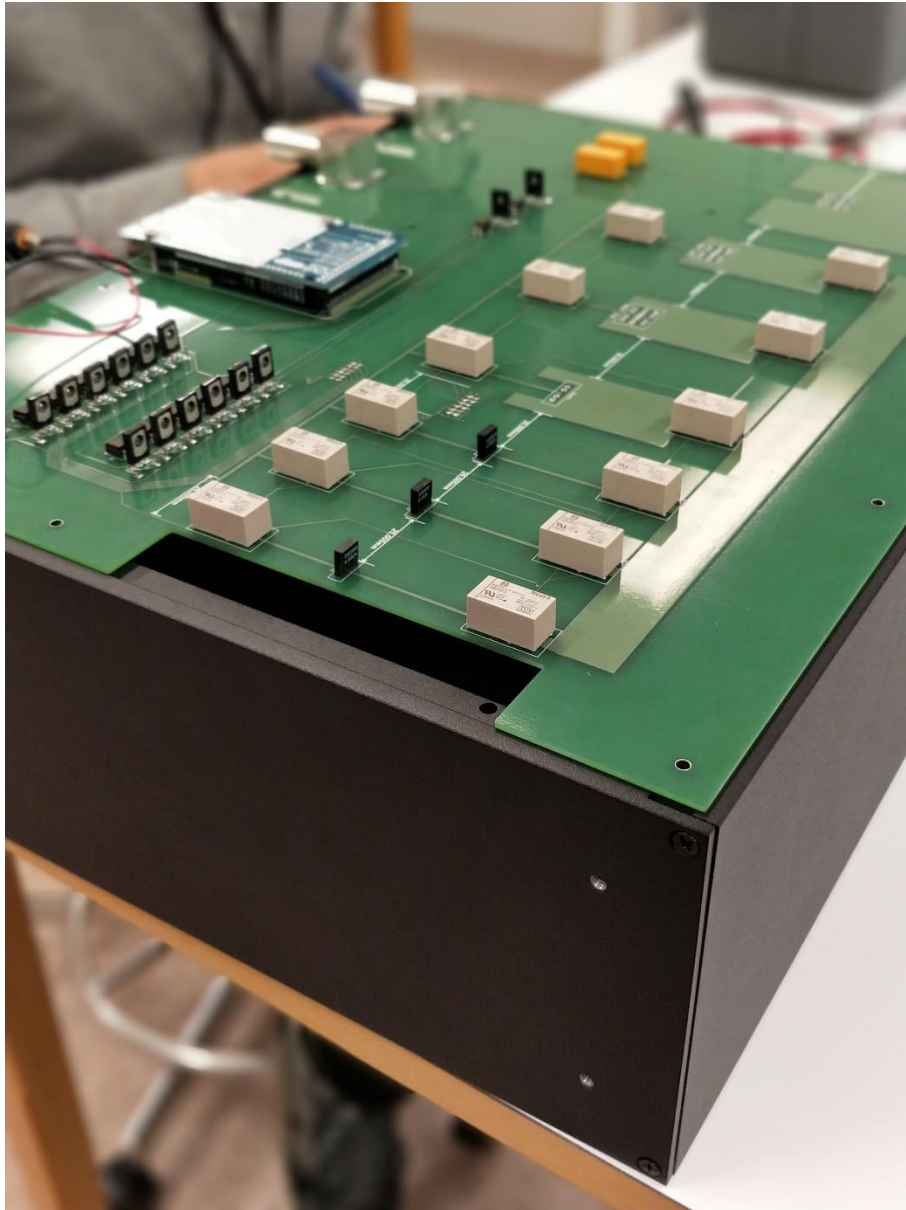




CHALMERS



Strömshuntskanner

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Mekanik

Jonas Lundberg, Erik Jones

Förord:

Detta examensarbete, omfattande 15 högskolepoäng, är utfört på RISE och markerar slutet på det treåriga högskoleingenjörsprogrammet Mekatronik på Chalmers Tekniska Högskola, arbetet är skrivet för institutionen Signaler och System.

Först och främst vill vi tacka vår handledare Karl-Erik Rydler som gett oss möjligheten att få utföra detta examensarbete på uppdrag åt RISE och agerat som mentor för oss under hela processen. Vidare vill vi tacka alla de andra på RISE som har lotsat oss i frågor under arbetsgången, däribland särskilt Valter Taresso, Tobias Bergsten och Ove Gunnarsson.

På skolan vill vi tacka Göran Hult som har hjälp både med tekniska frågor såväl som vid hjälp med val av programvara.

Sammanfattning:

Målet i arbetet var att designa och konstruera en strömshuntskanner på uppdrag av RISE för att automatisera kalibrering av strömkalibratorer för likström och växelström. Då kalibrering av strömstyrka sker vid flera olika nivåer behövs det även flera shuntkopplingar dimensionerade efter varierande strömstyrkor, detta leder till långa och omständliga kalibreringsprocesser med många omkopplingar; skannern är tänkt att eliminera detta element genom automatiska datorstyrda omkopplingar. De önskade kalibreringsströmmarna ska ställas in via datoranslutning.

Vidare råder att shuntkopplingarna har olika egenskaper för likström och för växelström. Därför undersöks ifall shuntarna kan konstrueras på ett sådant sätt att de ger lika goda mätresultat för likström som för växelström. Eller om en annan lösning, med shuntar för specifikt likström eller växelström, måste beaktas.

Resultatet av arbetet är en prototyp på en ny generations strömshuntar och en fungerande skanner utrustad med motstånd för kalibrering av låga strömmar samt styrelektronik och tillhörande mjukvara för automatiskt utföra kalibreringsarbetet. Det återstår dock en del tester att utföra innan man med säkerhet vet om skannern kommer kunna uppfylla alla de krav som ursprungligen ställts på den.

Abstract:

The goal of this job was to design and construct a Current Shunt Scanner for the company RISE to automate the calibration process of DC and AC for current calibrators. As calibration occurs at several different current levels, there also has to be several current shunts dimensioned for the varying current intensities. This results in extensive and time consuming calibration processes; the scanner is supposed to eliminate this element through automatic computer-controlled switching.

Furthermore, the shunts can differ in measured voltage depending on if the measurement is conducted with DC or AC, dependent on the fact that electrical current behaves differently for DC and AC. Therefor it is investigated whether the shunts can be constructed in such a way that they provide desirable measurement results in both cases, or if another solution must be considered.

The result of this project is a prototype for a new generation of current shunts and a functioning scanner equipped with resistances for calibration of low current and controlling circuitry accompanied by software for automatic calibration. There is however still some testing to do before one can certainly say if the scanner will meet the originally set demands.

Innehållsförteckning

Förkortningar

1. Inledning	8
1.1 Bakgrund	8
1.2 Syfte	8
1.3 Avgränsningar	8
1.4 Precisering av frågeställning	9
2. Teoretisk bakgrund	10
2.1 Mätmetod samt anslutningar	10
2.2 Effekt	11
2.3 Impedans	11
3. Metod	13
3.1 Viktiga punkter och kriterier	13
3.2 En ej ideal resistor	13
3.3 LCR-meter	14
3.4 Ekvivalent induktans	15
3.5 Kompensera för mätfel	16
3.6 Shuntkoppling kontra motstånd	17
4. Design och uppbyggnad av strömshuntskanner	18
4.1 Shuntens design och utformning	18
4.1.1 Induktansfenomenet	18
4.1.2 Resistorval	19
4.1.3 Effektutveckling och kylning	21
4.2 Styrkrets	22
4.2.1 Reläer	23
4.2.2 Mikrokontroller	23
4.2.2.1 Programmering av mikrokontroller	24
4.2.3 LabVIEW	25
4.2.4 Programmering av mikrokontroller	27
5. Resultat	28
5.1 Strömkalibratorer	28
5.2 Shuntar	28
5.3 Skanner, en prototyp	28
5.4 CE-märkning	29
5.5 VFR 321723	30

6. Slutsatser/Diskussion	31
6.1 Reflektioner kring resultat samt arbetsgång	31
6.2 Arbetets inverkan på allmänheten	31
Referenser	32
Bilagor	33

Förkortningar:

PCSS2 – Programmable Current Shunt Scanner 2

Shunt – En eller flera resistorer i parallell koppling.

PCB - Printed Circuit Board

CAD – Computer Assisted Design

VI – Virtual Instrument

VISA – Virtual Instrument Software Architecture

EMS – Elektromotorisk Spänning

PPM – Parts Per Million

PPB – Parts Per Billion

SMD – Surface Mounted Device

AC – Alternating Current

DC – Direct Current

1. Inledning

I detta stycke kommer det att ges en kort introduktion till arbetets syfte och utförande.

1.1 Bakgrund:

Arbetet är utfört åt den Svenska Riksmätplatsen för elektriska storheter som finns inom forskningsinstitutet RISE Research Institutes of Sweden, enheten för Mätteknik. Vid Riksmätplatsen finns primärnormaler för alla elektriska storheter, baserade på definitionerna i SI-systemet. Med dessa normaler som referens utförs kalibreringar på högsta noggrannhetsnivå av många olika mätinstrument åt industri och samhälle.

Kalibrering av strömkalibratorer är en av alla tjänster RISE erbjuder sina kunder. Detta är en mycket tidskrävande process och kräver en hög grad av övervakning. I dagsläget görs kalibrering av AC och DC separat genom olika metoder som båda tar lång tid, arbetet innefattar en mängd manuella omkopplingar mellan olika så kallade strömshuntar och mätinstrument. Dessutom kräver kalibrering av AC att kalibrering av DC redan är utförd vilket ytterligare förlänger kalibreringsprocessen.

Vid kalibrering av strömnivå läggs då en ström över en strömshunt, resistorer i parallellkoppling, av känd storlek. Genom att sedan mäta spänningsfallet över shuntkretsen med en noggrann spänningsmätare går det att räkna ut strömmen. Det kräver dock ett mycket stabilt resistansvärde som på RISE realiseras med referensshuntar som i dagsläget är mycket stora och dyra. Dessa shuntar är utformade för att minimera effektutveckling i varje resistans som sitter i kretsen för att eliminera resistansernas temperaturberoende. Dessutom är de utvalda och testade för att ha ett stabilt resistansvärde som inte driver ifrån ursprungsvärdet över tid. Genom att parallellkoppla så pass många motstånd uppnås även en bra frekvensgång för strömshuntens. Med detta menas att shuntens AC-karakteristik över det intressanta frekvensområdet (10 kHz – ca. 200 kHz) hålls konstant

För ca. 20 år sedan togs det fram en strömshuntskanner som kan liknas med den som är konstruerad i detta arbete, dock är den inte kapabel till att göra de mätningar som önskas av den nya, och används i dagsläget bara för att hjälpa till med kalibrering av AC-ström.

1.2 Syfte:

Syftet med arbetet är alltså att göra kalibreringsarbetet för mätteknikerna på RISE enklare och framförallt mindre tidskrävande. Detta är då tänkt att genomföras med denna strömshuntskanner som förhoppningsvis skall kunna automatisera stora delar av kalibreringsarbetet. För att kalibrera DC-ström görs i dagsläget en mängd mätningar vid olika ström-områden på olika strömshuntar manuellt, med hjälp av de tidigare nämnda referensshuntarna. Mellan dessa olika områden krävs då fysiska omkopplingar mellan shuntarna. I och med detta blir arbetet mycket tidskrävande och personen som utför arbetet blir låst med kalibreringen en hel arbetsdag.

För att sedan kalibrera AC-ström används en metod som kallas för AC/DC-transfer. Denna process är i dagsläget halvt automatiserad men är omständlig och tar ändå lång tid att utföra. Metoden bygger dessutom på att DC-strömmen redan är kalibrerad då den innebär att man med motstånd vars AC/DC-differens (differensen mellan spänningsfallet för AC och DC) är känd kan beräkna AC-strömmen genom att mäta spänningsfallet över dessa motstånd först med DC, därefter med AC och till sist med DC igen, fast med omvänd polaritet. På så vis är det endast reaktansen som blir betydelsefull för att beräkna på strömmens storlek.

Om möjligt vill man nu kunna göra så kallade direktmätningar på både AC och DC, detta innebär att man helt enkelt lägger strömmen som skall kalibreras över ett motstånd och mäter spänningsfallet

som utvecklas direkt, därefter använder man sig av Ohms lag för att enkelt ta fram värdet på strömmen.

Förhoppningen är att framställa en skanner som per automatik kan skifta mellan olika strömshuntar för olika ström-områden. Man vill även ta fram en ny typ av strömshuntar då det inte är ekonomiskt hållbart att bygga upp en sådan här skanner med de redan existerade referensshuntarna.

Skannern skall automatisera kalibreringen av kalibratorer efter en önskad programsekvens. Sekvensen skickas till skannern från en dator och ställs efter önskemål av användaren in i programmet LabVIEW. Denna automatisering skulle medföra att det totala kalibreringsarbetet skulle gå att utföra på mindre än en tredjedel av tiden som dagens kalibreringsarbete kräver.

Det har även uttryckts ett intresse av mätinstitut från andra länder att köpa en strömshuntskanner av detta slag. Med ökad produktion ökar vikten av en enkel och kostnadseffektiv konstruktion på skannern.

1.3 Avgränsningar:

Målet är att designa och konstruera själva skannern och de shuntkretsar som finns däri, samt dimensionera dessa efter de strömnivåer som ska kalibreras. För att automatisk koppla om mot rätt shuntkrets krävs någon form av relästyrning som måste utformas med lämplig styrkrets samt så behöver ett program skrivas i LabVIEW för kommunikation med skannern. Då användaren ställer in en strömstyrka ska skannern koppla sig mot en shuntkrets som är dimensionerad på så vis att ett spänningsfall på antingen 1 V eller 100 mV ska utvecklas vid nominell ström.

Skannern ska vara konstruerad för att vara så bra som den kan vara fram till dess anslutningspunkter, att säkerställa att kringliggande utrustning, så som mätinstrument och miljön, avseende temperatur, luftfuktighet m.m., är av tillräckligt bra standard faller på handhavaren. Viktigt att notera är att längden på kablarna fram till skannerns in och utgång är intressant att minimera, därav är det önskvärt att kunna göra skannern så liten som möjligt för att vara enkel att hantera.

Alltså är det design och konstruktion som är fokus för denna rapport och hur skannern används vid själva kalibreringsarbetet kommer endast mycket kort att beskrivas.

1.4 Precisering av frågeställning:

- Skannern ska styras via datoranslutning och bör i mätsammanhang vara plug-n-play. Undersök vilken anslutningsform som är föredra för en så enkel datorkommunikation som möjligt.
- För att skannern ska kunna hantera en variation av olika lik- och växelströmmar krävs det flera olika dimensionerade och, eventuellt, designade shuntkretsar. Går det här att hitta en gemensam konstruktion som ger godtyckliga mätresultat för såväl likström som växelström?
- Eftersom att produkten möjligtvis skall säljas bör skannern CE-märkas. Hur bör layout av strömtillförsel byggas upp för att på enklast vis realisera detta?

2. Teoretisk bakgrund

I detta avsnitt kommer den bakomliggande teorin för arbetet kort beskrivas. Detta exjobb har varit till stor del teoretisk och mycket fakta behövs för att förstå helheten bakom kalibreringsarbetet. Här kommer de mest väsentliga delarna behandlas för att man skall kunna förstå grunderna för vad som är viktigt vid konstruktionen. Vid designen har ett fåtal faktorer tagits hänsyn till som inte beskrivs genomgående i rapporten för att vi skall hålla oss inom avgränsningarna som är satta för arbetet.

2.1 Mätmetod samt anslutningar:

En strömkalibrator är ett instrument som används som referens för olika strömstyrkor, denna referens nyttjas för att kalibrera multimetrar och använda mätverktyg. Men även de bästa strömkalibratorer måste ibland kalibreras för att försäkra noggrannheten i dess värden.

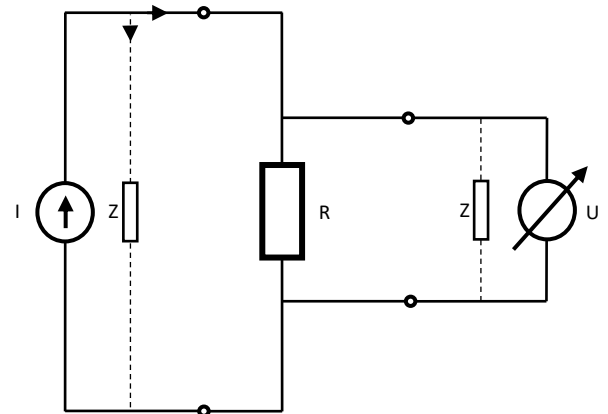
Grundprincipen för kalibrering av strömkalibratorer innebär att det placeras en ström över ett motstånd, av känd storlek, därefter mäts spänningsfallet som sker över motståndet, se figur 1. Från det uppmätta spänningsfallet och det kända motståndet kan man sedan härleda strömmens storlek enligt Ohms lag och justera värdet för kalibratoren efter önskemål.

Vid mer exakta mätningar av motstånd med låg resistans tillämpas fyrterminell mätning över motståndet.

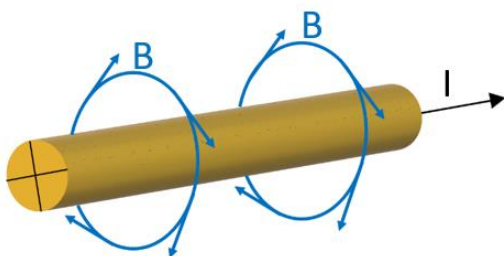
Fyrterminell mätning innebär att ström och spänning separeras från varandra och går genom skilda kablar med individuell nolla. På detta vis kringgås de spänningsfall som annars utvecklas i kablarna fram till mätobjektet och eliminerar dessa mätosäkerheter.

Vid ledning av ström i en ledare utvecklas ett magnetfält som verkar moturs kring ledaren i förhållande till strömriktningen (fig. 2). Detta magnetfält kan bidra till induktanser i kretsen. Så för att säkerställa att det vi mäter på är den pålagda strömmen och inget annat måste de utvecklade magnetfältens inverkan minimeras.

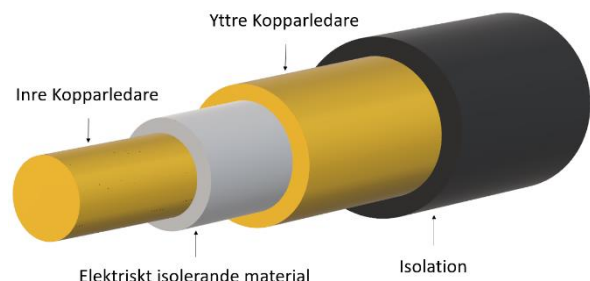
För att minimera mätosäkerheten nyttjas därför lämpligen tvinnade kabelpar eller koaxiella kablar (fig. 3) där strömmen efter mätobjektet leds tillbaka jämsides den pålagda strömmen fram till mätobjektet. Detta resulterar i att det totala magnetfältet elimineras med hjälp av den motriktade strömmens egna magnetfält.



Figur 1. Fyrterminell mätning.



Figur 2. Magnetfält kring ledare i förhållande till strömriktning.

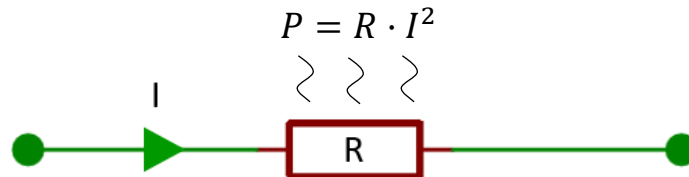


Figur 3. Koaxialledare.

2.2 Effekt:

Då en ström går genom ett motstånd så sker det en effektutveckling enligt sambandet $P = U \cdot I$, eller $P = R \cdot I^2$. En effektutveckling är den mängd energi som omvandlas från en form till en annan. I detta sammanhang omvandlas den elektriska energin till värme. (Fig 4.)

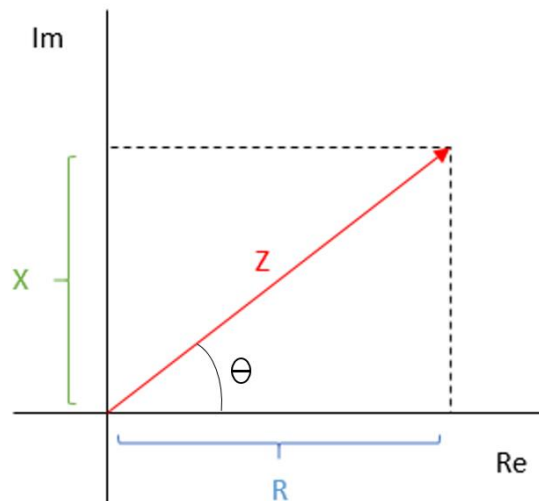
Resistorernas storlek är uppmätt vid rumstemperatur och är som alla resistanser beroende av temperatur, därför kan motståndens värde driva från sitt ursprungsvärde vid temperaturändringar, eller i värsta fall bli obrukbara. Det är därför viktigt att hålla nere effektutveckling över mätobjekten eftersom ett förändrat resistansvärde innebär att direkt mätning av strömmen vid både AC och DC inte går att utföra.



Figur 4. Ett motstånd med genomgående ström.

2.3 Impedans:

Impedans är det totala motståndet som uppstår över en resistor då en växelström flödar genom den. Impedansen är absolutbeloppet av en resistors resistans samt dess reaktans. Resistansen och reaktansen kan beskrivas som två, i förhållande till varandra, vinkelräta storheter.



Figur 5. Diagram över resistans och reaktans, och deras förhållande till varandra.

Förhållandet mellan reaktans, resistans och impedans illustreras enklast i ett diagram (fig. 5) med en realaxel som beskriver resistansstorleken och en imaginäraxel för den reaktiva delen. Hypotenusan visar den totala impedansen och vinkeln Θ beskriver storleksförhållandet mellan resistansen och reaktansen.

Om den imaginära delen är positiv så är kretsen induktiv och på motsatt sätt ger en negativ imaginärdel en kapacitiv krets. En reaktiv krets kan bestå av både induktiva och induktiva element, det är då den med störst inverkan som bestämmer om den blir induktiv eller kapacitiv. Den exakta storleken på reaktansen kan variera med växelströmmens frekvens samt resistorernas storlek.

En rent konduktiv komponents storlek beskrivs enligt: $Z = \frac{1}{j\omega C}$

En rent induktiv komponents storlek beskrivs enligt: $Z = j\omega L$

I verkligheten innehåller dock komponenter som spolar, resistorer och kondensatorer alla var för sig en viss utsträckning av de tre storheterna resistans, induktans och kapacitans. Den totala impedansen varierar beroende på deras förhållande tillvarandra samt till vinkelfrekvens hos den pålagda strömmen. En spole kan alltså ha kapacitiva egenskaper, men så länge som de induktiva är större än de kapacitiva så är spolen induktiv. I vilken utsträckning de olika egenskaperna påverkar varandra kommer att undersökas längre fram i rapporten.

3. Metod

Under detta avsnitt kommer tankegång och utförande att diskuteras för att beskriva hur arbetet gällande designen av skannern har fortgått. Till att börja med diskuteras ett par viktiga punkter att ha i åtanke vid hela konstruktionens gång.

3.1 Viktiga punkter och kriterier:

För att under arbetets gång kunna dra slutsatser om vilken information som är väsentlig från de kommande uträkningarna är det viktigt att först sammanställa vilka kriterier som ställs på mätningarna.

- Strömkalibreringarna kommer att utföras över området $100\ \mu\text{A}$ upp till eventuellt $20\ \text{A}$.
- Spänningsfallet som mäts upp över motstånden ska vara av storleken $100\ \text{mV}$ vid AC och $1\ \text{V}$ DC
- Strömkalibreringarna skall hålla en noggrannhetsgrad på PPM-nivå, dvs parts per million.
- Kalibreringarna ska utföras över ett frekvensområde omkring $10\ \text{kHz}$ upp till $200\ \text{kHz}$.

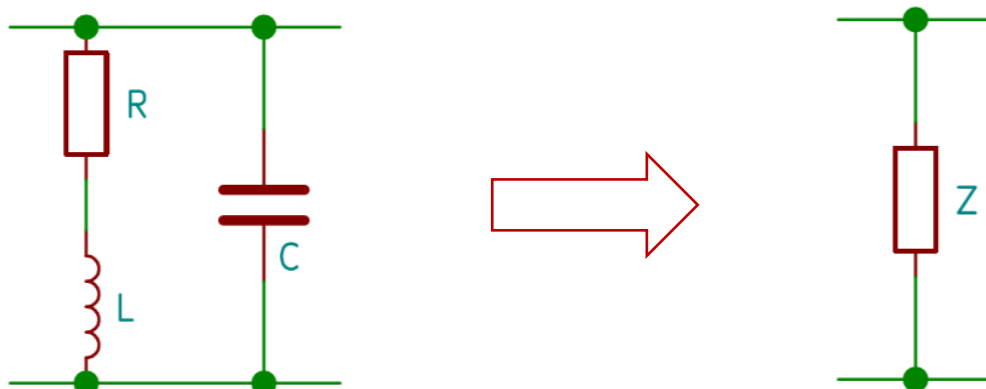
3.2 En ej ideal resistor:

Samtliga uträkningar finnes i rapportens bilaga.

Den huvudsakliga fokusen är att designa en skanner med shuntkopplingar inuti för så pass exakta mätningar som möjligt. För att utföra dessa mätningar med så hög precision som möjligt är det viktigt att förstå exakt hur ett motstånd beter sig då en växelström placeras över det.

När en växelström går genom en ledare kommer denna att agera som en induktiv spole, detta innebär att ledaren till och från resistorn kan ses som en spole i serie till resistorn i kopplingen. Mellan de två sidorna om resistorn kommer det att utvecklas en kapacitans, detta kan beskrivas som en kondensator i parallell koppling mot resistorn.

En mer realistisk modell för en resistor vid växelström bör därav utformas som illustrerat i figur 6.



Figur 6. Beskrivande bild för hur samtliga komponenter i en krets kan beskrivas som en impedans.

För att gå vidare och se exakt hur stor inverkan de olika komponenterna har på varandra behöver vi se till kretsens impedans.

$$Z = R \frac{1 + j \left(\frac{\omega L}{R} - \omega RC - \frac{\omega^3 L^2 C}{R} \right)}{1 - \omega^2 2LC + \omega^2 R^2 C^2 + \omega^4 L^2 C^2}$$

I ekvationen är den totala impedansen uttryckt med separerad real- och imaginärdel, genom att se närmare på imaginärdelen kan följande slutsatser om hur kretsen beter sig dras:

1. Induktansen har störst inverkan på låga motstånd enligt $\frac{\omega L}{R}$
2. Kapacitansen har som störst inverkan vid stora motstånd enligt ωRC
3. L och C tar ut varandra då den totala imaginärdelen $j \left(\frac{\omega L}{R} - \omega RC - \frac{\omega^3 L^2 C}{R} \right) = 0$. Det vill säga
då $R = \sqrt{\frac{L}{C} - \omega^2 C}$

3.3 LCR-meter

Vid mätning av impedans över en resistor har en Keysight E4980A LCR-mätare nyttjats. Detta instrument har inställningar för resistor i serie med en induktans, RS-LS, samt för resistor i parallell koppling med en kondensator, RP-CP. Som illustreras i bilden för en ej ideal resistor hamnar spolen i serie med resistorn, därför nyttjas inställningen RS-LS för att mäta upp induktansen.

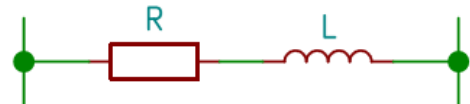
Instrumentet använder sig alltså av en annan modell än den ovan nämnda (fig. 6) då den utför sin mätning över resistorkopplingen. Nämligen enbart en spole i serie med ett motstånd (fig. 7).

Den illustrerade kretsens impedans kan beskrivas enligt följande:

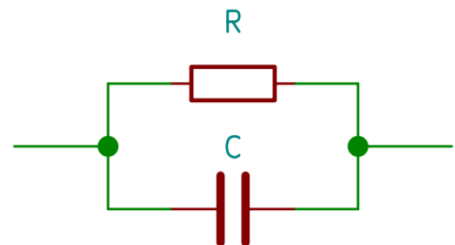
$$Z = R \left(1 + j \frac{\omega L}{R} \right)$$

För att utföra en mätning på kapacitansen nyttjas en modell av ett motstånd i parallell koppling med en kondensator (fig. 8). Impedansen beskrivs enligt följande:

$$Z = R \left(\frac{1 - j\omega RC}{1 + \omega^2 R^2 C^2} \right)$$



Figur 7. Modell för hur LCR-metern tolkar kretsen vid RS-LS.



Figur 8. Modell för hur LCR-metern tolkar kretsen vid RP-CP.

Då mätområdet är 100 μA upp till 20 A och spänningsfallet mäts på 1 V vid DC och 100 mV vid AC, innebär detta att motståndens storlek kommer att hamna på området 10 m Ω upp till 10 k Ω . Vid de större impedanserna, när det gäller AC, kommer reaktansen att ha en, relativt, lägre inverkan än vid de små. Som påvisat under delkapitel "En ej ideal resistor" är det induktansen som har störst inverkan när resistansen är låg. Det är av denna orsak intressant att se närmare på mätningarna av induktansen. Gällande stora resistansvärden och kapacitans är det också önskvärt att minimera reaktansens verkan på det totala motståndet. Med stora resistanser menas motstånd större än ca. 100 ohm och mindre motstånd är motstånd mindre än ca. 10 ohm, området där mellan är ungefär där induktans och kapacitans tar ut varandra.

3.4 Ekvivalent induktans

Vi har nu tre uttryck för den totala impedansen över ett motstånd. Impedansens storlek är här den samma i alla tre fallen, även om den är uttryckt på olika sätt. Som tidigare nämnt är vi framförallt intresserade av induktansen vid dessa små resistansområden och kommer därför att fokusera på modellen för LS-RS och modellen av en ej ideal resistor.

Eftersom impedanserna för de två modellerna ska vara densamma kan de två uttrycken ställas mot varandra enligt följande:

$$R \frac{1 + j \left(\frac{\omega L}{R} - \omega R^2 C - \frac{\omega^3 L^2 C}{R} \right)}{1 - \omega^2 2LC + \omega^2 R^2 C^2 + \omega^4 L^2 C^2} = R \left(1 + j \frac{\omega L}{R} \right)$$

Eftersom de reella komponenterna, det vill säga den resistiva delen, beror enbart på motståndets storlek kan de uteslutas från ekvationerna, detta ger oss följande uttryck för den reaktiva delen:

$$\frac{j \left(\frac{\omega L}{R} - \omega R^2 C - \frac{\omega^3 L^2 C}{R} \right)}{1 - \omega^2 2LC + \omega^2 R^2 C^2 + \omega^4 L^2 C^2} = \left(j \frac{\omega L}{R} \right)$$

Utifrån detta kan det enkelt dras en slutsats att det uppmätta induktansvärdet från LCR-mätaren enbart är summan av de induktiva och de kapacitiva elementen i kretsen. Detta värde kommer framöver att refereras till som den ekvivalenta induktansen och uttrycks enligt följande ekvation.

$$L_{eq} = \frac{L - R^2 C - \omega^2 L^2 C}{1 - \omega^2 2LC + \omega^2 R^2 C^2 + \omega^4 L^2 C^2}$$

Både motståndets storlek, vinkelfrekvensen, samt den ekvivalenta induktansen är kända från mätningen med LCR-mätaren. De två okända storheterna är nu enbart kretsens kapacitans samt den verkliga induktansen över motståndet. Eftersom motståndet är litet är kapacitansen över motståndet som tidigare påvisat försumbart, de kapacitiva elementen kan därför attribueras till kretsens kopparbanor samt anslutningskontaktarna.

Kopparbanornas kapacitans kan beräknas med följande formel:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$$

Där A motsvarar arean på de ledande kopparbanorna, d är avståndet mellan kopparbanorna, och ε är det dielektriska talet, det vill säga en konstant för hur bra materialet mellan kopparbanorna leder ström.

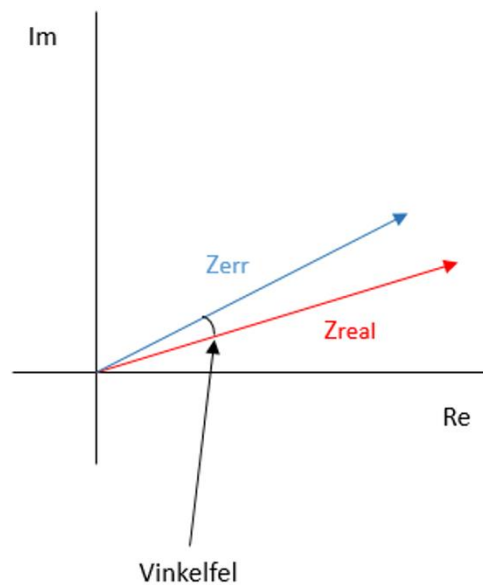
Anslutningskontakternas kapacitans är sedan tidigare uppmätt av mätinstitutet.

Genom att nu lösa ut L från ekvationen för ekvivalent induktans kan vi enkelt beräkna den verkliga induktansen över motståndet.

3.5 Kompensera för mätfel:

Fram tills nu har alla fysiska bidragskällor identifierats och isolerats från uträkningar samt mätresultat. Det sista steget i ledet för att få godtyckligt bra uppskattning av induktansen är att identifiera eventuella mätfel från instrumentets sida.

Alla mätinstrument har ett fasfel i sina mätningar som bidrar till osäkerhet i det uppmätta resultatet. Vid mycket små motstånd ger ett litet fasfel ett väldigt litet bidrag till mätresultatet, men allt eftersom resistansen ökar så växer även felmarginalen som visas i figur 9.



Figur 9. Graf illustrerande felmarginaler som följd av vinkelfel.

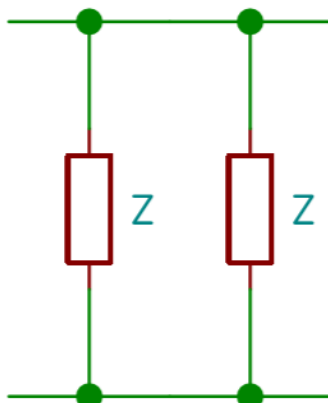
För att identifiera fasfelets storlek utförs mätningar över hela frekvensspannet med 3 geometriskt identiska shunt-kopplingar med noga uträknad kapacitans och varierade resistansvärden. Motstånden är tillverkade specifikt för att ha en så pass låg induktans och kapacitans som möjligt och är till utformningen mycket lika. Med dessa förutsättningar kan slutsatsen om att induktansen i de 3 shuntkopplingarna bör vara närmare identiska.

Från mätvärdena samt uträkningarna från tidigare för att identifiera den verkliga impedansen kan ett medelfel i mätresultaten för Henry per Ohm härledas för hela frekvensspannet. Medelfelet beräknas med minsta kvadratmetoden och används slutligen för att korrigera den uppmätta induktansen.

3.6 Shuntkoppling kontra motstånd:

Den slutgiltiga frågan är om de slutsatser för induktansen som har dragits för ett motstånd även kan tillämpas för en shuntkoppling. I figur 10 ser vi två impedanser i parallell koppling, och kan enkelt dra

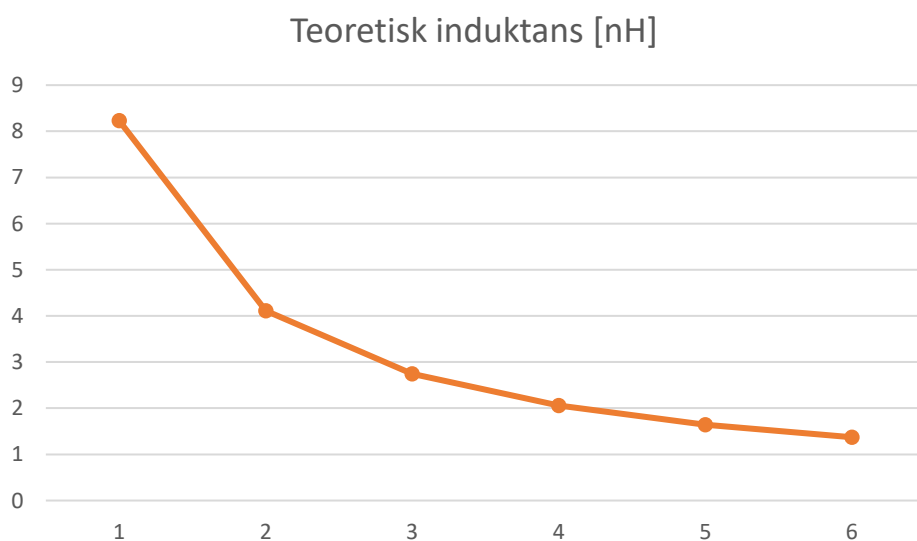
slutsatsen att impedansen kommer att minska enligt, $Z_{tot} = \frac{Z}{n}$, där n är antalet impedanser, då alla impedanser i parallell koppling med varandra är av samma storlek som i figur 10.



Figur 10. Två impedanser i parallell koppling.

Samma slutsats kan då dras om induktansens minskning i förhållande till antalet parallellkopplingar. I samband med att totala den impedansen sjunker ska även induktansen sjunka och gå mot noll enligt

$L = \frac{L}{n}$. Se figur 11.



Figur 11. Teoretisk induktans beräknad för ett till sex motstånd av typen Vishay B0811-S102KT. Vid en fast frekvens. Beräkningsgång finns presenterad i bilaga 2 sid 1.

4. Design och uppbyggnad av strömshuntskanner:

I följande avsnitt kommer det närmare att förklaras hur skannern har tagit form. Samt kommer några slutsatser om shuntarnas utformning att presenteras. Även själva automationsdelen i arbetet är här beskrivet och hur styrningen fungerar beskrivs i detalj.

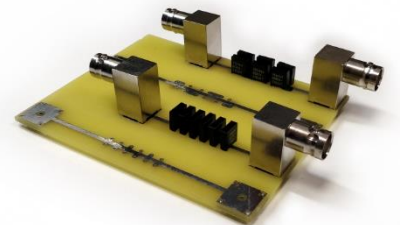
4.1 Shuntens design och utformning

I den existerande skannern sitter endast shuntar som är lämpliga för AC-kalibrering vilket betyder att alla DC-kalibreringar måste göras manuellt. I den nya skannern är målet att kunna göra båda delar automatiskt, detta går att uppnå genom att antingen använda två uppsättningar av shuntar för samma områden, en för AC och en för DC, eller genom en shuntkonstruktion som fungerar lika väl för AC som för DC. Det innebär att man vill ha liknande egenskaper på motstånden, eller shunten, vid både AC och DC. Det senare alternativet är helt klart att föredra då det hade inneburit lägre materialkostnader och enklare konstruktion. För att undersöka om detta är en möjlighet har ett flertal olika tester och mätningar gjorts på olika typer av shuntar. En komplikation med att konstruera AC/DC-shuntar är att AC-strömmen är frekvensberoende, detta medför att den totala impedansen är högst beroende på vilken frekvens mätningarna utförs på. I synnerhet gäller detta de lägre resistansvärden i skannern. För att uppnå samma egenskaper är det önskvärt att minimera frekvensberoendet i så stor utsträckning som möjligt.

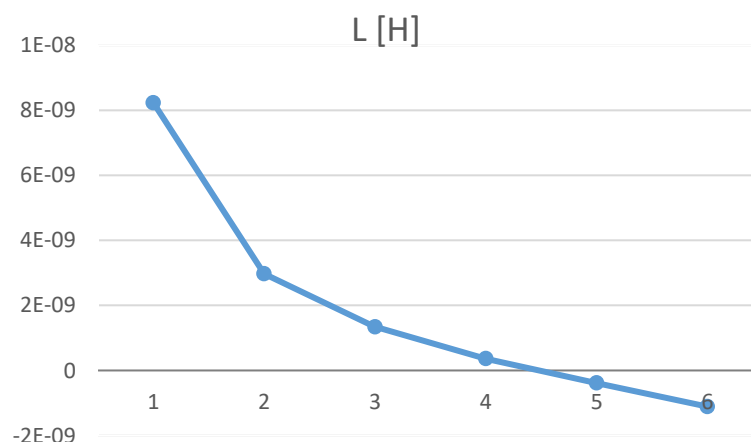
4.1.1 Induktansfenomenet:

På RISE hade man innan detta ex-jobb påbörjades, gjort några enstaka test-mätningar på en prototyp av en kretskortsshunt, det vill säga en strömshunt monterad på ett kretskort. Detta var ett kort med ett antal parallellkopplade motstånd monterade på olika vis (fig. 12).

Intressant att notera är att med fler parallellkopplade resistanser minskar reaktansen precis som den borde enligt teorin, men hur mycket den minskade skiljde sig från det ovan påvisade sättet för parallellkopplingar. Vad man fann vid mätningar på dessa shuntprototyper var att induktansen, istället för att avtagande minska och gå mot noll, minskade den mer linjärt och passerade förbi nollan så att den blev negativ (fig. 13) när man mätte på 5 eller fler motstånd. Kretsen gick alltså över till att bli kapacitiv.



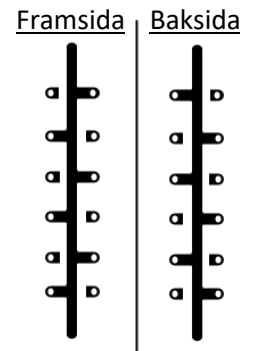
Figur 12. Demoversion av olika shuntkopplingar



Figur 13. Som synes skiljer sig teorin och verkligheten åt. Vad detta beror på är svårt att bestämma.

En tanke som funnits sedan arbetets start är att detta fenomen skulle kunna användas för att designa shuntar som har liknande AC och DC egenskaper genom att minska den frekvensberoende reaktansen. För att kunna uppnå likvärdiga induktansvärden enligt de teoretiskt framräknade induktansvärdena skulle alldeles för många motstånd behöva parallellkopplas för att kunna realiseras på ett kretskort av rimlig storlek. Så då är frågan vad som är orsaken till detta fenomen och hur det återskapas för att nå en reaktans så nära noll som möjligt i de riktiga shuntarna. En teori kan vara, att det har att göra med ömsesidig induktans mellan benen på motstånden och den geometri som använts på kortets kopparbanor (fig. 14). Ifall de induktiva delarna i kretsen delvis tar ut varandra, så kan det gå att hitta det läge där induktansen och kretsens kapacitans balanserar varandra.

Då dessa prototypshuntar är designade för 2-poliga motstånd kan det vara ett bra alternativ att återskapa geometrin i de shuntar med högre resistansvärden men som förklaras i ett nästa stycke kommer detta inte att fungera för de lägre resistansvärdena. Eftersom att det kan vara nödvändigt att använda sig utav 4terminella motstånd. Principen för designen kommer vara den samma men upplägget blir lite förändrat eftersom de motstånden har fyra anslutningspunkter.



Figur 14. Kopparbanornas geometri på prototypshuntar.

4.1.2 Resistorval:

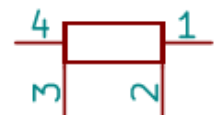
Vid val av resistorer att nyttja i skannern finns det en rad faktorer att ha i åtanke.

- Resistorerna bör ha lägsta möjliga induktans, då densamma bidrar till kvadratisk ökande impedans som tidigare beskrivet.
- Dessutom bör resistorerna ha en så liten kapacitans som möjligt.
- Resistorerna måste vara driftsäker, det vill säga att den inte driver allt för mycket från sitt ursprungsvärde över tiden.
- Resistorerna måste tåla den effekt som utvecklas, så att det inte uppstår någon temperaturutveckling i skannern.

Motstånd med godtycklig induktans samt driftsäkerhet för de lägre strömområdena var relativt enkelt att finna, och problem med hög effektutveckling uppstår först vid högre strömmar.

För att få ett spänningsfall på önskade 0,1 Volt vid 10 Ampere, det högsta strömområdet, krävs ett motstånd av storleken 10 mOhm. För att nå ett såpass lågt resistansvärde skulle en orimligt stor mängd vanliga motstånd behöva parallellkopplas och bidra till ett enormt kretskort samt mycket höga kostnader.

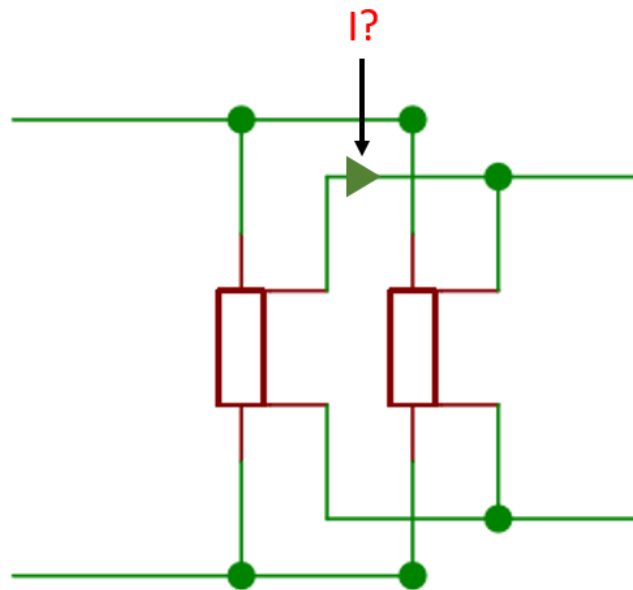
För att hålla storlek och kostnad inom rimliga ramar undersöktes istället fyrterminella motstånd. Ett fyrterminellt motstånd (fig. 15) är ett motstånd med fyra anslutningsben monterade och är ämnat för just den typ av mätningar som ska utföras, men exakt hur de beter sig då fler än ett sätts i parallellkoppling var för oss okänt.



Figur 15. Fyrterminellt motstånd

Vid de tvåterminella motstånden fanns det en tydlig avgränsning mellan strömsida och spänningsida för samtliga motstånd. Då flera fyrterminella var det ovisst om ström skulle gå genom spänningsledarna och bidra till fel. I figur 16 visas en parallellkoppling mellan fyrterminella motstånd, på benen som ansluts mellan resistorerna ska det enbart ligga en spänning, för att kontrollera om

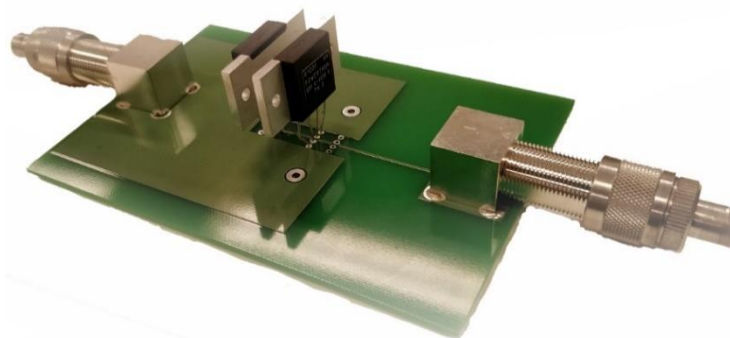
lösningen är acceptabel framställdes en demokrets där vi testade teorin på några effektmotstånd. Dessa uppfyller inte kraven för driftsäkerhet, men ger en uppfattning om principen är hållbar.



Figur 16. Illustration av parallellkopplade fyrterminella motstånd, och den okända strömmen

Demokretsen (fig. 17) designades för att så väl som möjligt kunna utnyttja det fenomen som hos de gamla prototypshuntarna bidrog till att minska induktansen. Däremot var tanken att denna gång montera motstånd på bägge sidor av kortet, eftersom att fyrterminella motstånd är mycket större än tvåterminella. Detta skulle effektivt minska avståndet mellan motstånden och på så vis leda till minskad ledarresistans. De motstånd som ursprungligen beställts kunde inte levereras och istället fick ett par andra användas för demokretsen med andra dimensioner vilket medför en större induktans, då benen blir längre än önskat. Mätningarna visade på stora differenser mellan AC och DC allt eftersom frekvensen på mätningarna ökade. Ökningen skedde dock linjärt, därför kunde induktans från benen exkluderas som huvudsaklig bidragande faktor, då vi från tidigare uträkningar kan se att denna ska öka kvadratisk i förhållande till frekvens.

En teori är att induktansökningen beror på Skin-effekten där strömmen söker sig ut till ytterkanten av en ledare allt eftersom frekvensen ökar, detta medför en linjärt ökande induktans som även då skulle minska med kortare ben. Det fanns dessvärre inte utrymme att undersöka detta fenomen närmare under arbetet, utan får lämnas till framtida experiment.



Figur 17. Demokort för test av fyrterminella motstånd i parallell koppling.

4.1.3 Effektutveckling och kylning:

Som beskrivet i teoretisk referensram är det viktigt att hålla en jämn temperatur på shuntarna så att deras värden inte avviker från det ursprungligt uppmätta. Temperaturen i rummet omkring förutsätts regleras till konstant 23 grader som i de flesta mätlaboratorier, och temperaturen i skannern kan relativt enkelt hållas konstant med hjälp av luftflöde från en fläkt.

Ett problem uppstår dock vid motstånden som nyttjas för de högre strömmarna, 10 och 20 Ampere. Effektutvecklingen ökar kvadratisk i förhållande till strömstyrkan enligt $P = R \cdot I^2$, och för att motstånden ska kunna hantera en effektutveckling över 2 Watt utan att ta skada krävs en ökad värmeledningsförmåga. Tillverkarna av motstånden menar på att motstånden kan hantera upp till 10 Watt om montering av deras egna kylflänsar sker på motstånden. Ett problem uppstår med dessa flänsar då avståndet mellan resistorerna blir för stort för att kunna dra nytta av de tidigare påvisade positiva effekterna för minskad induktans, och måste därför uteslutas.

Av denna anledning har annan en modell av flänsar också undersökts som skulle möjliggöra bättre monteringsförhållanden. Denna typ av fläns utlovar ett likvärdigt värmeledningstal i förhållande till de specialdesignade kylflänsarna, detta förutsätter dock att de utsätts för forcerad konvektion från fläkt som med ett luftflöde på cirka 100 meter per minut. Trots att dessa flänsar verkar lovande finns fortfarande risk för att shuntens karakteristik blir försämrade. Därför har ytterligare ett alternativ för kylning undersökts där motståndens inbyggda kylflänsar har monterats med en millimeter i mellan för att man möjligtvis skulle kunna montera en liten bit aluminium som i kombination med fläkten uppnår en tillräckligt bra värmeledningsförmåga.

4.2 Styrkrets:

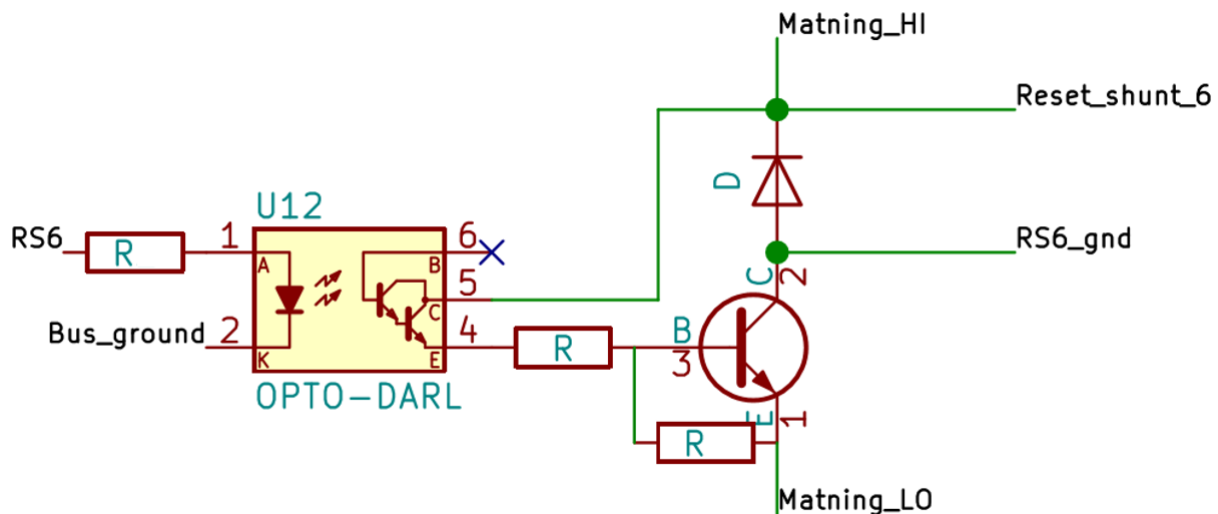
För att kunna automatisera mätprocessen krävs det en styrkrets som kan ställa in vilken av shuntkopplingarna som den pålagda strömmen ska placeras genom, om det är vid högström eller lågströmsområdet, samt om spänningsfallet ska mätas upp vid AC eller DC, då dessa avläsningar görs vid olika nominella spänningar.

Utöver inställning av rätt shuntkoppling så ska styrkretsen förse en fläkt med lämplig ström och spänning samt tända dioder för att indikera att rätt shunt är inkopplad för mätning.

För att leda inströmmen genom rätt shunt-koppling nyttjas reläer. Ett relä är en slags ledare som, i de flesta fall, kan befinna sig i öppet läge, eller ett stängt läge. Genom att sätta ett relä som kan öppnas och slutas efter önskemål både före och efter varje shunt-koppling kan man säkerställa att det utvecklade spänningsfallet är över just den valda shunten.

Vilket relä som ska väljas styrs från en mikrokontroller som skickar en signal till önskat relä. Då en relativt hög effektutveckling erfordras för att slå om ett relä måste en separat spänningskälla anslutas för att förstärka signalen från kontrollern.

För att stärka signalen har en enkel transistor-koppling tillämpats där relät ligger i serie med matningsspänningen och, i detta fall, Darlington-transistorns kollektor-krets. Parallellt med relät sitter en frihjulsdiod för att hantera de kraftiga spänningsspikar som kan uppstå när strömmen till en spole plötsligt bryts. Det hela visas nedan i figur 18.



Figur 18. Den krets som förstärker kontrollerns styrsignaler.

Mellan mikrokontrollern och förstärkarkretsen sitter en opto-kopplare för att helt separera kontrollern från resterande krets samt för att säkerställa att inga kryptströmmar går till transistoren. I och med den optiska skärmningen säkerställs även att inga pulser från mikrokontrollerns klocka går ut i ledningarna kring mätobjekten, utan enbart möjliga smygströmmar i form av DC från nätadaptern där störningar i form av magnetfält är försumbara.

Fläkten matas med en konstant signal för att hålla temperaturen jämn, men endast då mikrokontrollern är ansluten till en dator för att hålla nere ljudnivå och strömförbrukning då ingen kalibrering utförs.

4.2.1 Reläer:

Eftersom kretsen ska nyttjas för just precisionskalibrering är det viktigt att förstå hur reläerna kan påverka det uppmätta spänningsfallet. På den ena sidan om shuntens finns den pålagda strömmen, inströmmen, på den andra finns det utvecklade spänningsfallet, utspänningen.

På strömsidan är det kontaktresistans i relät som ger den största inverkan på spänningsfallet. Om det finns stora resistanser i relät kommer spänningsfallet att påverkas i enlighet med Ohm's lag. Detta blir extra tydligt vid höga strömmar då spänningsfallet ökar linjärt i förhållande till strömökningen. Detta i konjunktion med att differensen mellan reläts och shuntens resistans är förhållandevis låg vid dessa mätningar då ett konstant spänningsfall ska bibehållas.

På spänningssidan är det Elektromotoriska Spänningar som medför bidrag till det av multimetern uppmätta spänningsfallet. Inverkan av elektromotorisk spänning (EMS) kommer att ske i form av termo-EMS, det vill säga en potentialändring som uppstår när två ledare av olika material i en krets antar olika temperaturer. Precis som med kontaktresistansen är detta inget som kan elimineras helt. Därför har man försökt att endast se till att minimera inverkan av denna potentialförändring. För att minimera påverkan av de EMS:er som eventuellt kan uppstå är det alltså viktigt att minimera antalet kontakter mellan olika ledare som kan anta olika temperaturer och därmed agera som termoelement.

Något som kommer att bidra till detta mer än något annat i kretsen är reläerna som är nödvändiga för skanners funktionalitet.

För att ställa om ett relä läggs en ström över en spole som utvecklar ett magnetfält och fysiskt förflyttar ledarna inuti relät. Ström över en spole medför effektutveckling som kan påverka mätresultaten via termo-EMS samt varierad resistansnivå från temperaturändring, därför måste ett bistabilt relä nyttjas där det räcker med en kort puls för att ställa om, till skillnad från reläer där en konstant ström måste tillföras för att hålla relät i öppet eller stängt läge. Detta säkerställer även att det inte utvecklas något konstant magnetfält kring spolen som kan störa mätningarna vid kalibrering.

Bistabila reläer kan utformas med en spole, eller två spolar för att ställa om mellan öppet eller slutet läge. I ett relä med en spole bestäms läget genom vilken riktning strömmen förs genom spolen. I ett relä med två spolar förs strömmen genom den ena spolen för att ställa i öppet läge, och vice versa för att sluta relät. För att hålla styrkretsens så enkel som möjligt valdes här den tvåspoliga relämodellen.

Eftersom mätningarna utförs fyrterminellt över mostånden och strömmen ska ledas koaxiellt behöver reläerna kunna bryta två poler före och efter shuntarna. Istället för att göra denna brytning med två enkla reläer väljer vi ett 2-poligt relä där vi kan leda plus och minuspolen parallellt för att behålla symmetri och därigenom minska störningar.

4.2.2 Mikrokontroller:

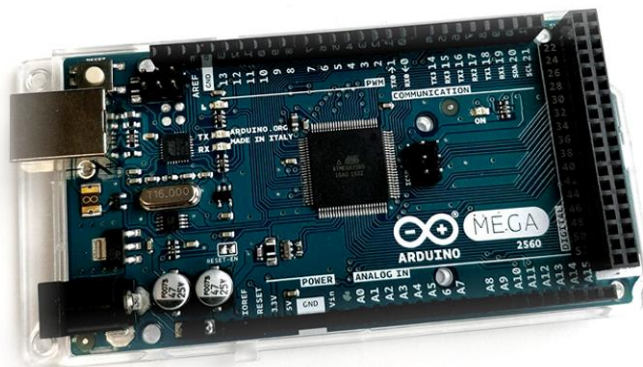
Vid val av mikrokontroller är det i detta sammanhang viktigt att hitta en kontroller som inte bara kan skicka styrsignaler med stor tillförlighet, utan också kommunicera med LabVIEW, det programmet som styr hela mätprocessen och ser till att alla sekvenser sker i korrekt ordning.

Eftersom produkten planeras att både användas intern och säljas till andra mätinstitut är det en klar fördel om anslutningen är helt plug-and-play, det vill säga att inga ytterligare installationer av drivrutiner är nödvändig för att börja nyttja produkten.

En simpel och väldigt billig kommunikationsstandard är RS-232 via DSUB. För att kommunicera med datorn krävs en mikrokontroller samt en stödkrets för att hantera seriell kommunikation mellan en dator och densamma. Nackdelarna är att det kräver mycket omfattande programmering av mikrokontrollern och att anslutningsmetoden via DSUB har varit utdöende en lång tid.

Ett annat alternativ är att köpa kommunikationsenhet direkt från National Instrument, utvecklarna av LabVIEW, som är direkt kompatibel med LabVIEW. Deras kommunikationsenheter nyttjar kabelbussar av IEEE-standard, något som används flitigt i mätforskningsmiljöer, och har många färdiga programmeringsblock i LabVIEW för enkel kommunikation mellan dator och styrkrets. Dessa enheter är dock mycket dyra att köpa in; därför valdes att se över ytterligare möjligheter i första hand.

Det slutgiltiga valet blev styrkretsen Arduino Mega2560 A000067 (*fig. 19*). På Arduino-kretsen finns all nödvändig kringutrustning för kommunikation mellan dator och mikrokontroller redan installerat, tillsammans med detta finns det även ett stort antal digitala utgångar som kan anslutas mot ett kretskort. Allt detta ger oss större frihet till att fokusera på själva programmeringen av styrkretsen, och inte behöva spendera stor tid på att etablera en anslutning till datorn.



Figur 19. Arduino Mega2560.

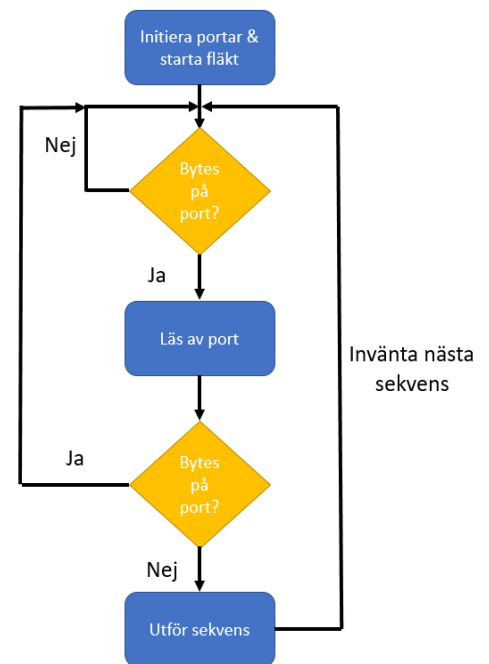
Programmeringen sker i ett språk som liknar en kombination av C och C++, med flera färdigskrivna funktionsbibliotek tillgängliga för diverse ändamål. Då en programsekvens kan skrivas från grunden ger den frihet att skraddarsy program för kommunikation med just det specifika LabVIEW-programmet som ska nyttjas. All strömförsörjning sker via USB-kabeln som ansluts till datorn och inga ytterligare drivrutiner krävs efter det att kontrollern har programmerats.

4.2.2.1 Programmering av Mikrokontroller

För att hålla kommunikationen så säker som möjligt sker all sekvensexekvering från datorn till mikrokontroller med 1 byte långa meddelanden. Kontrollern kan hantera hela strängar med meddelanden vilket kan ge en större överskådlighet, men kan bidra till problem om inte alla bitar läses in korrekt och sedan ligger kvar i bufferminnet då nästa sekvens ska läsas in.

Vid start av kontrollern sker först initiering av samtliga utportar och en konstant signal läggs på för att förse en fläkt med ström. Efter detta sker kontinuerligt kontroll av kommunikationsporten fram till det att ett meddelande finns att läsa in. När det finns ett meddelande på porten läses detta till en integer, men för att säkerställa att meddelandet är av önskad storlek kontrollerar kontrollern nu om det finns fler bytes på porten. Om så är fallet så stryks meddelandet på integern och programmet startar om från början.

Är antalet bytes på porten korrekt går programmet nu vidare till en Case-sats, där vilken sekvens som ska köras bestäms från det avlästa meddelandet. När exekveringen är färdig skickar kontrollern tillbaka samma meddelande som den läst av så att LabVIEW-programmet kan göra en sista kontroll att rätt sekvens har utförts. För att ytterligare tydliggöra mikrokontrollerns funktion visas ett flödeschema i figur 20.



Figur 20. Flödesschema beskrivande programsekvens.

Eftersom varje sekvens nu är max en byte stor blir överskådligheten nu begränsad, speciellt om någon mindre insatt i programmering bestämmer sig för att i framtiden göra en ändring i någon av sekvenserna. För att göra koden mer överskådlig deklarerar därför varje shunt-storlek i programkoden med tillhörande sekvensvärde som illustreras i figur 21.

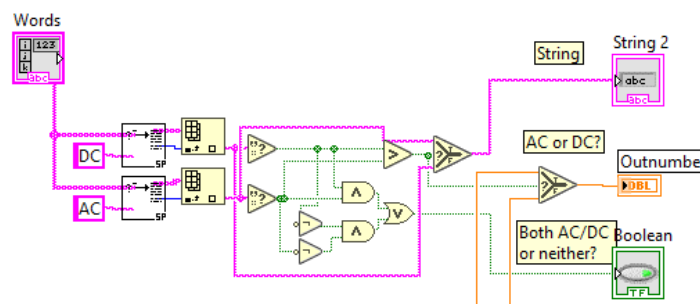
```

const int shunt1mohm = 0;
const int shunt10mohm = 1;
const int shunt100mohm = 2;
  
```

Figur 21. Exempelkod

4.2.3 LabVIEW:

All information som skickas till och från datorn går igenom programmet LabVIEW. LabVIEW är ett programmeringsverktyg där alla kommandon utförs genom grafiska funktionsblock (fig. 21) i ett VI (Virtual Instrument). Varje block symboliserar en programfunktion som kan sträcka sig från enkla Booleska uttryck till komplett initiering av seriell kommunikation. LabVIEW används flitigt bland mättekniker då det är relativt enkelt att sätta sig in i, samt för att man får ett färdigt användargränssnitt i samband med att man skriver programmet.



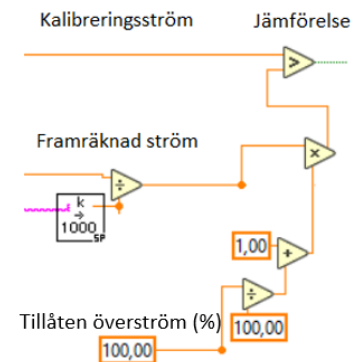
Figur 21. Programsekvens från LabVIEW med ett antal olika funktionsblock.

Det VI som hanterar kommunikationen med PCSS2 är ett sub-VI som kan anropas från ett större huvudprogram, som styr hela mätsystemet i fråga, och får inparametrar som önskad shuntkoppling, vid vilken strömstyrka som mätningen ska utföras samt om det är vid AC eller DC.

Det första programsekvensen utför är att plocka fram ett numeriskt värde på shuntkopplingens motstånd samt om det ska utföras en AC-mätning eller DC-mätning ur en textsträng, då dessa mäts vid olika nominella spänningar. Den önskade nominella spänningen divideras med shuntens motstånd och ger oss en strömstyrka som därefter jämförs med den strömstyrka som ställts in för kalibrering. Om den önskade strömmen är högre än den framräknade så löper shuntkopplingen risk att brinna upp; ett felmeddelande skickas och programmet avbryts.

Over-range ger möjlighet att tillåta större kalibreringsströmmar, detta kan nyttjas om shuntkopplingarna tål högre effektutvecklingar. I just denna koppling tillåts en over-range på 100%. I figur 22 visas hur beräkning och jämförelse med over-range utförs.

Förutsatt att den önskade shunten är godkänd att användas efter jämförelsen mot kalibreringsströmmen så går programmet nu vidare och förbereder sig för att skicka sina meddelande till mikrokontrollern. För att starta kommunikation med kontrollern används funktionsblocket VISA Serial som matas med inparametrar som Baudrate, om paritetsbit skall nyttjas, antal bitar som skall skickas samt till vilken COM-port USB-kabeln är ansluten.



Figur 22. Programsekvens där önskad strömstyrka jämförs med den faktiska.

När kommunikation är upprättad går programmet vidare med att kontrollera att kommunikationsporten är fri och att inga bitar ligger i bufferminnet, annars tömmer den detta. Nästa steg är att skicka den önskade sekvensen till kontrollern, för detta nyttjas funktionsblocket VISA Write som seriellt skickar önskad sträng till kontrollern. Efter det att strängen har skickats väntar programmet in en handskakning från kontrollern, och avslutar slutligen kommunikationen med kontrollern genom att frigöra COM-porten. Om programmet behöver vänta längre än 5 sekunder, eller om meddelandet som skickas tillbaka vid handskakningen inte stämmer överens med den önskade sekvensen avbryts programmet och ett felmeddelande skickas.

4.3 KiCAD:

För att realisera kretsen och strukturera upp shuntarna används CAD-programmet KiCad, ett verktyg för att skapa kretskort och elektriska designscheman. Vid framtagande av tidiga sketcher och designer på skannerns utformning användes endast schema-delen av programmet för att kunna visualisera de tankar som fanns för skannerns funktionalitet. Genom att placera komponenter och dra ledare mellan dem kan man se till att allt fungerar som man tänkt sig.

Eftersom inte alla kretsens komponenter finns tillgängliga i programmets bibliotek måste i första hand utformning av dessa ske. Som exempel är de tvåpoliga reläerna för denna krets som ska nyttjas för att bryta och sluta koppling över en shunt. Specifikationer över exakt utformning och funktion för varje komponent hämtas från respektive komponents datablad.

Då ett el-schema framställts som uppfyller funktionen som önskas på bästa möjliga sätt är nästa steg att designa ett PCB (Printed Circuit Board). För att skapa ett kort som är realiserbart i verkligheten måste man försäkra sig om att de komponenter som är valda har rätt utformning och dimensioner, samt att alla anslutningar i kretsen är korrekt utförda för att undvika kortslutningar.

PCB designen är kretskortets slutskede och det är viktigt att då få med alla de designkrav som ställs på skannern. Några exempel på viktiga designregler är hur man dimensionerar banornas bredd och längd, man måste till exempel tänka på att skannern inte värms upp för mycket om man vill köra 20A genom en shunt. Ledarresistansen bör vara så låg som möjligt för att inte påverka spänningsfallet hos de shuntar med lågt resistansvärde, detta kan minskas genom att hålla banornas längd så kort som möjlig. En annan viktig sak att ha i åtanke är att inte byta riktning på strömmen i onödan, då försämrar AC mätnoggrannheten med avseende på onödiga induktanser. Dessutom är det önskvärt att behålla symmetri hos shuntarna så gott det går.

Förutom det faktum att komponenterna i kretsen skall ha en funktionsritning för el-schemat behöver alla komponenter på brädet också ha ett så kallat footprint, som i PCB-designen är en skiss av komponentens yttre fysiska dimensioner. För många standardkomponenter finns det ett passande footprint i programmets bibliotek färdigt att använda, men för annorlunda utformade eller ovanliga komponenter, så som många av de motstånd som ska nyttjas i skannern eller typ-N anslutningarna (se bilaga 4, sida 2) finns inga standard footprints. Dessa footprints måste därför designas på egen hand. Oftast har tillverkaren specificerat lämpliga monteringsförslag som då förs in i programmet genom att placera borrhål i rätt storlek på rätt plats.

När designkrav och komponentval är uppställda och färdiga sätts alla delar samman på ett kretskort. Eftersom kopparbanorna på ett kretskort vanligtvis endast är 35 μm tunna behöver som tidigare nämnt banorna på strömsidan av shunten dimensioneras med avseende på bredden istället för diametern som i normalfallet hos vanliga, cirkulära, ledare. Så istället görs zoner utav koppar för att uppnå önskad tvärsnittsarea. För de största strömområdet (20A) beräknade vi att ett tvärsnitt på ca. 2,5 mm^2 skulle vara tillräckligt för att skannern inte skulle överhettas. Detta motsvarar ca. 70 mm i bredd på en 35 μm tunn kopparbana. I detta fall finns dock utrymme för ännu bredare banor och för att säkerställa att banan på högströms-området höll rumstemperatur valdes bredden 80 mm. Vidare har shuntarna placerats på ett tillfredsställande avstånd ifrån varandra för att undvika att de värmer varandra i den mån som har varit möjlig.

5. Resultat

Arbetets gång har kantats av oförutsedda motgångar samt har i diverse delar av arbetet krävt mer tid än vad som ursprungligen uppskattades. Trots svårigheter har ett resultat framställts och framtiden för skannern ser god ut. I detta avslutande stycke kommer resultat för olika delar ur projektet att beskrivas som det står i dagsläget.

5.1 Strömkalibratorer:

Önskvärt vore att skannern blev så flexibel som möjligt och kunde helautomatiseras för användning till flera utformningar av strömkalibratorer. Exempel på modeller som skannern är utformad för att stödja är Fluke 5500A samt 5700A/5720A där de senare två nämnda modellerna har en gemensam nolla för hög- och lågströmsområdet. För att undvika manuella omkopplingar mellan hög- och lågström finns det två separata ingångar till skannern via typ N-kontakt. På detta vis kan både hög- och lågströmsområdet anslutas via koaxialkabel till lådan samtidigt och vilket av strömområdena som väljs ställs in via en programsekvens från en dator.

Ett problem i den ovanstående lösningen uppstod i och med utformningen på strömkalibratorerna av modell 5700A samt 5720A där strömområdena delar nolla. Detta medför att det rent fysiskt inte går att ansluta både hög- och lågströmsområdet koaxialt. För att lösa detta tillämpades, i en tidigare version av skannern, en reläkrets inuti skannern där nollan skulle ledas tillbaka via den andra kabeln. Denna idé fick dock slopas då det skulle innebära att symmetrin mellan strömmen i positiv och negativ riktning skulle störas och medföra stor osäkerhet i mätningarna.

Skannern blir därför helautomatiserad vid användning tillsammans med strömkalibratorer med två separata nollor, men förutsätter fysisk omkoppling mellan vissa strömintervall på de kalibratorer med gemensam nolla. Nämnvärt är att det totalt räknat finns 7 shuntkopplingar i skannern, varav enbart en räknas till högströmsområdet. De flesta kalibreringar kan därmed utföras per automatik, oavsett kalibratormodell.

5.2 Shuntar:

Genom val av motstånd med låg induktans tillsammans med fenomenet för linjärt avtagande induktans vid parallellkoppling har det påvisats goda möjligheter till att i framtiden tillverka shuntar med bra AC-DC-gång. För att säkerställa shuntarnas stabilitet över tid kommer ytterligare tester utföras över tid. Den uppsättning av shuntar som är tänkta att monteras i PCSS2 kan ses som en första prototyp på en ny generation av shuntar eftersom att deras prestationer inte kan garanteras innan de testats tillsammans i den verkliga miljön under en längre tid.

5.3 Skanner, en prototyp:

Det slutgiltiga resultatet av arbetet är en prototyp av skannern med motstånd redo för montering för resistansområdena 10 kOhm, 1 kOhm, 100 Ohm samt 10 Ohm på kretskortet.

Förstärkningskretsen är testad och fungerar enligt önskemål för att slå om reläer samt för att förse fläkten med ström, vidare fungerar kommunikationen mellan LabVIEW och mikrokontroller efter önskemål vid de tester som har utförts. Dessvärre begränsades resultatet av långdragna leveranstider avseende motstånd. De lågohmiga motstånd som uppfyllde kraven är en specialbeställningsvara med en flera månader lång leveranstid. Demoversioner av rent fysiskt större utformning, men samma resistansvärde, skulle levereras för tester och montering i demoexemplar, men dessa anlände inte. Färdigställning av skannern för resistansområdena 10 mOhm, 100 mOhm samt 1 Ohm får därför överlämnas till RISE.

5.4 CE-märkning:

För att CE-märka en elektronisk produkt måste visa krav uppfyllas. (Europeiska kommissionen, 2014). Enligt den europeiska kommissionen avser lågspänningsutrustning området 50-1000 Volt för AC och 75-1500 volt för DC. De Spänningsfall som ska mätas i skannern ligger på intervallet 0,1 till 1 Volt, och de styrkretsar som finns behöver inte mer än 12 Volts spänning för att fungera. Kvarstående är anslutning från vägguttag till skanner för strömförsörjning. Genom att här köpa in en redan CE-märkt nätadapter uppfyller skanner nu de krav som ställs för CE-märkning.

5.5 VFR 321723

I ett mycket sent skede av arbetet anlände till slut de motstånd som beställdes för de fyrterminella demokorten. Tidigare har i rapporten nämnts att de tester som utfördes på det fyrterminella demokortet inte var tillräckligt bra. Anledningen till detta bestämdes vara de sämre motstånd som istället fick monteras ty de ursprungligt beställda motstånden inte kunde levereras i tid. Dock anlände dessa i de absolut sista dagarna för arbetets gång och några mycket snabba mätningar gjordes för att se hur vida man kunde vänta ett bättre resultat med dessa. Eftersom resistansvärdena på motstånden är mycket små vet vi att det är induktansen som är det huvudsakliga bidraget för en större reaktans eller med andra ord en sämre AC/DC-differens. Därför valdes att montera de ny-anlända motstånden på samma typ av demokort för att sedan göra direktmätning på induktansen för kretsen och jämföra denna induktans med induktansen hos den tidigare beprövade demokretsen. USR 4-4020 var det motstånd som först beprövades eftersom att det vid tillfället saknades möjlighet att pröva VFR 321723. I tabellen nedan visas de i slutskedet uppmätta induktanserna.

Typ av motstånd	VFR 321723	USR 4-4020
Uppmätt induktans	~600pH	~2800pH

Slutsatser man kan dra utifrån dessa resultat är att en shuntkoppling med den typ av motstånd som ursprungligen var tänkta att användas i skannern kommer att ge ett nästan 5 gånger bättre resultat. Till detta hör även att induktansen i sig påverkar impedansen kvadratisk, därav väntar vi oss en förbättring på nästan 25 gånger. Vilket kan anses vara godtyckligt då den ursprungliga AC/DC-differensen låg på nästan 2000ppm, det skulle innebära att det vore möjligt att den nya AC/DC-differensen skulle kunna bli så låg som 80ppm. 80ppm är även inom ramarna för vad som ursprungligen hoppats på när arbetet startades där målet låg på att hamna under 100-200ppm.

Resultaten från denna slutgiltiga mätning visade alltså på en mycket lovande framtid för shuntar av denna typ.

6. Slutsatser/ Diskussion

Till sist diskuterar vi kort lite slutsatser och reflekterar över resultatet.

6.1 Reflektioner kring resultat samt arbetsgång:

Det slutgiltiga resultatet är en prototyp för strömshuntskannern som uppfyller de krav som krav som har ställts, det finns dock utrymme för ytterligare förbättringar i konstruktionen.

Eventuella förbättringsområden:

- Vidare forskning kring fenomenet med linjärt avtagande induktans vid parallellkoppling. Hur mycket påverkar avståndet mellan resistorerna resultatet, finns det andra sätt att placera motstånden för att påverka fenomenet och vilken inverkan på fenomenet har motståndets resistansvärde?
- Bör andra förstärkningskretsar iaktas? I den befintliga förstärkningskretsen sitter det Darlington-transistorer genom vilka en svag ström alltid går. Hade förstärkningen kunnat genomföras bättre, eller bara enklare, med exempelvis OP-förstärkare eller fälttransistorer?

Begränsningar:

- Den huvudsakliga begränsningen i arbetet är tid. De motstånd som nyttjas är sparsamt framtagna och har långa leveranstider. Detta tillsammans med många långa mätprocesser och manuell montering av shuntkretsar på demokort minskar den effektiva arbetstiden.

Något som har blivit uppenbart under arbetet är hur viktigt automatiserad mätutrustning är för mättekniker, då vi själva har fått erfara just hur mycket tid som går åt vid datainsamling. Att starta en mätning över natten om nästa dag ha all väsentlig data för att arbeta vidare gentemot att spendera en hel dag på att utföra dessa själv kan bli en väldigt viktig tillgång för vidare utveckling.

6.2 Arbetets inverkan på allmänheten:

Rent konkret ger inte skannern någon inverkan på miljön, dess syfte är att underlätta mätteknikers arbete och medför inga direkta fördelar gentemot tidigare utförande av kalibrering.

Allmänt kan utveckling av mätteknik bidra till mer optimerad strömförbrukning, enklare och mer rättvis elhandel. Genom att frigöra mer tid för de som arbetar med mätteknik kan skannern i sig bidra till en mer hållbar utveckling.

Referenser

CE-märkning

Europeiska Kommissionen. (2014). Low Voltage. Hämtad 2017-08-18, från

<http://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking/manufacturers/>

Bilder:

Samtliga bilder är fotograferade eller framtagna av författarna.

Bilagor

Kod Arduino:

```

//Declare names for switch case
const int shunt_10mOhm = 0;
const int shunt_100mOhm = 1;
const int shunt_1Ohm = 2;
const int shunt_10Ohm = 3;
const int shunt_100Ohm = 4;
const int shunt_1kOhm = 5;
const int shunt_10kOhm = 6;
const int ACLO_DCHI = 7;
const int DCLO_ACHI = 8;

//Declare names for output pins
const int set_100mOhm = 28;
const int set_1Ohm = 27;
const int set_10Ohm = 26;
const int set_100Ohm = 25;
const int set_1kOhm = 24;
const int set_10kOhm = 23;

const int reset_100mOhm = 34;
const int reset_1Ohm = 33;
const int reset_10Ohm = 32;
const int reset_100Ohm = 31;
const int reset_1kOhm = 30;

const int reset_10kOhm = 29;

const int set_ACLO_DCHI = 52;
const int set_DCLO_ACHI = 51;

const int fan = 44;

void setup() {
    //Set output pins
    pinMode(set_100mOhm, OUTPUT);
    pinMode(set_1Ohm, OUTPUT);
    pinMode(set_10Ohm, OUTPUT);
    pinMode(set_100Ohm, OUTPUT);
    pinMode(set_1kOhm, OUTPUT);
    pinMode(set_10kOhm, OUTPUT);
    pinMode(reset_100mOhm, OUTPUT);
    pinMode(reset_1Ohm, OUTPUT);
    pinMode(reset_10Ohm, OUTPUT);
    pinMode(reset_100Ohm, OUTPUT);
    pinMode(reset_1kOhm, OUTPUT);

```

```

pinMode(reset_10kOhm, OUTPUT);
pinMode(set_ACLO_DCHI, OUTPUT);
pinMode(set_DCLO_ACHI, OUTPUT);
pinMode(fan, OUTPUT);
//Start fan
digitalWrite(fan, HIGH);
Serial.begin(9600);
while (!Serial) {
;
}
}

```

```
int a='t', b=0;
```

```
void loop() {
```

```

while(Serial.available() > 0)    //Enter while loop if bytes on serial port.
{
a=Serial.read();
delay(10);
b = com_check();                //Check if number of bytes on serial port is correct. If not, set b=9
and break loop.
if (b == 9) break;
switch (a)
{
case shunt_10mOhm:              //Case 0
{
delay(50);
Serial.print(0);
}
break;
case shunt_100mOhm:             //Case 1
{
set_shunt(set_100mOhm);
Serial.print(1);
}
break;
case shunt_10Ohm:               //Case 2
{
set_shunt(set_10Ohm);
Serial.print(2);
}
break;
case shunt_100Ohm:              //Case 3
{
set_shunt(set_100Ohm);

```

```

    Serial.print(3);
}
break;
    case shunt_100Ohm:          //Case 4
{
    set_shunt(set_100Ohm);
    Serial.print(4);
}
break;
    case shunt_1kOhm:          //Case 5
{

    set_shunt(set_1kOhm);
    Serial.print(5);
}
break;
    case shunt_10kOhm:        //Case 6
{
    set_shunt(set_10kOhm);
    Serial.print(6);
}
break;
    case ACLO_DCHI:          //Case 7
{
    ACLO_DCHI_func();
    Serial.print(7);
}
break;
    case DCLO_ACHI:          //Case 8
{
    DCLO_ACHI_func();
    Serial.print(8);
}
break;
default:
break;
}
}
}

void set_shunt(int shunt)
{
    for(int reset_shunt=reset_10kOhm;reset_shunt<=reset_100mOhm;reset_shunt++)
    {
        //Reset all relays, pins 29-34.
        digitalWrite(reset_shunt, HIGH);
        delay(25);
        digitalWrite(reset_shunt, LOW);
    }
}

```

```

    delay(25);
}
digitalWrite(shunt, HIGH);
delay(25);
digitalWrite(shunt, LOW);
delay(25);
a='t';
}

void ACLO_DCHI_func()
{
    digitalWrite(set_ACLO_DCHI, HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(set_ACLO_DCHI, LOW);
    delay(50);
}
void DCLO_ACHI_func()
{
    digitalWrite(set_DCLO_ACHI, HIGH);
    delay(50);
    digitalWrite(set_DCLO_ACHI, LOW);
    delay(50);
}
int com_check()
{
    a=a-48;
    if(Serial.available() == 1);
    else if(Serial.available() > 1)
    {
        while(Serial.available() != 0)
        {
            a = Serial.read();
            delay(10);
        }
        b=9;
    }
}

```

//Set desired relay.

//Convert ASCII to binary number for switch case.

//If only 1 byte on port, continue

//If number of bytes greater than 1, empty serial port and

// overwrite integer a. Set b=9 to exit main program loop.

Uträkningar:

För att beräkna induktansen i figur xx använder vi oss utav samma motstånd och kort som för de mätningar som görs för verkliga induktans beräkningar. absolutbeloppet av impedansen och det faktiska resistansvärdet på motståndet. Med LCR mätare har beloppet mätts upp till 1,920006964 och resistansvärdet är 1,92. Induktansen löses ur impedansens belopp enligt:

$$Z = R + j\omega L$$

$$Z = R \left(1 + j \frac{\omega L}{R} \right)$$

$$|Z| = R \sqrt{1^2 + \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2} \text{ där } \left(\frac{\omega L}{R} \right)^2 \text{ är mycket liten, då kan man applicera förenklingen:}$$

$$\sqrt{1 + \Delta} = 1 + \frac{\Delta}{2} \text{ så att följande gäller}$$

$$|Z| = R \left(1^2 + \frac{\left(\frac{\omega L}{R} \right)^2}{2} \right) \quad |Z| = R \left(1 + \frac{\omega^2 L^2}{2R^2} \right) \quad |Z| = R + \frac{\omega^2 L^2}{2R}$$

$$|Z| - R = \frac{\omega^2 L^2}{2R}$$

$$\frac{(|Z| - R)2R}{\omega^2} = L^2$$

$$L = \sqrt{\frac{(|Z| - R)2R}{\omega^2}}$$

Parallellkoppling:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{j\omega L} + j\omega C = \frac{1 + j\omega RC + j^2\omega^2 LC}{R + j\omega L}$$

Inverse:

$$Z = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}$$

Konjugat:

$$\frac{R + j\omega L}{(1 - \omega^2 LC) + j\omega RC} \cdot \frac{(1 - \omega^2 LC) - j\omega RC}{(1 - \omega^2 LC) - j\omega RC} = \frac{R - \omega^2 RLC - j\omega R^2 C + j\omega L - j\omega^3 L^2 C + \omega^2 RLC}{1 + 2\omega^2 LC + \omega^4 L^2 C^2 + \omega^2 R^2 C^2}$$

$$Z = R \cdot \frac{1 + j \left(\frac{\omega L}{R} - \omega RC - \frac{\omega^3 L^2 C}{R} \right)}{1 + 2\omega^2 LC + \omega^4 L^2 C^2 + \omega^2 R^2 C^2}$$

L är stor om R är liten enligt: $\frac{\omega L}{R}$

C stor om R stor enligt: ωRC

$X = 0$ då L och C balanserar:

$$X = \omega L - \omega RC - \omega^3 L^2 C = 0 \rightarrow R = \sqrt{\frac{L}{C} - \omega^2 L}$$

$$\arg(Z) = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) = \arctan\left(\frac{\omega L - \omega R^2 C - \omega^3 L^2 C}{R}\right)$$

$$\omega^3 L^2 C \text{ försumbart låg} \rightarrow \arctan\left(\frac{\omega L - \omega R^2 C}{R}\right) \approx \frac{\omega L}{R} - \omega RC$$

$$|Z| = \frac{\sqrt{R^2 + (\omega L - \omega RC)^2}}{1 + (\omega^2 R^2 C^2 - 2\omega^2 LC)} = \frac{R\sqrt{1 + \frac{(\omega L - \omega RC)^2}{R^2}}}{1 + (\omega^2 R^2 C^2 - 2\omega^2 LC)}$$

Om Δ litet:

$$\sqrt{1+\Delta} \approx 1+0.5\Delta$$

$$\frac{1}{1+\Delta} \approx 1-\Delta$$

$$R\left(1+\frac{\omega^2 L^2}{2R^2}-\omega^2 LC+\frac{\omega^2 R^2 C^2}{2}\right)(1-\omega^2 R^2 C^2+\omega^2 2LC)=$$

$$R(1-\omega^2 R^2 C^2+\omega^2 2LC+\frac{\omega^2 L}{2R^2}-\frac{\omega^4 R^2 L^2 C^2}{2R^2}+\frac{\omega^4 L^3 C}{R^2}-\omega^2 LC+\omega^4 R^2 LC^3-$$

$$\omega^4 2L^2 C^2+\frac{\omega^2 R^2 C^2}{2}-\frac{\omega^4 R^4 C^4}{2}+\omega^4 R^2 LC^3)$$

Försumma alla termer innehållande tre eller fler reaktiva termer.

$$|Z|=R\left(1+\omega^2 LC+\frac{\omega^2 L^2}{2R^2}-\frac{\omega^2 R^2 C^2}{2}\right)$$

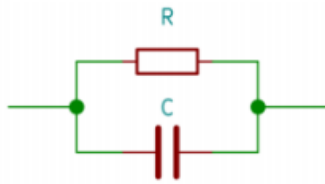


$L_s - R_s$:

$$Z = R + j\omega L = R \left(1 + j \frac{\omega L}{R} \right)$$

$$|Z| = R \left(1 + \frac{1}{R^2} (\omega L)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow R \left(1 + \frac{\omega^2 L^2}{2R^2} \right)$$

$$\arg(Z) = \arctan \left(\frac{\omega L}{R} \right)$$



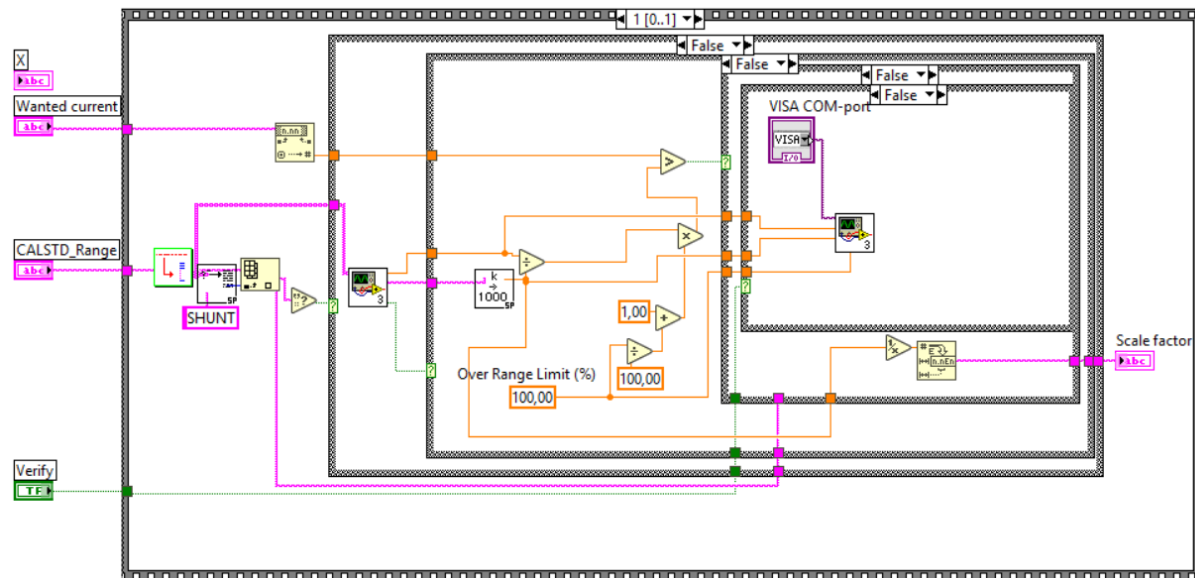
$C_p - R_p$:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\omega C \rightarrow Z = \frac{R}{1 + j\omega RC} = \text{konjugat} = \frac{R - j\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2}$$

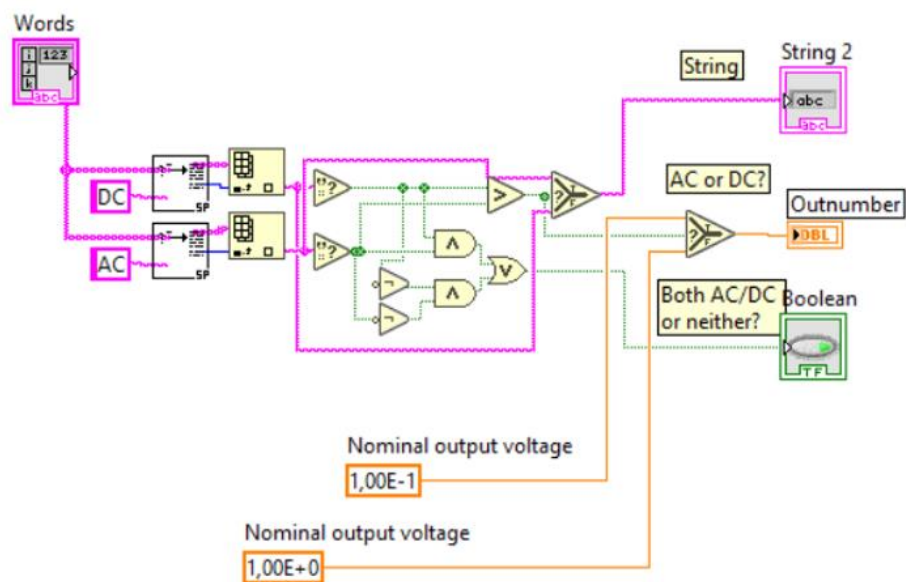
$|Z|$ med $\sqrt{1 + \Delta} \approx 1 + 0.5\Delta$ samt $\frac{1}{1+\Delta} = 1 - \Delta$ ger:

$$|Z| = R \left(1 + \frac{\omega^2 R^2 C^2}{2} \right) \cdot (1 - \omega^2 R^2 C^2) = R \left(1 - \frac{\omega^2 R^2 C^2}{2} \right)$$

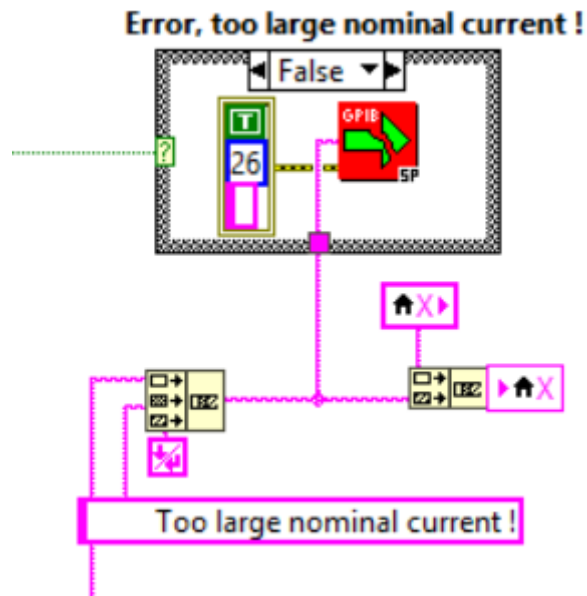
$$\arg(Z) = \arctan \left(\frac{\omega R^2 C}{R} \right) = \arctan(\omega RC)$$

LabVIEW:

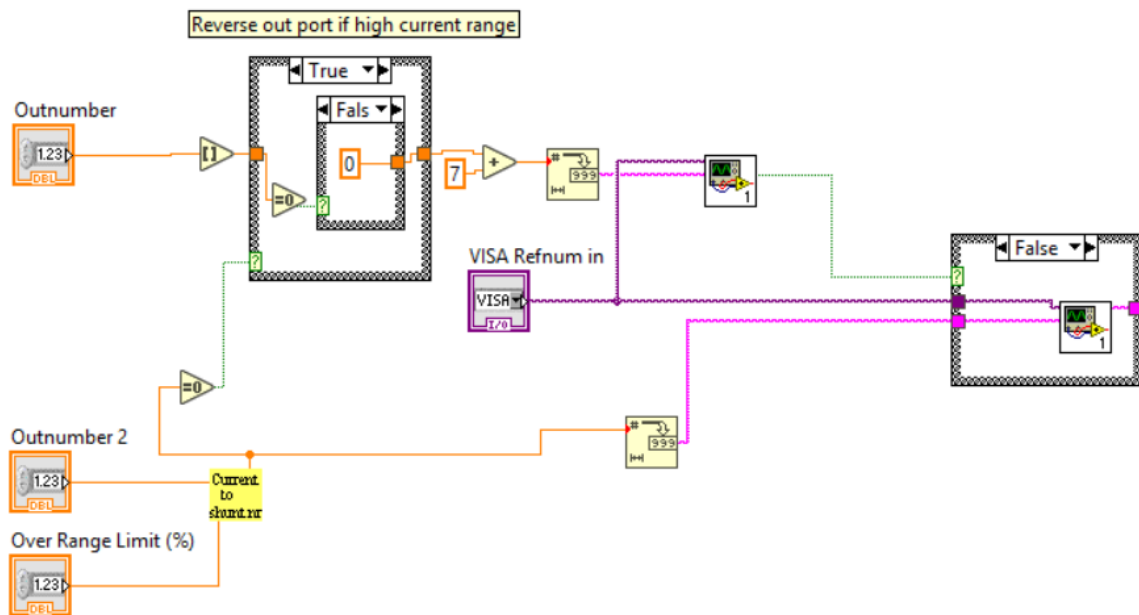
Huvudprogrammet för inställning av rätt shunt. Programmet har nyttjats för den gamla shunt, men är nu uppdaterat för att hantera AC och DC, samt slå om mellan hög och lågström. Till vänster kommer önskad ström, samt vilken shuntkoppling in som strängar från ovanliggande program.



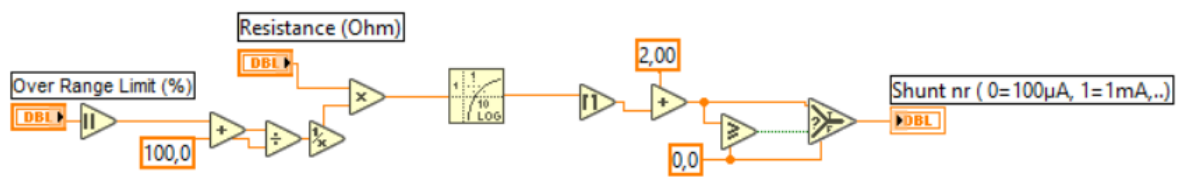
SubVI som lyfter fram om AC eller DC ska ställas in, skickar felmeddelande om inget av de två finnes.



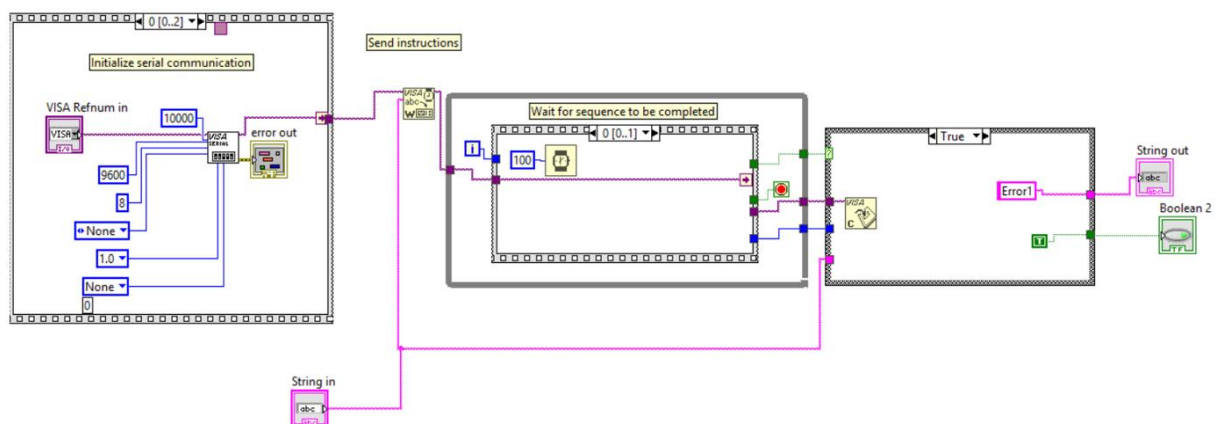
Felmeddelande skickas till RISE eget framtagna subVI för felhantering.



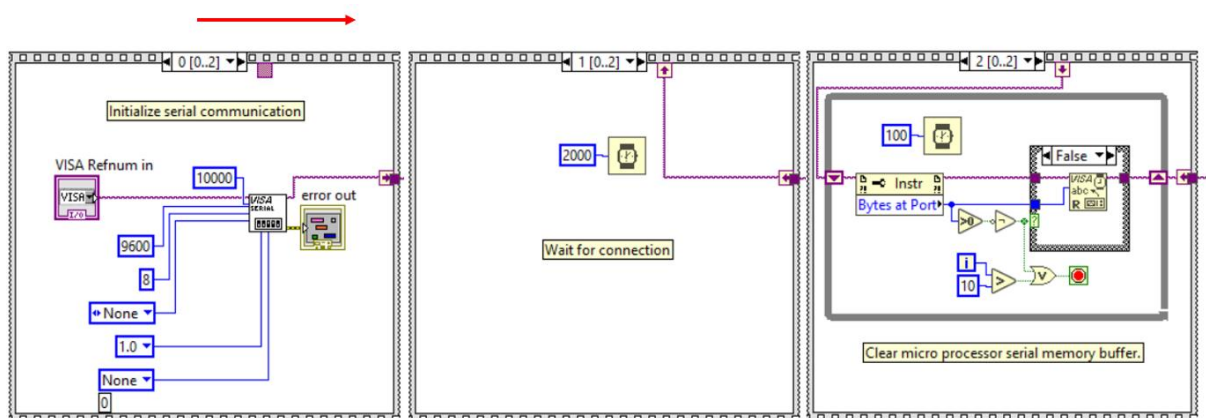
Meddelande för inställning av AC eller DC skickas först, om lyckat så går den vidare till att ställa in rätt shunt.



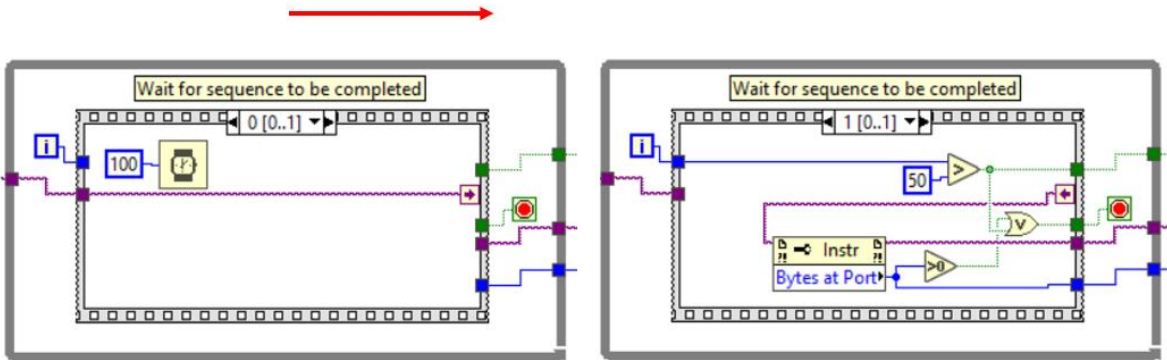
Shuntarnas resistans ökar i dekader. Genom att ta fram 10-log för motstånden och addera med 2 fås heltalsvärde 0-7 att skickas till mikrokontroller för rätt val.



SubVI för att sända meddelande till mikrokontroller.

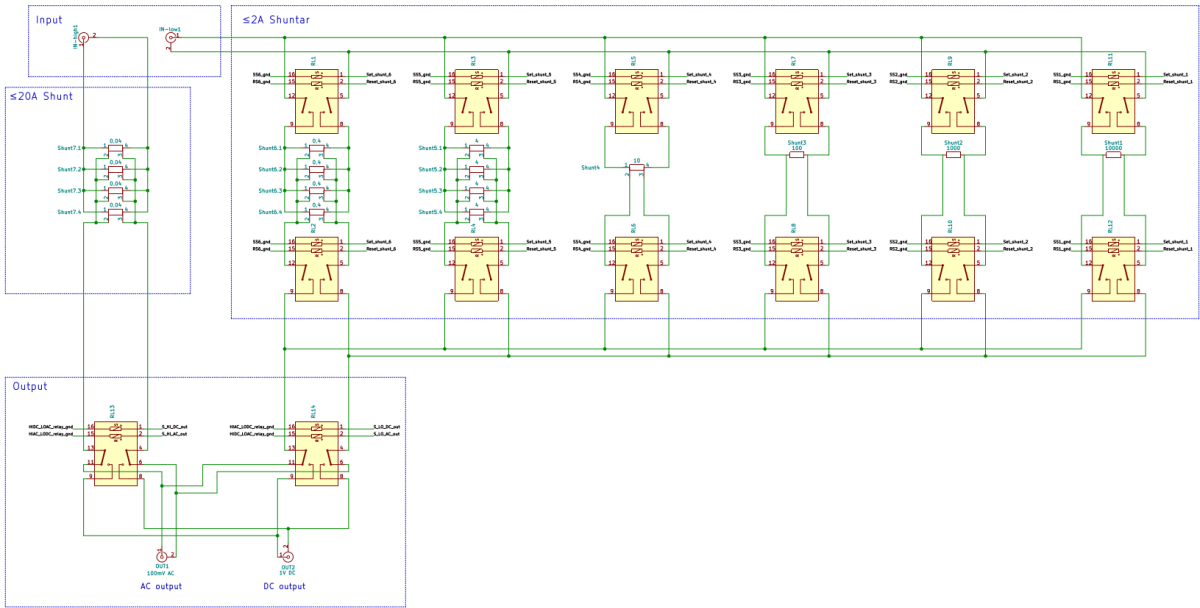


Vänstra sekvensblocket.

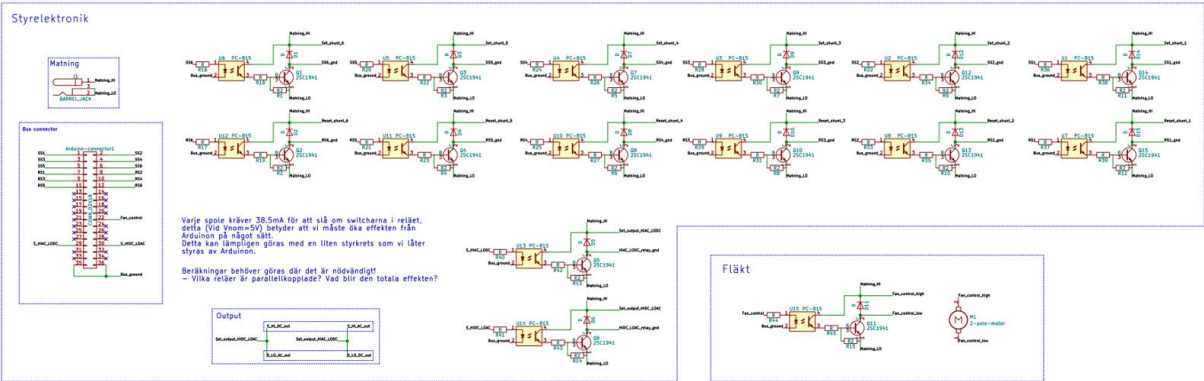


Mellersta sekvensblocket.

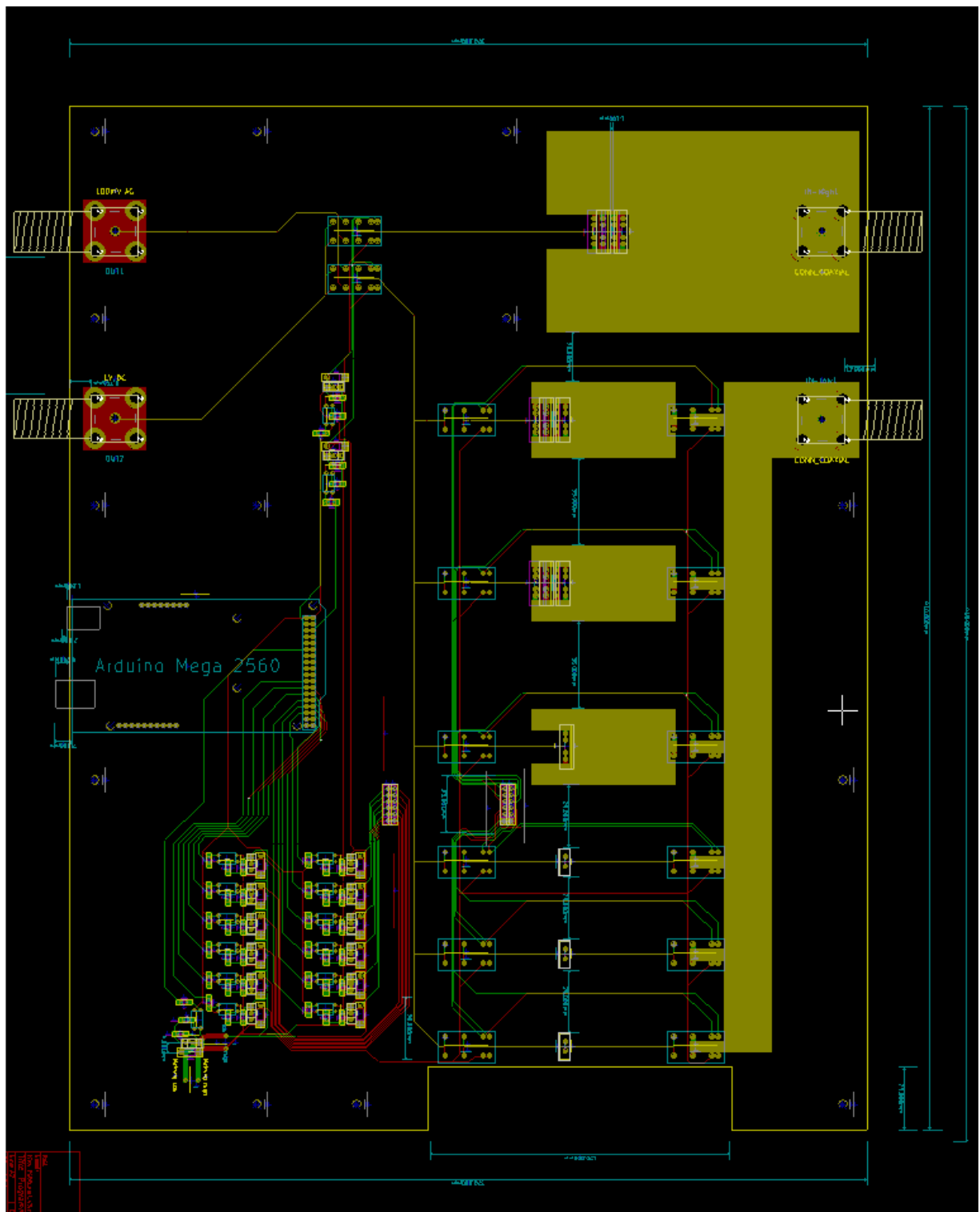
KiCad:



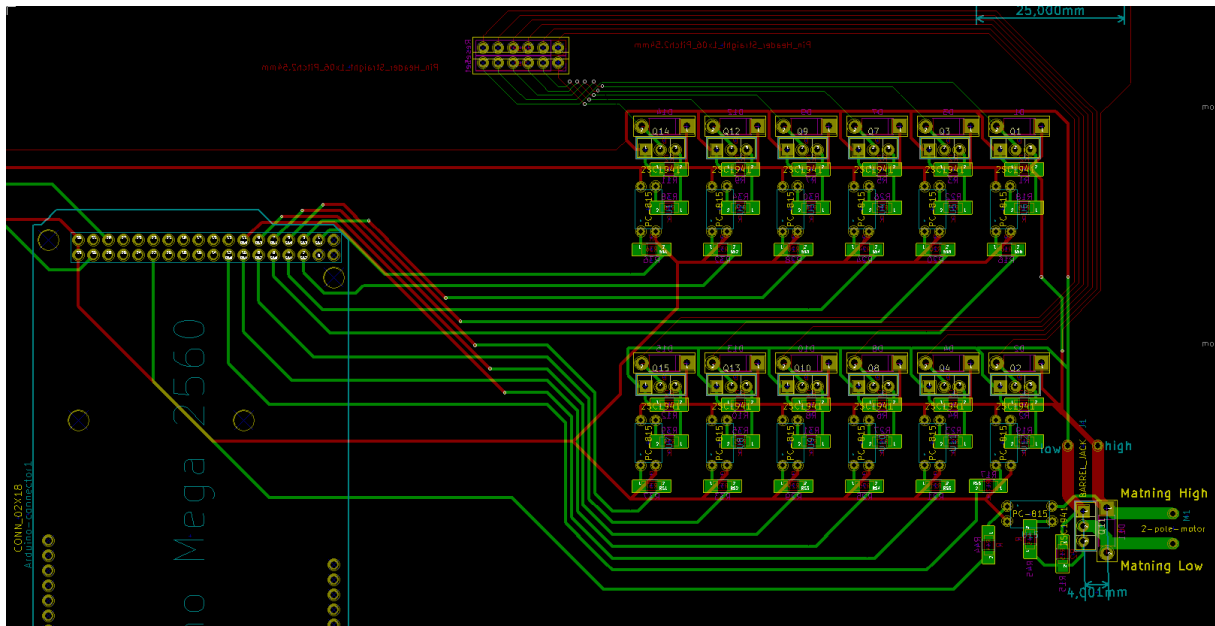
Shunt och reläkrets eeschema



Förstärkningskrets samt utgångar från mikrokontroller eeschema



Komplett schema över skannerns PCB.



Förstärkningskretsar samt anslutning mot mikrokontroller i PCB-utförande.

