

Separation factor measurement module

Examensarbete Elektroingenjör, vid Institutionen för signaler och system

Linus Strömsnes

EXAMENSARBETE 2016

Separation factor measurement module

Linus Strömsnes



CHALMERS

Institutionen för signaler och system
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sweden 2016

Separation factor measurement module
Linus Strömsnes

© Linus Strömsnes, 2016.

Handledare: Göran Hult, Institutionen för signaler och system
Examinator: Bertil Thomas, Institutionen för signaler och system

Examensarbete 2016
Institutionen för signaler och system
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telephone +46 31 772 1000

Titelsida: 3D-vy av kretskortet i KiCad.

Typeset using L^AT_EX

Separation factor measurement module
Linus Strömsnes
Department of Signals and Systems
Chalmers University of Technology

Abstract

The friction in a ball/roll-bearings can have a decisive factor in the bearings functionality. In a rotating bearing the metallic surfaces are separated by a thin layer of lubricating oil in order to reduce friction and extend life of the bearing. Due to various factors, the metallic surfaces goes through the oil layer and come in direct contact with each other. In order to monitor and analyze the amount of contact a single conditioning unit has been developed. SKF:s testing department have recently moved in to new facilities and are undergoing extensive upgrades. The existing measuring module are from 1980 and has become outdated and the lack of documentation makes the design hard to maintain. There are also some improvements that needs to be done in order for the module to fit in the new interface in the updated electric design. The project included the selection of components, simulations of the hardware and design of a printed circuit board. Software to the module and for some communication with LabView has also been developed.

Keywords: SKF, ball-bearing, ball-bearings, roll-bearing, roll-bearings, bearing testing, microcontroller, PCB.

Separation factor measurement module
Linus Strömsnes
Institutionen för signaler och system
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Friktionen i kullager och rullager har en avgörande faktor på dess funktionalitet så i ett roterande lager separeras de metalliska ytorna av en smörjfilm med syfte att minska friktionen och öka livslängden. På grund av flertalet olika faktorer sker det genomslag av smörjfilmen där metallytorna kommer i direkt kontakt med varandra. I syfte att övervaka och analysera dessa genomslag har någon gång under 80-talet ett mätinstrument tagits fram. Nu har SKF:s avdelning för lagerprovning flyttat in i nya lokaler och genomfört omfattande uppgraderingar och då har det varit ett önskemål att förnya och förbättra detta mätinstrument samt att få en bättre förståelse till dess funktionsprincip för att bättre kunna förstå mätresultaten. I arbetet har det ingått att gå igenom det gamla mätinstrumentet och att få en förståelse för principen och sedan konstruera en ny med en del förbättringar i linje med de krav som har ställts. Projektet har innefattat simuleringar av hårdvaran, val av komponenter och design av kretskort samt montering till en färdig modul för montering i de befintliga skåpen i anslutning till mätriggen. Mjukvara för modulens microcontroller har också konstruerats samt ett VI i LabVIEW för kontroll av modulen.

Nyckelord: SKF, kullager, rullager, lagerprovning, kretskort, microcontroller, mönsterkort, PCB.

Förord

Examensarbetet ingår som ett moment på elektronikingenjörsprogrammet, 180 HP, vid Chalmers tekniska högskola och omfattar 15 HP. Projektet har utförts på SKF:s avdelning för lagerprovning i Göteborg där större delen av arbetet också har utförts.

Jag vill förutom medhjälparna på SKF Test Center Göteborg rikta ett särskilt stort tack till mina handledare:

- John Svensson, AB SKF, Test Center Göteborg.
- Göran Hult, Institutionen för signaler och system på Chalmers tekniska högskola.

Och för alla diskussioner och feedback på olika tankar och idéer vill jag också särskilt tacka:

- Olle Bankeström, AB SKF.

Linus Strömsnes, Göteborg, 2016

Innehåll

Beteckningar	xi
Figurer	xiii
Tabeller	xv
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Mål	1
1.4 Avgränsningar	2
2 Kravspecifikation	3
3 Teknisk bakgrund	5
3.1 Kullager/Rullager	5
3.1.1 Separationsfaktorn	5
3.1.1.1 Smörjmedlets inverkan på mätningen	6
3.1.2 Lagret som en elektrisk komponent	6
3.1.3 Strömmens/spänningens inverkan på lagret	7
3.2 Operationsförstärkare	7
3.3 Digital potentiometer	8
3.4 PIC-processor	9
3.5 SPI	9
3.6 A/D-omvandling	10
3.7 DC/DC-omvandlare	11
3.8 LCD	11
3.9 Mjukvaror	12
3.9.1 LTspice	12
3.9.2 MPLAB	12
3.9.3 KiCad	13
3.9.3.1 Kopplingsschema	13
3.9.3.2 PCB	14
3.9.4 LabVIEW	14
4 Konstruktion	17
4.1 Spänningsförsörjning av kretsens olika delar	17

4.2	Ström-/spännings-reglering genom/över lagret	19
4.3	Operationsförstärkare OPA350	22
4.4	Aktivt lågpasfilter	23
4.5	Kalibrering	24
4.5.1	0 procent separation	24
4.5.2	100 procent separation	26
4.6	PIC16F886	29
4.6.1	Menysystemet	30
4.6.2	ADC	33
4.6.3	Separationsfaktorn	33
4.6.4	Kalibrering	34
4.6.4.1	0 procent	34
4.6.4.2	100 procent	35
4.6.4.3	Standardinställning	37
4.6.5	Inställningar	37
4.6.5.1	Ändra spänningen/strömmen över/genom lagret . . .	38
4.6.5.2	ADC-gain	39
4.6.5.3	Reglera reostaten till specifikt läge	40
4.6.6	Bakgrundsbelysning	41
4.7	Styrning via LabVIEW	42
4.8	Kretskortet	43
5	Resultat	45
6	Diskussion	47
6.1	Potentiella förändringar av modulen	47
6.2	Alternativa lösningar	48
	Referenser	49
A	Bilaga A	I
A.1	Additional data and information	I
B	Bilaga B	III
B.1	Elschema	III
B.2	PCB	IV
C	Bilaga C	V
C.1	main.c	V
C.2	macros.h	XXIV
C.3	lcd.h	XXV
C.4	lcd.c	XXVI
D	Bilaga D	XXXI
D.1	Front panel	XXXI
D.2	Block diagram	XXXII

Beteckningar

A/D	-	Analog/Digital
D/A	-	Digital/Analog
digiPOT	-	Digital Potentiometer/Digital Reostat
DIN	-	Deutsches Institut für Normung (Tyska institutet för standardisering)
GPIO	-	General Purpose Input/Output
IC	-	Integrerad krets
LCD	-	Liquid Crystal Display
LP	-	Lågpas
NI	-	National Instrument
PCB	-	Printed Circuit Board (Mönsterkort)
SPI	-	Serial Peripheral Interface

Figurer

3.1	Tvåradigt rullager i genomskärning. [2] [3]	5
3.2	Förstärkarkoppling, icke-inverterad. $A_v = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{R1+R2}{R1}$	8
3.3	Illustration av digiPOT.	8
3.4	SPI-buss. Det kan vara flera slavar kopplade till samma master. [13]	9
3.5	Succesiv A/D-omvandling. [12]	10
3.6	LCD med controller Hitachi HD44780	11
3.7	Bild av ett elschema i KiCad.	13
3.8	Olika lager i ett kretskort. [18]	14
3.9	Överst är blockdiagramuppbyggd kod och under det tillhörande grafiska gränssnittet (koden i bilderna är inte relaterade till projektet).	15
4.1	Blockschema över modulen.	17
4.2	Spänningsdelning för att sänka spänningen.	18
4.3	Spänningsdelning mellan lagret, reostaten och övriga resistorer.	19
4.4	Strömmen som flyter genom lagret beroende på reostaten.	19
4.5	Strömmen som flyter genom lagret beroende på reostaten.	20
4.6	Spänningen över lager vid 100 procent separation.	20
4.7	Illustration av digiPOT.	21
4.8	Modulens LP-filter.	23
4.9	Koppling i LT-Spice	24
4.10	Späningsvariationen över lagret och 100 Ω resistorn beroende på reostatens resistans (se Ref.-1 i figur 4.9).	24
4.11	Späningsvariationen över lagret och 100 Ω resistorn beroende på reostatens resistans (se Ref.-1 i figur 4.9).	25
4.12	Utsignalen från OP 1 (märkt U1 i figur 4.9) vid 0 procent varierar beroende på reostatens resistans (se Ref.-2 i figur 4.9).	25
4.13	Spänningsfallet över reostaten med reostaten inställt på 50 $k\Omega$.	27
4.14	Spänningsfallet över reostaten med reostaten inställt på 10 $k\Omega$.	27
4.15	Spänningsfall över digiPOT.	28
4.16	Förstärkning med en faktor av 71 gånger.	28
4.17	Modulens LP-filter.	29
4.18	Modulens framsida.	30
4.19	Uppbyggnad av menyerna.	32
4.20	Flödesschema för loopen i huvudrutinen.	34
4.21	Kalibrering av signalnivån representativ för 0 procent separation.	35
4.22	Kalibrering av signalnivån representativ för 100 procent separation.	36

4.23	Återställning av signalnivåerna för 0 respektive 100 <i>procent</i> separation till standard nivåer.	37
4.24	Flödesschema över funktionen för att reglera strömmen genom lagret.	38
4.25	Flödesschema för hur beräkningsbasen för ADC regleras.	39
4.26	Flödesschema över funktionen för att sätta digiPOT till specifikt läge.	40
4.27	Flödesschema över funktionen för att sätta reglera bakgrundsbelysningen.	41
4.28	Modulens flödesschema vid extern styrning.	42
4.29	Användarpanel i LabVIEW.	43
6.1	Hur sänkning av spänningen över lagret går till.	47

Tabeller

3.1	Exekveringstiden för olika instruktioner. [15]	12
4.1	Tiden för utsignalen att nå olika nivåer	23
4.2	Modulens anslutningar.	30
4.3	Tabell över olika förstärkningar.	33

1

Inledning

Detta examensarbetet handlar om att konstruera en modul för mätning av lagrets samt valt smörjmedels förmåga att separera rullkropparnas och lagerringarnas ytor, vidare i rapporten kallad separationsfaktor.

1.1 Bakgrund

SKF grundades redan 1907 och växte snabbt till ett internationellt företag som idag finns i samtliga världsdelar [1]. SKF tillverkar, utvecklar och säljer roterande lager i olika typer av utförande och varierande storlekar till flertalet industrier på ett globalt plan i hela världen. På SKF:s avdelning för lagerprovning i Göteborg utförs flertalet tester på allehanda lager. En mätning innefattar smörjfilmen där man mäter separationsfaktorn. Det finns en befintlig mätförstärkare för dessa mätningar men dess gränssnittet passar inte mot den nya mätutrustningen. Avdelningen för lagerprovning håller på att flytta in i nya lokaler och utför omfattande uppgraderingar.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att uppgradera den befintliga mätförstärkaren och göra vissa förbättringar.

1.3 Mål

Målet är att konstruera en mätförstärkare för mätning av separationsfaktorn i roterande lager. Modulen skall vara inkapslad i en förpackning för montering på en 35 mm DIN-skena och storleksmässigt passa i tillsammans med övriga moduler i de elskåp som finns till riggen. Vidare önskas matningsspänningen vara +24 volt samt komplett och tydlig dokumentation skall finnas. Mätningens upplösning bör kunna regleras, detta kan göras med variabla resistorer. Då för stora strömmar kan skada lagret önskas att detta också kan regleras.

1.4 Avgränsningar

Projektet innefattar enbart mätförstärkarens hårdvara och mjukvara. Modulen skall sammankopplas med redan befintlig mjukvara för sampling av separationsfaktorn. Praktiska prov har ej kunnat genomföras då maskinen under tiden för detta arbete varit demonterad för uppgradering/renovering.

2

Kravspecifikation

Den kravspecifikation som arbetades fram vid projektets start är uppstaplade i listan nedan.

- Drivspänning: $+24\text{ V}$ och *Jord*.
- Modul monterbar på 35 mm DIN-skena.
- Möjlighet att reglera strömmen som flyter genom lagret.
- Dokumentation av modulen och dess princip.
- En djupare förståelse för själva mätningen och vad som kan inverka på resultatet.

3

Teknisk bakgrund

I det här kapitlet beskrivs olika komponenter som används i projektet samt en del fakta om hur de är uppbyggda och fungerar. Även använda programvaror och övrig teknisk fakta presenteras.

3.1 Kullager/Rullager

Det finns väldigt många typer av lager med två av de vanligaste är kullager och rullager. De är uppbyggda efter samma princip. Det mest vitala är en innerring och en ytterring som åtskiljs av antingen kulor eller rullar som roterar. För att minska friktion och kyla lagret separeras metallytorna av en tunn smörjfilm.

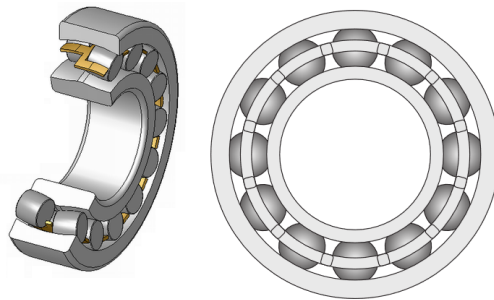


Figure 3.1: Tvåradigt rullager i genomskärning. [2] [3]

3.1.1 Separationsfaktorn

Separationsfaktorn används som en indikation för att säkerställa att ett lager under arbete bygger upp en tillräcklig smörjfilm för att kunna rotera med så minimal friktion som möjligt. Smörjfilmen är extremt viktig. En otillräcklig smörjfilm kan medföra allvarliga skador på lagret. En annan konsekvens av en otillräcklig smörjfilm är stora förluster genom värme på grund av den friktion som uppstår mellan lagerytorna.

De metalliska ytorna i ett lager är inte helt perfekt släta vilket resulterar i vissa genomslag av den tunna smörjfilm som separera dem. Efter en viss tids inkörning brukar dock ytorna slipa till sig något mot varandra vilket resulterar i färre genomslag. Genom att registrera och logga dessa genomslag över tiden kan man

ange ett mått på hur stor andel av lagerytorna som är separerade från varandra.

Separationen registreras som antingen kontakt eller inte kontakt, 0 *procent* separation eller 100 *procent* separation, och anges i hur stor andel separation det är i lagret över tid. På grund av lagerytornas operfekta yta uppstår det genomslag av smörjfilmen där lagerytorna kommer i kontakt med varandra. Dessa genomslagspunkter kan vara väldigt små vilket medför att genomslagsfrekvensen kan bli väldigt varierande och väldigt hög, för detta behövs ett filter för att generera ett mätbart värde.

3.1.1.1 Smörjmedlets inverkan på mätningen

Då ett lager under arbete bygger upp en smörjfilm som separerar metallytorna från varandra hade det varit idealt om detta smörjmedie inte hade någon ledningsförmåga och därmed oändlig resistans. Smörjmediet i sig har en väldigt hög resistans men på grund av föroreningar i form av metall eller annat material med låg resistans kommer den totala resistansen i en förorenad smörjfilm ha egenskaper som är betydande och negativt påverkar modulens funktionalitet genom att potentialen innan lagret kan bli för hög och minska utsignalens upplösningen.

$$R_{smörjfilm} = \frac{Oljans\ resistivitet \cdot Smörjfilmens\ tjocklek}{Lagrets\ kontaktarea} \quad (3.1)$$

En "torr" mineral oljas resistivitet har blivit uppmätt till $10^{14} \Omega \cdot cm$ vilket motsvara en låg ledningsförmåga. Totalt i ett lager motsvarar detta nivåer på tiotals $M\Omega$. En olja som däremot är använd och blivit utspädd av föroreningar så som fukt och andra ogynnsamma partiklar kan ha en betydligt lägre resistivitet på $10^8 \Omega \cdot cm$ vilket med samma beräkningsparametrar motsvarar tiotals $k\Omega$ i ett lager. En annan faktor som påverkar resistiviteten i oljan är temperaturen, resistiviteten ökar med temperaturen. [4]

3.1.2 Lagret som en elektrisk komponent

I avseende till projektet och modulens funktionalitet uppfattas lagret som en resistor. Lagrets resistans mellan inner- och ytterring är okänt men antas vara väldigt låg. För att styrka den teorin har ett medelstort lager har uppmätts till någon Ω utan belastning och runt $0,2 \Omega$ vid last motsvarande muskelkraft, i sammanhanget väldigt låg last. Dessa låga nivåer gör att lagrets resistans i stort sett kan bortses från, resonemang och gränsvärden runt detta återfinns i kapitlet "Konstruktion".

För att kunna mäta separationen i ett arbetande lager krävs att antingen den inre eller yttre ringen är jordad, att föredra är samma jord som elskåpet och i förlängningen mätmodulen så att potentialen i jordpunkterna inte skiljer sig åt.

3.1.3 Strömmens/spänningens inverkan på lagret

Effektutvecklingen som uppstår på grund av strömmen/spänningen genom/över lagret i relation till varandra samt lagrets resistans är det som i sig kan skada lagret. Om effektutvecklingen är tillräckligt stor kan den process som uppstår efterliknas med den vid svetsning. Materialet värms upp och kan smälta vilket kan resultera i att ytan blir missformad, gropig eller bergig vilket i sig kan minska separationen. Det kan också resultera i omhårdning som i sin tur kan förändra lagrmaterialets struktur så att det riskerar att inte tåla lika höga belastningar och kan spricka. Lagret får ofta områden med missfärgat där temperaturen stuckit iväg till skadliga nivåer. [5] [6]

Höga spänningar över ett lager kan medföra stora risker i form av gnistbildning och elektrisk erosion. Det finns inga studier på detta och således inga gränsvärden eller riktlinjer för hur detta skall hanteras.

Även smörjmedlet kan vara känsligt för onormalt höga värmenivåer och ändra kemisk sammansättning eller till och med börja brinna [5]. Genom en förändring av den kemiska sammansättningen kan smörjförmågan kraftigt försämrats och större friktion uppstå som i sin tur resulterar i ännu högre värmeutveckling och större skador på lagret och dess funktion.

Faktorer som påverkar är:

1. Typ av lager
2. Lagrets storlek
3. Last
4. Rotationshastighet
5. Smörjmedie [5]

3.2 Operationsförstärkare

Enskilt används en operationsförstärkare för att göra jämförelser mellan två spänningar. För att erhålla funktionen som förstärkare krävs att man ansluter två passiva resistorer och gör en negativ återkoppling, operationsförstärkarens utgång kopplas via spänningsdelning tillbaka till minusingången. För att erhålla en positiv förstärkning görs en icke-inverterad förstärkarkoppling [7] .

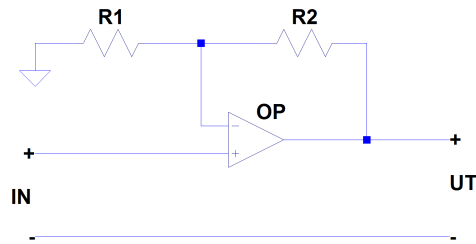


Figure 3.2: Förstärkarkoppling, icke-inverterad. $A_v = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{R1+R2}{R1}$

I många fall antas operationsförstärkare vara ideala med oändlig inresistans, obefintlig utresistans och en oändlig förstärkning. Ofta har de icke ideala parametrarna väldigt lite påverkan på modellen [7]. I detta projektet har det visats sig att dessa icke ideala parametrar haft en väsentlig inverkan på funktionaliteten.

3.3 Digital potentiometer

En digital potentiometer kan benämnas som en digiPOT. En digiPOT är uppbyggd som ett nät av resistorer och kontakter. Wiper-benet är programmerbart och kan ansluta till samtliga kontaktpunkter mellan resistorerna.

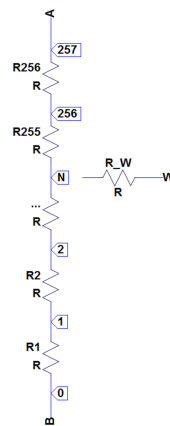


Figure 3.3: Illustration av digiPOT.

Det finns primärt två typer av digitala potentiometrar. Konfigurerad som potentiometer eller reostat. De kan ha flyktigt eller icke-flyktigt minne, det finns även de som endast går att programmera en gång, och finns i ett flertal storlekar allt ifrån $1\text{ k}\Omega$ till $1\text{ M}\Omega$ i total resistans mellan ändlägena A till B. Storleken på resistornätet variera också och finns vanligtvis från 32 till 1024 *steg*, 5– till 10 – *bitar* [8].

Olika potentiometrar accepterar någon typ av kommunikationsprotokoll för att styras. Ofta I^2C eller SPI men det finns även andra protokoll.

Användningsområdena för en digital potentiometer är många. Ett vanligt användningsområde är i förstärkarkretsar där man kan justera förstärkningen eller i analoga filter där gränsfrekvensen kan justeras [9] .

3.4 PIC-processor

En mikrokontroller är en enskild IC-krets och fungerar principiellt som en dator med ett antal funktionella GPIO-portar och olika en rad hårdvarufunktioner knutna till dessa. Mikrokontroller kan programmeras efter användarens önskemål i enlighet med dess specifikationer.

Det finns mikrokontroller med olika antal GPIO-portar och antal digitala/analoga ben samt olika storlekar av minne. Oftast har de en inbyggd klockoscillator men det går även att externt koppla en med andra specifikationer. Det finns även ett antal andra användbara funktioner så som A/D-omvandling och timers.

3.5 SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) är en seriell kommunikationsbuss som arbetar i full-duplex. Kommunikationen sker synkront mellan en masterenhet och en slavenhet. Masterenheten kan vara ansluten till flera slavenheter som aktiveras genom en aktivt låg signal kallad slave select (SS). Det finns ytterligare tre logiska signaler i bussen, serial clock (SCLK) som är den synkrona klockan och genereras av masterenheten tillsammans med master output (MOSI). Master input (MISO) genereras av slavenheten och bär med sig information till masterenheten. Det är masterenheten som väljer vilken slavenhet som det skall kommuniceras med, masterenheten måste även välja rätt klockpolaritet för att kommunikationen skall bli korrekt. Data skickas bitvis till ett shift-register, PIC16F886:s register är en byte (8-bitar) stort [14].

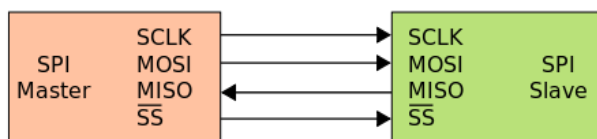


Figure 3.4: SPI-buss. Det kan vara flera slavar kopplade till samma master. [13]

3.6 A/D-omvandling

För att kunna tolka en analog signal i en digital krets krävs en A/D-omvandling som omformulerar den analoga spänningen till ett binärt tal. Ju fler bitar en A/D-omvandlare har ju högre upplösning blir det på det digitala värdet.

$$\Delta U = \frac{U_{REF+} - U_{REF-}}{2^n} \quad (3.2)$$

A/D-omvandlaren har n antal bitar och ΔU representerar spänningen per bit.

Den vanligaste metoden för att A/D-omvandla ett analogt värde till en digital representation är genom metoden successiva approximationer. Genom att använda en komparator och jämföra ett D/A-omvandlat värde.

Det finns flera tillvägagångssätt när en A/D-omvandling görs. Ett sätt är att börja från noll och räkna upp ett register som D/A-omvandlas och i komparatorn jämförs med den testade analoga signalen. Den här metoden är tidskrävande då den kräver många jämförelser [10]. Ett mer effektivt sätt är att räkna från andra hållet och sätta den mest signifikanta biten i registret som D/A-omvandlas till hög och successivt testa genom att om mindre sätta biten till låg och gå till nästa bit, om större sätts den aktuella biten till hög [11]. Den första metoden kräver 2^n antal jämförelser medans den senare endast n antal jämförelser, där n står för antal bitar i upplösningen.

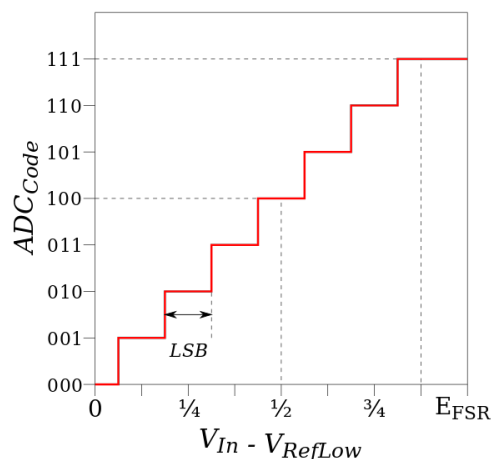


Figure 3.5: Succesiv A/D-omvandling. [12]

På grund av att man genom successiva approximation bara erhåller ett resultat som är större eller mindre än det jämförda analoga värdet blir felmarginalen motsvarande den minst signifikanta biten. Man kan dock minska felet ännu mer,

till halva den minst signifikanta biten, genom att om resultatet skiljer sig mer än halva den minst signifikanta biten addera 1 [11] .

3.7 DC/DC-omvandlare

En DC/DC-omvandlare används för att sänka eller höja olika likspänningsnivåer och är användbar när man använder flera komponenter med olika krav av matningsspänning.

Spänningsregulatorer kan exempelvis användas i mindre batteridrivna kretsar där batteriets spänning tenderar att sjunka och inte ger en långvarigt stabil spänningsnivå.

3.8 LCD

Den LCD:n, Liquid Crystal Display, som används i projektet är en två raders 16-segment display men en Hitachi HD44780 controller som kan tolka ASCII-tecken. Det finns 16 pinnar, två är dedikerade till bakgrundsbelysningen och fyller ingen annan funktion. Åtta är för att skicka data i byte-form utöver dessa finns det en som heter RS, R/W och en för att kontrollera kontrasten. Sedan finns det också två pinnar för matningsspänningen [15].

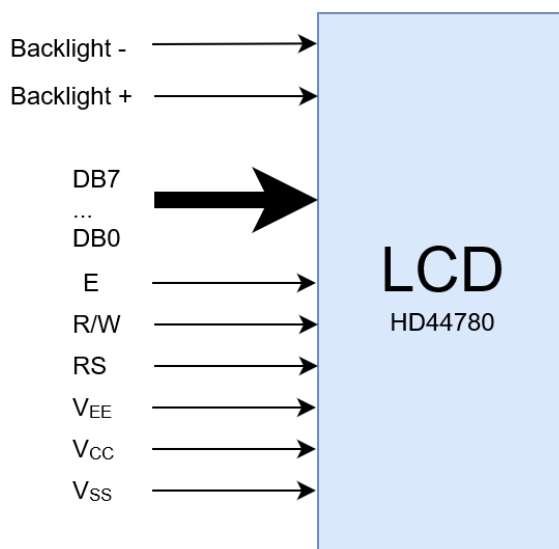


Figure 3.6: LCD med controller Hitachi HD44780

Först behöver displayen initieras vilket görs genom att sända olika kommandon med inställningar, däribland om man vill skicka 4-bitar eller 8-bitar åt gången. Vid varje falling-edge på enable-signalen läser kontrollern de pinnar som data skickas på och när 8-bitar har mottagits så kan antingen ett tecken skrivas ut eller

ett kommando utföras, detta beroende på om RS-signalen är hög eller låg. [15]

Timingen (hur länge olika portar skall vara höga och/eller låga i relation till varandra) är väldigt viktig även olika kommandon tar olika lång tid att bearbetas.

Table 3.1: Exekveringstiden för olika instruktioner. [15]

<i>Instruktion</i>	<i>Bearbetningstid</i>
<i>Clear display</i>	1,52m [s]
<i>Cursor home</i>	1,52m [s]
<i>Entry mode set</i>	37 μ [s]
<i>Display on/off</i>	37 μ [s]
<i>Cursor displayshift</i>	37 μ [s]
<i>Funktion set</i>	37 μ [s]
<i>Write data</i>	37 μ [s]

3.9 Mjukvaror

Här beskrivs de mjukvaror som varit väsentliga för projektet.

3.9.1 LTspice

LTSpice är utgivet av Linear Technology och fungerar som SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). SPICE är ett textbaserat program för att simulera analoga kretsar. LTSpice har ett enkelt lättarbetat gränssnitt och innehåller ett flertal användbara funktioner för att simulera olika typer av analoga kretsar. Det finns implementerbara simuleringsfiler till väldigt många olika komponenter från ett stort antal tillverkare. Fördelen med att importera de komponenter man vill använda är att de inte beter sig som ideala komponenter utan uppträder mer som i verkligheten. När man använder LTSpice bör man vara medveten om att simuleringarna inte nödvändigtvis överensstämmer med verkligheten.

3.9.2 MPLAB

MPLAB från Microchip är ett utvecklingsprogram för att programmera och simulera PIC-processorer. Programmet innehåller kompilatorer som gör att man kan skriva program i både C-kod eller maskinkod. Det finns även en debugger för att felsöka koden och en execution engine för att även kunna simulera hårdvaran [16]. Genom att ansluta en PICkit3 som är en programmerare från Microchip kan man överföra programmet till de flesta PIC-processorerna och går att ansluta med USB [17].

3.9.3 KiCad

KiCad är ett CAD-program som används för att designa kretskortslayouter och är helt gratis att använda.

3.9.3.1 Kopplingsschema

Till KiCad finns ett flertal olika bibliotek att ladda ner för diverse komponenter. Man kan även göra egna komponenter med hjälp av ett för komponenten tillhörande datablad. Man placerar sedan ut sina komponenter på ritningen och drar alla kontakter till dess specifika punkter. Man länkar sedan samtliga komponenter till ett passande fotavtryck som specificerar kretsens yttre mått och benplacering.

När man har placerat ut alla komponenter måste kopplingarna mellan dessa dras för att senare kunna skapa kopparlagren till kretskortet.

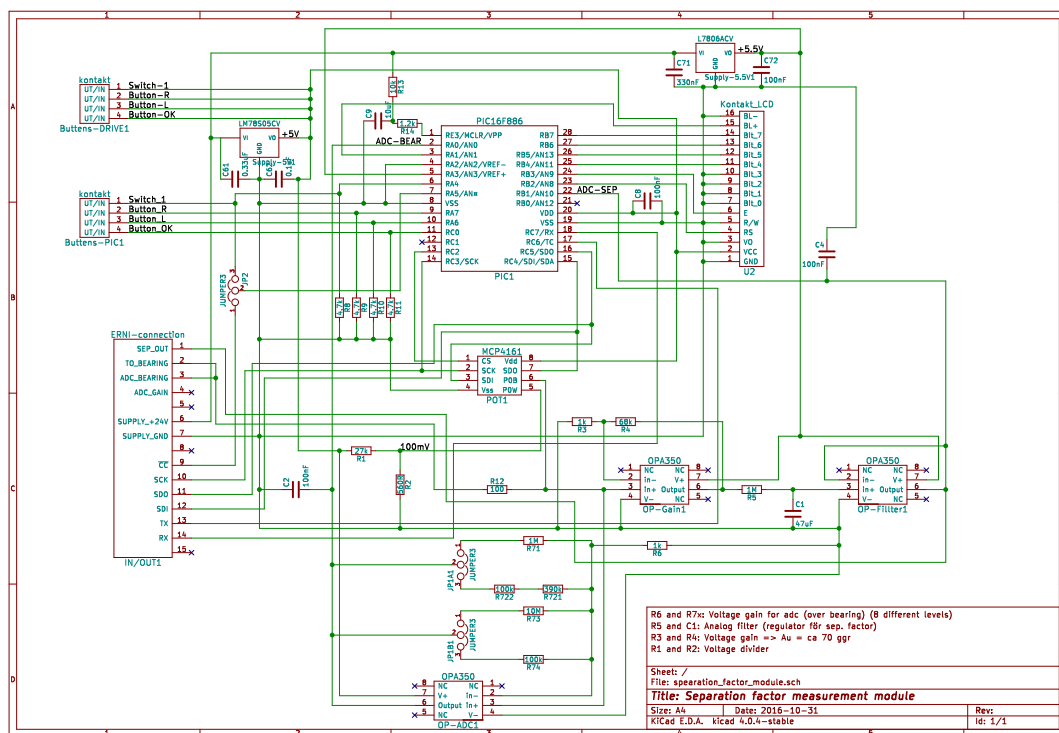


Figure 3.7: Bild av ett elschema i KiCad.

3.9.3.2 PCB

PCB (Printed Circuit Board) är ett kretskort som man monterar komponenter på och är uppbyggt i olika lager. Antalet lager syftar oftast till antalet kopparlager, som är de lager som sammanbinder komponenterna och ersätter sladdar. Mellan kopparlagren återfinns ett baslager, ett icke-ledande lager som ofta består av fiberglas. Utöver dessa är det vanligt med ett lager kallat lödmask, detta lagret är ofta färgat i en distinkt färg, som underlättar och skyddar kopparlagret från att misstag bli ihopplött på fel ställen under montering av komponenter. Valfritt är också att ha en så kallad silkscreen som används om man vill trycka text eller symboler på kortet.

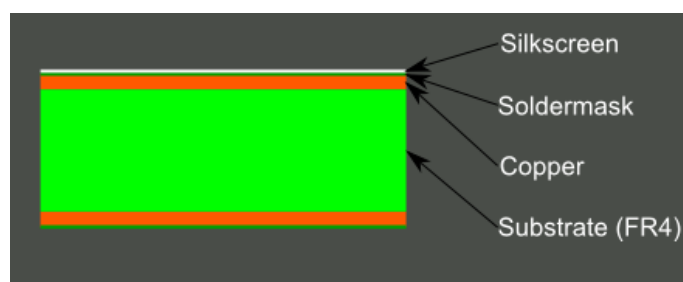


Figure 3.8: Olika lager i ett kretskort. [18]

3.9.4 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) är ett program utvecklat av National Instruments (NI) och har funnits sedan 1986, från början bara till Macintosh men nu finns det till de flesta operativsystem.

LabVIEW är ett mjukvaruprogram och används för att skapa virtuella instrument (VI) i olika grafiska gränssnitt. Programmeringen görs i två delar. I det ena görs det grafiska gränssnitt som presenteras och används av användaren och den andra innehåller själva koden som är uppbyggd i olika blockdiagramstrukturer.

LabVIEW kan programmeras för att kommunicera med en rad olika instrument och kan användas för att samla in och logga data i olika databaser. Man kan även göra mer komplexa program så som filter för att tolka insamlade data [19].

LabVIEW används för att sampla utsignalen från modulen och tolka separationsfaktorn men också för att kommunicera med modulen.

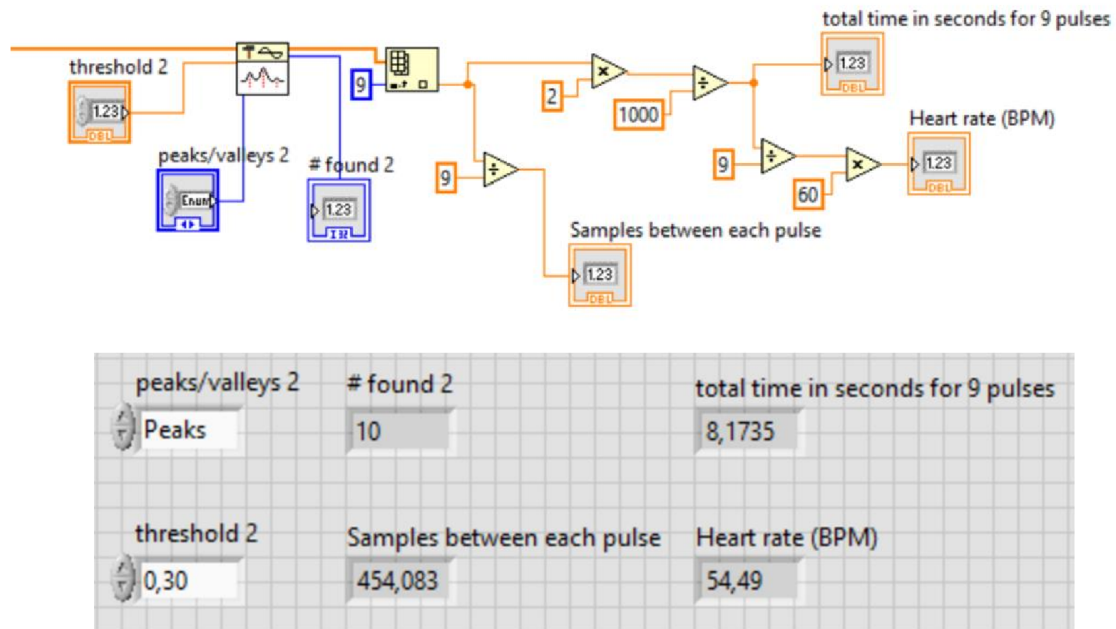


Figure 3.9: Överst är blockdiagramuppbbyggd kod och under det tillhörande grafiska gränssnittet (koden i bilderna är inte relaterade till projektet).

4

Konstruktion

I kapitlet konstruktion beskrivs den lösning som tagits fram och lite av hur tankegången har varit.

För att lättare få ett övergripande perspektiv kan modulen brytas ner i mindre delar.

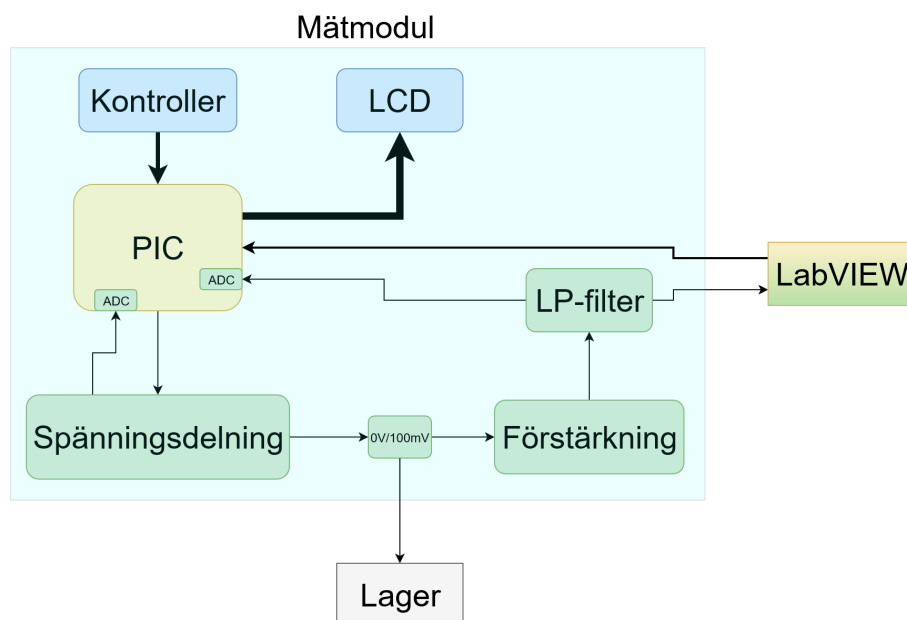


Figure 4.1: Blockschema över modulen.

4.1 Spänningsförsörjning av kretsens olika delar

Primärt används det tre olika försörjningsnivåer vad gäller spänning.

1. De digitala komponenterna
 - (a) PIC-processorn
 - (b) Digitala reostaten
 - (c) Digitala reostaten
 - (d) LCD:n

2. De analoga komponenterna

- (a) Förstärkningen
- (b) LP-filtret

3. Lagret

På kretsen finns det två olika spänningsregulatorer som omvandlar den matningsspänning om $+24\text{ V}$ som modulen externt matas med.

De digitala komponenterna kräver en matningsspänning på $+5\text{ V}$. Här har det används en DC/DC-omvandlare med en fast utspänning, L78S05CV, som ger en fast utspänning på $+5\text{ V}$ med kapacitet på upp till 2 A i utström [20].

Den andra är en L7806ACV, som också är en DC/DC-omvandlare, med en fast utspänning på $+6\text{ V}$ och är till för att försörja operationsförstärkarna som är kopplade som förstärkare av signalen som går via lagret samt för det aktiva LP-filtret [21]. Eftersom den maximala spänningen här önskas vara något över $+5\text{ V}$ när lagret har full separation räcker inte samma spänningsnivå som till de digitala komponenterna då utsignalen hade blivit mättad.

Kretsens tredje del som berör lagret och innefattar modulens primära funktion matas från $+5\text{ V}$ men sänks ytterligare genom spänningsdelning mellan en $27\text{ k}\Omega$ resistor och en $560\text{ }\Omega$ resistor som är parallellkopplad med den digitala reostaten som i sin tur är i serie med en $100\text{ }\Omega$ resistor och lagret.

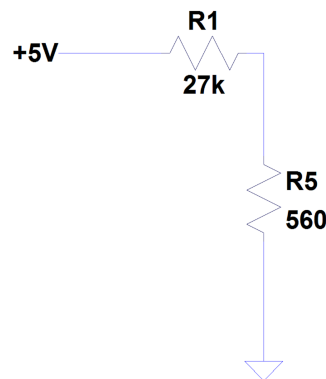


Figure 4.2: Spänningsdelning för att sänka spänningen.

Spänningsnivån efter resistorernas spänningsdelning kräver inte någon större noggrannhet. Vid full separation tolkas lagret som ett avbrott, beroende på smörjfilmens renhet vilket diskuteras i föregående kapitel, och resulterar i spänningen i den här punkten minus spänningsfallet över den digitala reostaten som förstärks och skickas ut från modulen, ett visst spänningsfall sker även i LP-filtret. Spänningsfallet över reostaten varierar beroende på resistansen och operationsförstärkarens input bias current, detta resoneras det mer kring under kalibrering.

4.2 Ström-/spännings-reglering genom/över lagret

För att reglera spänningen över, samt strömmen genom, lagret vid 0 procent separation används en digital reostat som tillsammans med lagret bildar en spänningsdelning mellan dessa. En digiPOT och $100\ \Omega$ resistor, plus lagret, är parallellkopplade mot en $560\ \Omega$ resistor och i serie med en $27\ k\Omega$ resistor.

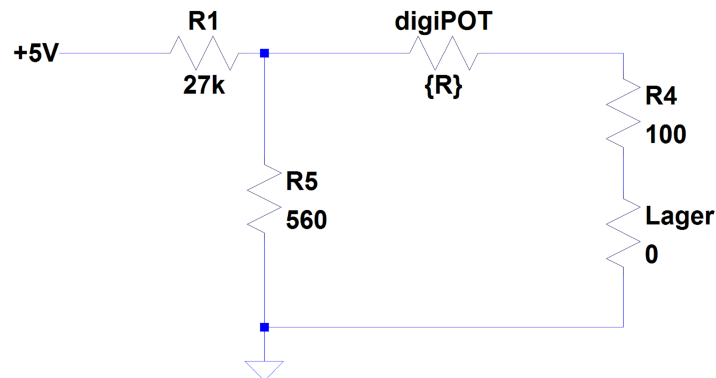


Figure 4.3: Spänningsdelning mellan lagret, reostaten och övriga resistorer.

Med reostaten inställt på $0\ \Omega$ erhålls högsta strömmen genom lagret. Vid simulering blir den maximala strömmen genom lagret $156,63\ \mu A$, några pA lägre beroende på lagrets resistans som är väldigt låg. Den lägsta strömmen blir runt $2\ \mu A$.

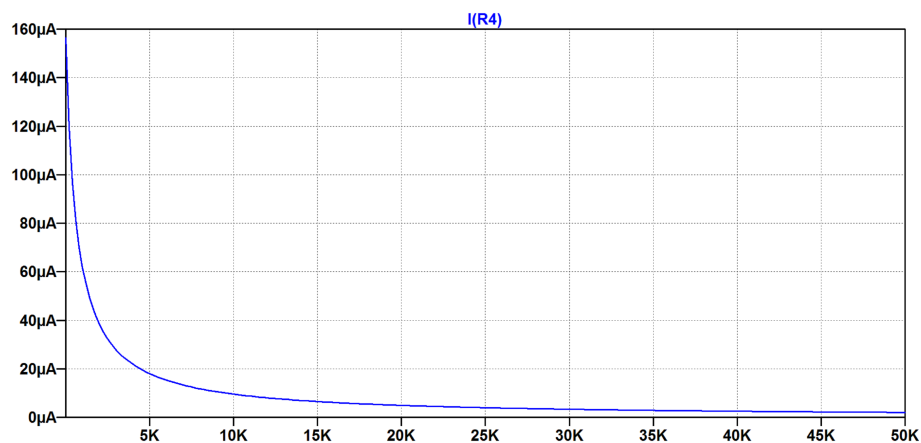


Figure 4.4: Strömmen som flyter genom lagret beroende på reostaten.

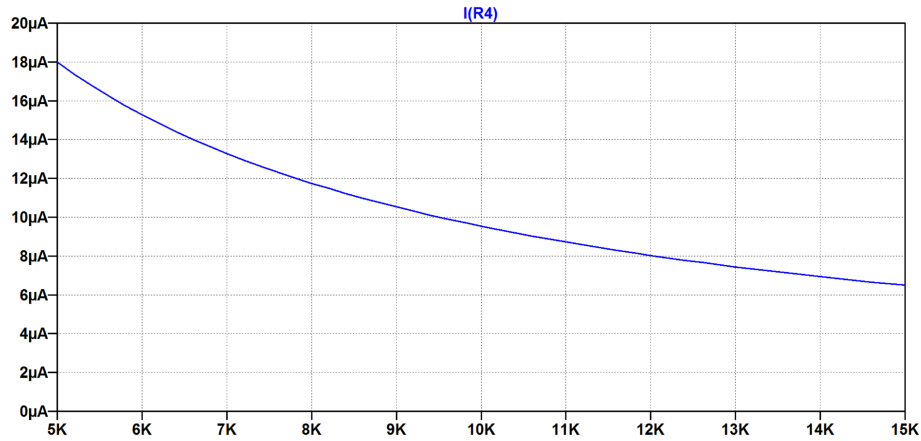


Figure 4.5: Strömmen som flyter genom lagret beroende på reostaten.

100 Ω resistorn är till för att spänningen över den plus lagret skall bli mätbar vid 0 procent separation (se figur 4.10). Då lagrets resistans är så låg kan spänningen över dessa, lagret plus 100 Ω resistorn, divideras med 100 för att få fram den ström som flyter genom lagret. 100 Ω resistorn resulterar också i att strömmen genom lagret sänks lite, *nA* – nivå när den digitala reostaten står på 50 $k\Omega$, och effektutvecklingen i lagret blir således lägre och risken att lagret skall skadas av detta minskar.

När lagerytorna är separerade av lagrets smörjfilm blir reistansen dramatiskt stor och spänningen över lagret blir maximal.

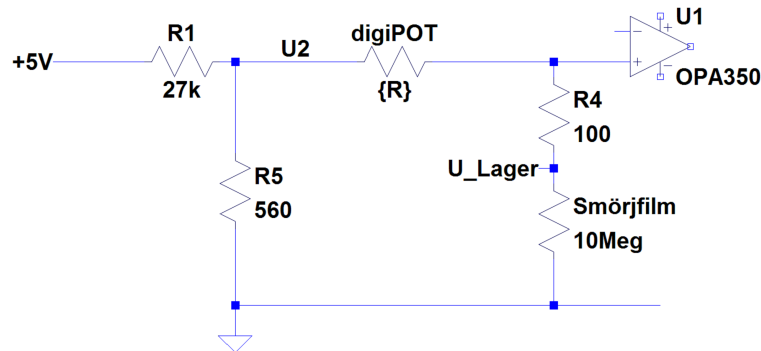


Figure 4.6: Spänningen över lager vid 100 procent separation.

$$U_{Lager} = U2 \cdot \frac{R_{Smörjfilm}}{R_{Smörjfilm} + R_{digiPOT}} \quad (4.1)$$

Det finns inga gränsvärden för vad som är tolererbart men enligt erfarenhet är runt $100mV$ en tolererbar nivå där gnistbildning som skadar lagret inte uppstår.

Den digitala reostaten kan via SPI-kommunikation från PIC-processorn ställas in på 257 olika nivåer mellan cirka $150\ \Omega$ till $50\ k\Omega$ beroende på R_W . Reostaten kan antingen direkt regleras till en vald nivå eller ökas/minskas succesivt genom att skicka två i följd 8-bitars kommandon [22]. Detta sker genom att under menyn "Change voltage over bearing" antingen öka eller minska resistansen. I första instansen ökar eller minskar reostaten 10 steg per klick och i efterkommande instans 1 steg per klick. Efter varje klick görs en A/D-omvandling och resultatet presenteras på displayen. Även strömmen som flyter genom lagret presenteras på displayen.

Ett annat alternativ är att ställa modulen till extern styrning och reglera reostaten via LabVIEW.

I den digitala reostaten är alla element lika stora och i den typ som används i projektet är det 256 element. Den totala resistansen för samtliga element tillsammans är angivet i ett intervall från $40\ k\Omega$ till $60\ k\Omega$ [22]. Genom att mäta ett element kan man räkna ut den aktuella resistansen genom att veta vilket steg wipern är ansluten till.

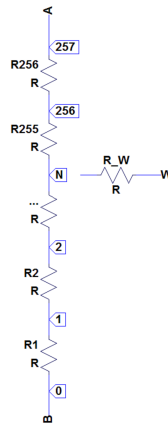


Figure 4.7: Illustration av digiPOT.

$$R_{WB} = \frac{R_{AB} \cdot N}{256} + R_W \quad [22] \quad (4.2)$$

N är värdet 0 till 256. Resistansen för wipern har mätts med en voltmeter. Detta utnyttjas för att kalibrera modulen. Initialt sätts wipern till position 257 vid uppstart av modulen då detta medför lägst ström genom lagret.

4.3 Operationsförstärkare OPA350

Operationsförstärkaren OPA350 är av typen "high precision op amp" har valts då den för projektet har en rad gynnsamma egenskaper.

- Slew-rate:
Hög slew-rate, $22\text{ V}/\mu\text{s}$, vilket gör att man eventuellt skulle kunna använda råsignalen innan filtret. Det har också visat sig ha en väsentlig inverkan för att lösa problemet med varierande resistans hos smörjfilmen (läs stycke 4.5.2).
- Rail-to-rail:
Då signalen ut från OPA350 kommer bli mättad fort beroende på att den maximala matningsspänningen inte är direkt hög är det av stor vikt att kunna förstärka signalen så nära förstärkarens ändlägen som möjligt. En fördel blir också att 0 V in blir nästan 0 V ut [7] .
- Single-supply:
Att kunna mata modulen med $+24\text{ V}$ och jord var en av grundkraven för projektet.
- Offset:
När operationsförstärkarens ingångssteg inte är balanserade med tillräckligt hög precision läggs det till eller dras ifrån en liten spänning på ingången. OPA350 har väldigt låg offset vilket är en fördel då det inte behövs någon extern offsetsjustering [7] .
- Input bias current:
I låg-pass filtret används en resistor med en väldigt hög resistans och med en hög input bias current hade spänningsfallet över den dragit ner slutsignalen för mycket. Med OPA350 begränsas spänningsfallet över filtret.

OPA350 finns bara förpackad med en operationsförstärkare per IC, den finns för både hålmonterade och ytmonterade kretskort. En nackdel är att den maximala matningsspänningen inte är så hög och således påverkar upplösningen på modulens utsignal.

I projektet används det tre operationsförstärkare.

1. Den första används för att förstärka signalen som representerar 0 procent eller 100 procent separation till nivån strax över 0 V och strax under $+6\text{ V}$.
2. Den andra är den aktiva delen i LP-filtret.
3. Den tredje används som förstärkare för att PIC-processorn skall kunna mäta spänningen över lagret.

4.4 Aktivt lågpasfilter

Utsignalen från förstärkarsteget är en fyrkantvåg med väldigt hög frekvens. För att kunna registrera denna signalens förändringar och generera ett medelvärde används ett LP-filter.

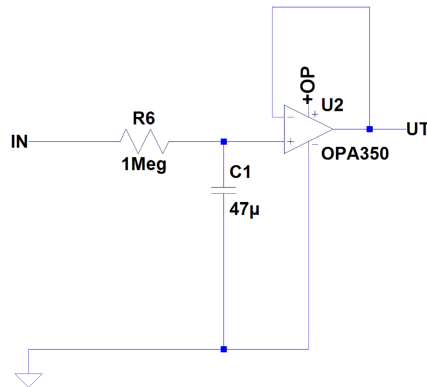


Figure 4.8: Modulens LP-filter.

Då det är likström så skapar filtret en eftersläpning av utsignalen från filtret (operationsförstärkarens slew-rate genererar också en viss fördröjning beroende på signalens frekvens). Beroende på tidskonstanten kommer signalen få en specifik insvängningstid.

$$\tau = RC = 10^6 \cdot 47 \cdot 10^{-6} = 47[s] \quad (4.3)$$

Detta är tiden det tar för utsignalen att nå 63,3 *procent* av maxnivån.

Table 4.1: Tiden för utsignalen att nå olika nivåer

τ	<i>Tid [s]</i>	<i>Procent av maxnivå (spänning)</i>
$0,5\tau$	23,5	39,3%
$0,7\tau$	32,9]	50,3%
$1,0\tau$	47	63,2%
$2,0\tau$	94	86,5%
$3,0\tau$	141	95,0%
$4,0\tau$	188	98,2%
$5,0\tau$	235	99,3%

På grund av att urladdningen är exponentiell kommer kondensatorn aldrig bli 100 *procent* uppladdad så efter fem gånger tidskonstanten anses kondensatorn vara 100 *procent* laddad.

4.5 Kalibrering

4.5.1 0 procent separation

Lagrets, inklusive axelns, resistans är så liten att den kan bortses från. Beroende på reostatens resistans kommer spänningen variera över lagret och $100\ \Omega$ resistorn (se figur 4.10). På grund av operationsförstärkarens output swing kommer utsignalen från operationsförstärkaren vara minst $10\ mV$ till $50\ mV$ [23]. Ju större insignalen, spänningen över lagret och $100\ \Omega$ resistorn, är ju sämre kommer upplösningen bli så därför är det väsentligt att hålla spänningsnivån för 0 procent separation så låg som möjligt och helst så låg att den inte påverkar operationsförstärkarens utsignal.

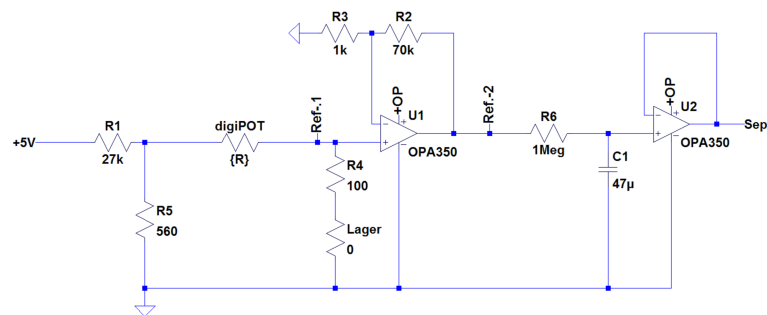


Figure 4.9: Koppling i LT-Spice

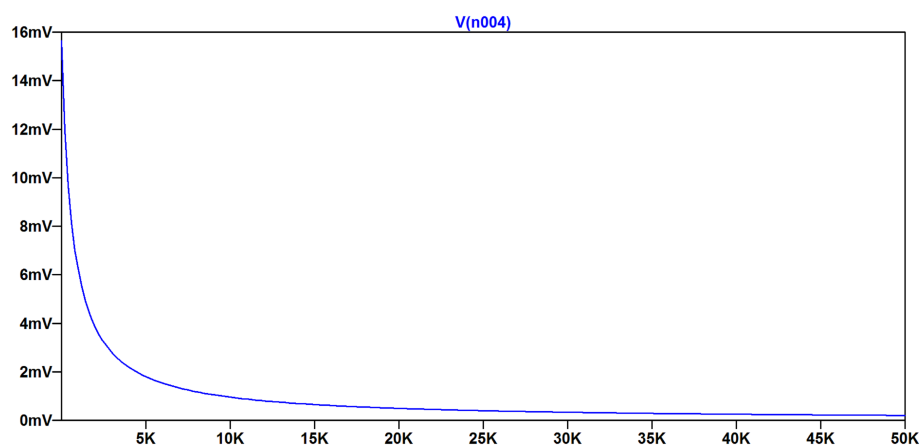


Figure 4.10: Spänningsvariationen över lagret och $100\ \Omega$ resistorn beroende på reostatens resistans (se Ref.-1 i figur 4.9).

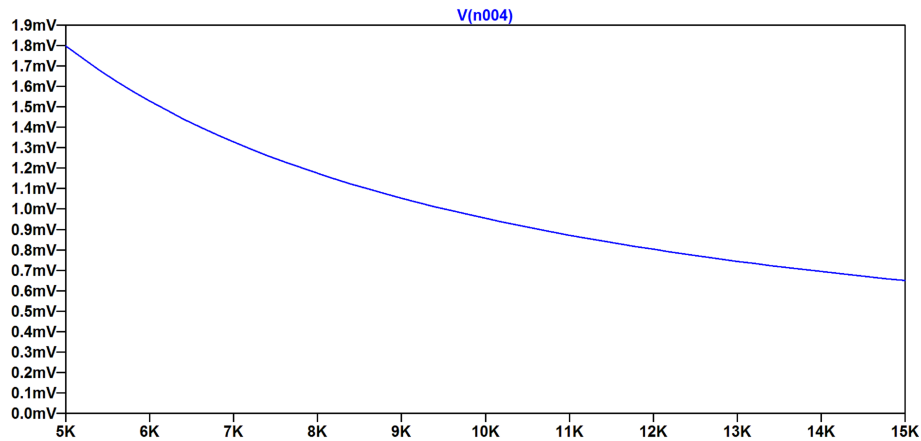


Figure 4.11: Spänningsvariationen över lagret och $100\ \Omega$ resistorn beroende på reostatens resistans (se Ref.-1 i figur 4.9).

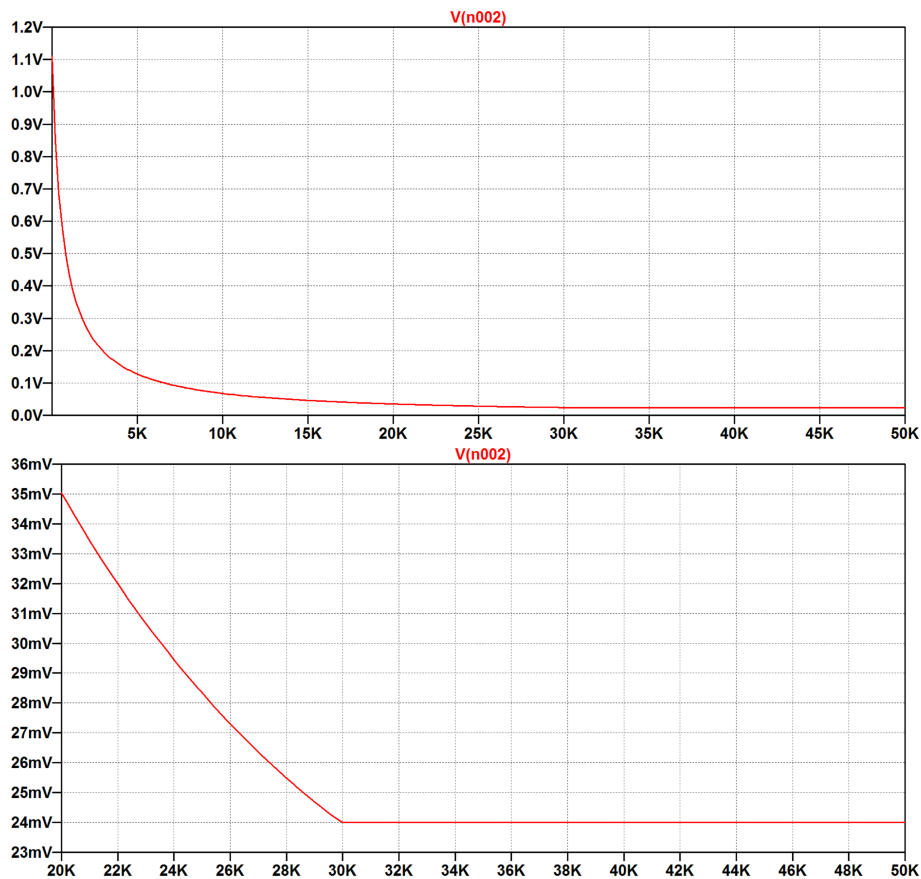


Figure 4.12: Utsignalen från OP 1 (märkt U1 i figur 4.9) vid 0 procent varierar beroende på reostatens resistans (se Ref.-2 i figur 4.9).

I figur 4.12 kan man tydligt se när spänningen är för låg i relation till förstärkningen för få en förstärkt signal som kan relateras till insignalen. Signalen blir istället bottnad.

Signalen för 0 *procent* separation kalibreras enkelt genom att registrera utsignalen innan lagret körs och börjar bygga upp en smörjfilm, det är då kontinuerlig kontakt mellan lagerytorna. Under modulens meny för inställningar kan nivån för 0 *procent* separation kalibreras.

4.5.2 100 procent separation

Signalen för 100 *procent* separation påverkas av tre faktorer.

- Smörjmediet:
Smörjmediets resistans kan ha en stor inverkan på mätresultaten. Då modulen är tänkt att användas i en testmiljö där man har hög standard på smörjmediets renhet kommer resistansen därav vara hög och inverkan minskas. Genom simulering i bearingsimulator av olika lager vid olika laster, som är aktuella för riggen där modulen kommer sitta. Kontaktarean för två olika lager vid respektive två olika laster, 20 *procent* och 5 *procent* från listade maxlasten, beräknats till mellan 65 – 520 mm^2 beroende på last. Oljefilmens tjocklek uppskattas till 0,1 μm , vilket är lågt men varierar med smörjmediets viskositet, temperatur och lagrets rotationshastighet.

$$R_{smörjfilm} = \frac{Oljans\ resistivitet \cdot Smörjfilmens\ tjocklek}{Lagrets\ kontaktarea} \quad (4.4)$$

Smörjfilmens resistans varierar mycket. En variation på 2 $M\Omega$ till 15 $M\Omega$ ger avsevärda skillnader. Med en förorenad olja kan resistansen sjunka dramatiskt.

- digiPOT:

I relation till oändlig resistans påverkar smörjfilmens resistans spänningsfallet över den digitala reostaten.

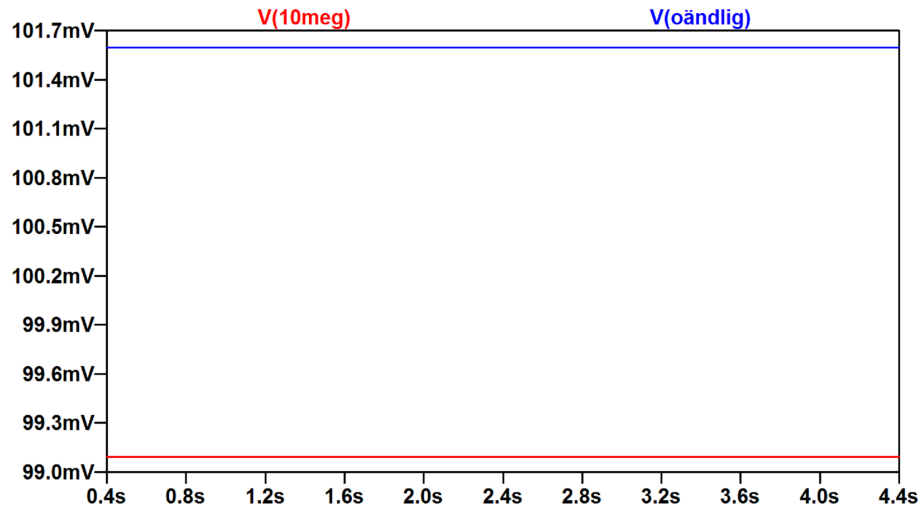


Figure 4.13: Spänningsfallet över reostaten med reostaten inställt på $50\text{ k}\Omega$.

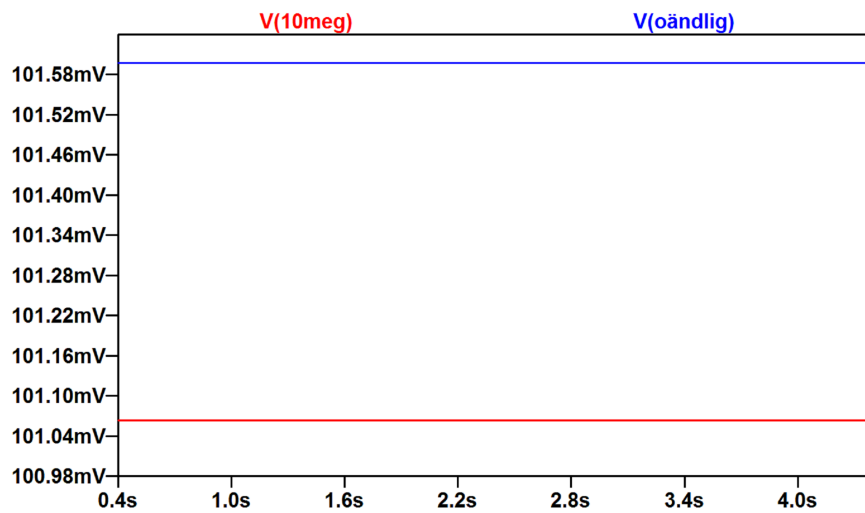


Figure 4.14: Spänningsfallet över reostaten med reostaten inställt på $10\text{ k}\Omega$.

Ju lägre resistans hos den digitala reostaten, i förhållande till resistansen i smörjfilmen, ju lägre blir den procentuella spänningsfallsvariationen. Detta blir en avvägning i förhållandet till strömmen som flyter genom lagret vid 0 procent separation.

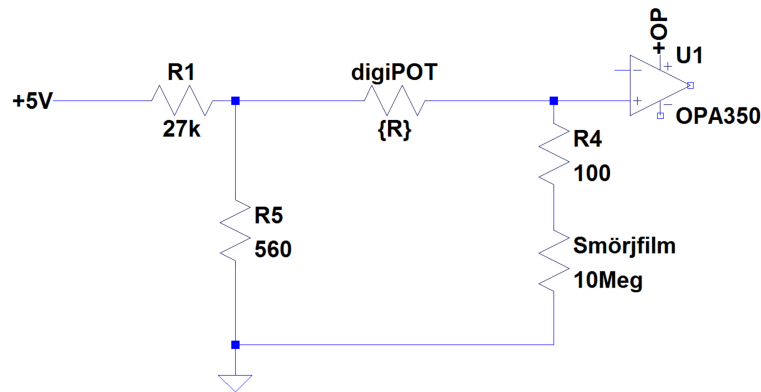


Figure 4.15: Spänningsfall över digiPOT.

$$U_{digiPOT} = \frac{R_{Smörjfilm}}{R_{Smörjfilm} + R_{digiPOT}} \quad (4.5)$$

Med reostaten inställt på $50\text{ k}\Omega$ och en resistans på $2\text{ M}\Omega$ hos smörjfilmen blir spänningsfallet nästan *2,5 procent*. På grund av att spänningsbortfallet kan vara relativt stort och för att kunna ta hänsyn till spänningsbortfallet även vid en extremt förorenad olja är förstärkningen över operationsförstärkaren så hög att signalen för *100 procent* separation blir mättad.

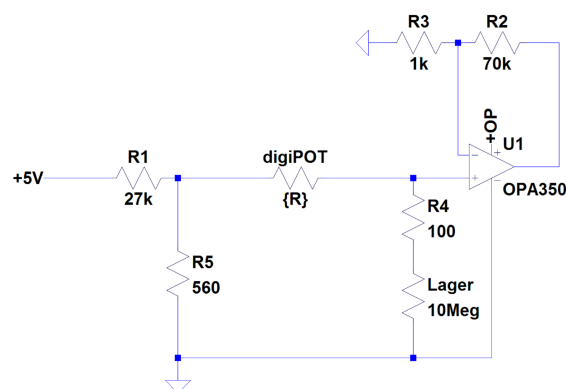


Figure 4.16: Förstärkning med en faktor av *71 gånger*.

Innan filtret representeras icke-kontakt, *100 procent* separation, av den mättade signalen från förstärkaren och kontakt, *0 procent* separation, av den bottnade signalen från förstärkaren.

- LP-filtret:
I låg-pass filtret används det en resistor på $1\text{ M}\Omega$. Beroende på

operationsförstärkarens input bias current kommer det bli ett spänningsfall över filtret. OPA350 har låg input bias current, $\pm 0,5 \text{ pA} - 10 \text{ pA}$ [23], vilket resulterar i ett spänningsfall som är så lågt att det kan försummas i förhållandet till spänningsnivån.

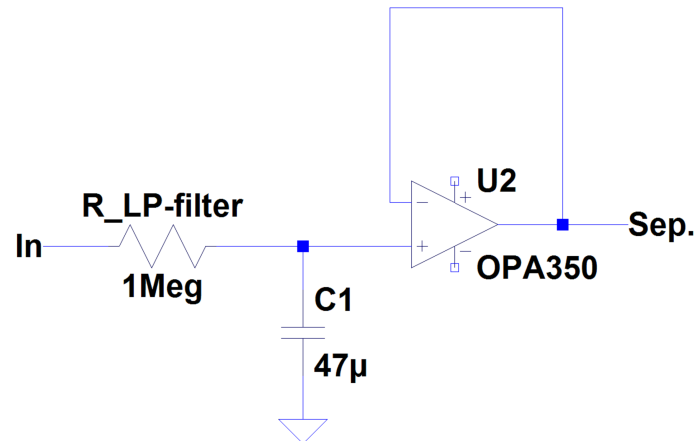


Figure 4.17: Modulens LP-filter.

$$U_{R_{LP-filter}} = R_{LP-filter} \cdot I_{inputbiascurrent} = 1 \text{ M}\Omega \cdot 10 \text{ pF} = 0,00001 \text{ V} \quad (4.6)$$

Uträkningen baseras på den maximala input bias current för OPA350.

Signalen för 100 *procent* separation kalibreras likt signalen för 0 *procent* genom under modulens meny för inställningar. Där kan man välja på att själv kalibrera genom att modulen mäter signalen när lagret är urkopplat eller använda den uppmätta signalnivå som gjordes när PIC-processorn programmerades.

4.6 PIC16F886

PIC16F886 valdes då den har för projektet tillräckligt många GPIO-portar och analoga inportar. PIC16F886 har 368 *bytes* ram-minne och 14k *byte* flash-minne vilket är tillräckligt för programmets storlek. Vidare har den en 10-bitars A/D-omvandlare och stöd för SPI kommunikation. Det finns också en inbyggd klock-oscillator om 20 *MHz*.

Ett problem som uppstod var att PIC16F886 inte har någon egen lösning för att hantera komplikationer i samband med RMW, Read Modify Write. RMW innebär att när man skriver till enskilda bitar i något av de register länkade till in-/ut-portarna läses först värdet från det aktuella registret till ett nytt register där det modifieras för att sedan skrivas tillbaka. Detta medför att om man skriver

till flera enskilda bitar kan spänningen på benen fortfarande vara under/över den gräns som gör att porten tolkas som hög/låg och medföra att man återställer den bit som man i sekvensen innan ändrat. Detta har dock lösts genom ett skuggregister som lagrar det tidigare värdet och om utporten efter första skrivningen inte uppnått rätt spänningsnivå när nästa skrivning inleds så sätts den till det bestämda värdet en gång till.

4.6.1 Menysystemet

På modulens framsida finns det två vita knappar och en svart knapp som används för att navigera i modulens olika menyer och inställningar.

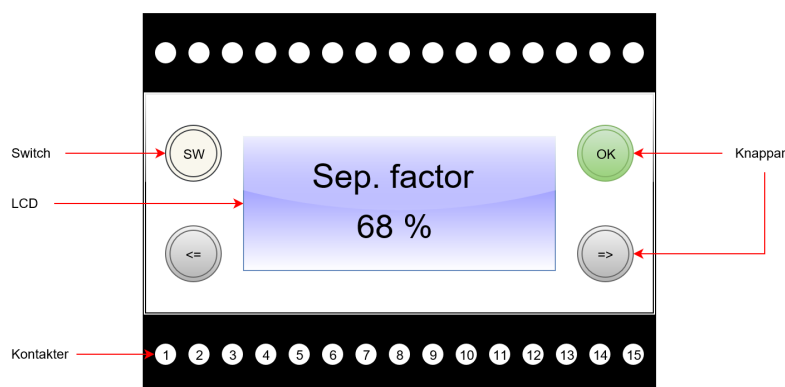


Figure 4.18: Modulens framsida.

Table 4.2: Modulens anslutningar.

Port	Namn	In/Ut	Funktion	Max/Min [V]
1	<i>SDI</i>	In	Data in	+6/0
6	<i>SCK</i>	In	klock in	+6/0
9	<i>GND</i>	In	Jord	0
10	<i>V_{DD}</i>	In	Drivspänning	+11/ + 35
12	<i>Lager</i>	Out	Till lager	+0,11/0
15	<i>Sep.</i>	Out	Separationsfaktorn	+6/0

Initialt efter att modulen har blivit påslagen sätts en del standardinställningar.

- Digitala reostaten:
För att minimera strömmen som flyter genom lagret så ställs den digitala reostaten till maximal resistans, runt $50\text{ k}\Omega$.
- Separationsfaktorsignalens ändpunkter:
När kortet monterades och PIC-processorn programmerades mättes ändpunkterna i utsignalen efter filtret när den digitala reostaten står på sitt maxläge och det är dessa signalnivåer som beräkningen av separationsfaktorn initialt är baserad på. I figur 4.12 syns när man behöver kalibrera

ändpunkten för 0 procent separation.

Den första menyn som dyker upp vid start är "Sep. factor" där man kan se den aktuella separationsfaktorn angiven i procent.

Menysystemet ser ut som följer:

- "Sep. factor":
Här presenteras den aktuella separationsfaktorn i procent och uppdateras kontinuerligt.
- "Calibrations":
Här görs inställningar rörande utsignalens spänningsnivåer efter LP-filtret.
 - "Calibrate 0 procent":
Här kan man kalibrera signalnivån som representerar 0 *procent* separation. Behovet för att kalibrera den lägre signalnivån behöver bara göras om utspänningen från förstärkaren till LP-filtret inte är bottnad (se figur 4.12).
 - "Calibrate 100 procent":
Signalen för 100 *procent* separation skall egentligen aldrig behöva ändras om inte oljan i smörjfilmen är extremt smutsig och då rekommenderas att man byter oljan istället för att inte skada lagret.
 - "Use predefined settings":
Här återställs grundinställningarna för separationsfaktorsignalens ändpunkter. Dessa är uppmätta vid montering av komponenterna och programmering av PIC-processorn.
- "Settings":
 - "Change current thru bearing":
Här kan man succesivt reglera den ström som flyter genom lagret. Detta görs genom att ge den digitala reostaten kommandon, antingen öka eller minska. I den första instansen ändras reostaten 10 *steg/click*. Höger representerar upp och vänster representerar ner. I den andra instansen ändras reostaten 1 *steg/click*.
 - "Change gain for ADC":
På kretskortet återfinns det två jumperkontakter med tre pinnar vardera för reglering av för-förstärkningen till A/D-omvandlingen av spänningen över lagret. Det är möjligt att göra åtta olika kopplingar men det är bara tre som används. Under "Change gain for ADC" specificeras hur jumpern är placerad för att få rätt beräkningsbas vid A/D-omvandlingen.
 - "Set digiPOT to specific point":

Här finns möjlighet att ändra wipern hos den digitala reostaten till att ställa sig på något av de 257 olika kontaktpunkterna som finns. Funktionsmässigt är det samma som under menyn "Change current thru bearing" men man kan tydligare se om man är i ändzonerna.

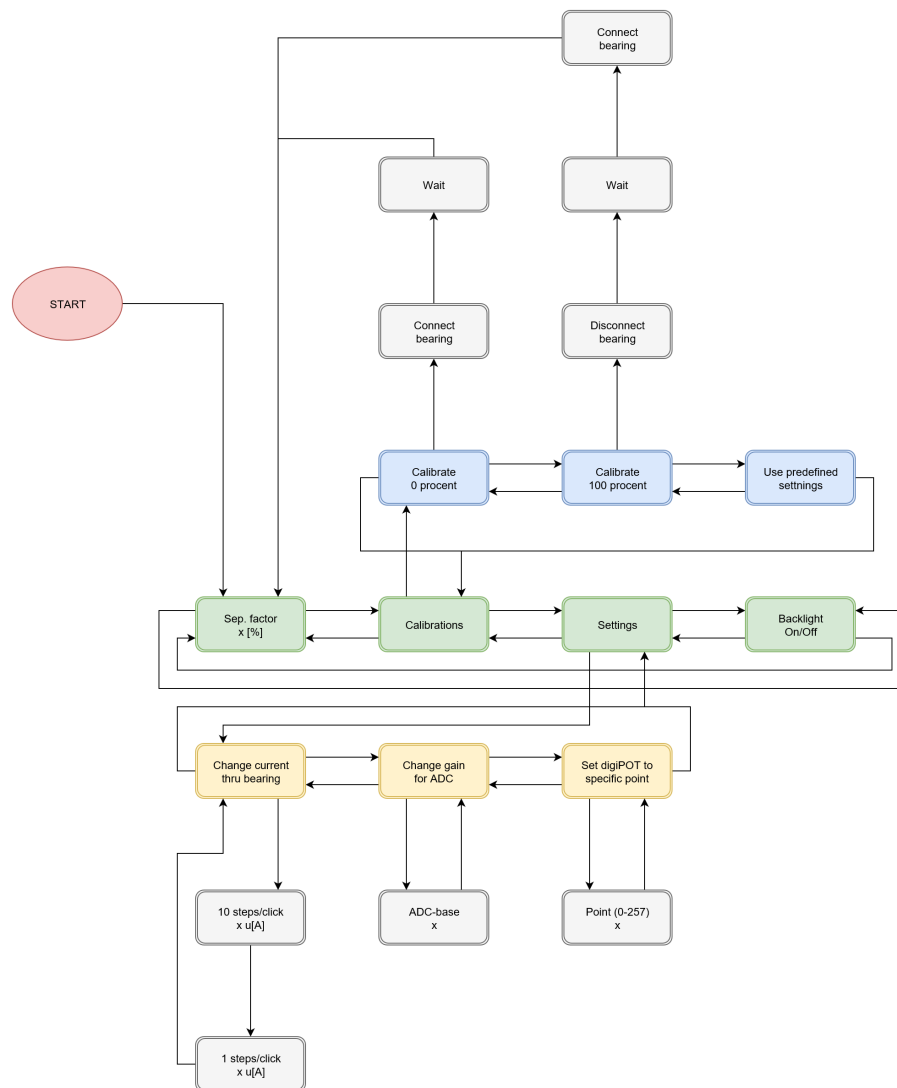


Figure 4.19: Uppbyggnad av menyerna.

I figur 4.19 är huvudmenyn grön och undermenyerna blå och gul. Genom att stega höger eller vänster med de två vita knapparna på modulens framsida kan man bläddra mellan menyalternativen. För att gå vidare till en undermeny används den svarta knappen på modulens framsida. Väl i en undermeny går man tillbaka till huvudmenyn genom att direkt stega vänster eller tre steg åt höger.

4.6.2 ADC

Vid en A/D-omvandling med PIC16F886 läggs det digitala värdet i två 8 – *bitars* register, upplösningen är 10 *bitar*. I detta projektet används samtliga 10 *bitar* vid beräkningen av A/D-omvandlingen. För att öka omvandlingens noggrannhet görs A/D-omvandlingen 10 *gångar* där medelvärdet av dessa mätningar representerar det digitala värdet. I stället för PIC-processorns matningsspänning används de båda externa referenspunkterna som är anslutna till +6 V respektive jord (0 V).

A/D-omvandling görs på två olika ställen i kretsen, när strömmen genom lagret regleras och när separationen beräknas. Då spänningen över lagret, när det leder, kan vara väldigt låg, μV – *nivåer*, förstärks först spänningen via en operationsförstärkare till en mätbar nivå.

Då spänningen som mäts kan variera mellan 18 mV och 200 μV finns det fyra olika förstärkningsnivåer. Dessa ändra genom att flytta en jumper på kretskortet. Beroende på vart jumpern sitter behöver beräkningsbasen definieras och detta görs under menyn "Settings" -> "Change gain for ADC".

Table 4.3: Tabell över olika förstärkningar.

<i>Förstärkning</i>	<i>Inspänning</i> [V]	<i>Utspänning</i> [V]	<i>digiPOT</i> [Ω]
5.000[<i>ggr</i>]	200 μ - 800 μ	1 - 4	50k - 12k
1.000[<i>ggr</i>]	800 μ - 4m	0,8 - 4	12k - 2k
500[<i>ggr</i>]	4m - 8m	2 - 4	2k - 700
100[<i>ggr</i>]	8m - 18m	0,8 - 1,8	700 - 0

Då det inte behöver mätas några snabba förändringar sitter det på kretskortet en kondensator i anslutning till det ben där den aktuella A/D-omvandling sker för att stabilisera spänningsnivån ytterligare.

4.6.3 Separationsfaktorn

När "Sep. factor" har valts så rullar programmet i huvudrutinens oändliga loop och lyssnar på knapparna och uppdaterar den aktuella separationsfaktorn var tredje sekund.

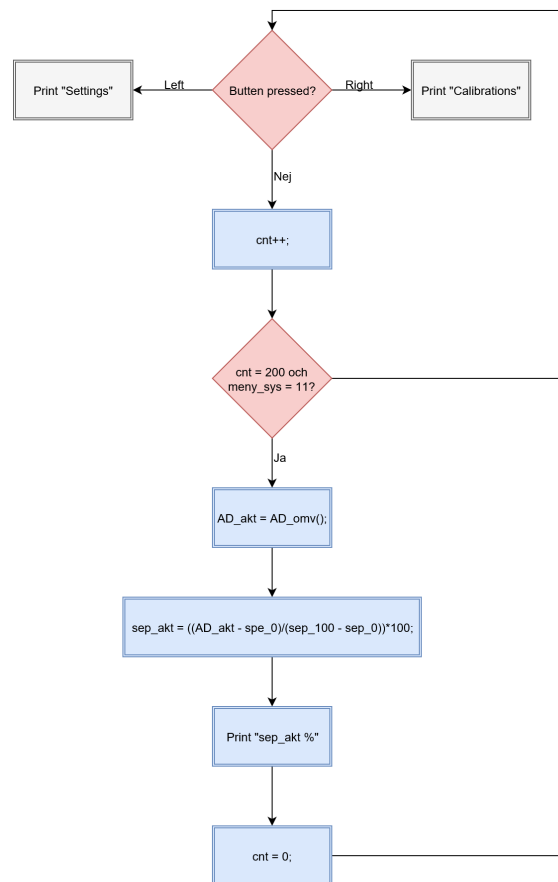


Figure 4.20: Flödesschema för loopen i huvudrutinen.

Först undersöks om någon knapp är nertryckt och om inte så tickar en räknare som när den nått rätt värde och menyn för separationsfaktorn är aktiv A/D-omvandlas utsignalen efter LP-filtret. Resultatet omvandlas sedan till att representera separationsfaktorn i procent.

$$Separationsfaktorn = \frac{AD_akt - sep_0}{sep_100 - sep_0} \cdot 100\% \quad (4.7)$$

Separationsfaktorn skrivs sedan ut på displayens rad två.

4.6.4 Kalibrering

Undermenyn "Calibrations" innehåller tre olika funktioner som beskrivs nedan.

4.6.4.1 0 procent

Signalnivån för 0 *procent* separation kalibreras genom att under "Calibrations" -> "Calibrate 0 procent" följa instruktionerna.

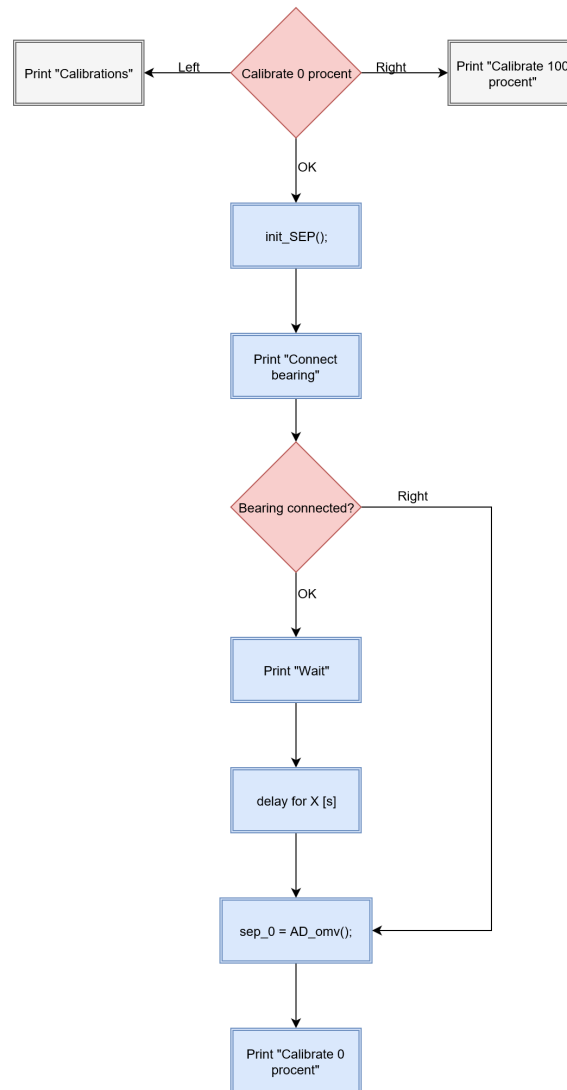


Figure 4.21: Kalibrering av signalnivån representativ för 0 *procent* separation.

Först initierar PIC-processorn inställningar för att kunna A/D-omvandla utsignalen efter LP-filtret, signalen för separation. Sedan kommer instruktionen att ansluta lagret till modulen. När man tryckt "OK" (den svarta knappen) aktiveras en delay för att ge signalen tid att nå bottennivån. Om lagret har varit inkopplat och olastat länge, minst 4 *minuter*, kan man genom att en gång istället trycka på "Höger" (vit knapp på höger sida) hoppa över delayen. När signalen nått bottennivån A/D-omvandlas den och resultatet skrivs till variabeln "sep_0" och programmet återgår till menyn "Calibrate 0 procent" där man får stega höger eller vänster.

4.6.4.2 100 procent

Signalnivån för 100 *procent* separation kalibreras genom att under "Calibrations" -> "Calibrate 100 procent" följa instruktionerna.

VARNING!

Att kalibrera signalnivån för 100 *procent* separation är inte rekommenderat om smörjfilmens resistans kan antas vara låg.

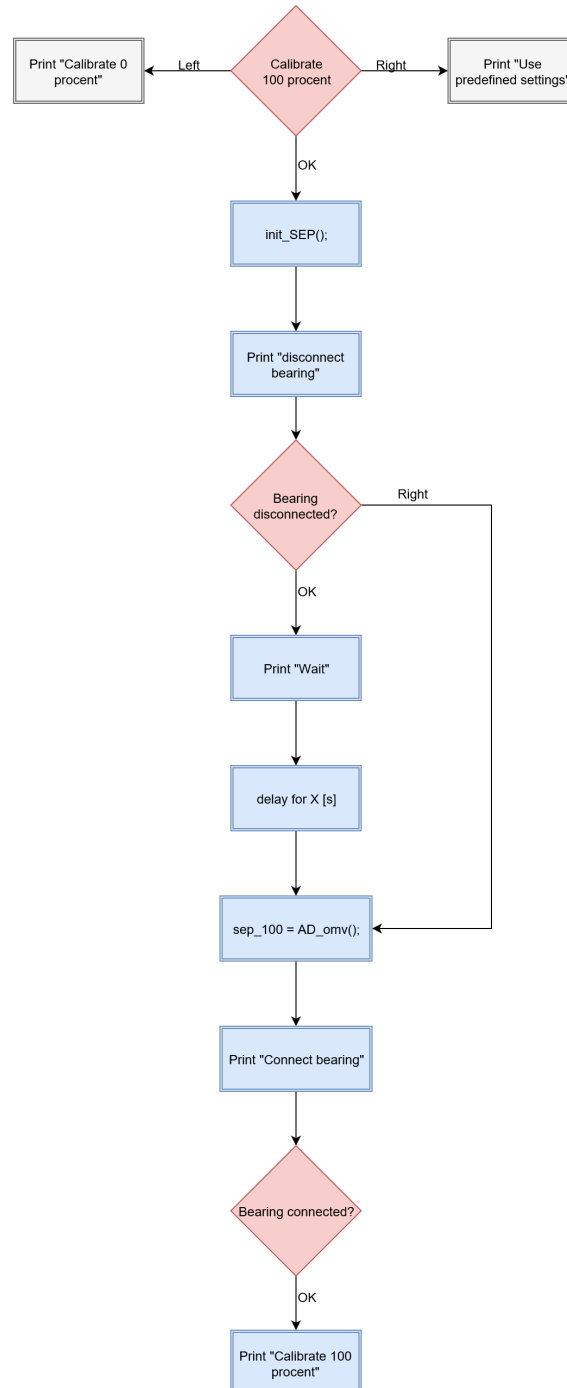


Figure 4.22: Kalibrering av signalnivån representativ för 100 *procent* separation.

Precis som för kalibrering av signalnivån för 0 *procent* separation initieras först inställningarna för att A/D-omvandla utsignalen efter LP-filtret. Instruktionen att koppla ut lagret kommer och man kan då välja att hoppa över delayen som krävs

för att signalen skall stabiliseras eller invänta den beräknade tiden som krävs. Efter att signalnivån representativ för 100 *procent* separation registrerats i variabeln "sep_100" instruerar modulen att återinkoppla lagret igen.

4.6.4.3 Standardinställning

Signalnivåerna för 0 *procent* separation respektive 100 *procent* separation ändras i normalfallet inte och har således uppmätts när komponenterna monterades på kortet. Dessa signalnivåer kallas "predefined settings". Återställning av dessa signalnivåer görs under "Calibrations" -> "Use predefined settings".

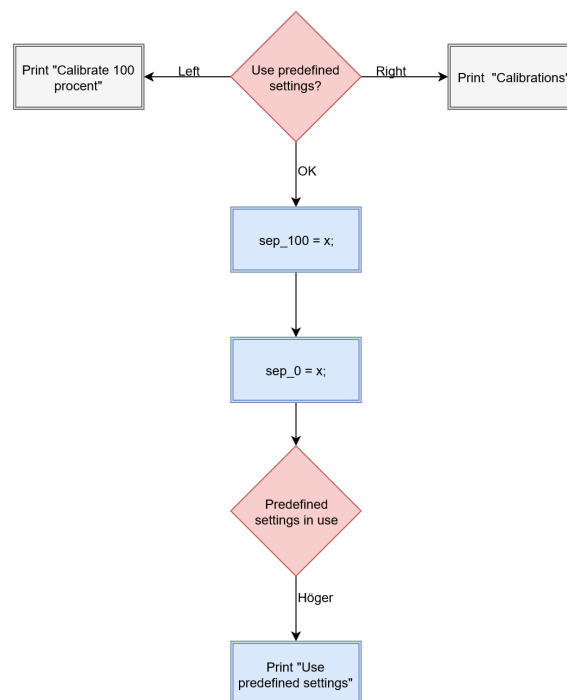


Figure 4.23: Återställning av signalnivåerna för 0 respektive 100 *procent* separation till standard nivåer.

Genom att trycka på "OK" skrivs de uppmätta nivåerna till variablerna "sep_0" och "sep_100". En bekräftelse kommer upp som behöver kvitteras genom att trycka "Höger".

4.6.5 Inställningar

Undermenyn "Settings" innehåller tre olika funktioner som beskrivs nedan.

4.6.5.1 Ändra spänningen/strömmen över/genom lagret

För att reglera strömmen som flyter genom lagret görs genom att navigera till "Settings" -> "Change current thru bearing".

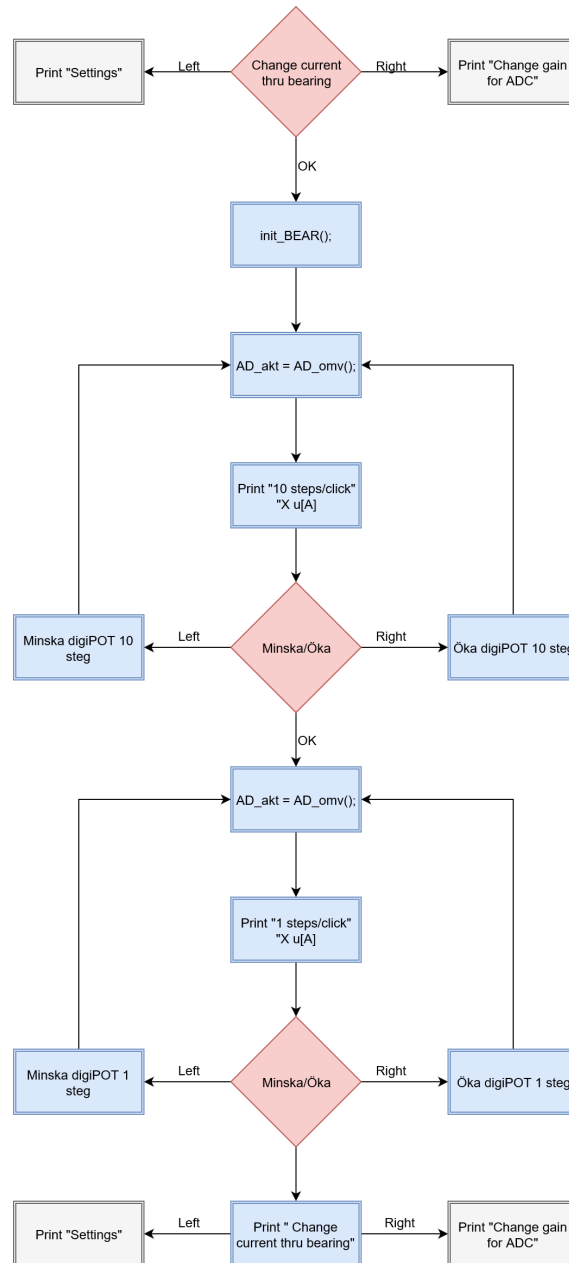


Figure 4.24: Flödesschema över funktionen för att reglera strömmen genom lagret.

Genom att via SPI kommunikation till den digitala reostaten reglera dess spänning förändras spänningen över och strömmen genom lagret. Då det finns 257 olika nivåer så görs detta i två steg där man först ändrar 10 *steg/click* och sedan 1 *steg/click*. efter varje förändring görs en A/D-omvandling och strömmen presenteras på displayen.

4.6.5.2 ADC-gain

Under menyn "Settings" -> "Change gain for ADC" ändras beräkningsbasen för A/D-omvandlingen beroende på hur jumpern på kretskortet är placerad.

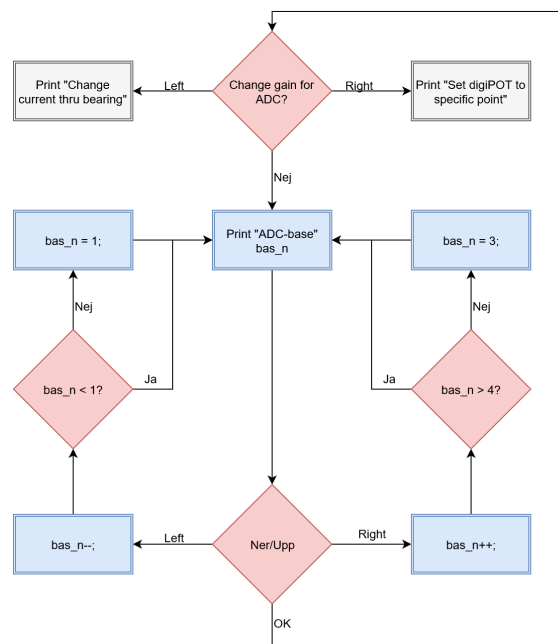


Figure 4.25: Flödesschema för hur beräkningsbasen för ADC regleras.

De olika beräkningsbaserna ligger i vektorn *AD_bas*. För att använda rätt beräkningsbas pekar *bas_n* på vilken plats i vektorn konstanten ligger.

4.6.5.3 Reglera reostaten till specifikt läge

Genom att reglera den digitala reostaten till ett av de 257 olika kontaktpunkterna mellan de seriekopplade resistorelementen kan det navigera till "Settings" -> "Set digiPOT to specific point".

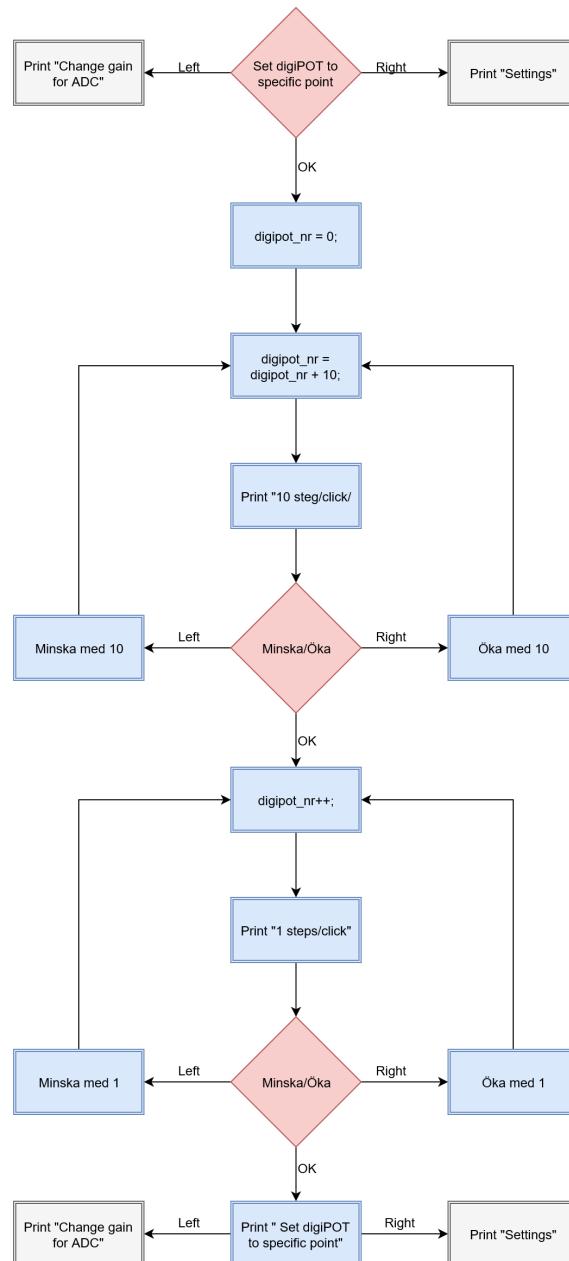


Figure 4.26: Flödesschema över funktionen för att sätta digiPOT till specifikt läge.

Likt funktionen för att reglera strömmen genom lagret trimmas valet av läge för den digitala potentiometern i två steg. Först väljs vilken kontaktpunkt som skall navigeras till, 0 till 257, genom att först öka eller minska variabeln "digipot_nr" 10 *steg/click* och sedan 1 *steg/click*. När "OK" sedan trycks skickas kommandot till den digitala reostaten att wiper-benet skall trimma in sig på den punkt som anges av "digipot_nr".

4.6.6 Bakgrundsbelysning

Under menyalternativet "Backlight On/Off" kan man genom att trycka "OK" växla mellan att slå av eller på displayens bakgrundsbelysning.

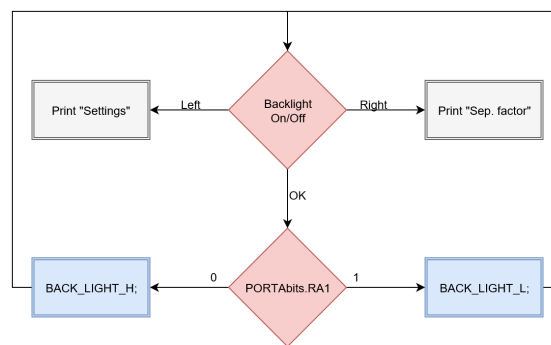


Figure 4.27: Flödesschema över funktionen för att sätta reglera bakgrundsbelysningen.

Bakgrundsbelysningen rekommenderas inte vara påslagen mer än maximalt 12 timmar i sträck.

4.7 Styrning via LabVIEW

Extern styrning via LabVIEW sker genom kommunikationsprotokollet SPI.

När modulen är ställd till extern styrning genom switchen på framsidan ligger den och lyssnar på ett kommando från LabVIEW. LabVIEW skickar två 8-bitars dataord som talar om till vilket av de 257 olika lägena den digitala reostated skall förflytta sig till.

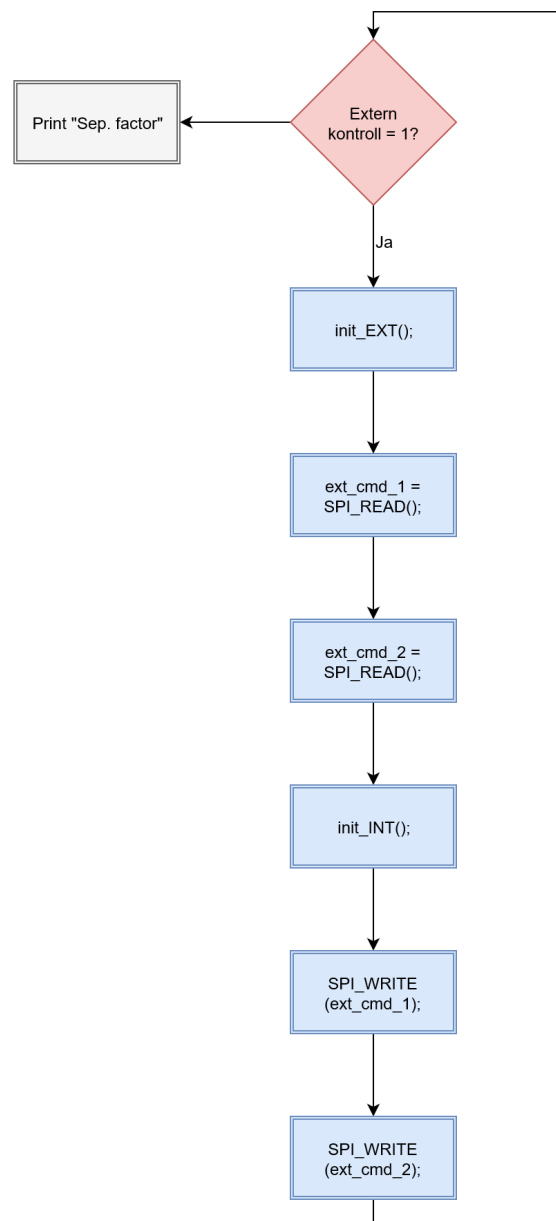


Figure 4.28: Modulens flödesschema vid extern styrning.

I LabVIEW presenteras sedan det aktuella läget samt en beräkning av den ström som passerar genom lagret när dess metallytor är i kontakt med varandra.

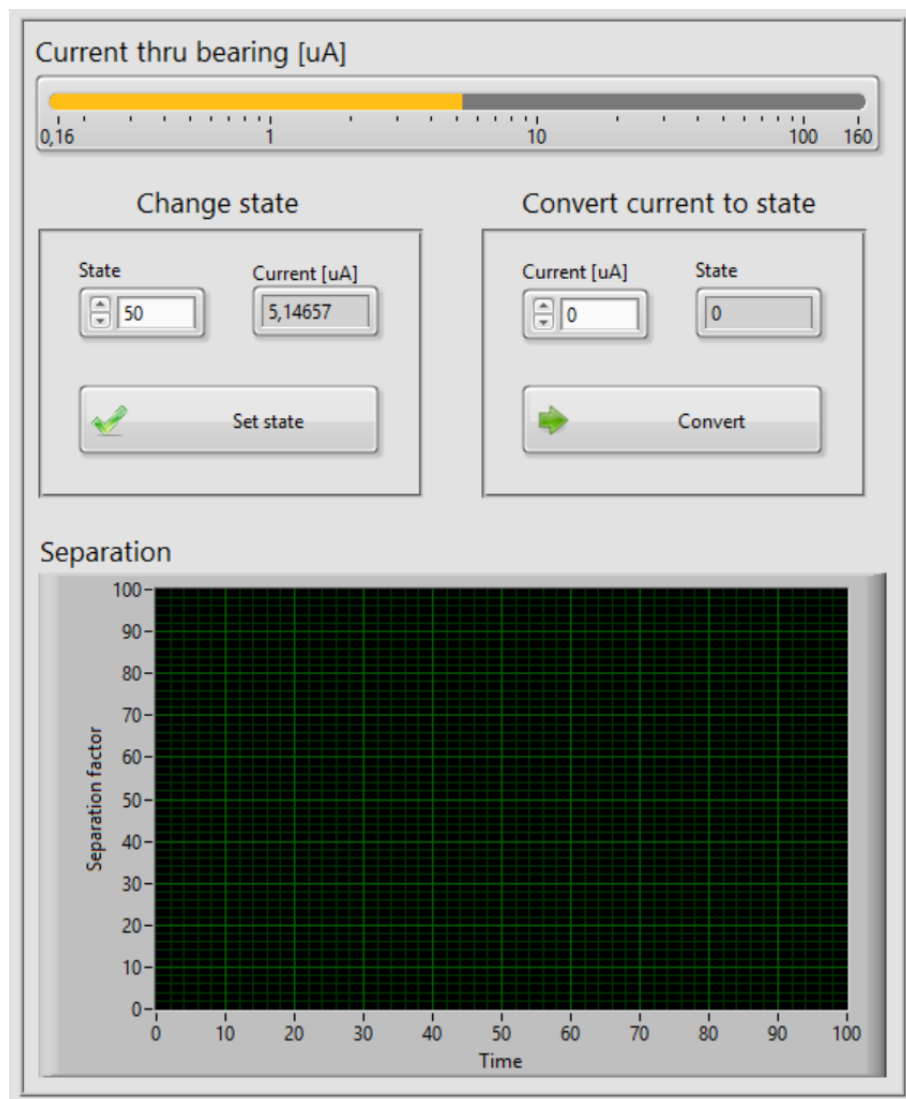


Figure 4.29: Användarpanel i LabVIEW.

4.8 Kretskortet

Kretskortet är designat i KiCad. De flesta komponenterna fick göras i komponenteditorn då de inte fanns med i något bibliotek. Även footprinten för modulens in-/ut-kontakter fick göras manuellt baserat på lådans mått.

Den i KiCad inbyggda funktionen för att automatiskt placera ut komponenterna på kretskortet visade sig inte fungera helt perfekt. Dels hamnade en del av silkscreenen till komponenternas footprints utanför kortet men främst togs det ingen hänsyn till att vissa komponenters funktion är avhängig av dess placering i relation till varandra, framför allt kondensatorerna för A/D-omvandlingarna behöver sitta så nära de analoga ben på PIC-processorn programmerade för detta.

4. Konstruktion

Komponenternas footprint-silkscreen visade sig kunna breda ut sig onödigt mycket så dessa fick modifieras.

I KiCad finns en funktion för att automatiskt sammanbinda alla komponenterna i olika antal kopparlager (i projektet har det räckt med två kopparlager). Den fungerade väldigt bra och endast mindre ändringar krävdes.

Ritningarna över de olika lagren samt borrhilen skickades till en tillverkare i Sverige som levererade inom en vecka.

5

Resultat

Baserat på de ursprungliga krav som var samt lösningar på en del under vägen uppkomna potentiella problem har en komplett mätmodul tagits fram för att mäta separationsfaktorn i roterande lager.

Följande viktiga punkter har uppnåtts:

- +24 V drivspänning.
- Kretskort i förpackning monterbart på 35 mm DIN-skena.
- Reglerbar ström som flyter genom lagret.
- Hänsyn till smörjfilmens kvalitet har tagits så att dess resistans inte påverkar mätresultatet annat än i extrema fall då smörjfilmens kvalitet i sig kan vara skadligt.
- Maximala spänningen över lagret kan justeras genom enkla modifieringar på hårdvaran.
- Dokumentation av funktionen och möjliga förändringar i form av en rapport.

6

Diskussion

6.1 Potentiella förändringar av modulen

En viktig punkt som diskuterats är spänningen som ligger över lagret. När lagrets metallytor helt separeras av smörjfilmen, 100 *procent* separation, kommer maximal spänning ligga över lagret. Det kan om spänningen är för hög vara risk för gnistbildning som kan resultera i omfattande skador. På grund av det inte finns några tydliga gränser gällande detta annat än att man av erfarenhet kunnat utsätta lagret för runt 100 *mV* utan synliga skador har det i konstruktionen valts att ha 100 *mV*. Om det skulle visa sig vara fördelaktigt att sänka den maximala spänningen över lagret är det enkelt att bara byta ut den första spänningsdelningen samt eventuellt öka förstärkningen innan filtret.

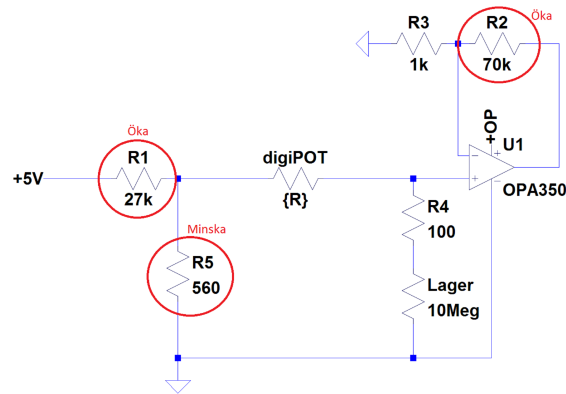


Figure 6.1: Hur sänkning av spänningen över lagret går till.

Om förstärkningen är för stor bottenar inte utsignalen vid 0 *procent* separation från förstärkarsteget in till filtret och kommer således spela in på utsignalens totala upplösning.

En annan förbättring hade kunnat vara operationsförstärkare som klarar högre matningsspänning. Men med de viktiga krav som listas i tabell 4.3.

Filtret är också en del av modulen som potentiellt kan ändras. Filtrets tidskonstant kan enkelt ändras vilket resulterar i en större eller mindre eftersläpning av signalen. Om detta görs kan utsignalens ändpunkter regleras i

mjukvaran.

En alternativ ändring skulle kunna vara att öka $100\ \Omega$ resistorn innan lagret för att förenkla A/D-omvandlingen som görs för att beräkna strömmen som flyter genom lagret.

Även den digitala reostaten kan bytas till en med $100\ k\Omega$.

Kommunikationen till och från LabVIEW hade kunnat utvecklas mer. Kretskortet har stöd för tvåvägskommunikation.

6.2 Alternativa lösningar

En tidig tanke var att kanske det skulle gå att använda en FPGA eller CPLD i kombination med en snabb oscillator. Klockoscilatorns frekvens måste då vara högre än frekvensen på de genomslag av smörjfilmen där lagrets metallytor är i direkt kontakt med varandra. Genom att registrera genomslagen skulle man digitalt kunna filtrera signalen för att få samma procentuella resultat men med potential att kunna samla mer data. Det bygger dock på att man kan göra en beräkning av genomslagsfrekvensen.

Referenser

- [1] AB SKF, *Historia*. [Online]. Tillgänglig:
<http://www.skf.com/se/our-company/skf-historia/index.html>.
Hämtad: 27-11-2016.
- [2] "Rolling contact bearings," 2006. [Illustration]. Tillgänglig:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/71/Spherical-roller-bearing-double-row_din635-t2_120.png. Hämtad:
28-11-2016.
- [3] "Drawing of a ball bearing," 2012. [Illustration]. Tillgänglig:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Bearing_thick_shaded.svg. Hämtad: 28-11-2016.
- [4] D. Godfrey and W.R. Herguth, *Physical and chemical properties of industrial mineral oils affecting lubrication. Part 3*. Journal of the STLE, October 1995.
- [5] AB SKF, *Rolling bearings and seals in electric motors and generators*. [Online]. Tillgänglig: <http://www.skf.com/binary/68-134586/13459-EN-Rolling-bearings-and-seals-in-electric-motors-and-generators.pdf>. Hämtad: 11-01-2016.
- [6] T. Bishop, *dealing with shaft and bearing currents*. [Online]. Tillgänglig:
<http://industrialelectricalco.com/wp-content/uploads/2014/01/EASA-Shaft-Bearing-Currents..> Hämtad: 11-01-2016.
- [7] B. Molin. *Analog elektronik*. 2:a upplagan, Lund, Sverige: Studentlitteratur AB, 2009.
- [8] *Analog and Interface Product Solutions: Digital Potentiometers Design Guide*, Arizona, USA: Microchip Technology Inc, 2010. [Online]. Tillgänglig:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22017c.pdf>.
Hämtad: 01-10-2016.
- [9] *Choosing the Correct digiPOT for Your Application*, Massachusetts, USA: Analog Devices Inc, 2014. [Online]. Tillgänglig:
http://www.analog.com/media/en/news-marketing-collateral/product-selection-guide/Choosing_the_Correct_Digipot.pdf. Hämtad:

01-10-2016.

- [10] *Microcomputer systems A/D- and D/A-converters*, Sven Knutsson, Chalmers Department of Computer science and Engineering, 2011. [Online]. Tillgänglig: http://www.cse.chalmers.se/~svenk/mikrodatorsystem/lectures/AD_DA.pdf. Hämtad: 20-10-2016.
- [11] L. Bengtsson, *Elektriska mätsystem och mätmetoder*, Lund, Sverige: Studentlitteratur AB, 2012.
- [12] "Voltage resolution steps for a 3-bit ADC," 2010. [Illustration]. Tillgänglig: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/5/52/ADC_voltage_resolution.svg. Hämtad: 28-11-2016.
- [13] C. Burnett, "SPI single slave," 2006 [Illustration]. Tillgänglig: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/ed/SPI_single_slave.svg/500px-SPI_single_slave.svg.png. Hämtad: 10-11-2016.
- [14] Byte Paradigm sprl, "Introduction to I^2C and SPI protocols," *Byte Paradigm*, 2016. [Online]. Tillgänglig: <http://www.byteparadigm.com/applications/introduction-to-i2c-and-spi-protocols/?/article/AA-00255/22/Introduction-to-SPI-and-IC-protocols.html>. Hämtad: 10-20-2016.
- [15] *Specification: MC21605H6W-BNMLW*, Great Yarmouth, England: Midas Components Limited, 2013. [Online]. Tillgänglig: http://www.farnell.com/datasheets/2021876.pdf?_ga=1.209683990.588426445.1448887033. Hämtad: 03-10-2016.
- [16] *MPLAB IDE User's guide with MPLAB Editor and MPLAB SIM Simulator*, Arizona, USA: Microchip Technology Inc, 2009. [Online]. Tillgänglig: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MPLAB_User_Guide_51519c.pdf. Hämtad: 01-10-2016.
- [17] *PICkitTM 3 Programmer/Debugger User's Guide*, Arizona, USA: Microchip Technology Inc, 2009. [Online]. Tillgänglig: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PICkit_3_User_Guide_51795A.pdf. Hämtad: 01-10-2016.
- [18] "Different layers in a PCB". [Illustration]. Tillgänglig: <https://cdn.sparkfun.com/assets/3/f/c/b/c/50d0c95bce395fd321000000.png>. Hämtad: 28-11-2016.
- [19] National Instruments, "LabVIEW System Design Software," *National Instruments*, 2016. [Online]. Tillgänglig: <http://www.ni.com/labview/>.

Hämtad: 15-11-2016.

- [20] *L78S00 SERIES: 2A POSITIVE VOLTAGE REGULATORS*, Italy: STMicroelectronics, 2003. [Online]. Tillgänglig: https://www.elfa.se/Web/Downloads/ta/_e/tcL78S_data_e.pdf?mime=application%2Fpdf. Hämtad: 01-10-2016.
- [21] *L78: Positive voltage regulator ICs*, USA: STMicroelectronics, 2016. [Online]. Tillgänglig: http://www.farnell.com/datasheets/2051023.pdf?_ga=1.21847611.1036030419.1473835246. Hämtad: 01-10-2016.
- [22] *MCP414X/416X/424X/426X: 7/8-Bit Single/Dual SPI Digital POT with Non-Volatile Memory*, Arizona, USA: Microchip Technology Inc, 2008. [Online]. Tillgänglig: http://www.farnell.com/datasheets/630445.pdf?_ga=1.125178250.1036030419.1473835246. Hämtad: 01-10-2016.
- [23] *OPA350, OPA2350, OPA4350: High-Speed, Single-Supply, Rail-to-Rail OPERATIONAL AMPLIFIERS*, Texas, USA: Texas Instruments Inc, 2001. [Online]. Tillgänglig: https://www.elfa.se/Web/Downloads/50/_e/ebOPA350_e.pdf?mime=application%2Fpdf. Hämtad: 01-10-2016.

A

Bilaga A

A.1 Additional data and information

Separation factor module

Additional data and information

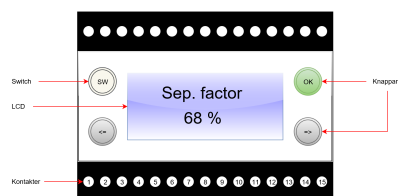
1 INSTALLATION

The module are mountable on a 35 mm DIN-rail and measure 110x99,7x75 mm [HxBxD].

Follow the table in section 2 (Connections) for information on how to connect the external cables.

2 CONNECTIONS

The port numbering is from left to right.



PORT	IN/OUT	Name	Function	MAX/MIN
4	In	SDI	Data in	+6/0
6	In	SCK	Clock in	+6/0
9	In	GND	Ground	<i>GND</i>
10	In	V_{DD}	Supply	+11/ + 35[V]
12	Out		To bearing	+0, 11/0
15	Out		Sep. factor	+0/ + 6[V]

3 BUTTONS

There are three buttons, two black and one white, and one switch on the frontpanel of the module.

Name	Color	Placement	Funktion
OK	White	Right/Up	Enter
Right	Black	Right/Down	Right/+
Left	Black	Left/Down	Left/-
Switch	Chrome	Left/Up	External controll

4 digiPOT

The connected digiPOT have a nuber of parameters that have been measured. The digipot contains 256 identical resistor elements.

Name	Ω
Wiper	92
Element	380
W to B	97,6k

5 OTHER CONNECTIONS

There are nine ports on the module that have no function or a function that are not in use.

Bilaga B

kontakt 1 Switch=1
U1/IN 2 Button-R
U1/IN 3 Button-L
U1/IN 4 Button-OK
Buttons-DRIVE1

kontakt 1 Switch_1
U1/IN 2 Button-R
U1/IN 3 Button-L
U1/IN 4 Button-OK
Buttons-PIC1

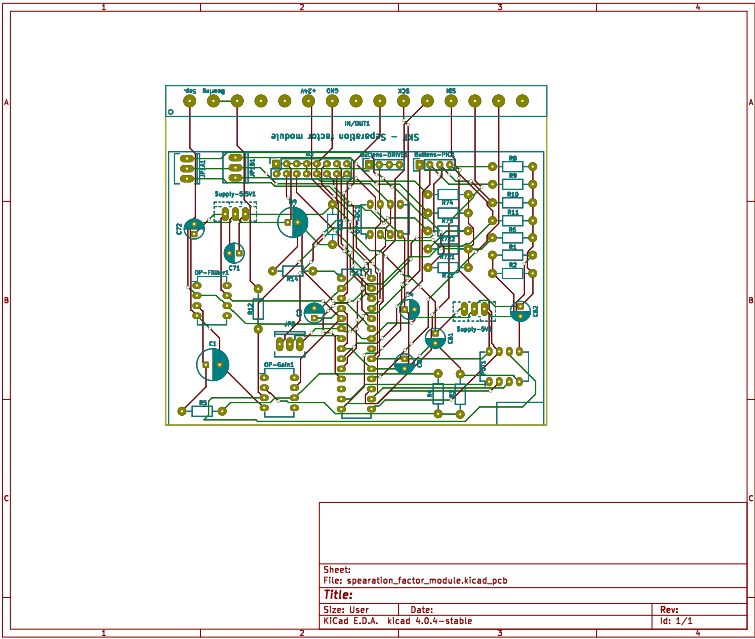
ERN1-connection
SEP_OUT 1
TO_BEARING 2
ADC_BEARING 3
ADC_GAIN 4
SUPPLY_V2V4 7
SUPPLY_GND 8
TC 9
SCX 10
SDO 11
SDI 12
TX 13
RX 14
IN/OUT1 15

Kontakt_LCD
16 BL-
17 BL-
18 BL-
19 BL-
20 BL-
21 BL-
22 BL-
23 BL-
24 BL-
25 BL-
26 BL-
27 BL-
28 BL-
29 BL-
30 BL-
31 BL-
32 BL-
33 BL-
34 BL-
35 BL-
36 BL-
37 BL-
38 BL-
39 BL-
40 BL-
41 BL-
42 BL-
43 BL-
44 BL-
45 BL-
46 BL-
47 BL-
48 BL-
49 BL-
50 BL-
51 BL-
52 BL-
53 BL-
54 BL-
55 BL-
56 BL-
57 BL-
58 BL-
59 BL-
60 BL-
61 BL-
62 BL-
63 BL-
64 BL-
65 BL-
66 BL-
67 BL-
68 BL-
69 BL-
70 BL-
71 BL-
72 BL-
73 BL-
74 BL-
75 BL-
76 BL-
77 BL-
78 BL-
79 BL-
80 BL-
81 BL-
82 BL-
83 BL-
84 BL-
85 BL-
86 BL-
87 BL-
88 BL-
89 BL-
90 BL-
91 BL-
92 BL-
93 BL-
94 BL-
95 BL-
96 BL-
97 BL-
98 BL-
99 BL-
100 BL-

R6 and R7x: Voltage gain for adc (over bearing) (B different levels)
R5 and C1: Analog filter (regulator fbr sep. factor)
R2 and R4x: Voltage gain => A_u = ca 70 ggr
R1 and R2: Voltage divider

Sheet: /
File: separation_factor.module.sch
Title: Separation factor measurement module
Size: A4 Date: 2016-10-31
KICad E.D.A. Kicad 4.0.4-stable
Rev: 1/1

B.2 PCB



C

Bilaga C

C.1 main.c

```
1  /*↵
    *****↵
    */
2  /*↵
    *****↵
    */
3  /*
4  *   File:      main.c
5  *   Program:   Separation factor measurent module.
6  *   Authors:   Linus öStrmsnes.
7  *   Created:   2016.
8  */
9  /*↵
    *****↵
    */
10 /* Config-bits for PIC16F886 */
11 /*↵
    *****↵
    */
12 /* CONFIG1 */
13 #pragma config FOSC = INTRC_NOCLKOUT// Oscillator Selection bits (↵
    INTOSCIO oscillator: I/O function on RA6/OSC2/CLKOUT pin, I/O ↵
    function on RA7/OSC1/CLKIN)
14 #pragma config WDIE = OFF
15 #pragma config PWRIE = ON          // Power-up Timer Enable bit (PWRT ↵
    enabled)
16 #pragma config MCLRE = ON          // RE3/MCLR pin function select bit (↵
    RE3/MCLR pin function is MCLR)
17 #pragma config CP = ON             // Code Protection bit (Program memory↵
    code protection is disabled)
18 #pragma config CPD = OFF           // Data Code Protection bit (Data ↵
    memory code protection is disabled)
19 #pragma config BOREN = OFF         // Brown Out Reset Selection bits (↵
    BOR disabled)
20 #pragma config IESO = OFF          // Internal External Switchover bit (↵
    Internal/External Switchover mode is disabled)
21 #pragma config FCMEN = OFF         // Fail-Safe Clock Monitor Enabled ↵
    bit (Fail-Safe Clock Monitor is disabled)
22 #pragma config LVP = OFF           // Low Voltage Programming Enable bit↵
    (RB3 pin has digital I/O, HV on MCLR must be used for ↵
```

```
        programming)
23
24 /* CONFIG2 */
25 #pragma config BOR4V = BOR40V // Brown-out Reset Selection bit (↵
        Brown-out Reset set to 4.0V)
26 #pragma config WRT = OFF // Flash Program Memory Self Write ↵
        Enable bits (Write protection off)
27
28 /*↵
        *****↵
        */
29 /* Include-files */
30 /*↵
        *****↵
        */
31 #include <xc.h>
32 #include <stdint.h>
33 #include <stdlib.h>
34 #include <stdio.h>
35 #include "lcd.h"
36 #include "macros.h"
37 /*↵
        *****↵
        */
38 /* Funkton prototypes */
39 /*↵
        *****↵
        */
40 void init();
41 void init_EXT();
42 void init_SPI_master();
43 void init_SEP();
44 void init_GAIN();
45 void init_BEAR();
46
47 void menu(char knapp);
48
49 void EXT();
50
51 void sep_factor();
52
53 void cal_0();
54 void cal_100();
55 void orginal_settings();
56
57 void change_current();
58 void change_current2();
59 void print_V_A();
60 void set_adc_base();
61 void set_digiPOT();
62
63 unsigned int AD_omv(void); //KOLLA
64 unsigned int ADC(void); //KOLLA
65
66 void SPI_WRITE(char data);
67 unsigned char SPI_READ(); //KOLLA
```

```

68 /*↵
    *****↵
    */
69 /* Global variables */
70 /*↵
    *****↵
    */
71 /* Shadow register to solve RMW-errors */
72 //volatile unsigned char PA_Shadow;
73 //volatile unsigned char PB_Shadow;
74 //volatile unsigned char PC_Shadow;
75
76 /* Tracking current menu */
77 unsigned int menu_sys;
78
79 /* Counter for sep. factor updating invterval */
80 int cnt = 0;
81
82 int sep_0 = 68; //ÄNDRA!!!
83 int sep_100 = 1015; //ÄNDRA!!!
84
85 //float AD_bas[]={1, 5, 5, 5, 5}; //NDRA!!!
86 char bas_n = 3; //aanvnds som pekare bland äberkningsbaserna
87
88 unsigned int digipot_plats = 257;
89
90 /*↵
    *****↵
    */
91 /* Mainroutine */
92 /*↵
    *****↵
    */
93 void main()
94 {
95     init();
96     LCD_init();
97
98     /* äStt digiPOT till 257 */
99     POT2_L; //Aktiverar POT1
100     __delay_us(2); //Ändra?
101     SPI_WRITE(1);
102     SPI_WRITE(0);
103     __delay_ms(2);
104     POT2_H; //Inaktiverar POT1
105     __delay_ms(50);
106
107     menu_sys = 11;
108     menu('P');
109
110     BACK_LIGHT_H;
111
112     char buffer[32];
113     unsigned int AD_akt;
114
115     /* äOndlig loop som lysnar efter aktivitet åp knapparna */

```

```
116     while(1){
117         cnt++;
118         if (BUTTON_R==1){           //Kan "bouncing" bli ett problem?
119             cnt = 0;
120             __delay_ms(500);
121             menu('R');
122             menu('P');
123         }
124         else if (BUTTON_L==1){
125             cnt = 0;
126             __delay_ms(500);
127             menu('L');
128             menu('P');
129         }
130         else if (BUTTON_OK==1){
131             cnt = 0;
132             __delay_ms(500);
133             menu('K');
134             menu('P');
135         }
136         else if (cnt == 10000 && menu_sys == 11 && SW==0){
137             cnt = 0;
138             sep_factor();
139
140             /* öFr att se ADC-max *
141             AD_akt = ADC(); //ADC
142
143             sprintf(buffer,"%u",AD_akt); //convert to ascii
144             LCD_GOTO(2,1); //set cursor to first pos. on second line
145             LCD_PUTS(buffer); //print sep_akt
146             LCD_PUTS("      ");
147             */
148         }
149         else if (SW==1){
150             cnt = 0;
151             EXT();
152         }
153     }
154 }
155 /*←
156     /*
157     /* Subroutines */
158     /*←
159     /*
160     /*←
161     /*
162     /* External control from LabVIEW */
163     /*←
164     /*
165 void EXT()
166 {
167     char buffer[32];
```

```

164     char cmd_1, cmd_2;
165
166     LCD_CLEAR();
167     LCD_PUTS("Waiting for cmd.");
168
169     while(SW==1){
170         cmd_1 = 0;
171         cmd_2 = 0;
172
173         init_EXT();
174
175         sprintf(buffer, "%u", digipot_plats);
176         LCD_GOTO(2,1);
177         LCD_PUTS("Current: ");
178         LCD_PUTS(buffer);
179         LCD_PUTS(" ");
180
181         cmd_1 = SPI_READ();
182
183         LCD_CLEAR();
184         LCD_PUTS("Send next cmd");
185
186         __delay_ms(50);
187         cmd_2 = SPI_READ();
188
189         if(SW==0){
190             break;
191         }
192
193         if(cmd_1 == 1){
194             digipot_plats = 257;
195         }
196         else{
197             digipot_plats = (unsigned int)cmd_2;
198             digipot_plats++;
199         }
200
201         init_SPI_master();
202
203         POT2_L; //Aktiverar POT1
204         __delay_us(2); //Ändra?
205         SPI_WRITE(cmd_1);
206         SPI_WRITE(cmd_2);
207         __delay_ms(2);
208         POT2_H; //Inaktiverar POT1
209         __delay_ms(50);
210     }
211
212     init_SPI_master();
213     menu_sys = 11;
214     menu('P');
215
216 }
217 /*↵

```

*/

```
218 /* Menu */
219 /*←
*/
220 void menu(char knapp)
221 {
222     switch(menu_sys){
223         case 10: //Backlight
224             switch(knapp){
225                 case 'R':
226                     menu_sys = 11;
227                     break;
228                 case 'L':
229                     menu_sys = 13;
230                     break;
231                 case 'K':
232                     if(PORTAbits.RA1 == 1){
233                         BACK_LIGHT_L;
234                     }
235                     else if(PORTAbits.RA1 == 0){
236                         BACK_LIGHT_H;
237                     }
238                     break;
239                 case 'P':
240                     LCD_CLEAR();
241                     LCD_PUTS("Backlight");
242                     LCD_GOTO(2,1);
243                     LCD_PUTS("On/Off");
244                     break;
245             }
246         case 11: //Separation factor
247             switch(knapp){
248                 case 'R':
249                     menu_sys = 12;
250                     break;
251                 case 'L':
252                     menu_sys = 10;
253                     break;
254                 case 'K':
255                     break;
256                 case 'P':
257                     LCD_CLEAR();
258                     LCD_PUTS("Sep. factor");
259                     sep_factor();
260                     break;
261             }
262             break;
263         case 12: //Calibrations
264             switch(knapp){
265                 case 'R':
266                     menu_sys = 13;
267                     break;
268                 case 'L':
269                     menu_sys = 11;
270                     break;
271                 case 'K':
```

```

272         menu_sys = 31;
273         break;
274     case 'P':
275         LCD_CLEAR();
276         LCD_PUTS("Calibrations");
277         break;
278     }
279     break;
280 case 13: //Settings
281     switch(knapp){
282     case 'R':
283         menu_sys = 10;
284         break;
285     case 'L':
286         menu_sys = 12;
287         break;
288     case 'K':
289         menu_sys = 21;
290         break;
291     case 'P':
292         LCD_CLEAR();
293         LCD_PUTS("Settings");
294         break;
295     }
296     break;
297 case 21: //Change current thru bearing
298     switch(knapp){
299     case 'R':
300         menu_sys = 22;
301         break;
302     case 'L':
303         menu_sys = 13;
304         break;
305     case 'K':
306         change_current();
307         change_current2();
308         break;
309     case 'P':
310         init_BEAR();
311         LCD_CLEAR();
312         LCD_PUTS("Change current");
313         LCD_GOTO(2,1);
314         LCD_PUTS("thru bearing");
315         break;
316     }
317     break;
318 case 22: //Change ADC gain
319     switch(knapp){
320     case 'R':
321         menu_sys = 23;
322         break;
323     case 'L':
324         menu_sys = 21;
325         break;
326     case 'K':
327         set_adc_base();

```

```
328         break;
329     case 'P':
330         LCD_CLEAR();
331         LCD_PUTS("Change gain");
332         LCD_GOTO(2,1);
333         LCD_PUTS("for ADC");
334         break;
335     }
336     break;
337 case 23: //Set digiPOT to specific point
338     switch(knapp){
339         case 'R':
340             menu_sys = 13;
341             break;
342         case 'L':
343             menu_sys = 22;
344             break;
345         case 'K':
346             set_digiPOT();
347             break;
348         case 'P':
349             LCD_CLEAR();
350             LCD_PUTS("Set digiPOT to");
351             LCD_GOTO(2,1);
352             LCD_PUTS("specific point");
353             break;
354     }
355     break;
356 case 31: //Calibrate 0%
357     switch(knapp){
358         case 'R':
359             menu_sys = 32;
360             break;
361         case 'L':
362             menu_sys = 12;
363             break;
364         case 'K':
365             cal_0();
366             break;
367         case 'P':
368             LCD_CLEAR();
369             LCD_PUTS("Calibrate");
370             LCD_GOTO(2,1);
371             LCD_PUTS("0 procent");
372             break;
373     }
374     break;
375 case 32: //Calibrate 100%
376     switch(knapp){
377         case 'R':
378             menu_sys = 33;
379             break;
380         case 'L':
381             menu_sys = 32;
382             break;
383         case 'K':
```



```

384         cal_100();
385         break;
386     case 'P':
387         LCD_CLEAR();
388         LCD_PUTS("Calibrate");
389         LCD_GOTO(2,1);
390         LCD_PUTS("100 procent");
391         break;
392     }
393     break;
394 case 33: //Use predefined settings
395     switch(knapp){
396     case 'R':
397         menu_sys = 12;
398         break;
399     case 'L':
400         menu_sys = 32;
401         break;
402     case 'K':
403         original_settings();
404         break;
405     case 'P':
406         LCD_CLEAR();
407         LCD_PUTS("Use predefined");
408         LCD_GOTO(2,1);
409         LCD_PUTS("settings");
410         break;
411     }
412     break;
413 }
414 }
415 /*←
416 */
417 /* SPI communication */
418 */
418 void SPI_WRITE(char data)
419 {
420     unsigned char temp_data;
421     temp_data = SSPBUF; // Clears BF
422     PIR1bits.SSPIF = 0; // Clear interrupt flag
423     SSPBUF = data; // write byte to SSP1BUF register
424     while(!PIR1bits.SSPIF) {}; // wait until bus cycle complete
425     //return ( 0 ); // if WCOL bit is not set return non-negative←
426     #
427 }
428 unsigned char SPI_READ() //only for ext. control
429 {
430
431     unsigned char SPI_Return = 0; //Clean buffer
432     SSPBUF = 0b00000000; //Initiate bus
433     while(!SSPSTATbits.BF); //Wait for SSP buffer
434     SPI_Return = SSPBUF; //Add data packet to buffer

```

```
435     return SPI_Return;
436
437     /*
438     unsigned char SPI_Return = 0;           //Clean buffer
439     SSPBUF = 0b00000000;                   //Initiate bus
440     while (!SSPSTATbits.BF && SW==1);       //Wait for SSP buffer
441     SPI_Return = SSPBUF; //Add data packet to buffer
442     return SPI_Return;
443     */
444 }
445 /*←
    *****←
    */
446 /* Sep. factor (Skriver ut aktuell sep. factor på LCD rad 2) */
447 /*←
    *****←
    */
448 void sep_factor()
449 {
450     char buffer[32];
451     uint24_t sep_akt, temp;
452     unsigned int AD_akt;
453
454     init_SEP(); //ADC settings for measuring the sep. factor
455
456     AD_akt = AD_omv(); //ADC
457     if (AD_akt > sep_0){
458         temp = (uint24_t)AD_akt;
459         sep_akt = (((temp - sep_0)*100)/(sep_100 - sep_0))+0.5); //←
            sep. factor in % (avrundat)
460         //sep_akt_2 = (((AD_akt - sep_0)/(sep_100 - sep_0))*100)←
            +0.5); //sep. factor in % (avrundat)
461         //sep_akt = sep_akt_2;
462     }
463     else if (AD_akt < sep_0){
464         sep_akt = 0;
465     }
466     else if (AD_akt > sep_100){
467         sep_akt = 100;
468     }
469
470     sprintf(buffer, "%d", sep_akt); //convert to ascii
471     LCD_GOTO(2,1); //set cursor to first pos. on second line
472     LCD_PUTS(buffer); //print sep_akt
473     LCD_PUTS(" % ");
474 }
475 /*←
    *****←
    */
476 /* Calibrate 0 procent */
477 /*←
    *****←
    */
478 void cal_0()
479 {
480     init_SEP(); //Init ADC for sep. factor
```

```

481
482 LCD_CLEAR();
483 LCD_PUTS("Connect bearing"); //Print to LCD
484
485 char temp = 1; //Villkor öfr loopen under
486 while(temp == 1){
487     if(BUTTON_OK==1){ //Om lagret är anslutet
488         __delay_ms(500);
489         temp = 0;
490
491         LCD_CLEAR();
492         LCD_PUTS("Calibrating..."); //Print to LCD
493
494         for(int i = 0; i < 47; i++){ //5*tau
495             __delay_ms(5000);
496         }
497     }
498     else if(BUTTON_L==1){ //Hoppa över delayen
499         __delay_ms(500);
500         temp = 0;
501     }
502 }
503
504 sep_0 = AD_omv(); //lagra aktuellt ävrde öfr sep.fator till sep←
505     . 0%
506 }
507 /*←
508     *****←
509     */
510 /* Calibrate 100 procent */
511 /*←
512     *****←
513     */
514 void cal_100()
515 {
516     init_SEP(); //Init ADC for sep. factor
517
518     LCD_CLEAR();
519     LCD_PUTS("Disconnect"); //Print to LCD
520     LCD_GOTO(2,1);
521     LCD_PUTS("bearing"); //Print to LCD
522
523     char temp = 1;
524     while(temp == 1){
525         if(BUTTON_OK==1){ //Om lagret är urkopplat
526             __delay_ms(500);
527             temp = 0;
528
529             LCD_CLEAR();
530             LCD_PUTS("Calibrating..."); //Print to LCD
531
532             for(int i = 0; i < 47; i++){
533                 __delay_ms(5000);
534             }
535         }
536         else if(BUTTON_L==1){ //Hoppa över delayen

```

```
532         __delay_ms(500);
533         temp = 0;
534     }
535 }
536
537 sep_100 = AD_omv(); //lagra aktuellt ävrde öfr sep.fator till sep←
    . 100%
538
539 LCD_CLEAR();
540 LCD_PUTS("Connect bearing"); //Print to LCD
541
542 temp = 1;
543 while(temp == 1){ //Om lagret är anslutet
544     if(BUTTON_OK==1){
545         __delay_ms(500);
546         temp = 0;
547     }
548 }
549 }
550 /*←
    *****←
    */
551 /* Set predefined settings */
552 /*←
    *****←
    */
553 void original_settings()
554 {
555     sep_100 = 1015; //Voltagelevel for 100% sep.
556     sep_0 = 68; //Voltagelevel for 0% sep.
557
558     char temp = 1;
559     while(temp == 1){ //Kvittering
560         if(BUTTON_OK==1){
561             __delay_ms(500);
562             temp = 0;
563         }
564     }
565 }
566 /*←
    *****←
    */
567 /* Change current thru bearing */
568 /*←
    *****←
    */
569 void change_current()
570 {
571     init_BEAR(); //Init ADC for voltage over bearing
572     init_SPI_master();
573
574     LCD_CLEAR();
575     LCD_PUTS("10 steps/click"); //Print to LCD
576     print_V_A(); //Skriv ut aktuell östrm
577
578     //char temp = 1;
```

```

579 while(1){ //öka/minska digiPOT 10 steg/click
580     if(BUTTON_OK==1){
581         //temp = 0;
582         __delay_ms(500);
583         break;
584     }
585     else if(BUTTON_R==1){ //Öka
586         digipot_plats = digipot_plats + 10;
587
588         if(digipot_plats > 255){
589             digipot_plats = 256;
590         }
591
592         print_V_A();
593         __delay_ms(500);
594     }
595     else if(BUTTON_L==1){ //Minska
596         if(digipot_plats > 9){
597             digipot_plats = digipot_plats - 10;
598         }
599         else if(digipot_plats < 9){
600             digipot_plats = 0;
601         }
602
603         print_V_A();
604         __delay_ms(500);
605     }
606 }
607 }
608
609 void change_current2(){
610     LCD_CLEAR();
611     LCD_PUTS("1 steps/click");
612     print_V_A();
613
614     //temp = 1;
615     while(1){ //öka/minska digiPOT 1 steg/click
616         if(BUTTON_OK==1){
617             //temp = 0;
618             __delay_ms(500);
619             break;
620         }
621         else if(BUTTON_R==1){
622             digipot_plats++;
623
624             if(digipot_plats > 255){
625                 digipot_plats = 256;
626             }
627
628             print_V_A();
629             __delay_ms(500);
630         }
631         else if(BUTTON_L==1){
632             if(digipot_plats > 0){
633                 digipot_plats--;
634             }

```

```
635
636         print_V_A();
637         __delay_ms(500);
638     }
639 }
640 }
641 /*←
        *****←
        */
642 /* Print  ADC results on LCD line 2*/
643 /*←
        *****←
        */
644 void print_V_A()
645 {
646     /*
647     char buffer[32];
648     unsigned int AD_akt;
649     float micro_V;
650     unsigned int micro_A;
651
652     AD_akt = AD_omv(); //ADC
653     micro_V = ((AD_bas[bas_n]*AD_akt)/(100)); //ADC i micro-volt
654     micro_A = ((micro_V + 0.5); //Omvandling till micro-ampere (←
        avrundat åuppt)
655
656     //sprintf(buffer,"%i",micro_A);
657     //LCD_GOTO(2,1);
658     //LCD_PUTS(buffer);
659     //LCD_PUTS(" u [A]");
660
661     sprintf(buffer,"%u",micro_A);
662     LCD_GOTO(2,1);
663     LCD_PUTS(buffer);
664     LCD_PUTS(" u [A]");
665     */
666
667     char buffer[32];
668     int digiPOT_e = 380;
669     int digiPOT_Rw = 92;
670
671     if(digipot_plats > 255){
672         POT2_L; //Aktiverar POT1
673         __delay_us(5); //Ändra?
674         SPI_WRITE(1);
675         SPI_WRITE(0);
676         __delay_ms(3);
677         POT2_H; //Inaktiverar POT1
678         __delay_ms(50);
679     }
680     else{
681         POT2_L; //Aktiverar POT1
682         __delay_us(5); //Ändra?
683         SPI_WRITE(0);
684         SPI_WRITE(digipot_plats);
685         __delay_ms(3);
```

```

686     POT2_H; //Inaktiverar POT1
687     __delay_ms(50);
688 }
689
690 float R_digipot = ((digipot_plats*digiPOT_e)+digiPOT_Rw+100);
691 float R_par = (R_digipot*560)/(R_digipot+560);
692 float sp_bas = ((R_par)/(R_par+27000))*5;
693 float amp = (1000000*((sp_bas)/(R_digipot)));
694
695 int g = (amp + 0.5);
696
697 sprintf(buffer, "%i", g);
698 LCD_GOTO(2,1);
699 LCD_PUTS(buffer);
700 LCD_PUTS("u [A] ");
701 }
702 /*←
    *****←
    */
703 /* ADC-gain */
704 /*←
    *****←
    */
705 void set_adc_base()
706 {
707     char buffer[32];
708     char temp2 = 1;
709     char temp;
710
711     LCD_CLEAR();
712     LCD_PUTS("ADC-base");
713
714     while(temp2 == 1){
715         temp = 1;
716         sprintf(buffer, "%d", bas_n); //from char to ascii
717         LCD_GOTO(2,1);
718         LCD_PUTS(buffer);
719
720         while(temp == 1){
721             if(BUTTON_OK==1){
722                 __delay_ms(500);
723                 temp = 0;
724                 temp2 = 0;
725             }
726             else if(BUTTON_L==1){
727                 __delay_ms(500);
728                 temp = 0;
729
730                 bas_n--;
731                 if(bas_n < 1){
732                     bas_n = 1;
733                 }
734             }
735             else if(BUTTON_R==1){
736                 __delay_ms(500);
737                 temp = 0;

```

```
738
739         bas_n++;
740         if(bas_n > 4){
741             bas_n = 4;
742         }
743     }
744 }
745 }
746 }
747 /*←
    *****←
    */
748 /* Set digiPOT to specific point */
749 /*←
    *****←
    */
750 void set_digiPOT()
751 {
752     unsigned int digipot_nr = 1; //uint digipot_nr
753     char buffer[32];
754     char temp = 1;
755     char temp2 = 1;
756
757     init_SPI_master();
758
759     LCD_CLEAR();
760     LCD_PUTS("10 steps/click");
761
762     while(temp2 == 1){
763         temp = 1;
764
765         sprintf(buffer, "%d", digipot_nr);
766         LCD_GOTO(2,1);
767         LCD_PUTS(buffer);
768
769         while(temp == 1){
770             if(BUTTON_OK==1){
771                 __delay_ms(500);
772                 temp = 0;
773                 temp2 = 0;
774             }
775             if(BUTTON_L==1){
776                 __delay_ms(500);
777                 digipot_plats = digipot_plats - 10;
778                 digipot_nr = digipot_nr - 10;
779
780                 if(digipot_nr < 1){
781                     digipot_nr = 1;
782                 }
783
784                 sprintf(buffer, "%d", digipot_nr);
785                 LCD_GOTO(2,1);
786                 LCD_PUTS(buffer);
787                 LCD_PUTS(" ");
788             }
789             if(BUTTON_R==1){
```



```

790         __delay_ms(500);
791         digipot_plats = digipot_plats + 10;
792         digipot_nr = digipot_nr + 10;
793
794         if(digipot_nr > 257){
795             digipot_nr = 257;
796         }
797
798         sprintf(buffer, "%d", digipot_nr);
799         LCD_GOTO(2,1);
800         LCD_PUTS(buffer);
801         LCD_PUTS(" ");
802     }
803 }
804
805
806 temp = 1;
807 temp2 = 1;
808 while(temp2 == 1){
809     sprintf(buffer, "%d", digipot_nr);
810     LCD_GOTO(2,1);
811     LCD_PUTS(buffer);
812
813     while(temp == 1){
814         if(BUTTON_OK==1){
815             __delay_ms(500);
816             temp = 0;
817         }
818         if(BUTTON_L==1){
819             __delay_ms(500);
820             digipot_plats--;
821             digipot_nr--;
822
823             if(digipot_nr < 1){
824                 digipot_nr = 1;
825             }
826
827             sprintf(buffer, "%d", digipot_nr);
828             LCD_GOTO(2,1);
829             LCD_PUTS(buffer);
830             LCD_PUTS(" ");
831         }
832         if(BUTTON_R==1){
833             __delay_ms(500);
834             digipot_plats++;
835             digipot_nr++;
836
837             if(digipot_nr > 257){
838                 digipot_nr = 257;
839             }
840
841             sprintf(buffer, "%d", digipot_nr);
842             LCD_GOTO(2,1);
843             LCD_PUTS(buffer);
844             LCD_PUTS(" ");
845         }

```

```
846     }
847 }
848
849 digipot_nr--;
850
851 if(digipot_nr < 256){
852     POT2_L; //Aktiverar POT1
853     __delay_us(5); //Ändra?
854     SPI_WRITE(0);
855     SPI_WRITE(digipot_nr);
856     __delay_ms(3);
857     POT2_H; //Inaktiverar POT1
858     __delay_ms(50);
859 }
860 else if(digipot_nr == 256){
861     POT2_L; //Aktiverar POT1
862     __delay_us(5); //Ändra?
863     SPI_WRITE(1); //KOLLA!!!
864     SPI_WRITE(0);
865     __delay_ms(3);
866     POT2_H; //Inaktiverar POT1
867     __delay_ms(50);
868 }
869
870 digipot_nr++;
871 }
872 /*←
873
874 */
875 /* ADC */
876 /*←
877
878 */
879 unsigned int ADC(void) //ADRESH+ADRESL
880 {
881     __delay_ms(5); //Delay
882     ADCON0bits.GO=1; //Startar AD-omvandling
883     while(ADCON0bits.GO); //äVnta åp att AD-omvandling skall bli ←
884     klar
885     return ((ADRESH << 8)+ADRESL);
886 }
887 /*←
888
889 */
890 /* AD_omv (öGr a/d-omvandlingen 10 ggr och delar sedan åp 10 */
891 /*←
892
893 */
894 unsigned int AD_omv(void)
895 {
896     unsigned int ADC_10;
897     ADC_10 = ADC() + ADC() + ADC() + ADC() + ADC() + ADC() + ADC() + ←
898     ADC() + ADC() + ADC();
899     ADC_10 = ADC_10 / 10;
900     return ADC_10;
901 }
```

```

892 /*↵
      *****↵
      */
893 /* Init */
894 /*↵
      *****↵
      */
895 /* Initiala äinstllningar */
896 void init()
897 {
898     ANSEL=0b00001101;    //1 = analog (AN7,AN6,AN5,AN4,AN3,AN2,AN1,AN0↵
      )
899     ANSELH=0b00000100;    //0 = digitala (AN13–AN8)
900
901     TRISA=0b11111101;    //1 = åingng
902     TRISB=0b00000001;    //0 = åutgng
903     TRISC=0b00010001;
904
905     PORTB=0b00000000;
906     BACK_LIGHT_L;
907
908     POT1_H;
909     POT2_H;
910
911     init_SPI_master();
912
913     //OSCCON=0b01100001;    //Intern klocka 4 MHz (Fosc)
914 }
915
916 /* Setting SPI for external control */
917 void init_EXT()
918 {
919     //SSPSTAT=0b01000001;
920     //SSPCON=0b11110101;    //CKP=0
921
922     SSPSTAT = 0b01000000;
923     SSPCON = 0b01100101;
924 }
925
926 /* Setting SPI for control of digiPOT */
927 void init_SPI_master()
928 {
929     SSPSTAT=0b01000001;
930     SSPCON=0b11110000;    //CKP=0
931 }
932
933 /* ADC äinstllningar öfr sep. factor */
934 void init_SEP()
935 {
936     ADCON0=0b01101001;    //AD-clock=Fosc/8, AN10–åingng, AD-ON
937     ADCON1=0b10110000;    //AD-resultat öhgerjusterat, AD-ref
938     //ADCON1=0b10000000;    //AD-resultat ävnsterjusterat, AD-ref VDD ↵
      och VSS
939 }
940
941 /* ADC äinstllningar öfr öäfrstrkning */

```

```
942 void init_GAIN()
943 {
944     ADCON0=0b01110001; //AD-clock=Fosc/8, AN10-åingng, AD-ON
945     ADCON1=0b10110000; //AD-resultat öhgerjusterat, AD-ref
946 }
947
948 /* ADC äinstllningar öfr ämtning av östrmmen genom lagret */
949 void init_BEAR()
950 {
951     ADCON0=0b01000001; //AD-clock=Fosc/8, AN10-åingng, AD-ON
952     ADCON1=0b10110000; //AD-resultat öhgerjusterat, AD-ref
953     //ADCON1=0b10000000; //AD-resultat ävnsterjusterat, AD-ref+ och ←
        VSS (TEMP)
954 }
955 /*←
        *****←
        */
956 /*←
        *****←
        */
```

C.2 macros.h

```
1 /*←
        *****←
        */
2 /*←
        *****←
        */
3 /*
4  * File:      macros.h
5  * Program:   Separation factor measurent module.
6  * Authors:   Linus öStrmsnes.
7  * Created:   2016.
8  */
9 /*←
        *****←
        */
10 /* Macros */
11 /*←
        *****←
        */
12 #define _XTAL_FREQ 4000000 //Oscillatorfrekvens 4 MHz
13                             //äKrvs öfr macro "__delay_us(x)"
14                             //respektive "__delay_ms(x)"
15
16 /* For the pushbuttens and switch */
17 #define BUTTON_R    PORTAbits.RA7
18 #define BUTTON_L    PORTAbits.RA6
19 #define BUTTON_OK    PORTCbits.RC0
20 #define SW          PORTBbits.RB0
21
```



```
7  *   Created:      2016.
8  */
9  /*←
    *****←
    */
10 /* Subroutines */
11 /*←
    *****←
    */
12 /* Initialize LCD */
13 extern void LCD_init();
14
15 /* Send 1 byte to LCD */
16 extern void LCD_WRITE(unsigned char DATA);
17
18 /* Write command to LCD */
19 extern void LCD_CMD(unsigned char DATA);
20
21 /* Clear LCD (command) */
22 extern void LCD_CLEAR(void);
23
24 /* Pulse enable-signal */
25 extern void LCD_E(void);
26
27 /* Write string to LCD */
28 extern void LCD_PUTS(const char * DATA);
29
30 /* Set cursor to specific point */
31 extern void LCD_GOTO(unsigned char pos_x, unsigned char pos_y);
32 /*←
    *****←
    */
33 /*←
    *****←
    */
```

C.4 lcd.c

```
1  /*←
    *****←
    */
2  /*←
    *****←
    */
3  /*
4  *   File:          lcd.c
5  *   Program:       Separation factor measurent module.
6  *   Authors:       Linus öStrmsnes.
7  *   Created:       2016.
8  */
9  /*←
    *****←
```

```

10  /* Include-files */
11  /*←
    *****←
    */
12  #include <xc.h>
13  #include "lcd.h"
14  #include "macros.h"
15  /*←
    *****←
    */
16  /* Subroutines */
17  /*←
    *****←
    */
18  /* Initialize LCD */
19  void LCD_init(){ //initialise the LCD – put into 4 bit mode
20      LCD_D4_L;
21      LCD_D5_L;
22      LCD_D6_L;
23      LCD_D7_L;
24      LCD_RS_L;
25      LCD_EN_L;
26      __delay_ms(50); // Wait 40ms after power applied
27      LCD_D4_H;
28      LCD_D5_H;
29      LCD_D6_L;
30      LCD_D7_L;
31      LCD_E();
32      __delay_ms(6); // Wait 6ms
33      LCD_E();
34      __delay_ms(2);
35      LCD_E();
36      __delay_ms(2);
37      LCD_D4_L; // Set 4 bit mode
38      LCD_E();
39      __delay_ms(2);
40      LCD_CMD(0b00101000); // Set interface length 4-bit, 2-line, 5x8 ←
        dots display
41      LCD_CMD(0b00001100); // Display On, Cursor OFF, Cursor Blink OFF
42      LCD_CMD(0b00000110); // Set entry Mode
43      LCD_CLEAR(); // Clear screen
44  }
45
46  /* Pulse enable-signal */
47  void LCD_E()
48  {
49      LCD_EN_H;
50      __delay_us(2);
51      LCD_EN_L;
52  }
53
54  /* Send 1 byte to LCD */
55  void LCD_WRITE(unsigned char c){ //write a byte to the LCD in 4 ←
        bit mode
56      if(c & 0x80) LCD_D7_H; else LCD_D7_L;

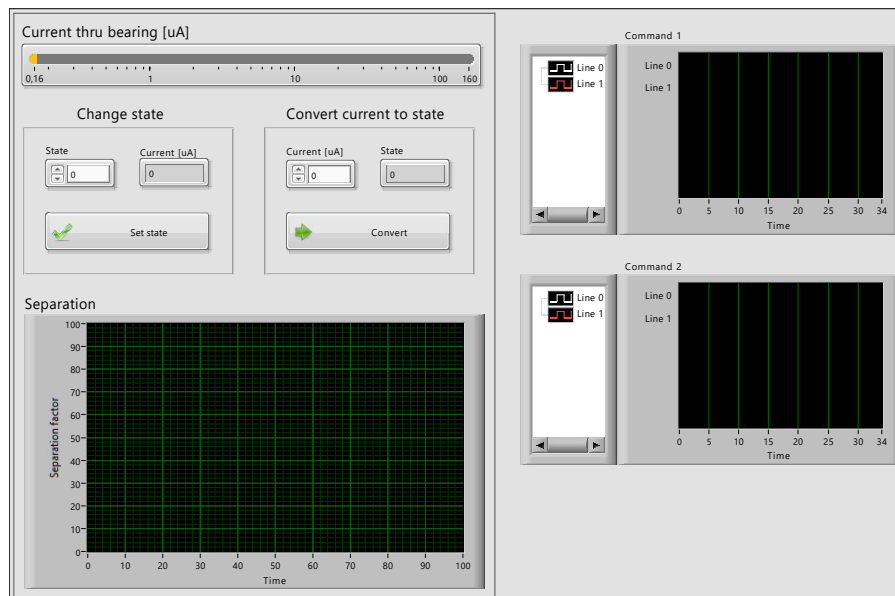
```

```
57     if (c & 0x40) LCD_D6_H; else LCD_D6_L;
58     if (c & 0x20) LCD_D5_H; else LCD_D5_L;
59     if (c & 0x10) LCD_D4_H; else LCD_D4_L;
60     LCD_E();
61     if (c & 0x08) LCD_D7_H; else LCD_D7_L;
62     if (c & 0x04) LCD_D6_H; else LCD_D6_L;
63     if (c & 0x02) LCD_D5_H; else LCD_D5_L;
64     if (c & 0x01) LCD_D4_H; else LCD_D4_L;
65     LCD_E();
66     __delay_us(50);
67 }
68
69 /* Write command to LCD */
70 void LCD_CMD(unsigned char command)
71 {
72     LCD_RS_L;
73     LCD_WRITE(command);
74     LCD_RS_H;
75 }
76
77 /* Clear LCD (command) */
78 void LCD_CLEAR(void){
79     LCD_CMD(0x1);
80     __delay_ms(2);
81 }
82
83 /* Write string to LCD */
84 void LCD_PUTS(const char * s){
85     while(*s){
86         switch (*s) {
87             case '\b': LCD_CMD(0x10); break; //backspace
88             case '\f': LCD_CMD(0x1); //clear display
89                         __delay_ms(2);
90                         break;
91             case '\n': LCD_CMD(0xC0); break; //newline
92             default : LCD_WRITE(*s); // write characters
93                         break;
94         }
95         *s++;
96     }
97 }
98
99 /* Set cursor to specific point */
100 void LCD_GOTO(unsigned char pos_x, unsigned char pos_y){
101     pos_y--;
102     if (pos_x==1){
103         LCD_CMD(0x80+pos_y);
104     } else if (pos_x==2){
105         LCD_CMD(0xC0+pos_y);
106     }
107 }
108
109 /*←
110
111     *←
112
113     *←
114
115     *←
116
117     *←
118
119     *←
120
121     *←
122
123     *←
124
125     *←
126
127     *←
128
129     *←
130
131     *←
132
133     *←
134
135     *←
136
137     *←
138
139     *←
140
141     *←
142
143     *←
144
145     *←
146
147     *←
148
149     *←
150
151     *←
152
153     *←
154
155     *←
156
157     *←
158
159     *←
160
161     *←
162
163     *←
164
165     *←
166
167     *←
168
169     *←
170
171     *←
172
173     *←
174
175     *←
176
177     *←
178
179     *←
180
181     *←
182
183     *←
184
185     *←
186
187     *←
188
189     *←
190
191     *←
192
193     *←
194
195     *←
196
197     *←
198
199     *←
200
201     *←
202
203     *←
204
205     *←
206
207     *←
208
209     *←
210
211     *←
212
213     *←
214
215     *←
216
217     *←
218
219     *←
220
221     *←
222
223     *←
224
225     *←
226
227     *←
228
229     *←
230
231     *←
232
233     *←
234
235     *←
236
237     *←
238
239     *←
240
241     *←
242
243     *←
244
245     *←
246
247     *←
248
249     *←
250
251     *←
252
253     *←
254
255     *←
256
257     *←
258
259     *←
260
261     *←
262
263     *←
264
265     *←
266
267     *←
268
269     *←
270
271     *←
272
273     *←
274
275     *←
276
277     *←
278
279     *←
280
281     *←
282
283     *←
284
285     *←
286
287     *←
288
289     *←
290
291     *←
292
293     *←
294
295     *←
296
297     *←
298
299     *←
300
301     *←
302
303     *←
304
305     *←
306
307     *←
308
309     *←
310
311     *←
312
313     *←
314
315     *←
316
317     *←
318
319     *←
320
321     *←
322
323     *←
324
325     *←
326
327     *←
328
329     *←
330
331     *←
332
333     *←
334
335     *←
336
337     *←
338
339     *←
340
341     *←
342
343     *←
344
345     *←
346
347     *←
348
349     *←
350
351     *←
352
353     *←
354
355     *←
356
357     *←
358
359     *←
360
361     *←
362
363     *←
364
365     *←
366
367     *←
368
369     *←
370
371     *←
372
373     *←
374
375     *←
376
377     *←
378
379     *←
380
381     *←
382
383     *←
384
385     *←
386
387     *←
388
389     *←
390
391     *←
392
393     *←
394
395     *←
396
397     *←
398
399     *←
400
401     *←
402
403     *←
404
405     *←
406
407     *←
408
409     *←
410
411     *←
412
413     *←
414
415     *←
416
417     *←
418
419     *←
420
421     *←
422
423     *←
424
425     *←
426
427     *←
428
429     *←
430
431     *←
432
433     *←
434
435     *←
436
437     *←
438
439     *←
440
441     *←
442
443     *←
444
445     *←
446
447     *←
448
449     *←
450
451     *←
452
453     *←
454
455     *←
456
457     *←
458
459     *←
460
461     *←
462
463     *←
464
465     *←
466
467     *←
468
469     *←
470
471     *←
472
473     *←
474
475     *←
476
477     *←
478
479     *←
480
481     *←
482
483     *←
484
485     *←
486
487     *←
488
489     *←
490
491     *←
492
493     *←
494
495     *←
496
497     *←
498
499     *←
500
501     *←
502
503     *←
504
505     *←
506
507     *←
508
509     *←
510
511     *←
512
513     *←
514
515     *←
516
517     *←
518
519     *←
520
521     *←
522
523     *←
524
525     *←
526
527     *←
528
529     *←
530
531     *←
532
533     *←
534
535     *←
536
537     *←
538
539     *←
540
541     *←
542
543     *←
544
545     *←
546
547     *←
548
549     *←
550
551     *←
552
553     *←
554
555     *←
556
557     *←
558
559     *←
560
561     *←
562
563     *←
564
565     *←
566
567     *←
568
569     *←
570
571     *←
572
573     *←
574
575     *←
576
577     *←
578
579     *←
580
581     *←
582
583     *←
584
585     *←
586
587     *←
588
589     *←
590
591     *←
592
593     *←
594
595     *←
596
597     *←
598
599     *←
600
601     *←
602
603     *←
604
605     *←
606
607     *←
608
609     *←
610
611     *←
612
613     *←
614
615     *←
616
617     *←
618
619     *←
620
621     *←
622
623     *←
624
625     *←
626
627     *←
628
629     *←
630
631     *←
632
633     *←
634
635     *←
636
637     *←
638
639     *←
640
641     *←
642
643     *←
644
645     *←
646
647     *←
648
649     *←
650
651     *←
652
653     *←
654
655     *←
656
657     *←
658
659     *←
660
661     *←
662
663     *←
664
665     *←
666
667     *←
668
669     *←
670
671     *←
672
673     *←
674
675     *←
676
677     *←
678
679     *←
680
681     *←
682
683     *←
684
685     *←
686
687     *←
688
689     *←
690
691     *←
692
693     *←
694
695     *←
696
697     *←
698
699     *←
700
701     *←
702
703     *←
704
705     *←
706
707     *←
708
709     *←
710
711     *←
712
713     *←
714
715     *←
716
717     *←
718
719     *←
720
721     *←
722
723     *←
724
725     *←
726
727     *←
728
729     *←
730
731     *←
732
733     *←
734
735     *←
736
737     *←
738
739     *←
740
741     *←
742
743     *←
744
745     *←
746
747     *←
748
749     *←
750
751     *←
752
753     *←
754
755     *←
756
757     *←
758
759     *←
760
761     *←
762
763     *←
764
765     *←
766
767     *←
768
769     *←
770
771     *←
772
773     *←
774
775     *←
776
777     *←
778
779     *←
780
781     *←
782
783     *←
784
785     *←
786
787     *←
788
789     *←
790
791     *←
792
793     *←
794
795     *←
796
797     *←
798
799     *←
800
801     *←
802
803     *←
804
805     *←
806
807     *←
808
809     *←
810
811     *←
812
813     *←
814
815     *←
816
817     *←
818
819     *←
820
821     *←
822
823     *←
824
825     *←
826
827     *←
828
829     *←
830
831     *←
832
833     *←
834
835     *←
836
837     *←
838
839     *←
840
841     *←
842
843     *←
844
845     *←
846
847     *←
848
849     *←
850
851     *←
852
853     *←
854
855     *←
856
857     *←
858
859     *←
860
861     *←
862
863     *←
864
865     *←
866
867     *←
868
869     *←
870
871     *←
872
873     *←
874
875     *←
876
877     *←
878
879     *←
880
881     *←
882
883     *←
884
885     *←
886
887     *←
888
889     *←
890
891     *←
892
893     *←
894
895     *←
896
897     *←
898
899     *←
900
901     *←
902
903     *←
904
905     *←
906
907     *←
908
909     *←
910
911     *←
912
913     *←
914
915     *←
916
917     *←
918
919     *←
920
921     *←
922
923     *←
924
925     *←
926
927     *←
928
929     *←
930
931     *←
932
933     *←
934
935     *←
936
937     *←
938
939     *←
940
941     *←
942
943     *←
944
945     *←
946
947     *←
948
949     *←
950
951     *←
952
953     *←
954
955     *←
956
957     *←
958
959     *←
960
961     *←
962
963     *←
964
965     *←
966
967     *←
968
969     *←
970
971     *←
972
973     *←
974
975     *←
976
977     *←
978
979     *←
980
981     *←
982
983     *←
984
985     *←
986
987     *←
988
989     *←
990
991     *←
992
993     *←
994
995     *←
996
997     *←
998
999     *←
1000
1001     *←
1002
1003     *←
1004
1005     *←
1006
1007     *←
1008
1009     *←
1010
1011     *←
1012
1013     *←
1014
1015     *←
1016
1017     *←
1018
1019     *←
1020
1021     *←
1022
1023     *←
1024
1025     *←
1026
1027     *←
1028
1029     *←
1030
1031     *←
1032
1033     *←
1034
1035     *←
1036
1037     *←
1038
1039     *←
1040
1041     *←
1042
1043     *←
1044
1045     *←
1046
1047     *←
1048
1049     *←
1050
1051     *←
1052
1053     *←
1054
1055     *←
1056
1057     *←
1058
1059     *←
1060
1061     *←
1062
1063     *←
1064
1065     *←
1066
1067     *←
1068
1069     *←
1070
1071     *←
1072
1073     *←
1074
1075     *←
1076
1077     *←
1078
1079     *←
1080
1081     *←
1082
1083     *←
1084
1085     *←
1086
1087     *←
1088
1089     *←
1090
1091     *←
1092
1093     *←
1094
1095     *←
1096
1097     *←
1098
1099     *←
1100
1101     *←
1102
1103     *←
1104
1105     *←
1106
1107     *←
1108
1109     *←
1110
1111     *←
1112
1113     *←
1114
1115     *←
1116
1117     *←
1118
1119     *←
1120
1121     *←
1122
1123     *←
1124
1125     *←
1126
1127     *←
1128
1129     *←
1130
1131     *←
1132
1133     *←
1134
1135     *←
1136
1137     *←
1138
1139     *←
1140
1141     *←
1142
1143     *←
1144
1145     *←
1146
1147     *←
1148
1149     *←
1150
1151     *←
1152
1153     *←
1154
1155     *←
1156
1157     *←
1158
1159     *←
1160
1161     *←
1162
1163     *←
1164
1165     *←
1166
1167     *←
1168
1169     *←
1170
1171     *←
1172
1173     *←
1174
1175     *←
1176
1177     *←
1178
1179     *←
1180
1181     *←
1182
1183     *←
1184
1185     *←
1186
1187     *←
1188
1189     *←
1190
1191     *←
1192
1193     *←
1194
1195     *←
1196
1197     *←
1198
1199     *←
1200
1201     *←
1202
1203     *←
1204
1205     *←
1206
1207     *←
1208
1209     *←
1210
1211     *←
1212
1213     *←
1214
1215     *←
1216
1217     *←
1218
1219     *←
1220
1221     *←
1222
1223     *←
1224
1225     *←
1226
1227     *←
1228
1229     *←
1230
1231     *←
1232
1233     *←
1234
1235     *←
1236
1237     *←
1238
1239     *←
1240
1241     *←
1242
1243     *←
1244
1245     *←
1246
1247     *←
1248
1249     *←
1250
1251     *←
1252
1253     *←
1254
1255     *←
1256
1257     *←
1258
1259     *←
1260
1261     *←
1262
1263     *←
1264
1265     *←
1266
1267     *←
1268
1269     *←
1270
1271     *←
1272
1273     *←
1274
1275     *←
1276
1277     *←
1278
1279     *←
1280
1281     *←
1282
1283     *←
1284
1285     *←
1286
1287     *←
1288
1289     *←
1290
1291     *←
1292
1293     *←
1294
1295     *←
1296
1297     *←
1298
1299     *←
1300
1301     *←
1302
1303     *←
1304
1305     *←
1306
1307     *←
1308
1309     *←
1310
1311     *←
1312
1313     *←
1314
1315     *←
1316
1317     *←
1318
1319     *←
1320
1321     *←
1322
1323     *←
1324
1325     *←
1326
1327     *←
1328
1329     *←
1330
1331     *←
1332
1333     *←
1334
1335     *←
1336
1337     *←
1338
1339     *←
1340
1341     *←
1342
1343     *←
1344
1345     *←
1346
1347     *←
1348
1349     *←
1350
1351     *←
1352
1353     *←
1354
1355     *←
1356
1357     *←
1358
1359     *←
1360
1361     *←
1362
1363     *←
1364
1365     *←
1366
1367     *←
1368
1369     *←
1370
1371     *←
1372
1373     *←
1374
1375     *←
1376
1377     *←
1378
1379     *←
1380
1381     *←
1382
1383     *←
1384
1385     *←
1386
1387     *←
1388
1389     *←
1390
1391     *←
1392
1393     *←
1394
1395     *←
1396
1397     *←
1398
1399     *←
1400
1401     *←
1402
1403     *←
1404
1405     *←
1406
1407     *←
1408
1409     *←
1410
1411     *←
1412
1413     *←
1414
1415     *←
1416
1417     *←
1418
1419     *←
1420
1421     *←
1422
1423     *←
1424
1425     *←
1426
1427     *←
1428
1429     *←
1430
1431     *←
1432
1433     *←
1434
1435     *←
1436
1437     *←
1438
1439     *←
1440
1441     *←
1442
1443     *←
1444
1445     *←
1446
1447     *←
1448
1449     *←
1450
1451     *←
1452
1453     *←
1454
1455     *←
1456
1457     *←
1458
1459     *←
1460
1461     *←
1462
1463     *←
1464
1465     *←
1466
1467     *←
1468
1469     *←
1470
1471     *←
1472
1473     *←
1474
1475     *←
1476
1477     *←
1478
1479     *←
1480
1481     *←
1482
1483     *←
1484
1485     *←
1486
1487     *←
1488
1489     *←
1490
1491     *←
1492
1493     *←
1494
1495     *←
1496
1497     *←
1498
1499     *←
1500
1501     *←
1502
1503     *←
1504
1505     *←
1506
1507     *←
1508
1509     *←
1510
1511     *←
1512
1513     *←
1514
1515     *←
1516
1517     *←
1518
1519     *←
1520
1521     *←
1522
1523     *←
1524
1525     *←
1526
1527     *←
1528
1529     *←
1530
1531     *←
1532
1533     *←
1534
1535     *←
1536
1537     *←
1538
1539     *←
1540
1541     *←
1542
1543     *←
1544
1545     *←
1546
1547     *←
1548
1549     *←
1550
1551     *←
1552
1553     *←
1554
1555     *←
1556
1557     *←
1558
1559     *←
1560
1561     *←
1562
1563     *←
1564
1565     *←
1566
1567     *←
1568
1569     *←
1570
1571     *←
1572
1573     *←
1574
1575     *←
1576
1577     *←
1578
1579     *←
1580
1581     *←
1582
1583     *←
1584
1585     *←
1586
1587     *←
1588
1589     *←
1590
1591     *←
1592
1593     *←
1594
1595     *←
1596
1597     *←
1598
1599     *←
1600
1601     *←
1602
1603     *←
1604
1605     *←
1606
1607     *←
1608
1609     *←
1610
1611     *←
1612
1613     *←
1614
1615     *←
1616
1617     *←
1618
1619     *←
1620
1621     *←
1622
1623     *←
1624
1625     *←
1626
1627     *←
1628
1629     *←
1630
1631     *←
1632
1633     *←
1634
1635     *←
1636
1637     *←
1638
1639     *←
1640
1641     *←
1642
1643     *←
1644
1645     *←
1646
1647     *←
1648
1649     *←
1650
1651     *←
1652
1653     *←
1654
1655     *←
1656
1657     *←
1658
1659     *←
1660
1661     *←
1662
1663     *←
1664
1665     *←
1666
1667     *←
1668
1669     *←
1670
1671     *←
1672
1673     *←
1674
1675     *←
1676
1677     *←
1678
1679     *←
1680
1681     *←
1682
1683     *←
1684
1685     *←
1686
1687     *←
1688
1689     *←
1690
1691     *←
1692
1693     *←
1694
1695     *←
1696
1697     *←
1698
1699     *←
1700
1701     *←
1702
1703     *←
1704
1705     *←
1706
1707     *←
1708
1709     *←
1710
1711     *←
1712
1713     *←
1714
1715     *←
1716
1717     *←
1718
1719     *←
1720
1721     *←
1722
1723     *←
1724
1725     *←
1726
1727     *←
1728
1729     *←
1730
1731     *←
1732
1733     *←
1734
1735     *←
1736
1737     *←
1738
1739     *←
1740
1741     *←
1742
1743     *←
1744
1745     *←
1746
1747     *←
1748
1749     *←
1750
1751     *←
1752
1753     *←
1754
1755     *←
1756
1757     *←
1758
1759     *←
1760
1761     *←
1762
1763     *←
1764
1765     *←
1766
1767     *←
1768
1769     *←
1770
1771     *←
1772
1773     *←
1774
1775     *←
1776
1777     *←
1778
1779     *←
1780
1781     *←
1782
1783     *←
1784
1785     *←
1786
1787     *←
1788
1789     *←
1790
1791     *←
1792
1793     *←
1794
1795     *←
1796
1797     *←
1798
1799     *←
1800
1801     *←
1802
1803     *←
1804
1805     *←
1806
1807     *←
1808
1809     *←
1810
1811     *←
1812
1813     *←
1814
1815     *←
1816
1817     *←
1818
1819     *←
1820
1821     *←
1822
1823     *←
1824
1825     *←
1826
1827     *←
1828
1829     *←
1830
1831     *←
1832
1833     *←
1834
1835     *←
1836
1837     *←
1838
1839     *←
1840
1841     *←
1842
1843     *←
1844
1845     *←
1846
1847     *←
1848
1849     *←
1850
1851     *←
1852
1853     *←
1854
1855     *←
1856
1857     *←
1858
1859     *←
1860
1861     *←
1862
1863     *←
1864
1865     *←
1866
1867     *←
1868
1869     *←
1870
1871     *←
1872
1873     *←
1874
1875     *←
1876
1877     *←
1878
1879     *←
1880
1881     *←
1882
1883     *←
1884
1885     *←
1886
1887     *←
1888
1889     *←
1890
1891     *←
1892
1893     *←
1894
1895     *←
1896
1897     *←
1898
1899     *←
1900
1901     *←
1902
1903     *←
1904
1905     *←
1906
1907     *←
1908
1909     *←
1910
1911     *←
1912
1913     *←
1914
1915     *←
1916
1917     *←
1918
1919     *←
1920
1921     *←
1922
1923     *←
1924
1925     *←
1926
1927     *←
1928
1929     *←
1930
1931     *←
1932
1933     *←
1934
1935     *←
1936
1937     *←
1938
1939     *←
1940
1941     *←
1942
1943     *←
1944
1945     *←
1946
1947     *←
1948
1949     *←
1950
1951     *←
1952
1953     *←
1954
1955     *←
1956
1957     *←
1958
1959     *←
1960
1961     *←
1962
1963     *←
1964
1965     *←
1966
1967     *←
1968
1969     *←
1970
1971     *←
1972
1973     *←
1974
1975     *←
1976
1977     *←
1978
1979     *←
1980
1981     *←
1982
1983     *←
1984
1985     *←
1986
1987     *←
1988
1989     *←
1990
1991     *←
1992
1993     *←
1994
1995     *←
1996
1997     *←
1998
1999     *←
2000
2001     *←
2002
2003     *←
2004
2005     *←
2006
2007     *←
2008
2009     *←
2010
2011     *←
2012
2013     *←
2014
2015     *←
2016
2017     *←
2018
2019     *←
2020
2021     *←
2022
2023     *←
2024
2025     *←
2026
2027     *←
2028
2029     *←
2030
2031     *←
2032
2033     *←
2034
2035     *←
2036
2037     *←
2038
2039     *←
2040
2041     *←
2042
2043     *←
2044
2045     *←
2046
2047     *←
2048
2049     *←
2050
2051    
```


D

Bilaga D

D.1 Front panel



D.2 Block diagram

