa gränsvärden rent pragmatiskt tagna.

Det vore skillnad om de baserades på mätningar på skärmar som uppleves som bra, och man samtidigt kunde mäta skärmar som upplevs som dåliga, och därur dra en klar gräns. Så är icke fallet, och de rekommenderade gränsvärdena är mer eller mindre tagna ur luften.

De rekommenderade gränsvärdena saknar reellt samband med den faktor som de skapades för, nämligen upplevda besvär av bildskärmen.

8 Vad borde man mäta?

Enligt Torbjörn Klittervall "får man nog acceptera TCO-95, för att få underlag för att mäta högre frekvenser måste man noga mäta upp ett antal bildskärmar och peka på detta underlag. Därefter återstår ett stort och komplext jobb att kartlägga mekanismerna."

1974 (!) föreslog IVA i rapporten IVA-210 följande behov för utveckling av mätmetoder:

- Det är nödvändigt att prioritera forskning och utveckling av mätteknik för att erhålla en god grund för övrig forskning inom området.
- Makroskopiska elektromagnetiska egenskaper av biologisk vävnad behöver undersökas vidare, speciellt dess frekvens och amplitudberoende.
- Riskanalys och dosberäkningar kräver kunskap om störda närfält och deras distribution runt människokroppen i aktuell miljö. Simuleringsmetoder och mätmetoder för sådan fältfördelning bör utvecklas.
- Bland de mättekniker som bör utvecklas eller förbättras finns små närfältsprobar som är lätta att hantera, som inte är känsliga för polarisation och brett frekvensområde. Dosimetrar för mätning på personal i arbetsmiljöer med höga fält är ett annat exempel.

Vi står på samma ställe idag, över 20 år senare. Vi måste börja.

Appendix

A Medelvärdesbildning

Låt oss betrakta en fysiskt realiserbar signal $s(t)$.

A.1 Likriktat medelvärde

Ett likriktat medelvärde av s beräknas enligt

$$s_{\mathrm{AV}} = \frac{\int_a^{a+T} |s(t)| dt}{T} \tag{2}$$

där T är mättidens längd med start vid tidpunkten a. Speciellt blir det för en sinusvåg med amplitud A ett likriktat medelvärde av $\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} A \sin \omega t d\omega t = \frac{2A}{\pi}$.

A.2 RMS – Root-mean-squared

RMS värdet av $s(t)$ beräknas enligt

$$s_{\mathrm{RMS}} = \sqrt{\frac{\int_a^{a+T} s^2(t) dt}{T}} \tag{3}$$

där T är mättidens längd med start vid tidpunkten a. Speciellt blir det för en sinusvåg med amplitud A ett rms-medelvärde av $\sqrt{\frac{\int_0^{\pi} A^2 \sin^2 \omega t^2 d\omega t}{\pi}} = \frac{A}{\sqrt{2}}$.

A.3 Topp-värden

Det högsta och lägsta värdet på signalen under mättiden kallas för topp värden. De betecknas för s_{p+} respektive s_{p-}.

$$s_{p+} = \max s(t) \tag{4}$$

$$s_{p-} = \min s(t) \tag{5}$$

Topp-till-topp värdet är då

$$s_{pp} = s_{p+} - s_{p-} \tag{6}$$

Speciellt blir det för en sinusvåg med amplitud A: $s_{pp} = 2s_p$, där $s_p = |s_{p+}| = |s_{p-}|$.

A.4 $\mathfrak{F}$ourier-serie

En periodisk funktion f med period T definierad i intervallet $[-T/2, +T/2]$ kan skrivas som en fourierserie:

$$f(x) = C_0/2 + \sum_1^{\infty} C_n \cos n\omega_0 x + \phi_n \tag{7}$$

B Pulståg

Låt en puls definieras av $g(t)$ och pulståget $y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t-nT) = [\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t-NT)] * g(t)$. $\mathfrak{F}$ouriertransformen av $y(t)$ blir då $Y(f) = \frac{1}{T}[\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta[f-nF]G(f)$, $F = \frac{1}{T}$, och dess $\mathfrak{F}$ourierserieutveckling blir $y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_n e^{in\omega_0 t}$, $D_n = \frac{1}{T}G(nF)$, och $D_0 = \frac{1}{T}\int_0^T g(t)dt = \frac{G(0)}{T}$.

Medelenergin av ett pulståg är $\frac{E}{T}$ där

$$E = \int_a^{a+T} g^2(t)dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |G(u)|^2 \, du \tag{8}$$

där $G(u) = \mathfrak{F}g(t)$.

C Särstudie av Sågtandsvåg

Låt oss betraka en sågtand B med amplitud A, stigtid t_s och falltid t_f. Låt maximum A inträffa vid tidpunkten 0.

```
   /|   /|   /|   /|   /|
  / |  / |  / |  / |  / |
 /  | /  | /  | /  | /  |
/   |/   |/   |/   |/   |
```

Medelvärdet blir $B_{\text{AV}} = A/2$ och rms-medelvärdet blir

$$B_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\int_{-t_s}^{t_f} B^2(t)dt}{t_s + t_f}} = A/\sqrt{3}. \tag{9}$$

Observera att både medelvärdet och rms värdet är *oberoende* av stig och falltid!

Sågtandsvågens medelenergiinnehåll blir

$$\begin{aligned} \frac{E}{T} &= B_{\text{RMS}}{}^2 = \frac{C_o^2}{4} + \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{+\infty} C_n^2 \\ &= \frac{C_o^2}{4} + B_{\text{AV}} \frac{T^2}{\pi^2 t_s t_f} \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2} \left| \sin \frac{n\pi t_s}{T} \right| \end{aligned} \tag{10}$$

Sågtandsvågens derivata är

$$\frac{dB}{dt} = \begin{cases} \frac{A}{t_s} & \text{if } -t_s < t < 0, \\ -\frac{A}{t_f} & \text{if } 0 < t < t_f. \end{cases} \tag{11}$$

Derivatans topp-till-topp värde är enligt ekvation 6

$$B'_{tt} = A(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_f}) \tag{12}$$

vilken alltså domineras av bidraget av t_f.

Derivatans likriktade medelvärde blir enligt ekvation 2

$$B'_{\text{AV}} = \frac{2A}{(t_s + t_f)} = \frac{2A}{T} \tag{13}$$

Derivatans rms-medelvärde blir enligt ekvation 3

$$B'_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_s} (\frac{1}{t_s})^2 dt + \int_{t_s}^{T} (\frac{1}{t_f})^2 dt}{T}} \tag{14}$$

.

D Mätning enligt MPR-II

Den i mätspolen inducerade strömmen motsvarar tidsderivatan av magnetflödets magnitud. Denna signal förstärkes och integreras sedan för att ge ett mått på magnetflödet. Därefter filterar man med ett bandpassfilter. Man beräknaar sedan effektivvärdet på den filtrerade signalen. Detta presenteras sedan som amplituden på den magnetiska flödestätheten för frekvensbandet specificerat av det använda filtret.

Specifikation av filter θ för band I och II

Frekvens	Dämpning	Frekvens	Dämpning
$< 5Hz$	$>$ 80dB/dekad	$<$ 2KHz	$>$ 80dB/d
5Hz	3dB	2KHz	3dB
100Hz	0dB	30KHz	0dB
2KHz	3dB	400KHz	3dB
$>$ 2KHz	$>$ 40dB/dekad	$>$ 400KHz	$>$ 40dB/d

$\mathfrak{F}$ouriertransformen av detta filter är $\Theta = \mathfrak{F}\theta$. Om vi multiplicerar i $\mathfrak{F}$ourierdomänen så motsvarar det en faltning i tidsdomänen, det vill säga vi kan få den filtrerade signalen genom

$$B_\theta = \mathfrak{F}^{-1}(\Theta \mathfrak{F} B) \tag{15}$$

Vilket i sin tur medför att vi enkelt kan utnyttja $\mathfrak{F}$ourierserieutvecklingen av vår signal och multiplicera den med filtret, detta låter sig göras för hand eftersom det är ett relativt fåtal koefficienter som faller inom filtrets passband. Med andra ord, vi kan beräkna hur stor del av en signals energi som går förlorad i filtreringen.

Man kan enkelt räkna på hur stort fel man får på grund av att man försummar alla övertoner över en viss frekvens övertoner. Detta kan sägas utgöra en grov övre gräns för det man förlorar i spolar, förstärkare, samt filter. För B kommer redan ett fåtal övertoner att i hög grad approximera sågtandsvågen. Ju större kvot $k = s_s/t_f$ man har desto fler övertoner krävs för att beskriva återsvepet. Om vi antar en gammal långsam skärm får vi ett teoretiskt fel på under en promille för B_{RMS}. För en riktigt modern snabb skärm kan vi få ett fel på närmare en procent för B_{RMS}.

Om vi gör motsvarande sak för tidsderivatan, den som verkligen induceras, så ser vi ett fel på dryga två procent för den gamla skärmen och 65 procent för den nya! Vad detta innebär är att spolar och förstärkare måste vara bredbandiga för att klara de inducerade strömmarna utan att förvanska dessa.

E Derivans toppvärde respektive integrerat medelvärde

Låt oss betrakta en enkel skiss över signalerna:

```
__________ _____________________ _ Positiv flank
---------| |-------------------| | Medelvärde
         | |                   | |
         | |                   | |
         | |                   | |
         |_|                   |_| Negativ flank
         0 t                   t
   ^       f                    s
  B  .
      .
    .   .
--.---------.------------- B
.          .               RMS
```

Som synes av ovanstående skiss säger inte medelvärdet något om toppvärdet på derivatan. Derivatan beror som ekvation 11, och toppvärdet beror alltså huvudsakligen på t_f, medan RMS värdet endast beror på amplituden på fältet.

Man kan rekonstruera den beräkning som Paulsson, SSI, torde ha utfört vid övergången från MPR-I till MPR-II. Om vi vet derivatans topp-till-topp värde enligt ekvation 12 och dessutom återsvepets tid t_f så kan vi räkna ut amplituden A på B, då faller givetvis också B_{RMS} ut. Om vi tar 25mT/s toppvärde och 50nT, mätt i sfärisk geometri och i Band II, ur MPR-P 1987:2. Vi kan verifiera rimligheten på t_f genom $A = \int_0^{t_f} B'_{tt}dt = B'_{tt}t_f$ dvs 50nT/25mT/s= 2μs vilket är rimligt. Vi kan alltså ta 50nT som $B_{tt} = A$, och vi får direkt $B_{\text{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{3}}1.11 = 33$nT, där vi utnyttjat ekv. 9. Faktorn 1.11 kommer från förhållandet mellan sinustrimmat mätinstrument och sant rms-värdesvisande instrument. Därefter får man korrigera för ändringen av geometri, vi har en radie på 0.65m, en vinkel på 22.5^o samt ett nytt värde på den tangerande katetens höjd på 0.3m.

```
         .
 r1     -.  r2
    -     . | 0.3m
 -         .|
22.5__________
    0.65m
```

Beräkningen blir $R_I = 0,65$, $r_{II} = \sqrt{0,65^2 + 0,3^2}$, och $\frac{B_I}{B_{II}} = \frac{1/r_I^3}{1/r_{II}^3} = 1,336$, dvs vi får 33nT/1,336 vilket blir 25nT som då blev MPR-II kravet på 50cm för Band II. Detta ligger sedan som grund för TCO-92.

Att mätpunkten på 30cm saknas i MPR-II var enligt Hjalmar Bondestam på Combinova ett misstag.

När vi går upp i bildfrekvens, tex. med syfte att minska flimmer, eller ökar upplösningen, minskar vi stig- och falltiderna, inte bara för det bildfrekventa fältet, utan även för de linjefrekventa. Detta innebär för konstant amplitud på fältet, ett oförändrat rms värde, men proportionellt ökad derivata och därigenom inducerad ström.

Det är inte svårt att inse att en bildskärmstillverkare vill mäta rms-värde och inte derivator!