

Examensarbete, Högskolan på Åland, Utbildningsprogrammet för Elektroteknik

MÄT- OCH REGLERSYSTEM FÖR EFFEKTMÄTNING AV MOTORER

Mikael Lindholm



12:2018

Datum för godkännande: 15.05.2018
Handledare: TkD Matias Waller

EXAMENSARBETE

Högskolan på Åland

Utbildningsprogram:	Elektroteknik
Författare:	Mikael Lindholm
Arbetets namn:	Mät- och reglersystem för effektmätning av motorer
Handledare:	TkD Matias Waller
Uppdragsgivare:	

Abstrakt

Examensarbetet handlar om att göra en empirisk studie för att utveckla och bygga ett mät- och reglersystem för vridmoment- och effektmätning av motor. Mätningen görs enligt motbromsnings- och hävstångsprincipen. Syftet är att göra ett enkelt system som lätt kan anpassas för olika bromsar. Huvudkomponenterna i systemet är mikrokontroller, pekskärm och givare. De viktigaste egenskaperna för systemet är att det ska vara enkelt och smidigt att använda, att mätprecision och repetitivitet skall vara tillfredsställande samt att det skall gå att bygga förmånligt.

Systemet testades på en friktionsbromsbänk och det visade sig fungera enligt önskemål.

Enheten visar de värden som är intressanta för användaren och reglerar bromsen. Även funktionen för att kunna logga data fungerade. Det som inom denna tidsram inte blev utvärderat var regleringen för bromsning av varvtalet över ett större varvtalsområde för att visuellt kunna visa vridmoment- och effektkurva.

Utmaningarna i projektet var att få stabila mätvärden och kommunikationen mellan komponenterna att fungera.

Nyckelord (sökord)

Effektmätning, Arduino, 4D Systems, Mikrokontroller, Kraftgivare, "Load cell", Hall-givare

Högskolans serienummer:	ISSN:	Språk:	Sidantal:
12:2018	1458-1531	Svenska	55 sidor

Inlämningsdatum:	Presentationsdatum:	Datum för godkännande:
07.05.2018	15.05.2018	15.05.2018

DEGREE THESIS

Åland University of Applied Sciences

Study program:	Electrical Engineering
Author:	Mikael Lindholm
Title:	Measuring and Control Systems for Measuring Engine Power
Academic Supervisor:	Dr. Tech. Matias Waller
Technical Supervisor:	

Abstract
<p>The subject of this thesis was to make an empirical study about creating a measuring and control system for measuring engine torque and power. Measurements are done by the breaking and lever principle. The aim was to make a system that is simple and easy to use and can be adapted to different braking systems. The main components of the system are a microcontroller, a touch screen and sensors. Desired properties for the system are ease of use, good measuring accuracy, repetitiveness and not too expensive to build.</p> <p>The system was tested on a friction engine brake.</p> <p>The system displayed the relevant information for the user and controlled the brake.</p> <p>The challenges in this project were to get stable measuring data and communication between the microcontroller and the touch screen.</p>

Keywords
Engine dynamometer, Arduino, 4D Systems, Microcontroller, Touchscreen, Load Cell

Serial number:	ISSN:	Language:	Number of pages:
12:2018	1458-1531	Swedish	55 pages

Handed in:	Date of presentation:	Approved on:
07.05.2018	15.05.2018	15.05.2018

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte och frågeställningar	8
1.3 Avgränsningar	8
1.4 Definitioner och förkortningar	9
1.5 Disposition	9
2. TEORETISK REFERENS RAM	10
2.1 Bromsbänk	10
2.1.1 Vattenbromsen	10
2.1.2 Hydrauliska bromsen	11
2.1.3 Magnetiska bromsen	11
2.1.4 Andra typer av bromsar	12
2.2 Mätning	13
2.3 Teoretiska lösningar	15
2.3.1 Viktiga formler	15
2.3.1.1 Beräkning av varvtalet	15
2.3.1.2 Beräkning av effekt	15
2.3.2 Korrigeringsfaktor	15
2.3.3 PID-regulator	16
3. TILLVÄGAGÅNGSSÄTT	18
3.1 Empirisk studie	18
3.2 Val av komponenter	18
3.2.1 Kraftgivaren	18
3.2.2 Hastighetsgivaren	20
3.2.3 Mikrokontrollern	21
3.2.4 Operatörstermialen	22
3.2.5 Val av förstärkning av mätsignalen	24
3.2.6 SD-kortläsare	29
3.2.7 Nätaggregat	30
3.2.8 Spänningsnivåskiftare	31
3.2.9 Övriga komponenter	32
3.3 Testning och utvärdering	33
3.4 Programmering	33
3.4.1 Mjukvaran	34
3.4.1.1 Arduino IDE	34

3.4.1.2 4D Workshop	34
3.4.2 Uppbyggnaden av layouten på skärmen	35
3.4.3 Programmering av Arduino-koden	38
3.5 Sammansättning	40
4. RESULTAT	41
4.1 Funktionstestning	41
4.2 Utvärdering och analysering	46
4.3 Kostnads kalkyl	47
5. VIDAREUTVECKLING	49
5.1 Mätvärden	49
5.2 Användarvänlighet	49
5.3 Förbättringar	49
6. SLUTSATS	52
6.1 Egna reflektioner	52
KÄLLOR	54

BILAGOR

Bilaga 1 - Elschema

Bilaga 2 - Datablad kraftgivare MS-W1

Bilaga 3 - Datablad kraftgivare TAS501

Bilaga 4 - Datablad AD620

Bilaga 5 - Loggad data

FIGURER

Figur 1. Vattenbroms	10
Figur 2. Funktionsprincip för en vattenbroms	11
Figur 3. Virvelströmsbroms	12
Figur 4. Friktionsbromsbänk som jag byggde för att kunna testa systemet.	13
Figur 5. Kraftgivare av S-modell.	19
Figur 6. Hall-givare, Cherry GS100502.	21
Figur 7. Arduino Due mikrokontroller.	22
Figur 8. Arduino Uno mikrokontroller.	22
Figur 9. 4D Systems pekskärm modell gen4-uLCD-70DCT-CLB.	23
Figur 10. Resultat från belastningstestet.	25
Figur 11. Kopplingsschema över parallellkopplade resistorer.	26
Figur 12. Uppkopplingsschema för AD620.	27
Figur 13. Plottad data från kraftgivarsignalen förstärkt med en AD620 instrumentförstärkare.	27
Figur 14. Plottad data av den digitaliskt filtrerade kraftgivarsignalen från ADS1115.	28
Figur 15. SparkFun HX711 24bit AD-omvandlare.	29
Figur 16. 1 kg precisionsvikt för kalibrering av givaren.	29
Figur 17. Plottad data från kraftgivaren.	29
Figur 18. Adafruit microSD kortläsare.	30
Figur 19. Modifierat Corsair VS 350 nätaggregat.	31
Figur 20. Mätning av hallgivarens signal före och efter spänningsnivåskiftaren.	32
Figur 21. Innehållet i kopplingslådan.	33
Figur 22. Användargränssnittet. Flik 1, startflik.	36
Figur 23. Användargränssnittet. Flik 2, sida för bromsning med svepreglering.	37
Figur 24. Användargränssnittet. Flik 3, sida för bromsning med konstant varvtal.	37
Figur 25. Användargränssnittet. Flik 4, sida för inställningar.	38
Figur 26. Utdrag ur koden för att räkna om kg till Newton.	39
Figur 27. Utdrag ur koden för beräkning av varvtalet.	39
Figur 28. Utdrag ur koden som visar implementeringen av filtreringen.	40
Figur 29. Plottad data av regleringen.	45
Figur 30. Plottad data av regleringen med parameterstyrning.	45
Figur 31. Den färdiga enheten.	47
Figur 32. Olinjäriteten i bromssystemet.	50

1. INLEDNING

1.1 Bakgrund

Jag har alltid varit fascinerad av modifikation och höjande av prestandan i förbränningsmotorer. Det har varit min hobby i flera år, med en hel del framgångar inom motorsport. Jag har byggt utombordsmotorer som har bringat in bland annat guld i finska mästerskapet i T400S-klassen och vinster i tävlingar i klasserna Sport 25 och Bruksbåtar 25. Under arbetet med att höja prestandan i motorer har jag hittills fått förlita mig på känsla, tidtagning och hastighetsmätning för att avgöra om resultatet har blivit enligt förväntningarna och därmed har jag en längre tid saknat en mera exakt mätutrustning för att kunna utvärdera resultatet på ett vetenskapligt sätt. Nu i och med denna utbildning har jag fått kunskapen att utveckla och bygga en passande mätutrustning. Kunskapen samt de olika delmomenten i projektet var orsaken till att jag ansåg att utvecklande och byggandet av ifrågavarande mätsystem var ett passande examensarbete.

Utvecklandet och byggandet av ett pålitligt mät- och reglersystem kräver många olika kunskaper. Därmed är arbetet med att utveckla detta system berikande i och med att kunskaper som jag lärt mig i denna utbildning kan utnyttjas i praktiken och utvecklas till att bättre kunna användas i arbetslivet och i fortsatta projekt när prototyper skall byggas.

Systemet bör vara uppbyggt så att det skall vara smidigt att använda, innehålla komponenter som är av bra kvalité och stabilitet samt att systemet skall kunna, med endast små modifieringar och anpassade inställningar, gå att använda på flera olika bromsarbänkar. Systemet skall med hjälp av en kraftsensor och hastighetsensor mäta kraften samt varvtalet och med denna information beräkna vridmomentet och effekten. Dessa komponenters signaler skall behandlas av en mikrokontroller som programmeras för att kunna beräkna effekten samt skicka informationen till en pekskärm där mätresultatet skall visas.

1.2 Syfte och frågeställningar

Syftet med utvecklandet och byggandet av systemet var att på ett förmånligt sätt kunna framställa en produkt som är pålitlig och användbar. Idén med uppbyggnaden av systemet var att komponenterna skall vara av hög kvalitet samt förmånliga och driftsäkra. Det kommer även att läggas vikt på att systemet i slutändan skall vara enkelt uppbyggt för att eliminera risken för fel som bidrar till driftstörningar.

De konkreta problemen som jag var tvungen att lösas var:

- Val av komponenter
- Hur signalerna skall behandlas för att få ut pålitliga mätresultat
- Programmera mikrokontrollern samt skärmen och kommunikationen mellan dessa
- Utveckla reglering av bromsstyrkan
- Sammanställa komponenterna i en användarvänlig förpackning
- Filtrering av mätdata för att få fram ett tydligt mätresultat
- Utvärdera om det var ekonomiskt lönsamt att bygga ett eget system

1.3 Avgränsningar

Arbetets omfattning berör endast det el- och automationstekniska arbetet för att få fram ett mät- och reglersystem som behövs för att kunna visa resultat av olika motorers vridmoment och effekt. Komponenterna i systemet kommer att begränsas till produkter som finns på den fria marknaden och har tillfredsställande kvalitet men som ändå är förmånliga. Själva bromsens tillverkning och byggnation kommer inte att tas upp utöver att teorin bakom funktionen kommer att presenteras.

1.4 Definitioner och förkortningar

- AD-omvandlare: En omvandlare som ändrar en analog signal till digitalisk data.
- RPM: Revolutions per minut, varv per minut.
- GPIO: General-purpose input/output, portar i en mikrokontroller som kan programmeras till att vara en in- eller utport.
- PWM: Pulse width modulation, pulsbreddsmodulering, vilket betyder att man varierar bredden på en högfrekvent fyrkantssvåg för att digitalt åstadkomma en variabel effektmatning. (Barr, 2001)
- Slider: En funktion i ett gränssnitt som fungerar som en glidväljare där ett värde kan väljas med att dra fingret längs med ett område på skärmen.
- Serial monitor: En funktion i Arduinos mjukvara där man direkt kan läsa av värden från mikrokontrollern och visa dem på datorn.
- Integer: Variabeltyp som består av en byte och kan innehålla heltal upp till 65535.
- Double: Variabeltyp som består av fyra byte och kan vara från $-3,4028253 \cdot 10^{38}$ till $3,4028253 \cdot 10^{38}$.
- Type casting: Används till att byta en variabels typ, t.ex. double till integer.
- Parameterstyrning: Kan användas till att reglera olinjära processer för att kunna ha olika inställningar på PID-regulatorn beroende på en parameters värde.

1.5 Disposition

Uppsatsen börjar med att presentera teorin bakom mätningen av vridmoment samt vad som behövs för att få fram effekten. Därefter kommer komponenterna att presenteras och förklaras, även mjukvaran som behövs för att kunna programmera mikrokontrollern samt skärmen kommer till viss del presenteras. Arbetets gång med problem och framgångar kommer att presenteras. Mätresultat vid utvärderingen av komponenterna kommer också att framföras. De programmerade koderna kommer inte att framföras i sin helhet, men de matematiska lösningarna kommer att presenteras.

2. TEORETISK REFERENSRAM

2.1 Bromsbänk

En bromsbänk är en utrustning som används för att statiskt belasta den motor man vill mäta vridmomentet och effekten av. Man bromsar motorns rotationskraft för att kunna mäta motorns momentkraft med en hävarm. Energin som motorn levererar och som man bromsar bort blir till värmeenergi.

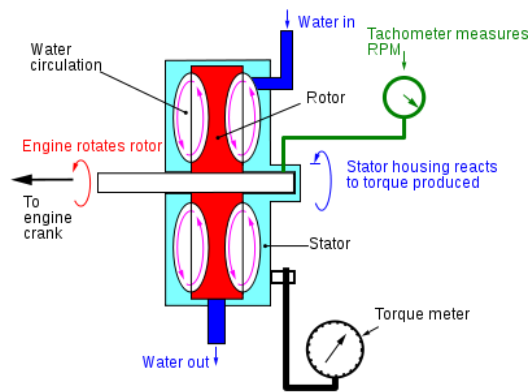
2.1.1 Vattenbromsen

Det finns olika varianter av bromsar, en vanlig variant är vattenbromsen. Hur en vattenbroms ser ut kan ses i Figur 1. Dess funktionsprincip bygger på att man leder in vatten i en ineffektiv vattenpump. Vattnet inne i pumpen bildar ett hydrauliskt motstånd. Ju högre vattennivån är inne i pumphuset desto större är rotationsmotståndet. På det viset kan motståndet i bromsen regleras. Energin som motorn levererar värmer vattnet så därför måste vattnet hela tiden cirkulera via en kylare. Funktionsprincipen kan ses i Figur 2.

(“Dynamometer,” 2018)



Figur 1. Vattenbroms (“Water Brake Engine Dyno,” 2017)



Figur 2. Funktionsprincip för en vattenbroms. ("Dynamometer," 2018)

2.1.2 Hydrauliska bromsen

En annan vanlig bromsvariant är den hydrauliska. Den bygger på att man har en hydraulpump som pumpar hydraulolja. Sedan reglerar man flödet genom pumpen. Ju mera man stryper desto större motstånd blir det för motorn att vrida runt pumpen. Sedan beräknar man effekten genom att veta pumpens flödesspecifikationer samt att man mäter hydraultrycket och varvtalet. Denna broms bygger alltså inte på hävarmsprincipen utan mätning av hydraultrycket. Även här överförs rotationsenergin till värme så oljan måste kylas i en kylare för att inte bli för het. ("Dynamometer," 2018)

2.1.3 Magnetiska bromsen

En broms som har blivit allt vanligare på senare tid är den magnetiska bromsen. Se Figur 3. Den bromsar med så kallade virvelströmmar i enlighet med Faradays lag. Bromsen är uppbyggd så att man har två metallskivor som roterar av motorns rotationskraft och mellan skivorna har man placerat elektromagneter hela varvet runt. När magnetismen ökas vill magneterna rotera med skivan och då bildas ett vridmoment. Elektromagneternas magnetism regleras med strömmen som går genom dem. Denna reglering görs oftast av en mikroprocessor. Det fina med denna broms är att det inte bildas friktionsvärme av bromsningen eftersom inga bromsande delar rör varandra mekaniskt eller hydrauliskt. Tack vare denna fördel minskas värmeutvecklingen från bromsen. Även här blir rotationsenergin till värme, men här räcker det ofta med luftkyllning för att hålla temperaturerna på en rimlig nivå. ("Dynamometer," 2018)

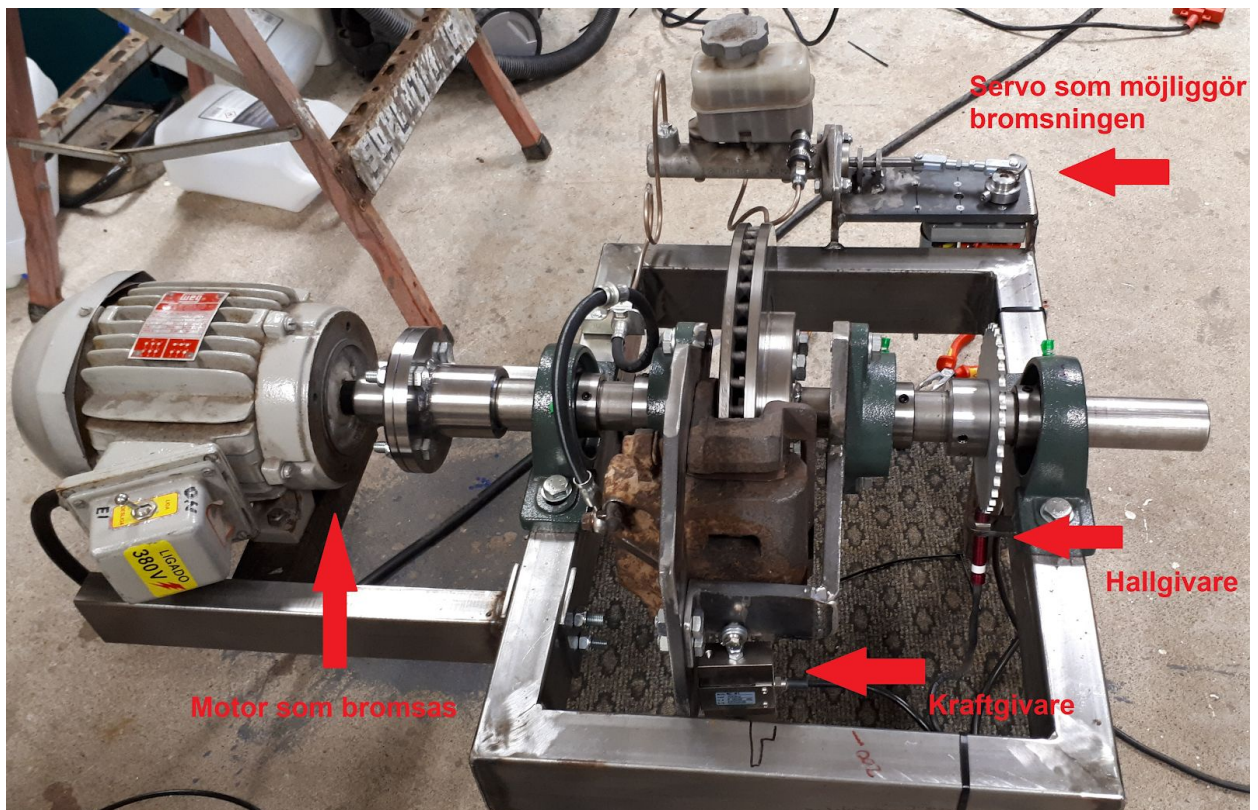


Figur 3. Virvelströmsbroms ("Eddy Current retarder," 2018)

2.1.4 Andra typer av bromsar

Andra typer av bromsar är t.ex. generatorer, samt vanliga friktionsbromsar. Fördelen med en generator som broms är att energin som tas från motorn kan omvandlas till elenergi som sedan kan användas precis som vanlig el. Alltså energin kan tas till vara. Nackdelen med denna modell är att själva generatormotorn ofta blir fysiskt mycket stor om man vill bromsa stora effekter. Denna effektmättningsmetod används när stora industri- och fartygsmotorer skall testas. ("Dynamometer," 2018)

Friktionsbromsen har den stora nackdelen att den snabbt blir otroligt het eftersom det är svårt att leda bort värmen på något annat sätt än med luftkyllning. Men denna bromsmetod fungerar ändå bra så länge som man håller sig till små effekter och korta broms-sessioner. För att testa konceptet av mät- och reglerutrustningen som detta examensarbete handlar om, har jag byggt en egen enkel friktionsbroms. Den kan ses i Figur 4. Orsaken till valet av denna modell av broms var att den var enkel och billig att bygga hemma i garaget.



Figur 4. Friktionsbromsbänk som jag byggde för att kunna testa systemet.

2.2 Mätning

Som jag redan tidigare har nämnt så mäter man vridmomentet i de vanligaste bromsarna enligt hävstångsprincipen. Eftersom själva bromsen vill rotera med motorns rotationskraft vid bromsning så kommer det att uppstå ett vridmoment. Överför man vridmomentet till en hävarm så kan man mäta vridmomentet med en kraftgivare. Kraft är inom fysiken ändringen av en kropps rörelsemängd i en viss riktning kgm/s^2 med SI-enheten Newton [N].

Vridmomentet är kraften som vrider ett objekt kring en viss axel. SI-enheten för vridmoment är Newtonmeter [Nm] alltså med hur många Newtons kraft ett föremål vrids runt axeln vid ett avstånd av en meter. Vill man mäta en motors vridmoment och räkna ut effekten placerar man en kraftgivare, antingen mekanisk eller elektronisk, på hävarmen. (“Dynamometer,” 2018)

Vet man avståndet från hävarmens ledade punkt till givaren kan man räkna ut vridmomentet enligt (Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S. Öistämö, J., 2002):

$$\tau = r * F$$

- τ är vridmomentet i Newtonmeter [Nm]
- r är avståndet i meter från centrumpunkten [m]
- F är kraften i Newton [N]

Kraftgivaren som kommer att användas för denna mätutrustning är en elektronisk töjningsgivare. Mera om denna givare i ett senare kapitel.

Effekt är arbete per tidsenhet alltså kraft gånger hastighet, enligt (Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S. Öistämö, J., 2002):

$$P = \tau * \omega$$

- P är effekten i kiloWatt [kW]
- τ är vridmomentet i Newtonmeter [Nm]
- ω är vinkelhastigheten [rad/s]

Vinkelhastigheten kallas vardagligt för varvtal eller varv per minut. Alltså betyder detta att för att få fram effekten behöver man veta vridmomentet och varvtalet. Med dessa två mätvärden kan man beräkna effekten. Varvtalet kommer att mätas med en hallgivare som känner av hur många tänder på ett tandat hjul, till exempel kugghjul, som sveper förbi under ett visst tidsintervall. Mera om denna givare i ett senare kapitel.

2.3 Teoretiska lösningar

2.3.1 Viktiga formler

De viktigaste formlerna för teorin bakom denna mät- och reglerutrustning är beräkning av varvtal och effekt.

2.3.1.1 Beräkning av varvtalet

$$\omega = 1 \frac{rad}{s} = \frac{60}{2\pi} rpm \quad RPM = \frac{C * \frac{1000}{t_s} * 60}{S}$$

- C är kuggar räknade under samplingstiden
- t_s är samplingstiden i [ms]
- S är totala antalet kuggar på triggerhjulet

2.3.1.2 Beräkning av effekt

$$P = \tau * \omega$$

- P är effekt [kW]
- τ är vridmomentet [Nm]
- ω är vinkelhastigheten [rad/s]

Kilowatt omvandlas till hästkrafter (DIN) enligt:

$$1 kW = 1,3596 hk$$

2.3.2 Korrigeringsfaktor

Eftersom lufttryck och temperatur påverkar en förbränningsmotors prestanda måste en korrigeringsfaktor användas för att kunna jämföra mätresultat mellan olika tidpunkter. Om en motor testas en dag så skall samma motor visa samma resultat en annan dag vid ett annat väderförhållande med annan temperatur och annat lufttryck.

För att denna korrigeringsfaktor skall vara jämförbar så finns det några olika normer för att beräkna korrigeringsfaktorn. (Sodré & Soares, 2003)

De vanligaste är:

- DIN 70020, Deutsches Institut für Normung, Tyska industri normen
- SAE J1349 eller J1995, Society of Automotive Engineers, Amerikanska standarden
- ISO 1585, International Organization for Standardization, Internationella standarden
- JIS D 1001, Japanese Industrial Standard, Japanska industri standarden

Jag valde att använda DIN 70020 som korrigeringsfaktor. Korrigeringsfaktorformeln för DIN 70020 är

$$k = \frac{1013}{atmp} * \sqrt{\frac{(273+airt)}{293}}$$

- k är korrigeringsfaktorn
- $atmp$ är atmosfärstrycket i millibar [mbar]
- $airt$ är omgivningstemperaturen i grader Celsius [°C]

2.3.3 PID-regulator

För att kunna reglera bromsen så att den bromsar motorn till ett konstant varvtal så valde jag att använda en PID-regulator. PID-regulatorn bygger på att man matematiskt beräknar en styrsignal så att systemet kan hålla ett börvärde. Återkopplingen från ärvärdet gör det möjligt att beräkna felet och därmed hurdan styrsignal som behövs för att korrigera felet mellan börvärdet och ärvärdet.

Det finns olika former för PID-regulatorer och jag valde att använda hastighetsformen ("PID Controller," 2018):

$$u(t_k) = u(t_{k-1}) + K_p \left(\left(1 + \frac{\Delta t}{T_i} + \frac{T_d}{\Delta t} \right) e(t_k) + \left(-1 - \frac{2T_d}{\Delta t} \right) e(t_{k-1}) + \frac{T_d}{\Delta t} e(t_{k-2}) \right)$$

- u är styrsignalen
- K_p är proportionella förstärkningen
- e är reglerfelet, skillnaden mellan börvärdet och ärvärdet
- K_i är integrerande verkan
- K_d är deriverande verkan
- T_i är K_p/K_i
- T_d är K_d/K_p
- Δt är samplingsperioden

3. TILLVÄGAGÅNGSSÄTT

3.1 Empirisk studie

Eftersom examensarbetet bygger på att utveckla ett mät- och reglersystem som lätt går att anpassa till olika bromsar, var ett av utvecklingsproblemen att komma på hur systemet skulle bli så smidigt som möjligt. Systemet fick inte bli för klen och ha för många lösa delar som blir svåra och jobbiga att flytta mellan olika bromsbänkar. Att koppla givare och olika styrkomponenter skall vara enkelt. Dessa skall lätt kunna kopplas till kontrollenheten så att den lästa datan kan visas på operatörsterminalen. Styrningen av bromsens bromskraft skall lätt kunna kopplas till enheten och med mindre ändringar i inställningarna kunna styra olika bromsar. Dessa olika problem krävde en hel del undersökning och problemlösning bland annat att hitta passande komponenter och en smidig sammansättning av dessa, samt att montera dessa i en robust förpackning som till slut blir en smidig enhet.

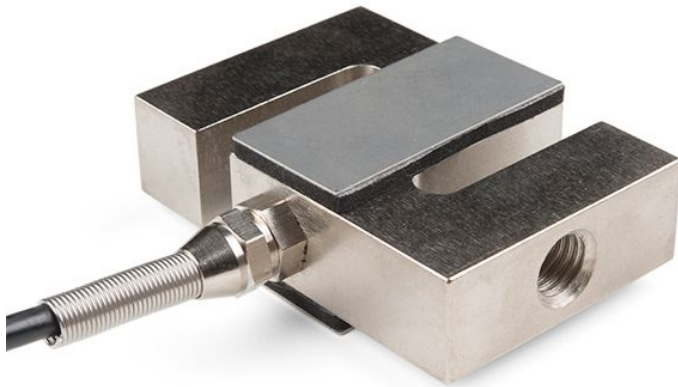
3.2 Val av komponenter

Vid val av komponenter var det några aspekter som var betydande. Dessa var att komponenterna skulle vara förmånliga men ändå av tillförlitlig kvalitet, lätta att få tag på, delar som kan kommunicera med varandra samt att det programmeringsmässigt inte skulle vara för krävande.

3.2.1 Kraftgivaren

Vid val av kraftgivare ville jag redan från början ha en givare som klarade så stor belastning som möjligt men ändå klarade av att känna av små kraftförändringar. Efter en del kartläggning kom jag fram till att en lämplig modell skulle vara en så kallad S-formad tøjningsgivare för att den modellen har bra uppbyggnad för fastsättning. Se Figur 5. Dessa finns i maxbelastningar från 100 Nm till så mycket som 98 kNm ("Industrial Electronic Load Cells - Celmi Load Control Solutions," 2018). Här är det till stor grad ekonomin samt

användningsområdet som avgör hur kraftig givare man behöver. Vid mätning av vridmoment så är det motorns största vridmoment som avgör hur mycket kraft givaren måste hålla. Man måste även ha koll på hur långt från axelns centrumpunkt som givaren är placerad och om motorn är kopplad direkt till bromsen eller om den har en växellåda som växlar ner varvtalet och därmed växlar upp vridmomentet. Ju närmare mot centrum som givaren flyttas desto större blir kraften på givaren (hävstångsprincipen). ("Lever," 2018)



Figur 5. Kraftgivare av S-modell. ("Load Cell 200kg," 2018)

Det visade sig att givare i klassen 200 kg (1961 Nm) var relativt vanliga och lätta att få tag på. Med denna givare och min testbänk skulle jag kunna bromsa direktkopplade motorer med ett största vridmoment på $200\text{kg} * 9,80665\frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0,2\text{m} = 392,3\text{Nm}$ alltså ungefär 390 Nm. Jag ansåg denna max belastning var helt tillräcklig för denna testbänk och för att kunna utveckla ett mät- och reglersystem. Jag beställde en 200 kg kraftgivare som var tillverkad av Hang Zhou South-Ocean Sensors, modell MS-W1, Bilaga 2. Jag märkte senare att det var bra att ha en till givare vid problemlösning och testning så jag beställde en tillverkad av HTC-Sensors CO. LTD modell TAS501, Bilaga 3.

Dessa givare bygger på att inne i en S-formad legerad stålbit finns det fyra stycken töjningsgivare där resistansen ändras vid töjning. Dessa givare är mycket känsliga och är

kopplade i en Wheatstone-brygga så att man noggrant kan bestämma förändringarna i resistansen. Genom att mata bryggan med en stadig spänning kan man mäta spänningsvariationerna tack vare att det blir en spänningsdelning inne i bryggan. Denna spänningsvariation uppkommer när resistansen förändras vid töjning. (Bengtsson, 2003)

Eftersom denna spänning är mycket liten behövs en mycket noggrann mätutrustning för att kunna avläsa de små spänningsvariationerna. Mera om denna utrustning senare.

När bryggan är i balans kommer spänningen att vara 0 V. Om sensorn belastas stiger spänningen, belastas sensorn i motsatt riktning kommer spänningen att sjunka och bli negativ.

3.2.2 Hastighetsgivaren

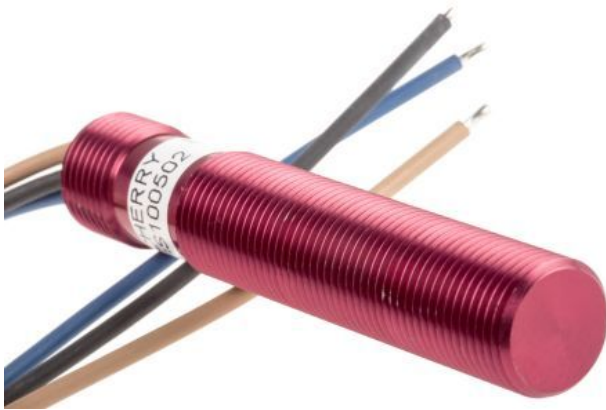
För att kunna räkna ut effekten behöver man veta vinkelhastigheten eller som det vardagligt kallas, varvtal per minut. Det finns några olika sätt att mäta varvtalet. Ett är att man har en givare som känner av när tänder på ett hjul, som är monterat på axeln far förbi och sedan räknar man tänderna och jämför med tiden som det tog att räkna dessa tänder. Ett annat sätt är att man har en generator kopplad till bromsens axel som ger ut en viss spänning beroende på hur snabbt den snurrar och sedan med att mäta spänning får man ut varvtalet. Ett tredje sätt är att man tar varvtalet direkt från motorn, antingen från motorns styrsystem eller sen från en av tändspolarna.

För denna applikation kom jag fram till att lämpligaste sättet att mäta varvtalet var med ett tandat hjul och en hallgivare. Jag valde denna lösning för att det är relativt lätt att koppla den till mikroprocessorn samt att skriva koden för att räkna varvtalet. Jag valde att göra det tandade hjulet av ett 36-kuggars kedjedrev för en moped och sedan svarvade jag ner en bit av kuggarna för att få en skarp kant för hallgivaren att känna av.

En hallgivare fungerar som om en brytare skulle bryta av och på vid varje tand och ger ut en binär fyrkantssignal där frekvensen motsvarar varvtalet. Inne i givaren finns en permanent magnet och ett hallelement. När ett ferromagnetiskt material kommer framför givaren kommer magnetismen genom hallelementet att göra så att det slutar leda och därmed kommer

matningsspänningen att brytas som sedan kan detekteras av mikroprocessorn som en fyrkantsvåg. ("Hall effect sensor," 2018)

För det här projektet skulle jag egentligen ha kunnat välja nästan vilken som helst hallgivare men jag valde att använda en Cherry GS100502 för att den är en universell givare för mätning av varvtal eller position. Den är även förmånlig samt byggd så att den är lätt att montera, tack vare att den har formatet av en gängstång, se Figur 6.



Figur 6. Hall-givare, Cherry GS100502. ("Cherry GS100502 Hall Effect Sensor," 2018)

3.2.3 Mikrokontrollern

För denna mät- och reglerutrustning var mikrokontrollern själva hjärnan. Mikrokontroller är en en-chipsdator som används till att ta in information från givare, sensorer eller andra mikrokontrollers. Sedan kan den behandla informationen och styra portar som i sin tur kan styra extern hårdvara som till exempel motorer, solenoider, lampor och reläer.

Mikrokontrollern kan även skicka informationen vidare till andra mikrokontrollers, datorer eller displayer för att visuellt kunna presentera informationen.

Jag valde att använda en Arduino Due, se Figur 7. Orsaken till varför jag valde en mikrokontroller från Arduino är att jag tidigare har gjort projekt med Arduinos Uno, Figur 8, som är en enklare mikrokontroller med en 8-bit, 16 MHz ATmega328P processor med 32 KB flashminne och 2 KB SRAM, ("Arduino Uno R3," 2018) medan Duen har betydligt bättre prestanda med en 32-bit 84 MHz AT91SAM3X8E processor med 512 KB flashminne och 96 KB SRAM. ("Arduino Due," 2018) Så jag valde denna mikrokontroller för att den hade

betydligt mycket bättre prestanda men ändå i princip var lika enkel att programmera. Enda nackdelen med Duen är att GPIO-pinnarna endast är 3,3 V kompatibla medan de på Unon är 5,0 V kompatibla. Problemet med endast 3,3 V kompatibla portar är att man inte direkt kan koppla extern hårdvara som fungerar med 5,0 V. Jag tänkte först att det här kommer att bli ett problem, men ganska snabbt efter att jag kom fram till vilka andra komponenter jag skulle använda, märkte jag att det här inte kommer att vara ett problem eftersom det var möjligt att få alla komponenter att kommunicera med 3,3 V spänning.

En annan orsak varför jag valde att använda Arduinos produkter är att jag hade tidigare erfarenhet av att programmera dessa mikrokontroller samt att det finns otroligt mycket information att tillgå från Arduinos manualer och hjälp från internetforum, även om hjälpen som finns på forumen inte alltid är korrekt och skall tas med en nypa salt. (“Arduino Reference,” 2018) Mera om programmeringen i ett senare kapitel.



Figur 7. Arduino Due mikrokontroller
(“Arduino Due,” 2018)



Figur 8. Arduino Uno mikrokontroller
(“Arduino Uno R3,” 2018)

3.2.4 Operatörsterminalen

Operatörsterminalen är den delen av utrustningen där människan kan kommunicera med maskinen. Eftersom jag redan från början ville ha en enhet som var kompakt och innehöll alla delar i samma paket var det klart att utrustningen skulle ha en pekskärm för att visualisera mätningarna och via den skulle man även kunna göra nödvändiga inställningar samt start av bromsningssekvenser.

Jag funderade länge på olika varianter och kom snabbt fram till att det minst behövde vara en 7” stor skärm. Jag kom även fram till att om skärmen har en egen processor så behöver inte mikrokontrollerns processor jobba med det visuella och därmed spara kapacitet för databehandling och beräkningar.

Efter lite kartläggande kom jag fram till att en 7” kapacitiv pekskärm från 4D Systems modell gen4-uLCD-70DCT-CLB var ett bra alternativ, Figur 9. Den har en egen Diablo16 16-bit processor som tar hand kommunikationen mellan Duen och skärmen samt sköter det visuella. En annan orsak till att jag valden en pekskärm från 4D Systems var att deras visuella utvecklingsplattform var smidig att jobba med och där var det relativt enkelt att designa en snygg layout. Även att det fanns bra manualer för att använda Arduinon tillsammans med denna pekskärm var en stor fördel. (“4D Systems Appnotes,” 2018)



Figur 9. 4D Systems pekskärm modell gen4-uLCD-70DCT-CLB (“4D Systems, gen4-uLCD-70DCT-CLB,” 2018)

3.2.5 Val av förstärkning av mätsignalen

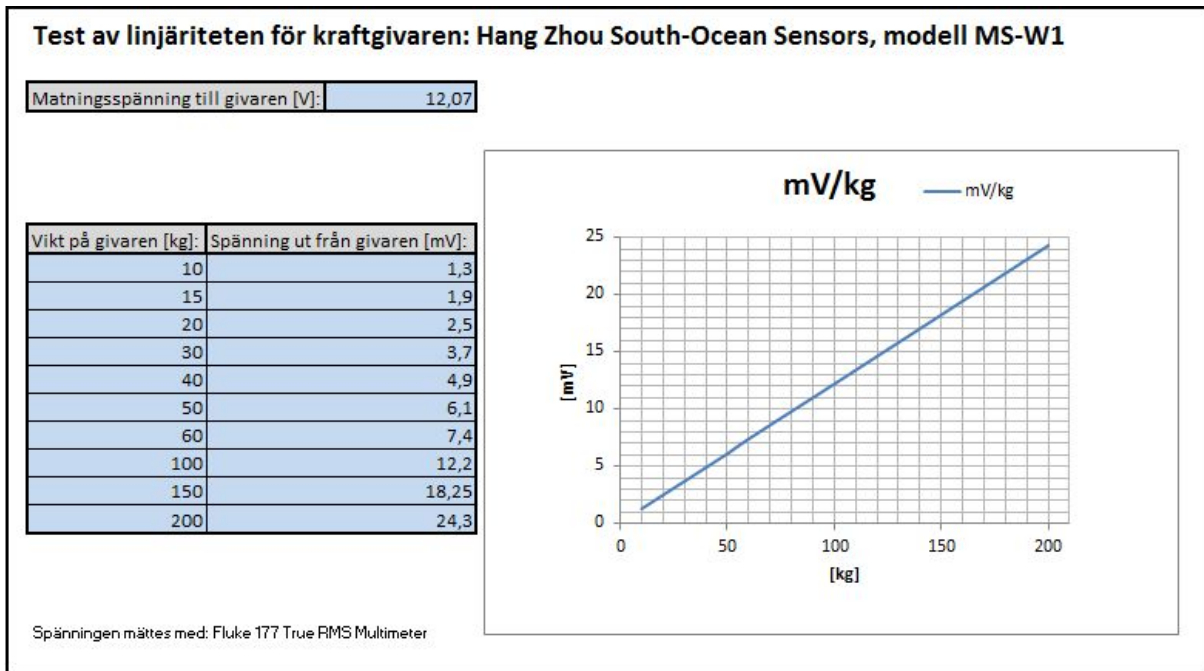
Vid användning av sensorer som bygger på Wheatstone-bryggor är det väsentligt att använda mycket känsliga komponenter för att kunna detektera de små spänningsvariationerna i spänningsdelaren i bryggan. Om denna spänning skall kunna tas in till mikrokontrollern behöver man antingen förstärka spänningen eller ha en AD-omvandlare med hög upplösning. Duen har en inbyggd AD-omvandlare som har en 12-bit upplösning ("Arduino Due," 2018). Det betyder att insignalen kan delas i $2^{12} = 4096$ delar, som betyder att om insignalen förstärks till max 3,3 V som Duens analoga in port klarar av så skulle noggrannheten bli $1962Nm/4096 = 0,479Nm$. Alltså i praktiken en noggrannhet på ungefär en halv Nm. Jag ansåg att det här inte var tillräckligt för att få användbara mätresultat, utan jag ansåg att en noggrannhet på 0,1 Nm skulle vara bättre. Problemet ledde till att jag behövde en AD-omvandlare med större upplösning. Efter lite kartläggning hittade jag en förmånlig 16-bit AD-omvandlare av Adafruit, modell ADS1115. Med 16-bits upplösning skulle jag få en noggrannhet på

$$2^{16} = 65536$$

$$\frac{1961Nm}{65536} = 0,02993Nm$$

alltså ungefär 0,03 Nm. Det var mer än tillräckligt.

Jag gjorde ett belastnings- och linjäritetstest av kraftgivaren för att få fram om belastning från 0 kg till 200 kg gav ut en linjär spänning. Med testet ville jag även testa vad utspänningen blir med en 12 V inspänning. Se Figur 10.



Figur 10. Resultat från belastningstestet.

Jag kom fram till att givarens linjäritet visade sig stämma enligt databladet och att utspänningen var 0,1238 mV per kg belastning med en maximal utspänning på 24,3 mV vid 200 kg belastning.

För att få 24,3 mV spänningen förstärkt till 3,3 V krävdes en förstärkare. Efter lite utredning kom jag fram till att en så kallad instrumentförstärkare skulle vara det bästa alternativet. En instrumentförstärkare har den fördelen att den inte belastar givaren tack vare dess uppbyggnad med tre stycken transistorer och har även litet brus och hög undertryckning av likfasiga signaler (CMRR) (“AD8221 precision instrumentation amplifier,” 2007). Efter en hel del sökande och läsande av manualer kom jag fram till att en AD620 eller AD8221 skulle vara ett bra alternativ. Problemet med AD8221 var att den bara fanns i formaten MSOP eller SOIC-N. Dessa fysiska format är menade att monteras av en robot på ett kretskort och är mycket små (“AD8221 precision instrumentation amplifier,” 2007) och därmed jobbiga att arbeta med vid prototypstestande. Därför valde jag att börja med att testa AD620:an.

Jag läste i manualen, Bilaga 4, hur förstärkaren skulle kopplas, se Figur 12, vid användning av sensorer som är kopplade i en Wheatstonebrygga och räknade ut förstärkningen till

$$\frac{3,3V}{0,0243V} = 135,8$$

Därför valde jag förstärkningen 135 för att undvika att spänningen skulle stiga över 3,3 V.

För att få en förstärkning av 135 använde jag formeln

$$R_g = \frac{49,4k\Omega}{(G-1)}$$

- R_g är totala resistansen som kopplas mellan pin 1 och 8, i Ω
- G är den önskade förstärkningen

Den beräknade resistansen blev,

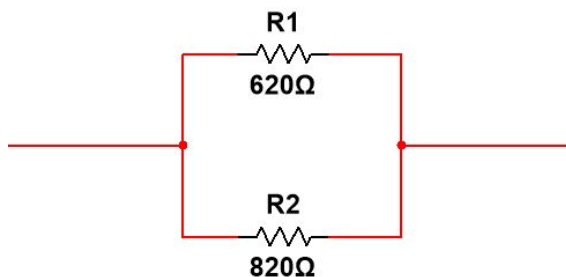
$$\frac{49400\Omega}{(135-1)} = 368,657\Omega$$

Eftersom det inte finns motstånd i precis alla ohmvärden så var jag tvungen att välja det närmast möjliga. Så jag valde att parallellkoppla ett 680 Ω och ett 820 Ω motstånd. Med dessa blev den totala resistansen

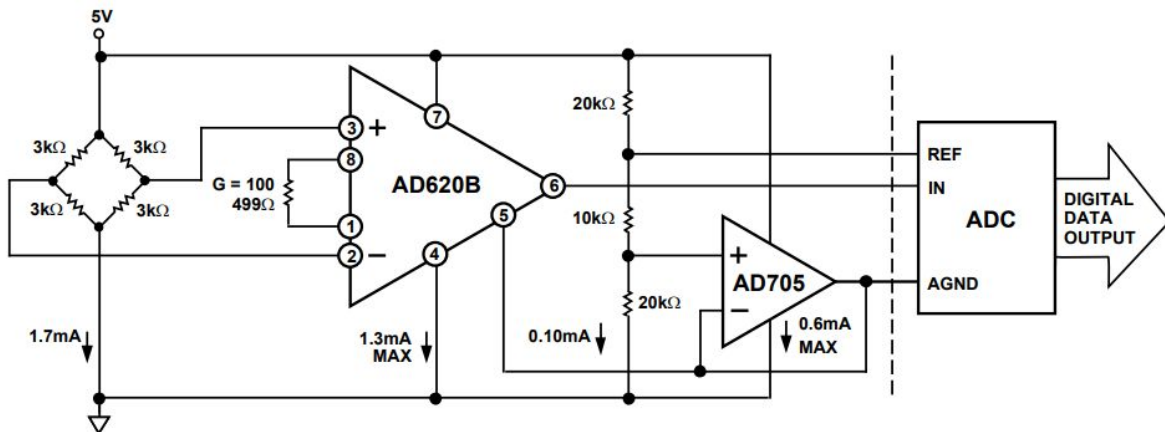
$$\frac{(620\Omega * 820\Omega)}{(620\Omega + 820\Omega)} = 371,7\Omega$$

Jag kopplade upp kretsen enligt Figur 11. Med denna resistans blev den slutliga förstärkningen

$$\frac{49400\Omega}{371,7\Omega} + 1 = 133,9$$

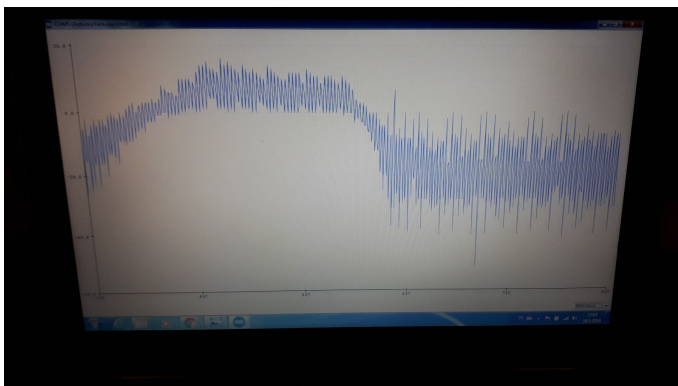


Figur 11. Kopplingsschema över parallellkopplade resistorer.



Figur 12. Uppkopplingschema för AD620. (Analog Devices, 2003)

Jag märkte snabbt att vid förstärkande av små signaler förstärks även alla störningar som finns på insignalen till bryggan. Det här ledde till att mätvärdet som jag fick in till mikrokontrollern via AD-omvandlaren var otroligt brusigt, se Figur 13.

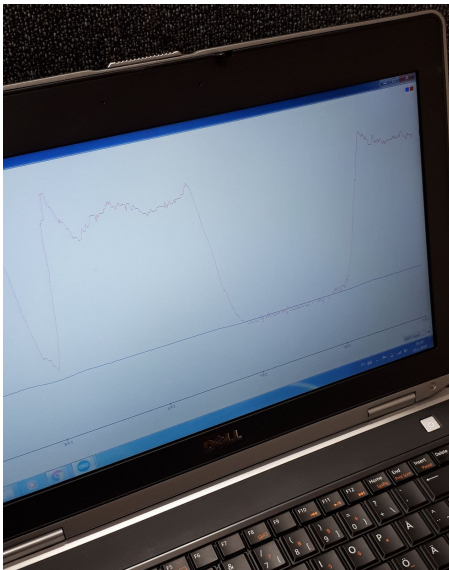


Figur 13. Plottad data från kraftgivarsignalen förstärkt med en AD620 instrumentförstärkare.

Jag utredde saken och även om spänningskällan som jag använde redan hade en filtrerad spänning kom jag fram till att jag måste filtrera matningsspänningen till bryggan med ett lågpasfilter. Jag utvärderade några olika versioner men ingen av dem hade tillräckligt bra inverkan.

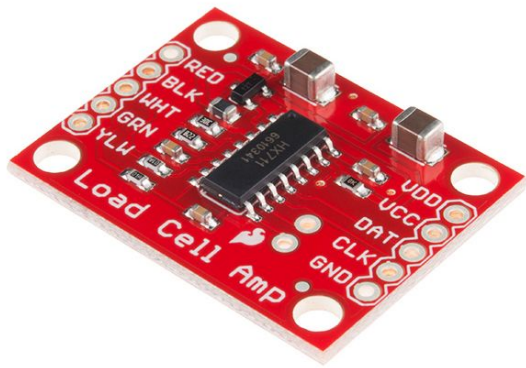
Då började jag fundera på att vad om jag skulle förstärka och filtrera signalen digitalt. Jag testade att läsa av utsignalen från bryggan direkt med AD-omvandlaren. Med denna

kopplingsmetod fick jag redan en mycket stabilare signal. Nu visade det sig att upplösningen på AD-omvandlaren var för liten. När jag digitalt förstärkte signalen förstärkte jag även här insignalens variationer och därmed tappade jag i noggrannhet, se Figur 14.



Figur 14. Plottad data av den digitaliskt filtrerade kraftgivarsignalen från ADS1115.

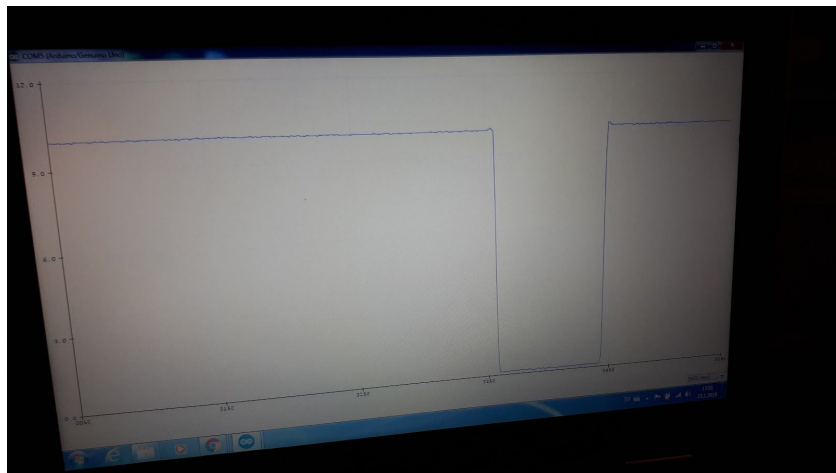
I och med det här problemet började jag undersöka om det fanns en AD-omvandlare med ännu bättre upplösning. Jag undersökte även möjligheten om att det skulle finnas en färdig lösning för avläsning och förstärkning av signaler från en kraftgivare. Efter en del sökande på internet hittade jag en HX711 integrerad krets med en 24-bits AD-omvandlare. SparkFun Electronics levererar ett färdigt kretskort med denna komponent så jag beställde ett sådant. Se Figur 15. Tack vare att det finns ett bibliotek samt exempel för att kunna få in mätvärdet från HX711 till mikrokontrollern var det relativt enkelt att testa noggrannheten av mätvärdet. Efter att jag hade kopplat upp kretsen och bränt in koden för exemplet och kalibrerat in givaren med en 1 kg precisionsvikt kunde jag testa noggrannheten. Se Figur 16. Det visade sig att noggrannheten var ± 2 gram vilket betyder en noggrannhet av ungefär $\pm 0,02$ Nm och dessutom näst intill inga variationer i signalen. Jag var mycket nöjd med ett så här stabilt mätvärde, se Figur 17.



Figur 15. SparkFun HX711 24bit AD-omvandlare. ("SparkFun Load Cell Amplifier," 2018)



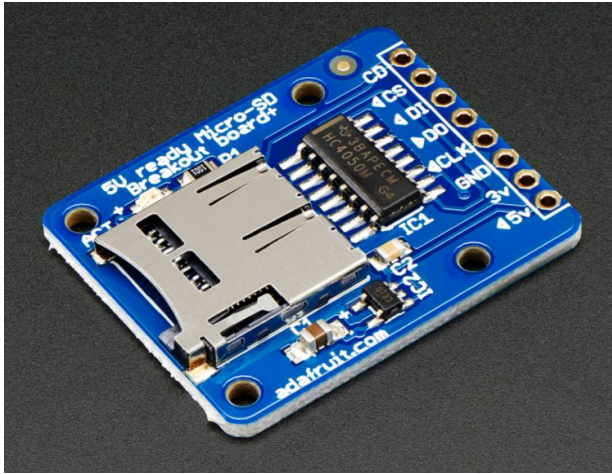
Figur 16. 1 kg precisions vikt för kalibrering av givaren.



Figur 17. Plottad data från kraftgivaren

3.2.6 SD-kortläsare

Jag ville att det skulle vara möjligt att logga datan från mätningarna, alltså varvtalet, vridmomentet och effekten, för att kunna flytta över informationen till en dator och där kunna analysera den närmare. För att kunna spara denna information var ett av alternativen att spara informationen på ett minneskort som sedan kan flyttas till en dator. Jag valde att använda Adafruit's MicroSD-kortläsare. Se Figur 18. Den kan skriva och läsa från microSD-kort och har ett bibliotek för Arduino samt en hel del exempel så att själva programmerandet inte skulle bli alltför krävande.



Figur 18. Adafruit microSD kortläsare. ("MicroSD card breakout board+," 2018)

3.2.7 Nätaggregat

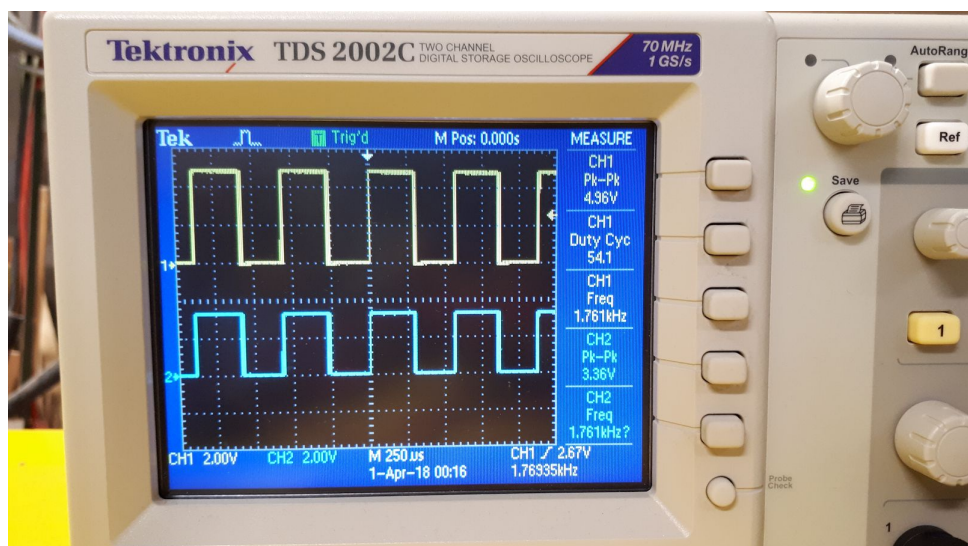
I en mätutrustning som denna vill jag ha så stabil spänningsmätning som möjligt samt en strömkälla som kan leverera relativ höga strömmar för att kunna leverera ström till extern hårdvara för reglering av bromsen. Dessutom behövde jag både 12 V och 5 V matning. Efter lite funderande kom jag på att nätaggregaten i datorer har alla egenskaper jag behövde. Denna klarar av att leverera stora strömmar vid både 12 V och 5 V matning. Eftersom den skall leverera ström till datorelektronik är strömmen och spänningen filtrerad för minimalt brus. Så jag skaffade en Corsair VS 350. Se Figur 19. Jag öppnade upp den och kapade bort original-kabelhärvan och lödde dit en 3-polig 1,5 mm² kabel, jord, 12 V och 5 V. Arduinon samt matningen till bromsens servo behöver 12 V:s spänning, och matningen till pekskärmen och kraftgivaren behöver 5 V:s spänning.



Figur 19. Modifierat Corsair VS 350 nättaggregat.

3.2.8 Spänningsnivåskiftare

Eftersom Duens pinnar endast klarar av 3,3 V och hallgivarens minsta spänning enligt databladet skulle behöva vara 4,5 V så var jag tvungen att använda en spänningsnivåskiftare som tar ner 5 V-signalen från hallgivaren till 3,3 V. Jag valde att använda Adafruits Bi Directional Level Shifter BSS138. Denna lilla komponent är till för att konvertera signaler från en hög till en låg eller låg till en hög signal. Just denna komponent är speciellt gjord för applikationer där pull-up resistorer används. Den visade sig fungera bra och resultatet kan ses i Figur 20.

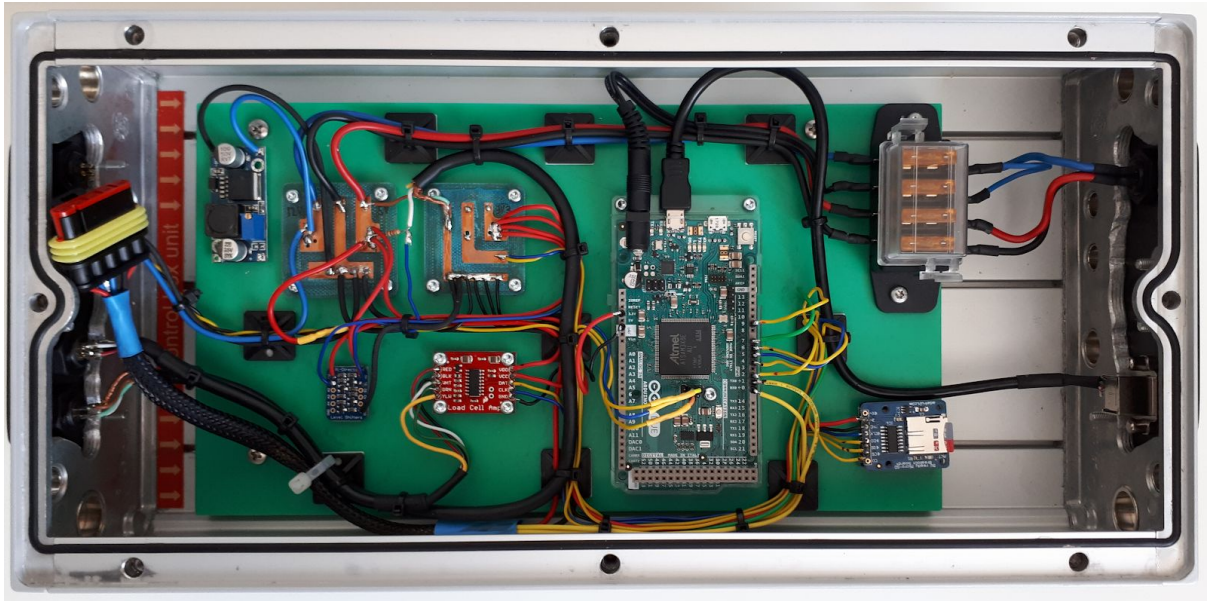


Figur 20. Mätning av hallgivarens signal före och efter spänningsnivåskiftaren, mätt med ett Tektronix TDS2002C oscilloskop.

3.2.9 Övriga komponenter

Alla dessa komponenter ville jag ha i en robust låda som håller att användas. Jag kom fram till att den bör vara av aluminium för att vara tillräckligt robust. Som tur fick jag tag på en Wärtsilä I/O-låda som är byggd för att tåla vibrationer och krävande omgivning vid stora fartygsdieselmotorer. För att få en mer ergonomisk vinkel för att se skärmen bättre, byggde jag vinklade fötter av rostfritt stål med integrerade kabelhållare. Eftersom systemet skulle vara så lätt som möjligt att anpassa till andra system behövde jag flerpoliga kabelkopplingar av bra och smidig kvalitet. Jag hittade kopplingar av märket WEiPU modell SP13 som är IP68-klassade samt med gängad bajonett. Dessa tyckte jag var smidiga och skaffade de jag behövde.

För att få alla komponenter monterade i lådan skaffade jag en plastskiva och sågade till den i lämplig storlek så att den skulle passa i lådan. För att lätt kunna distribuera de olika spänningarna samt koppla kablarna hade jag först tänkt använda kopplingsplatta för prototypbyggen, men märkte snabbt att detta inte var en bra lösning. Jag valde istället att fräsa ut egna kretskort med en CNC-fräs. Jag blev mycket nöjd med dessa och monterade dem på plastskivan med de andra komponenterna. Resultatet av monteringen av komponenterna i kopplingslådan kan ses i Figur 21.



Figur 21. Innehållet i kopplingslådan.

3.3 Testning och utvärdering

Som redan nämnts gjorde jag test på komponenterna för att kunna välja de rätta och för att se om de skulle fungera i detta projekt. Det visade sig att en stor del av tiden gick åt till dessa test. Tiden gick åt att läsa manualer, koppla upp kretsar, sätt upp testriggar och felsöka.

Även fast komponenterna fungerade skilt för sig var det inte säkert om alla skulle fungera tillsammans. Vid sammansättning av komponenterna kom det att visa sig att det inte skulle bli en enkel uppgift att få komponenterna att jobba tillsammans. Mera om dessa problem under rubriken funktionstestning.

3.4 Programmering

Hela idén med Arduinos mikrokontrollers och 4D Systems skärmar är att man själv skall programmera sin kod för att få mikrokontrollern att göra det man vill samt att själv designa

sin egen layout för att få operatörsterminalen att bli smidig att använda och visa väsentlig information. Att programmera är som att skriva ett språk som en dator kan förstå.

3.4.1 Mjukvaran

3.4.1.1 Arduino IDE

Arduino IDE är mjukvaran där man skriver koden för Arduino mikrokontrollers. Koden som man skriver bygger på C/C++ - kod, men man kan använda inbyggda funktioner för att förenkla programmeringen. Till exempel: för att lägga port B till utport och sedan skriva pinne 5 hög bör man i C skriva: `DDRB = 0xFF; PORTB = 0b00100000;` medan man i Arduino IDE kan skriva: `pinMode(13, OUTPUT); digitalWrite(13, HIGH);`.

Eftersom Arduino är en mycket populär plattform finns det bra tillgång på bibliotek för olika hårdvarukomponenter. Dessa bibliotek underlättar vid kommunikationen och styrandet av extern hårdvara, som i mitt projekt är pekskärmen, kraftgivarens AD-omvandlare och microSD-kortläsaren samt styrningen av bromsservon. ("Arduino," 2018)

3.4.1.2 4D Workshop

4D Workshop är 4D Systems mjukvara för att kunna koda pekskärmen samt bygga upp det visuella gränssnittet. I programmet finns fyra olika lägen att programmera ("4D Systems," 2018):

- Designer, här programmerar man skärmen i ren 4DGL-kod.
- ViSi, här kan man även visuellt se hur resultatet blir när man programmerar i 4DGL-kod.
- ViSi Genie, här programmerar man skärmen helt visuellt och det kräver ingen 4DGL kodning.
- Serial, använder man detta läge så konfigurerar man skärmen att fungera som en slavenhet som helt och hållet styrs via seriell kommunikation från master enheten som kan vara vilken som helst kontroller som har seriekommunikation.

Jag valde att bygga upp gränssnittet i ViSi Genie för jag ansåg att det inte i det här skedet var någon nytta med att lära sig ett nytt programmeringsspråk och dessutom gick de flesta funktionerna jag behövde att göra med detta programmeringsläge. Enda nackdelen var att vissa specialfunktioner inte gick att lösa i det här läget på grund av att man här är begränsad till mjukvarans möjligheter.

Till att börja med verkade mjukvaran vara lite invecklad och besvärlig att använda, men efter några timmars användning och efter att jag hade kommit underfund med hur programmet fungerade började design-processen löpa ganska bra.

I programmet finns många inställningar som är lite oklart uppbyggda men eftersom manualerna för programmet är relativt beskrivande så gick det mesta att lösa ganska enkelt. Det fina med programmet är att gratisversionen räcker mer än väl, men om man vill ha de bästa funktionerna så finns det också en professionell version som kostar en rimlig summa pengar. Jag märkte att jag klarade mig bra med gratisversionen.

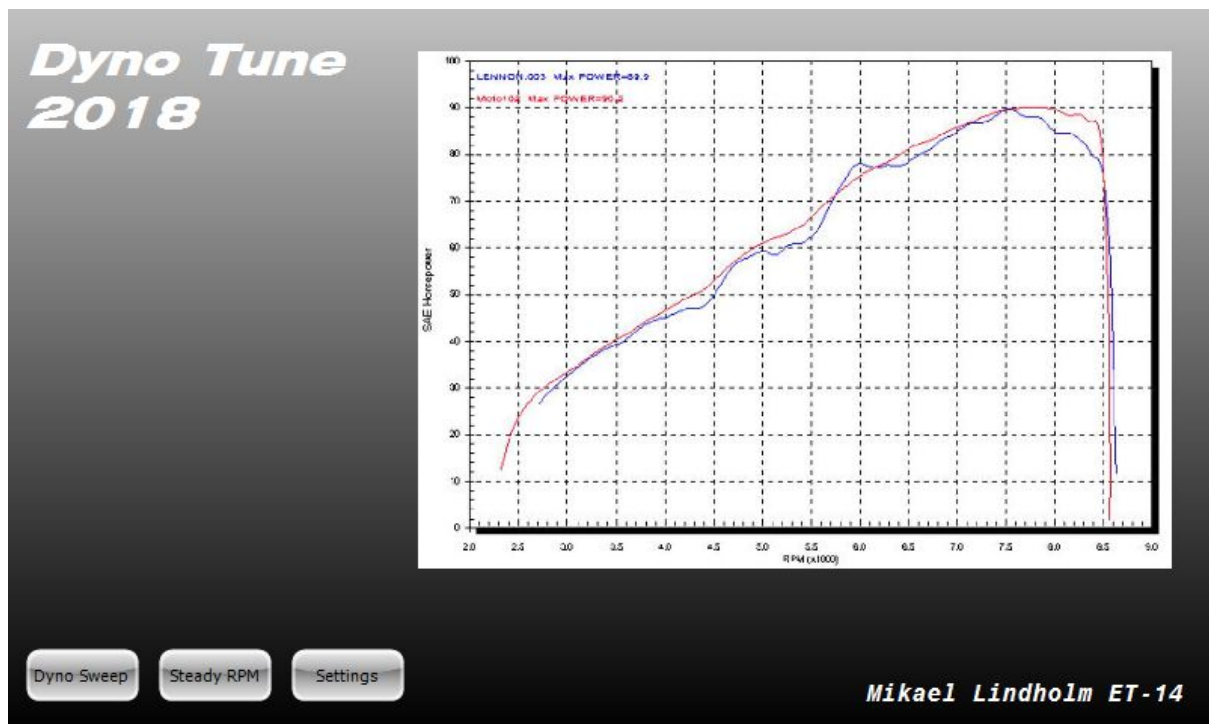
3.4.2 Uppbyggnaden av layouten på skärmen

Användarvänligheten i systemet bygger till stor del på ett klart och tydligt gränssnitt. Därför lade jag mycket tid på att bygga upp en layout som skulle vara lätt att använda samt klar och tydlig för att eliminera misstag och höja användarvänligheten. Jag funderade vilka funktioner som behövdes för att systemet skulle kunna användas till vad det är byggt för. Jag kom fram till att det behövdes minst tre stycken olika flikar på skärmen, en för att kunna göra en svepbromsning, en för att kunna bromsa vid konstant varvtal samt en för att kunna göra inställningar.

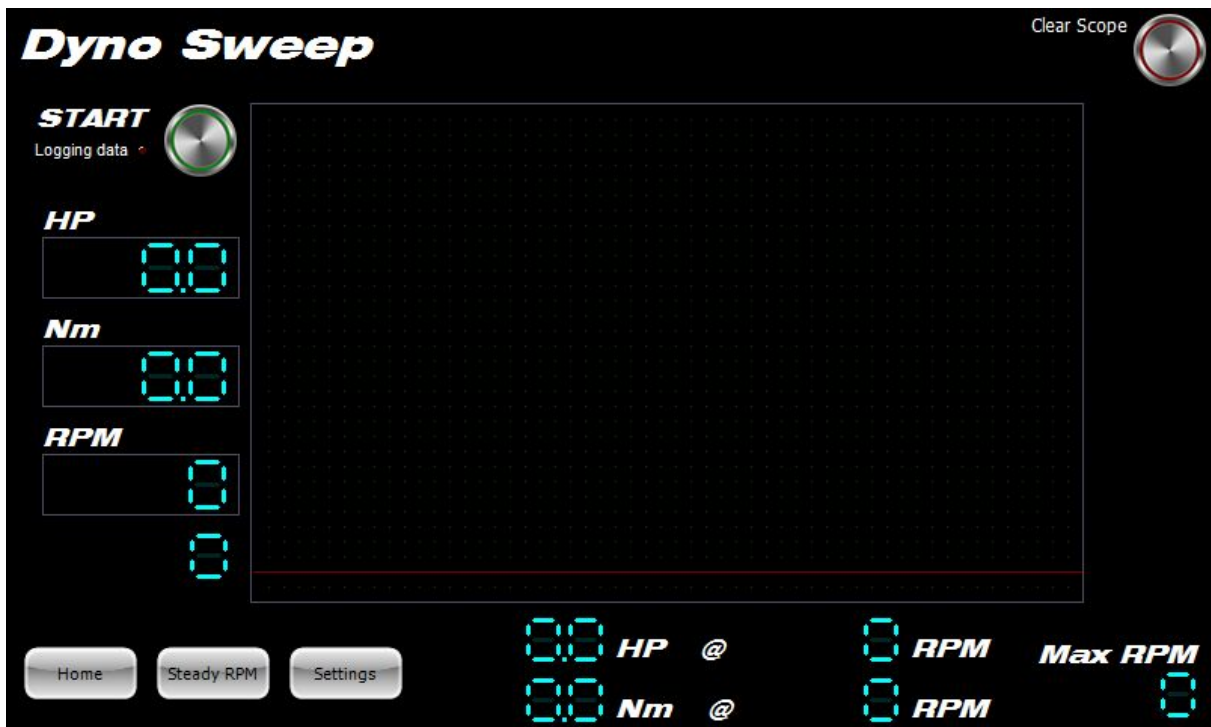
I mjukvaran är det visuellt ganska enkelt att hitta alla olika mätare, knappar, lampor och sliders. Man kan även lägga in ett skåp för att kunna visa trender på skärmen. På grund av att programmet som sagt har en del begränsningar var jag tvungen att fundera ut lösningar för att ändra på inställningsvärden som inte är så vanliga i gränssnitt, till exempel för att kunna göra inställningen för utväxlingen mellan motor och broms om man har en växellåda emellan.

Vanligtvis skulle man vilja använda en nummerpanel för att skriva in inställningsvärden men här var det inte möjligt utan kodning. För att på ett visuellt sätt enkelt kunna bygga upp denna funktion valde jag att använda en slider.

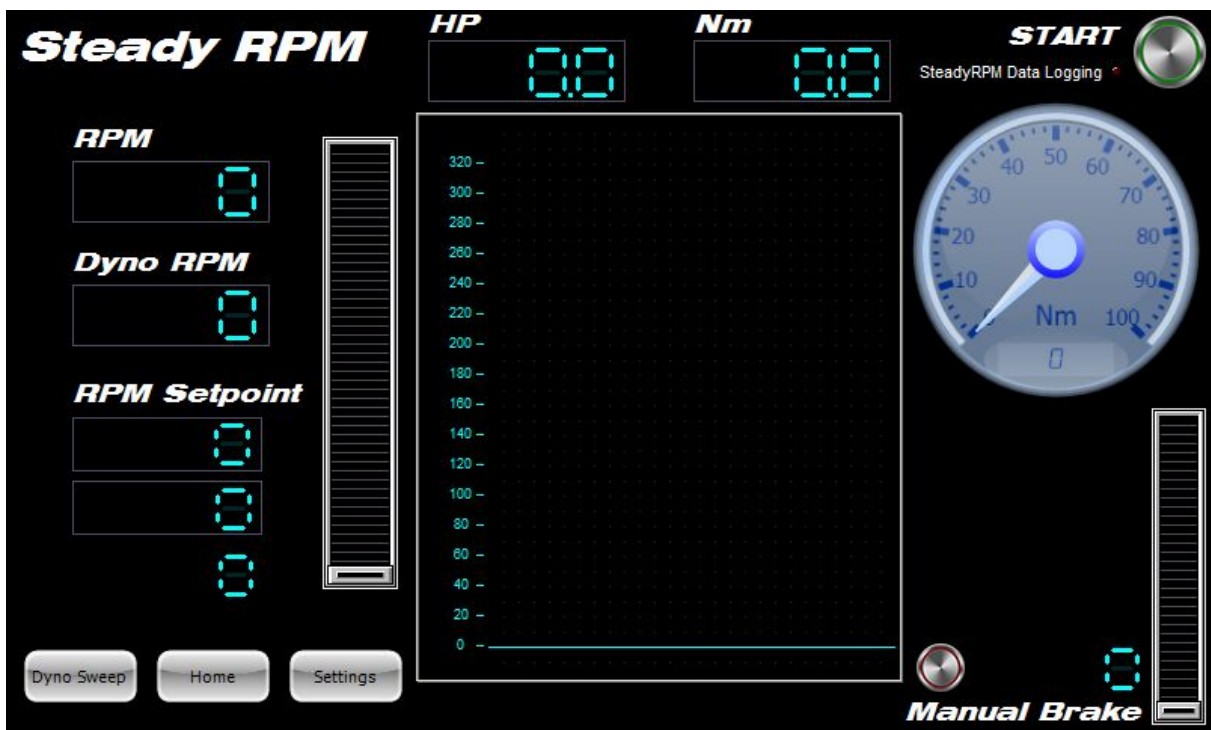
Det blev en hel del olika versioner innan jag var nöjd med layouten. Under arbetets gång kom det upp situationer där jag behövde lägga till funktioner samt ändra på de ursprungliga funktionerna. I Figur 22 till Figur 25, nedan kan man se det slutliga gränssnittet.



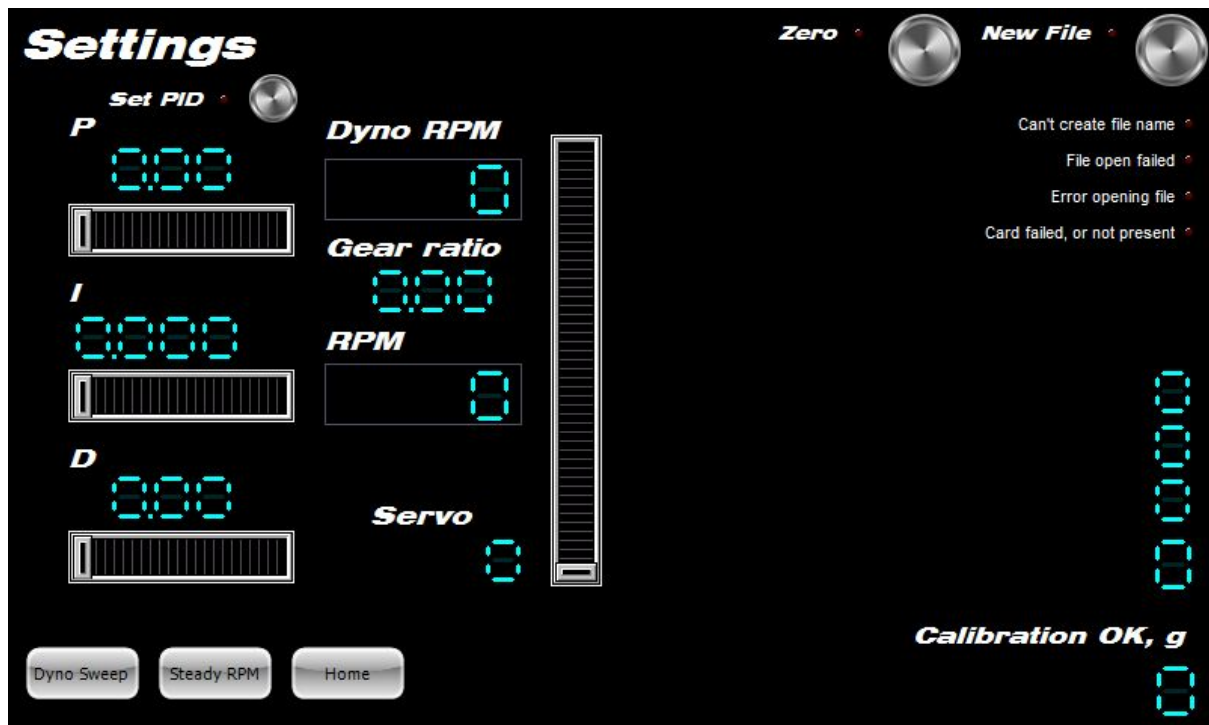
Figur 22. Användargränssnittet. Flick 1, startflik.



Figur 23. Användargränssnittet. Flik 2, sida för bromsning med svepreglering.



Figur 24. Användargränssnittet. Flik 3, sida för bromsning med konstant varvtal.



Figur 25. Användargränssnittet. Flick 4, sida för inställningar.

3.4.3 Programmering av Arduino-koden

Eftersom jag bara hade grundkunskaper i att skriva kod så var detta moment en stor utmaning för mig. För att få en vision om hur jag skulle börja bygga upp koden så läste jag en hel del på internet forum och kollade igenom exempelkoder. För att strukturera upp programmet och komma igång med koden valde jag att utgå från fyra huvudgrupper.

- Ta in data från kraftgivaren och hallgivaren.
- Upprätta kommunikationen mellan pekskärmen och mikrokontrollern.
- Behandla datan och skriva en algoritm för att styra bromsen.
- Kunna logga data och spara det på minneskortet.

Jag började med att skriva koden för kommunikationen mellan mikrokontrollern och skärmen. För att lättare komma igång använde jag exempelkoden som skärmtillverkaren hade gjort. Jag analyserade koden för att begripa hur den fungerade och hur jag skulle kunna implementera den i mitt projekt. Efter lite testande började koden klarna och jag kunde börja sammankoppla koden med gränssnittet.

Redan vid testandet av kraftgivaren tillsammans med förstärkaren fick jag erfarenhet av biblioteket och kommandona för att få in värdet från kraften som applicerades på givare. Eftersom biblioteket tar in värdet i enheten kilogram kalibrerade jag givaren med en 1000 g precisions vikt som jag lånade från skolan. Sedan skrev jag in en rad kod för att ändra kg värdet till Newton. Se Figur 26. Förhållandet mellan kg och Newton som bygger på tyngdaccelerationen varierar lite beroende på var på jordklotet man befinner sig. Därför valde jag att använda det värde som allmänt används i formelsamlingar. Alltså i det här fallet $9,80665\text{m/s}^2$. (Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S. Öistämö, J., 2002)

```

/* Läser av värdet från LoadCell Amp via biblioteket och
   omvandlar det till kilogram och här läggs det till kg */
kg = scale.get_units(), 4;

Newton = kg * 9.80665;           // kg => Newton

```

Figur 26. Utdrag ur koden för att räkna om kg till Newton.

Koden för att ta in värdet från hallgivaren bygger på att givaren är kopplad till en av digitala in-pinnarna som en brytare så att varje gång en kugg sveper förbi givaren så ger den en signal så att mikroprocessorn känner av kuggen och lägger det till en nolla och mellanrummet mellan kuggarna till en etta. Koden bygger på att varje gång givaren ger en signal så kommer den att trigga en interrupt som betyder att mikroprocessorn slutar det som den håller på med och går in i en funktion där den lägger till ett till en variabel så att den räknar upp när kuggarna passerar förbi. Efter en viss tid läser mikroprocessorn av värdet på variabeln och jämför det med tiden det har gått mellan läsningarna samt nollar räknaren. Se Figur 27.

```

//RPM BERÄKNING
if (millis() - oldtime >= 200) {           // Uppdateras var 1/5 sekund
  detachInterrupt(0);                       // Stänger av interrupts vid beräkning
  tid = (millis() - oldtime);
  dynoRpm = rev * ((1000 / tid) * 60);
  dynoRpm = dynoRpm / triggers;
  oldtime = millis();                       // Sparar current time
  rev = 0;                                   // Lägger rev till 0
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), isr, RISING); //Sparkar igång interrupts
}
// RPM BERÄKNING SLUT "dynoRpm" är resultatet från beräkningen

```

Figur 27. Utdrag ur koden för beräkning av varvtalet.

För att få varvtalet filtrerat så valde jag att använda ett enkelt lågpassfilter med formeln ("Exponential smoothing," 2018):

$$y(k) = \alpha y(k-1) + (1 - \alpha)x(k)$$

där

- $0 \leq \alpha \leq 1$, om $\alpha = 0$ ingen filtrering och för α nära 1 mycket filtrering.
- x är signalen som skall filtreras
- y är den filtrerade signalen

Lågpassfiltret implementerades enligt Figur 28:

```
// Lågpassfilter  
dynoRpmClean = (alpha * dynoRpmClean) + ((1 - alpha) * (int)dynoRpm);
```

Figur 28. Utdrag ur koden som visar implementeringen av filtreringen.

3.5 Sammansättning

När jag hade testat alla komponenter började jag planera hur alla delar skulle sammankopplas och ritade upp en ritning, Bilaga 1, samt gjorde en skiss för placeringen av komponenterna inne i lådan. Jag monterade delarna och kopplade sladdarna enligt ritningen. För att få pekskärmen monterad så mätte jag och sågade ut ett hål i lådans lock. Pekskärmen har en ram med dubbelsidig tape på baksidan så att den skall vara enkel att montera.

4. RESULTAT

4.1 Funktionstestning

När alla delar var ihopmonterade och koden var laddad till mikrokontrollern samt till pekskärmens gränssnitt var det dags att testa systemet. Jag började med att pröva systemet på arbetsbänken med givarna löst från själva bromsbänken. Allt verkade fungera, signalerna kom fram till displayen och kontrollen från displayen fungerade. Loggning av data och sparande av datan på minneskortet lyckades med gott resultat.

Efter det monterade jag givarna på bromsen för att kunna testa hela paketet. Jag valde att montera fast en 1.5 kW elmotor på bromsens inkommande axel för att på ett smidigt sätt kunna testa varvtalssignalen och bromsning vid konstant varvtal.

När jag startade upp maskinen visade det sig att varvtalsmätningen inte alls stämde och varvtalet varierade med upp emot +/- 300 rpm. Det här var inte acceptabelt eftersom systemet skall reglera varvtalet så stabilt som möjligt och då får inte själva mätningen variera. Jag analyserade koden och märkte att jag hade gjort en miss i beräkningen av tiden som mikroprocessorn använder för att räkna varvtalet. Jag korrigerade denna miss och samtidigt lade jag in några rader kod för att digitalt kunna filtrera signalen. Denna uppdatering visade sig fungera bra för nu var varvtalet relativt stabilt. Men det visade sig att jag ännu hade ett annat allvarligt problem vid läsandet av varvtalet.

När jag bytte mellan olika flikar i gränssnittet skiftade varvtalet till en annan nivå. Till exempel om jag var på inställningsfliken så kunde varvtalet vara 2400 rpm sedan om jag bytte till konstantvarvtalsfliken så kunde den visa 2600 rpm och sedan på svepsidan så kunde det vara 2700 rpm och alla dessa förändringar skedde fast motorn hela tiden gick på konstant varvtal. Det verkade vara helt slumpmässigt hur dessa hopp visade sig men det som var konsekvent var att det alltid blev en nivåskillnad mellan varvtalen. Enda gången jag fick den att visa rätt varvtal var när jag var på svepfliken och startade loggningen. Då visade den 2940 rpm som även var varvtalet min mekaniska tachometer Deumo MT-500 visade.

För att komma fram till vad detta berodde på, fick jag göra en grundlig felsökning. Jag började med att bygga ett enkelt program som bara räknade varvtalet och läste av det direkt med serial monitorn i Arduino IDE. Det visade sig att endast vid ett mätintervall av 0,9 sekunder visade den rätt varvtal. Jag kunde inte direkt se vad detta berodde på, så jag dubbelkollade och trippelkollade koden för beräkning av varvtalet. Algoritmen verkade enligt all logik stämma så felet kunde inte vara där. Då började jag fundera om felet kan vara hur mikroprocessorn gör beräkningar. För att vara helt säker på att variabeltypen inte var orsaken till problemet valde jag att ändra alla variabler i beräkningen till double:s. Denna variabeltyp är den största och tar mest utrymme i minnet men även den enda som praktiskt fungerar om man räknar med decimaltal.

Efter att jag ändrade alla variabler till double:s så visade det sig att varvtalsberäkningen började visa rätt i serial monitorn.

Efter det ville jag ännu testa att varvtalsberäkningen stämde när varvtalet visades på pekskärmen. Så jag byggde upp ett enkelt gränssnitt och program för att testa funktionen. Det visade sig att det fortfarande visade rätt. Så nu valde jag att köra in det fullständiga programmet för att testa varvtalsproblemet och nu visade det sig att varvtalet var stabilt och inga konstiga hopp uppenbarade sig. Valet att ändra till likadana variabler visade sig vara en lösning på problemet. En annan möjlighet skulle ha varit att göra uttryckliga type castingar.

Ett annat problem som uppstod under arbetets gång var att kommunikationen mellan skärmen och mikroprocessorn låste sig. Eftersom själva programkoden hade fungerat en tid så började jag med att felsöka de fysiska komponenterna. Jag bytte ut en efter en för att se om det skulle hjälpa. Jag hade extra av allt utom pekskärmen och när jag hade testat att byta ut alla andra komponenter utom skärmen började jag befara att skärmen hade gått sönder. Då var enda lösningen att beställa en ny skärm. Detta var inte bra eftersom mitt tidsschema redan var pressat. Det tog en vecka för den nya skärmen att anlända från USA. När jag fick hem den nya skärmen kopplade jag genast fast den för att se om det var lösningen på problemet och till min stora förvåning gjorde detta ingen skillnad. Kommunikationen mellan

mikroprocessorn låste sig fortfarande och nu kändes det hopplöst eftersom jag nu hade bytt alla fysiska komponenter utan någon lösning på problemet.

Nu valde jag att testa en helt ny sak. Det var att istället för att använda en Arduino Due så valde jag att använda en Arduino Uno. Med den började kommunikationen fungera. Då började jag fundera att kan båda mina Due vara sönder. Så jag beställde en ny Due och fick igen vänta en vecka. Den nya Duen anlände och jag kopplade genast fast den. Till min stora förvåning fungerade det inte nu heller.

Då tappade jag allt hopp om att få systemet att fungera eftersom jag inte kunde komma på en logisk förklaring på detta problem. Hur kunde ett fungerande system sluta fungera och inte börja fungera fast alla komponenter var bytta till nya komponenter?

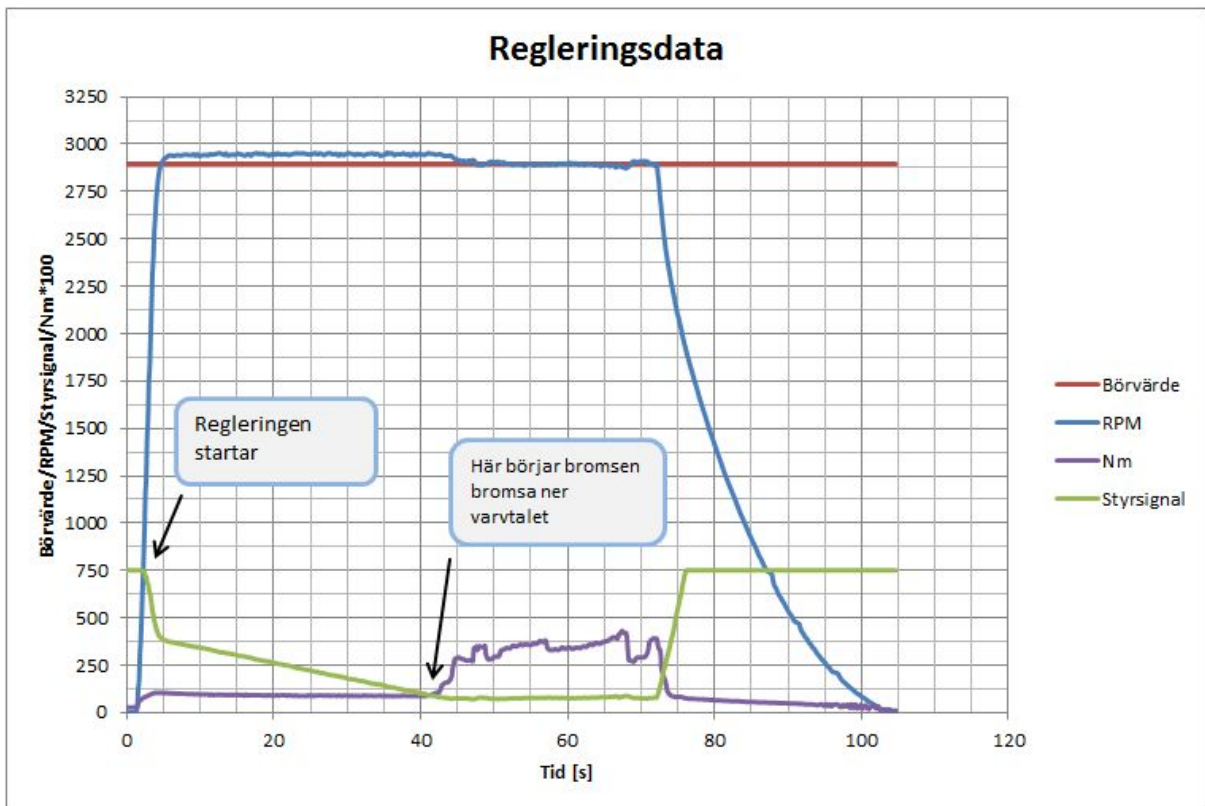
Då tänkte jag att jag har ingen annan möjlighet än att bygga upp ett nytt program och bena ut när problemet började uppenbara sig. Jag byggde upp koden bit för bit och när jag kom till kodsnutten som tar in värden från kraftgivarens AD-omvandlare så låste sig kommunikationen. Genast som jag avmarkerade koden så fungerade kommunikationen igen. Denna situation var ett totalt mysterium för mig, att en fungerande kod plötsligt slutar fungera.

Eftersom jag inte hittade en lösning på detta problem valde jag att istället använda en Uno. Med en Uno fick jag lite sämre prestanda som jag var tvungen att acceptera, men för att kunna testa systemet var detta en fungerande lösning.

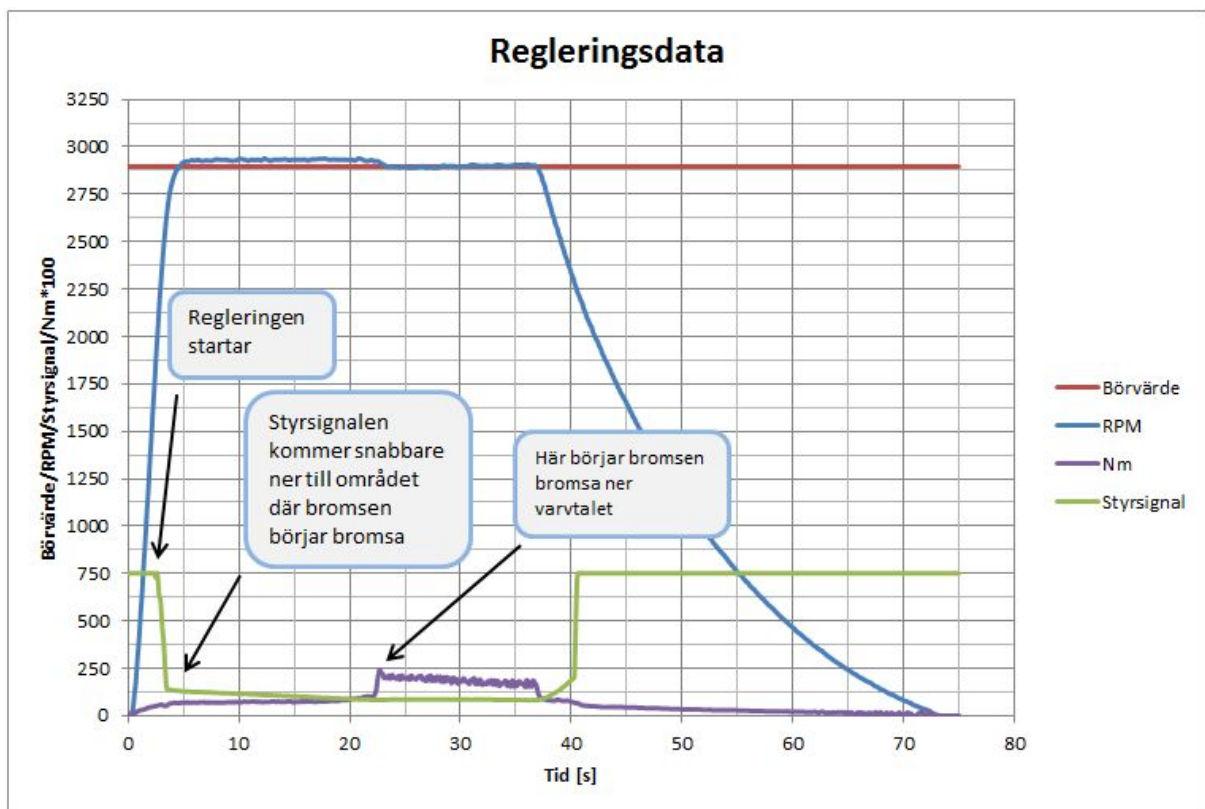
Först efter att jag hade löst dessa problem kunde jag börja bygga upp koden för regleringen av bromsen. Jag implementerade formeln för PID-regulatorn och analyserade den beräknade utsignalen för att kunna ändra om den till ett värde som bromsens servo kunde styras med. Efter lite trixande och räknande fick jag regulatorn att börja reglera bromsen. När jag provade att ställa in ett varvtal som bromsen skulle bromsa till visade det sig ganska snabbt att stegen som servon styrde bromsen med var alldeles för stora. Jag valde att bygga om fästet för bromsservons arm så att den skulle röra sig långsammare och med mindre utslag. Samtidigt ändrade jag koden för PWM-signalen som styr servon, från att vara styrd med en grads

noggrannhet där servon kan styras mellan 0 till 180 grader, till att vara styrd med mikrosekunder som tillåter att servon kan positioneras med 1000 olika vinklar mellan 0 och 180 grader. Denna ändring gjorde att styrningen blev 5,56 gånger noggrannare.

Nu visade det sig att regleringen fungerade betydligt bättre men var fortfarande mycket känslig för instabilitet. Jag gjorde många tester för att komma fram till rätta värden på PID-regulatorns förstärkning och integreringstid. När jag hade hittat de värden där regleringen fungerade som bäst visade det sig att det tog över 30 sekunder innan bromsen började bromsa från att motorn startades. Se Figur 29. När jag försökte göra denna tid kortare ledde det till att bromsen blev för aggressiv och därmed instabil. Orsaken till den långsamma regleringen berodde på att när motorn hade kommit upp till största varvtal så var skillnaden mellan börvärdet och ärvärdet förhållandevis litet och därmed reglerfelet litet. Samtidigt hade styrsignalen och servon ett område på 80% som måste köras innan bromsen börjar bromsa. Detta område behövs för att bromsen skall kunna släppa så mycket att den blir helt fri. För att snabbare få det icke inverkan området bort reglerat valde jag att använda parameterstyrning. Jag ändrade koden så att när styrsignalen var över 200 skulle PID-regulatorn ha en viss inställning där den reglerar snabbt och att styrsignaler under 200 skulle ha en annan inställning där regulatorn var mycket långsammare. Skillnaden mellan de olika regleringsmetoderna samt tidsskillnaden det tar för styrsignalen att komma ner till området där bromsen börjar bromsa kan ses i Figur 29 och Figur 30.



Figur 29. Plottad data av regleringen.



Figur 30. Plottad data av regleringen med parameterstyrning.

Jag hade även implementerat en funktion så att jag skulle kunna justera bromsstyrkan manuellt och det visade sig att styrningen av bromsen fungerade. Bromskraften kunde regleras och funktionen kunde användas för olika test av bromsen och för att kunna testa olika belastningar på motorn.

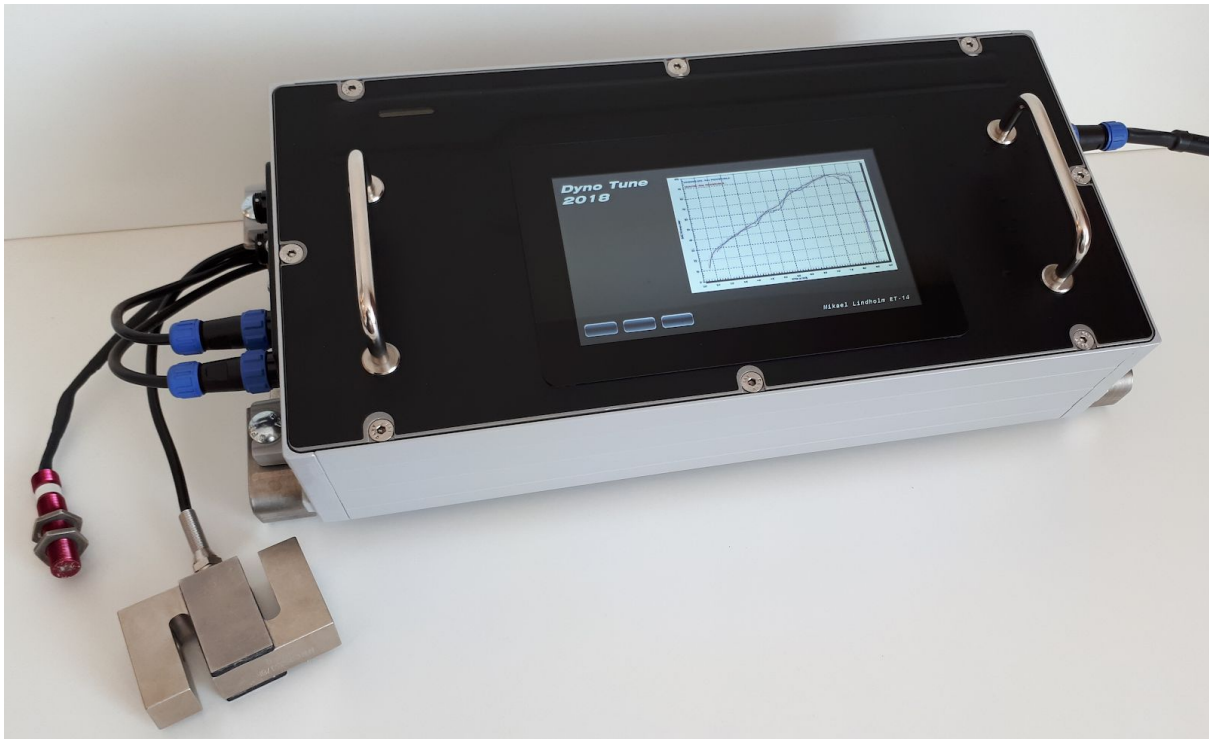
4.2 Utvärdering och analysering

Efter att problemen var lösta kunde testande av systemet börja. De första testerna visade att mät- och reglersystemet visade vridmomentet och effekten samt att det kunde reglera bromsen. Loggningen av data visade sig också fungera. Mätresultatet som uppmättes visade sig vara riktgivande. Det fanns inte möjlighet att verifiera resultatet men enligt loggad data levererade motorn 1,5 hästkrafter vid 2900 rpm som visar att resultatet är inom en halv hästkrafts noggrannhet. Ett kort exempel på loggad data ges i Bilaga 5.

Valet att byta till Unon visade sig inte vara ett stort problem. Detta enkla program visade sig fungera bra utan någon som helst antydning till att vara för långsamt.

Gränssnittet fungerade mycket bra och var smidigt att använda. Skärmens känslighet överraskade positivt och den reagerade genast vid tryck på knapparna och slidern.

I Figur 31 kan man se det färdiga paketet.



Figur 31. Den färdiga enheten.

4.3 Kostnads kalkyl

Ett av syftena med detta examensarbete var att undersöka om det är möjligt att bygga ett mät- och reglersystem för bromsbänkar på ett förmånligt sätt. I denna kostnads kalkyl redogörs för alla kostnader.

Priserna på produkter som användes i projektet:

- Arduino Due, 8,95€
- 4D Systems SK-GEN4-70DCT-CLB, 237,00€
- SparkFun Load Cell Amplifier HX711, 8,10€
- Kraftgivare HTC-Sensors CO. LTD TAS501, 45,55€
- Hallgivare Cherry GS100502, 42,00€
- mikroSD kortläsare Adafruits MicroSD 254, 6,10€
- Kopplingslåda IP klassad, 12,90€
- SP13 kopplingar, 44,62€
- Strömkälla Corsair VS 350, 37,90€
- Kablar och övriga tillbehör, ~20,00€

Sammanlagt kostade delarna 453,13 €. Det billigaste motsvarande systemet (YourDyno.com) som jag hittade på fria marknaden kostade 561 € (“YourDyno.com – Power to the people!” 2018). Största skillnaden mellan dessa system är att YourDyno-systemet kräver en dator där mätresultaten visas i deras mjukvara och det systemet har inte möjligheten att reglera bromsen att hålla ett konstant varvtal. Mitt system är ett komplett paket med den väsentliga funktionen att kunna hålla ett konstant varvtal vid justering av förbränningsmotorer. Ett system från Dyno-mite Dynamometers som har samma funktioner som mitt system kostar ungefär 2250 € alltså nästan fem gånger dyrare. (“Data Acquisition Dynamometer Conversion Prices and Models,” 2018)

5. VIDAREUTVECKLING

5.1 Mätvärden

Även om PID-regulatorn redan nu reglerar bromsen så bör den förbättras för att få en stabilare varvtalsreglering och ett stabilare mätresultat. För att komma fram till en bättre reglering krävs mera testande och utvärderande av utrustningen.

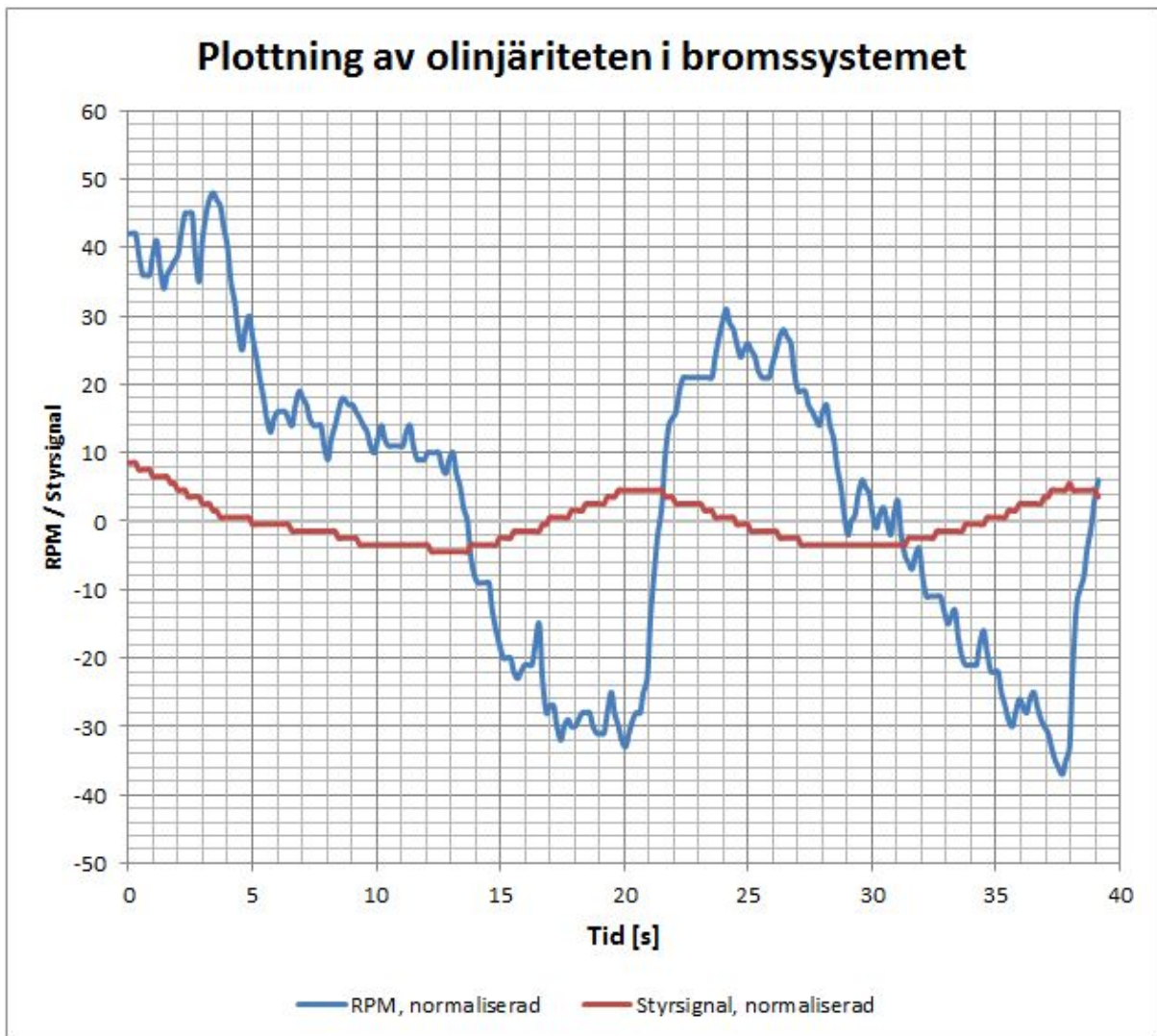
5.2 Användarvänlighet

Användarvänligheten var redan nu bra men vissa funktioner bör ses över för att göra gränssnittet smidigare att använda, t.ex. hur inställningsvärdena väljs. Nu görs dessa inställningar med sliders men en mera användarvänlig metod skulle vara en nummerpanel. Även möjligheten att göra övriga inställningar som behövs vid flytt mellan olika bromsar bör implementeras i gränssnittet. Dessa är t.ex. kraftgivarens placering och kalibrering samt inställningar för bromsens styrsignal som innebär skalning och val av gränsvärden för PWM-signalen.

5.3 Förbättringar

Som nämnt så var justeringen av PID-regulatorn mycket svår och det var svårt att få en stabil reglering utan risk för instabilitet. Jag tror att orsaken till detta fenomen var att eftersom bromsen är byggd för vridmoment uppemot 400 Nm och elmotorn som jag nu hade monterad på bromsen bara hade ett vridmoment under 10 Nm, vilket gör att bromsen är alldeles för stark för denna svaga motor. Därmed orkade inte motorn hålla emot när bromsens kraft inte kan, på ett smidigt sätt, reglera vid så små vridmoment. Även det att styrningen av bromskraften är olinjär och fäsförskjuten ger upphov till att regleringen av bromsen blir svår att justera in. Vid test av bromssystemet visade det sig att när varvtalet sjönk och regulatorn

ökade på styrsignalen för att bromsen skulle släppa på bromskraften så fortsatte varvtalet att sjunka, se Figur 32. När en kraftigare motor kopplas till bromsen kan dessa problem utvärderas vidare.



Figur 32. Olinjäriteten i bromssystemet, 0 = 2894 rpm = börvärdet.

Det som ännu inte blev implementerat i systemet var tryckgivare för mätning av förbränningsmotorns lufttryck i insugsserien. Detta mätvärde är intressant vid justering av förbränningsmotorer samt för att få in mera viktig data i loggarna. Denna givare kan även användas för att mäta atmosfärens lufttryck som sedan direkt kan läggas in i beräkningen av korrigeringsfaktorn. Även givare för temperatur till beräkningen av korrigeringsfaktorn bör implementeras.

En nödstoppfunktion behöver ännu implementeras i systemet. För att få in ett vettigt nödstopp behöver funktionen undersökas vid test av utrustningen. Vid undersökning av nödstoppfunktionen behöver man fundera på om nödstoppet skall göra så att bromsen bromsar fullt, släpper fullt eller någon kombination av dessa, för att få utrustningen så säker som möjligt.

6. SLUTSATS

6.1 Egna reflektioner

Målet med examensarbetet var att undersöka om det är möjligt att bygga ett förmånligt mät- och reglersystem för effektmätning av motorer. Arbetet visade att det är möjligt att bygga systemet förmånligare än de system som finns på marknaden. Men för att rättfärdiga att systemet kan byggas förmånligare än de kommersiella systemen så bör man räkna med att man bygger systemet åt sig själv och inte räknar med arbetstimmarna som sökandet av information och kodandet av mjukvaran kräver. Största skillnaden mellan mitt och det förmånliga kommersiella systemet YourDyno, är att det kommersiella systemet kräver en dator där mätresultaten visas i deras mjukvara och det systemet har inte möjligheten att reglera bromsen att hålla ett konstant varvtal. Mitt system är däremot ett komplett paket med en extra väsentlig funktion som underlättar vid justering av förbränningsmotorer. Ett motsvarande mät- och reglersystem från Dyno-mite Dynamometers är ungefär fem gånger dyrare.

Systemet visade sig fungera och kunde användas till att mäta varvtal, vridmoment och beräkna effekten och sedan visa resultatet på en skärm, samt logga data och spara den på ett minneskort.

Det finns en hel del kvar att utvärdera och förbättra på systemet för att få det fullständigt. Dessa förbättringar kräver att systemet testas med olika bromsbänkar och motorer, men redan i detta skede är det en fungerande produkt.

I och med detta examensarbete har jag lärt mig att konkret använda mina kunskaper för att bygga en prototyp för en produkt. Insamlingen av information som krävs för att genomföra ett projekt samt redovisningen av arbetet har visat sig bringa nyttig erfarenhet och varit givande.

Det visade sig att problemlösningen av oväntade problem blev betydligt mer krävande än jag hade kunnat tänka mig. De största problemen var signalbehandlingen samt att skriva en fungerande kod. Tack vare dessa problem fick jag en hel del ny erfarenhet som kommer att bringa mervärde i framtida projekt.

Det krävdes en hel del kartläggande och testande för att hitta rätt komponenter. Valet av komponenter visade sig vara bra i teorin men i praktiken visade det sig att vissa komponenter fungerade bra vid enskilda test men vid en sammansättning fungerade de inte ihop. Inom denna tidsram fick jag inte de planerade komponenterna att fungera ihop utan stabilitetsproblem. Så jag fick göra en kompromiss och välja en annan mikrokontroller som visade sig vara en lösning på problemet. Denna ändring av hårdvara visade sig inte påverka systemet märkbart vid testande av konceptet. Hela systemet byggdes i en robust låda med kvalitativa kopplingar och det visade sig bli ett smidigt och användarvänligt paket.

Stabiliteten av mätningarna och det visuella gränssnittet visade sig vara god. Regleringen av bromsen visade sig vara mycket känslig och blev lätt instabil. Instabiliteten beror troligtvis på att motorn som används som testmotor inte var optimal för testbromsbänken på grund av att motorn skulle ha behövt vara kraftigare samt att regleringen av bromskraften var olinjär. Instabilitetsproblemet kräver fortsatta undersökningar med andra motorer för att kunna utvärderas och optimeras.

Som helhet är jag nöjd med produkten och examensarbetet har varit givande och lett till ovärderlig erfarenhet.

KÄLLOR

4D Systems. (2018). Retrieved April 9, 2018, from <https://www.4dsystems.com.au/>

4D Systems Appnotes. (2018). Retrieved April 10, 2018, from

<https://www.4dsystems.com.au/appnotes>

4D Systems, gen4-uLCD-70DCT-CLB. (2018). Retrieved April 8, 2018, from

https://media.digikey.com/Photos/4D-Systems-Pty-Ltd/MFG_SK-GEN4-70DCT-CLB.jpg

AD8221 precision instrumentation amplifier. (2007). Retrieved from

<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8221.pdf>

Analog Devices, A. D. (2003). AD620 Datasheet. *Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier*.

Retrieved from

<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>

Arduino. (2018). Retrieved April 9, 2018, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino>

Arduino Due. (2018). Retrieved April 8, 2018, from <https://store.arduino.cc/arduino-due>

Arduino Reference. (2018). Retrieved April 10, 2018, from <https://www.arduino.cc/reference/en/>

Arduino Uno R3. (2018). Retrieved April 8, 2018, from <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>

Barr, M. (2001). Pulse width modulation. *Embedded Systems Programming*, 14(10), 103–104.

Bengtsson, L. (2003). Elektriska mätsystem och mätmetoder.

Cherry GS100502 Hall Effect Sensor. (2018). Retrieved April 8, 2018, from

https://media.rs-online.com/t_large/F7659328-01.jpg

Data Acquisition Dynamometer Conversion Prices and Models. (2018). Retrieved April 11, 2018,

from

<https://www.dynomitedynamometer.com/data-acquisition/data-acquisition-dynamometer-price.htm>

m

Dynamometer. (2018). Retrieved April 8, 2018, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamometer>

Eddy Current retarder. (2018). Retrieved April 8, 2018, from

<http://www.sportdevices.com/img/KLAM.jpg>

Exponential smoothing. (2018, March 23). Retrieved April 13, 2018, from

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Exponential_smoothing&oldid=832060289

Hall effect sensor. (2018, April 21). Retrieved May 7, 2018, from

https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hall_effect_sensor&oldid=837523155

Industrial Electronic Load Cells - Celmi Load Control Solutions. (2018). Retrieved April 8, 2018,

from <http://www.celmi.com/eng/products/load-cells/>

Lever. (2018, May 1). Retrieved May 7, 2018, from

<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lever&oldid=839100621>

Load Cell 200kg. (2018). Retrieved April 8, 2018, from

<https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/1/2/2/3/8/14282-02.jpg>

Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S. Öistämö, J. (2002). *Technical formulas : Basic Formulas of Mathematics, Physics and Strength of Materials, and SI System of Units*. Tammertekniikka.

MicroSD card breakout board+. (2018). Retrieved April 8, 2018, from

<https://cdn-shop.adafruit.com/970x728/254-05.jpg>

PID Controller. (2018). Retrieved April 8, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller

Sodré, J. R., & Soares, S. M. C. (2003). Comparison of engine power correction factors for varying atmospheric conditions. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 25(3), 279–284.

SparkFun Load Cell Amplifier. (2018). Retrieved April 10, 2018, from

<https://cdn.sparkfun.com//assets/parts/1/1/5/1/0/13879-01.jpg>

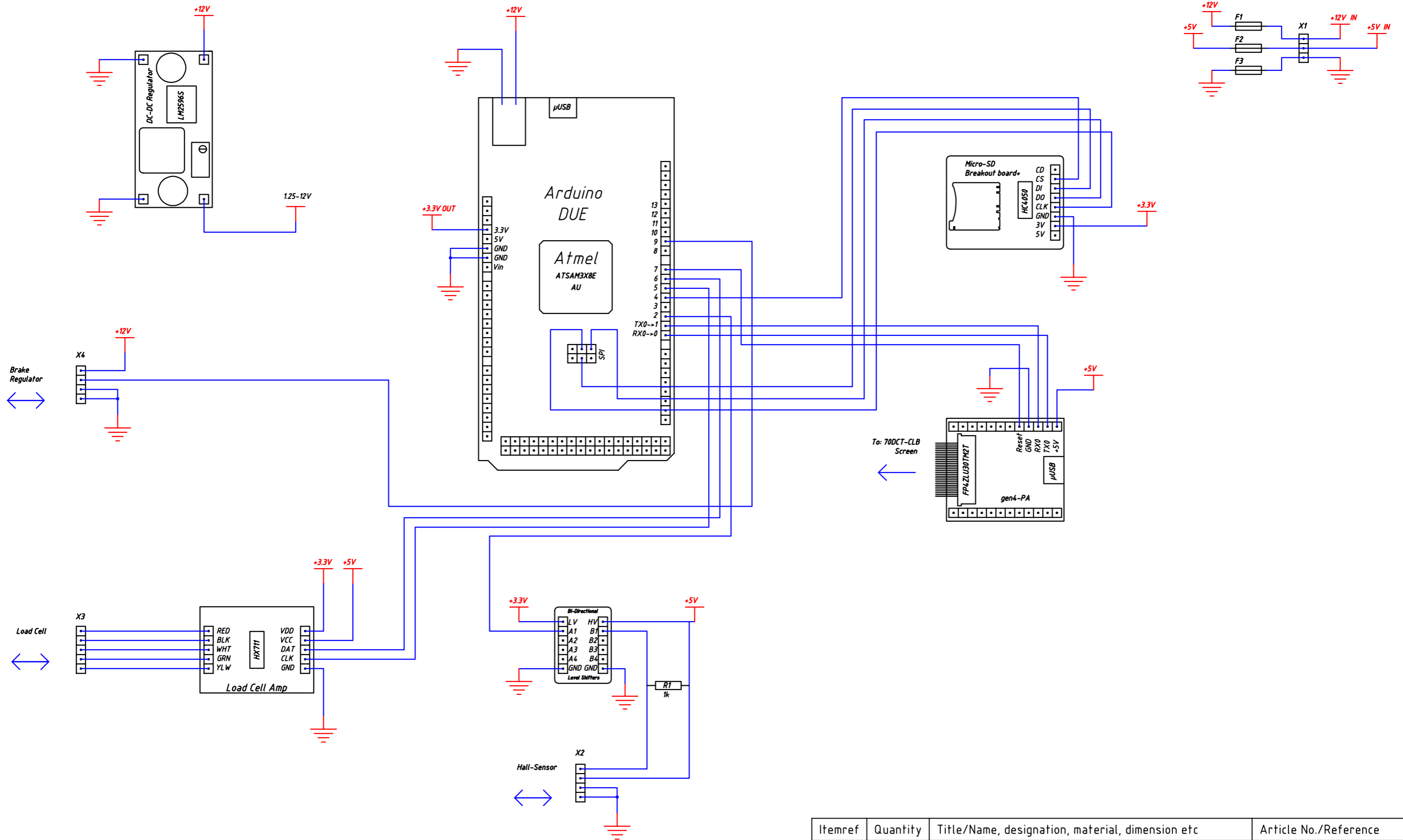
Water Brake Engine Dyno. (2017). Retrieved April 8, 2018, from

<https://powertestdyno.com/wp-content/uploads/sites/2/2015/12/50x-series-detailheader.jpg>

YourDyno.com – Power to the people! (2018). Retrieved April 9, 2018, from <http://yourdyno.com/>

“YourDyno.com – Power to the People!” n.d. Accessed April 9, 2018. <http://yourdyno.com/>.

Bilaga 1



Itemref	Quantity	Title/Name, designation, material, dimension etc	Article No./Reference		
Designed by Mikael Lindholm	Checked by ML	Approved by - date 07.04.2018	File name DTSchematic	Date 07.04.2018	Scale 1:1
HÖGSKOLAN PÅ ÅLAND ÅLAND UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES			DynoTune 2018		
			1.1	Edition 1	Sheet 1/1



杭州南洋传感器有限公司

HANG ZHOU SOUTH-OCEAN SENSOR CO., LTD.

杭州市复兴路闸口 ZHAKOU, FUXING ROAD, HANGZHOU
 电话: 0571-86081547 86081605 传真: 86083460 邮编: 310008

检定报告 EXAMINE REPORT

型号 Model MS-W1 编号 S/N A235638 量程 Capacity 200kg

主要技术指标	Main technical data	单位 Unit	技术指标 Technical quota
灵敏度	Sensitivity	mV/V	2.0036
非线性	Nonlinearity	%FS	±0.020
滞后	Hysteresis	%FS	±0.020
重复性	Repeatability	%FS	0.010
蠕变	Creep	%FS/30min	±0.020
零点输出	Zero balance	%FS	±1.00
零点温度系数	Zero temperature coefficient	%FS/10°C	±0.020
额定输出温度系数	Rated output temperature coefficient	%FS/10°C	±0.020
输入电阻	Input resistance	Ω	386
输出电阻	Output resistance	Ω	350
绝缘电阻	Insulation resistance	MΩ	≥ 5000
供桥电压	Supply Voltage	V	10(DC/AC) MAX:15(DC/AC)
温度补偿范围	Temperature compensation range	°C	-10~+50°C
使用温度范围	Safe temperature range	°C	-20~+60°C
允许过负荷	Safe overload	%FS	150

接线方式	Method of connecting wire
输入 input	红线 Red(+) 黑线 Black(-)
输出 output	绿线 Green(+) 白线 White(-)



郑煜煊

标定者 Calibrated By

12/18/2006

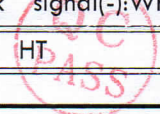
日期 Dated

TESTING DATA

Model: TAS501
Name/Type: Load Cell

Precision: 0.02%FS
Date: 19/Jun./2017

SPECIFICATIONS	UNIT	RESULTS
Series No.	6078	
Capacity	Kg	200
Rated Output	mV/V	1.9970
Combined Error	%FS	±0.020
Non-linearity	%FS	±0.017
Hysteresis	%FS	±0.020
Repeatability	%FS	±0.020
Creep(30min)	%FS	±0.020
Zero Balance	%FS	±1.0
Temp. Effect on SPAN	%FS/10 °C	±0.019
Temp. Effect on ZERO	%FS/10 °C	±0.016
Input Resistance	Ω	350±5
Output Resistance	Ω	350±5
Recommended Excitation	V	9~12
Allowed Excitation	V	5~18
Insulation Resistance	MΩ	≥5000(50Vdc)
Compensated Temp. Range	°C	-10~+40
Operating Temp. Range	°C	-20~+55
Safe Overload	%FS	120
Ultimate Overload	%FS	150
Cable length	3m	
Material	Alloy steel	
Wiring Code	excitation(+):Red signal(+):Green excitation(-):Black signal(-):White	
Calibrated by	HT	



HT SENSOR TECHNOLOGY CO., LTD
WWW.HTC-SENSOR.COM
SALES@HTC-SENSOR.COM



Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier

AD620

FEATURES

Easy to use

Gain set with one external resistor
(Gain range 1 to 10,000)

Wide power supply range (± 2.3 V to ± 18 V)

Higher performance than 3 op amp IA designs

Available in 8-lead DIP and SOIC packaging

Low power, 1.3 mA max supply current

Excellent dc performance (B grade)

50 μ V max, input offset voltage

0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, input offset drift

1.0 nA max, input bias current

100 dB min common-mode rejection ratio (G = 10)

Low noise

9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz, input voltage noise

0.28 μ V p-p noise (0.1 Hz to 10 Hz)

Excellent ac specifications

120 kHz bandwidth (G = 100)

15 μ s settling time to 0.01%

APPLICATIONS

Weigh scales

ECG and medical instrumentation

Transducer interface

Data acquisition systems

Industrial process controls

Battery-powered and portable equipment

CONNECTION DIAGRAM

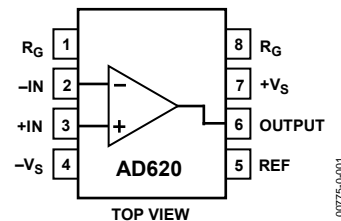


Figure 1. 8-Lead PDIP (N), CERDIP (Q), and SOIC (R) Packages

PRODUCT DESCRIPTION

The AD620 is a low cost, high accuracy instrumentation amplifier that requires only one external resistor to set gains of 1 to 10,000. Furthermore, the AD620 features 8-lead SOIC and DIP packaging that is smaller than discrete designs and offers lower power (only 1.3 mA max supply current), making it a good fit for battery-powered, portable (or remote) applications.

The AD620, with its high accuracy of 40 ppm maximum nonlinearity, low offset voltage of 50 μ V max, and offset drift of 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, is ideal for use in precision data acquisition systems, such as weigh scales and transducer interfaces. Furthermore, the low noise, low input bias current, and low power of the AD620 make it well suited for medical applications, such as ECG and noninvasive blood pressure monitors.

The low input bias current of 1.0 nA max is made possible with the use of Superbeta processing in the input stage. The AD620 works well as a preamplifier due to its low input voltage noise of 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz, 0.28 μ V p-p in the 0.1 Hz to 10 Hz band, and 0.1 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ input current noise. Also, the AD620 is well suited for multiplexed applications with its settling time of 15 μ s to 0.01%, and its cost is low enough to enable designs with one in-amp per channel.

Table 1. Next Generation Upgrades for AD620

Part	Comment
AD8221	Better specs at lower price
AD8222	Dual channel or differential out
AD8226	Low power, wide input range
AD8220	JFET input
AD8228	Best gain accuracy
AD8295	+2 precision op amps or differential out
AD8429	Ultra low noise

Rev. H

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

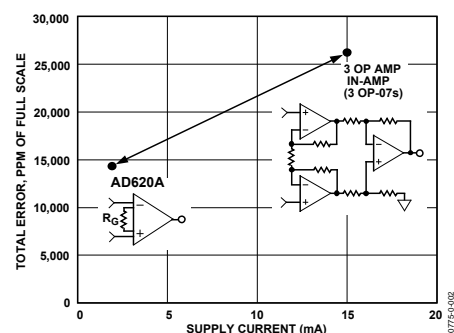


Figure 2. Three Op Amp IA Designs vs. AD620

TABLE OF CONTENTS

Specifications3
 Absolute Maximum Ratings5
 ESD Caution5
 Typical Performance Characteristics6
 Theory of Operation12
 Gain Selection.....15
 Input and Output Offset Voltage15
 Reference Terminal15
 Input Protection15

REVISION HISTORY

7/11—Rev. G to Rev. H

Deleted Figure 3.....1
 Added Table 11
 Moved Figure 2.....1
 Added ESD Input Diodes to Simplified Schematic12
 Changes to Input Protection Section.....15
 Added Figure 41; Renumbered Sequentially.....15
 Changes to AD620ACHIPS Information Section18
 Updated Ordering Guide20

12/04—Rev. F to Rev. G

Updated Format..... Universal
 Change to Features1
 Change to Product Description.....1
 Changes to Specifications.....3
 Added Metallization Photograph.....4
 Replaced Figure 4-Figure 66
 Replaced Figure 157
 Replaced Figure 3310
 Replaced Figure 34 and Figure 3510
 Replaced Figure 3710
 Changes to Table 313
 Changes to Figure 41 and Figure 4214
 Changes to Figure 4315
 Change to Figure 4417

RF Interference15
 Common-Mode Rejection.....16
 Grounding.....16
 Ground Returns for Input Bias Currents17
 AD620ACHIPS Information18
 Outline Dimensions19
 Ordering Guide20

Changes to Input Protection section15
 Deleted Figure 915
 Changes to RF Interference section15
 Edit to Ground Returns for Input Bias Currents section.....17
 Added AD620CHIPS to Ordering Guide19

7/03—Data Sheet Changed from Rev. E to Rev. F

Edit to FEATURES.....1
 Changes to SPECIFICATIONS2
 Removed AD620CHIPS from ORDERING GUIDE4
 Removed METALLIZATION PHOTOGRAPH.....4
 Replaced TPCs 1–35
 Replaced TPC 126
 Replaced TPC 309
 Replaced TPCs 31 and 32.....10
 Replaced Figure 4.....10
 Changes to Table I.....11
 Changes to Figures 6 and 712
 Changes to Figure 813
 Edited INPUT PROTECTION section.....13
 Added new Figure 913
 Changes to RF INTERFACE section14
 Edit to GROUND RETURNS FOR INPUT BIAS CURRENTS section.....15
 Updated OUTLINE DIMENSIONS16

SPECIFICATIONS

Typical @ 25°C, $V_S = \pm 15$ V, and $R_L = 2$ k Ω , unless otherwise noted.

Table 2.

Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN	$G = 1 + (49.4 \text{ k}\Omega/R_G)$										
Gain Range		1		10,000	1		10,000	1		10,000	
Gain Error ²	$V_{OUT} = \pm 10$ V										
G = 1			0.03	0.10		0.01	0.02		0.03	0.10	%
G = 10			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
G = 100			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
G = 1000			0.40	0.70		0.35	0.50		0.40	0.70	%
Nonlinearity	$V_{OUT} = -10$ V to $+10$ V										
G = 1–1000	$R_L = 10$ k Ω		10	40		10	40		10	40	ppm
G = 1–100	$R_L = 2$ k Ω		10	95		10	95		10	95	ppm
Gain vs. Temperature											
G = 1				10			10			10	ppm/°C
Gain > 1 ²				–50			–50			–50	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET	(Total RTI Error = $V_{OSI} + V_{OSO}/G$)										
Input Offset, V_{OSI}	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V		30	125		15	50		30	125	μ V
Overtemperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V			185			85			225	μ V
Average TC	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V		0.3	1.0		0.1	0.6		0.3	1.0	μ V/°C
Output Offset, V_{OSO}	$V_S = \pm 15$ V		400	1000		200	500		400	1000	μ V
Overtemperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V			1500			750			1500	μ V
Average TC	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V		5.0	15		2.5	7.0		5.0	15	μ V/°C
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSR)	$V_S = \pm 2.3$ V to ± 18 V										
G = 1		80	100		80	100		80	100		dB
G = 10		95	120		100	120		95	120		dB
G = 100		110	140		120	140		110	140		dB
G = 1000		110	140		120	140		110	140		dB
INPUT CURRENT											
Input Bias Current			0.5	2.0		0.5	1.0		0.5	2	nA
Overtemperature				2.5			1.5			4	nA
Average TC			3.0			3.0			8.0		pA/°C
Input Offset Current			0.3	1.0		0.3	0.5		0.3	1.0	nA
Overtemperature				1.5			0.75			2.0	nA
Average TC			1.5			1.5			8.0		pA/°C
INPUT											
Input Impedance											
Differential			10 2			10 2			10 2		G Ω _pF
Common-Mode			10 2			10 2			10 2		G Ω _pF
Input Voltage Range ³	$V_S = \pm 2.3$ V to ± 5 V	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.2$	V
Overtemperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 18 V	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.3$	V
Overtemperature		$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.9$		$+V_S - 1.4$	V
Overtemperature		$-V_S + 2.1$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 2.1$		$+V_S + 2.1$	$-V_S + 2.3$		$+V_S - 1.4$	V

AD620

Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Unit	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
Common-Mode Rejection												
Ratio DC to 60 Hz with 1 kΩ Source Imbalance	$V_{CM} = 0\text{ V to } \pm 10\text{ V}$											
G = 1		73	90		80	90		73	90		dB	
G = 10		93	110		100	110		93	110		dB	
G = 100		110	130		120	130		110	130		dB	
G = 1000		110	130		120	130		110	130		dB	
OUTPUT												
Output Swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 2.3\text{ V}$ to $\pm 5\text{ V}$	$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		V	
Overtemperature		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.3$		V	
Overtemperature	$V_S = \pm 5\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$	$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		V	
Short Circuit Current		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$		$-V_S + 2.3$	$+V_S - 1.5$		V	
DYNAMIC RESPONSE												
Small Signal -3 dB Bandwidth												
G = 1			1000			1000			1000		kHz	
G = 10			800			800			800		kHz	
G = 100			120			120			120		kHz	
G = 1000			12			12			12		kHz	
Slew Rate		0.75	1.2		0.75	1.2		0.75	1.2		V/ μs	
Settling Time to 0.01%	10 V Step											
G = 1-100			15			15			15		μs	
G = 1000			150			150			150		μs	
NOISE												
Voltage Noise, 1 kHz	$Total\ RTI\ Noise = \sqrt{(e_{ni}^2) + (e_{no}/G)^2}$											
Input, Voltage Noise, e_{ni}			9	13		9	13		9	13	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
Output, Voltage Noise, e_{no}			72	100		72	100		72	100	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz												
G = 1			3.0			3.0	6.0		3.0	6.0	$\mu\text{V p-p}$	
G = 10			0.55			0.55	0.8		0.55	0.8	$\mu\text{V p-p}$	
G = 100-1000			0.28			0.28	0.4		0.28	0.4	$\mu\text{V p-p}$	
Current Noise	$f = 1\text{ kHz}$		100			100			100		fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
0.1 Hz to 10 Hz			10			10			10		pA p-p	
REFERENCE INPUT												
R_{IN}	$V_{IN+}, V_{REF} = 0$		20			20			20		k Ω	
I_{IN}			50	60		50	60		50	60	μA	
Voltage Range		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.6$		V	
Gain to Output		1 ± 0.0001			1 ± 0.0001			1 ± 0.0001				
POWER SUPPLY												
Operating Range ⁴	$V_S = \pm 2.3\text{ V}$ to $\pm 18\text{ V}$	± 2.3		± 18		± 2.3		± 18		± 2.3		V
Quiescent Current			0.9	1.3		0.9	1.3		0.9	1.3		mA
Overtemperature			1.1	1.6		1.1	1.6		1.1	1.6		mA
TEMPERATURE RANGE												
For Specified Performance			-40 to $+85$			-40 to $+85$			-55 to $+125$		$^{\circ}\text{C}$	

¹ See Analog Devices military data sheet for 883B tested specifications.

² Does not include effects of external resistor R_G .

³ One input grounded. $G = 1$.

⁴ This is defined as the same supply range that is used to specify PSR.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Rating
Supply Voltage	± 18 V
Internal Power Dissipation ¹	650 mW
Input Voltage (Common-Mode)	$\pm V_S$
Differential Input Voltage	25 V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range (Q)	-65°C to $+150^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range (N, R)	-65°C to $+125^{\circ}\text{C}$
Operating Temperature Range	
AD620 (A, B)	-40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
AD620 (S)	-55°C to $+125^{\circ}\text{C}$
Lead Temperature Range (Soldering 10 seconds)	300°C

¹ Specification is for device in free air:
 8-Lead Plastic Package: $\theta_{JA} = 95^{\circ}\text{C}$
 8-Lead CERDIP Package: $\theta_{JA} = 110^{\circ}\text{C}$
 8-Lead SOIC Package: $\theta_{JA} = 155^{\circ}\text{C}$

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

(@ 25°C, $V_s = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, unless otherwise noted.)

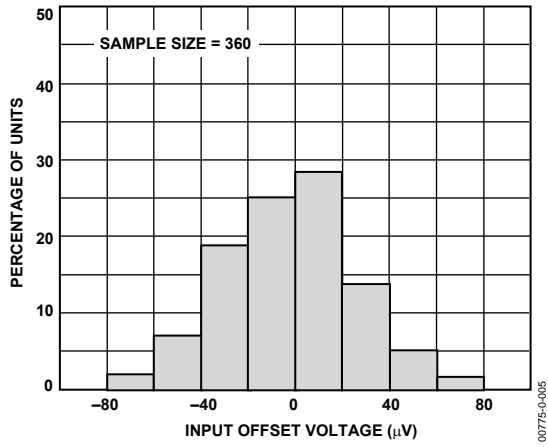


Figure 3. Typical Distribution of Input Offset Voltage

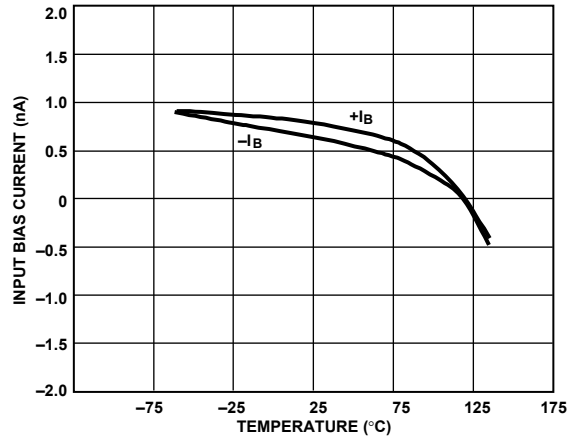


Figure 6. Input Bias Current vs. Temperature

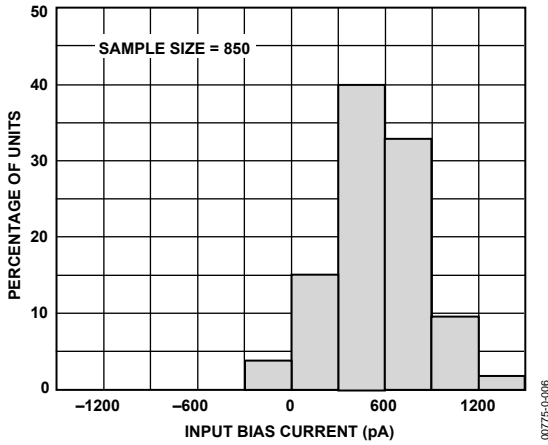


Figure 4. Typical Distribution of Input Bias Current

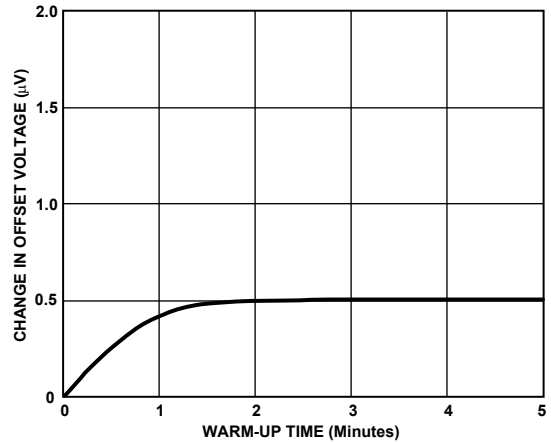


Figure 7. Change in Input Offset Voltage vs. Warm-Up Time

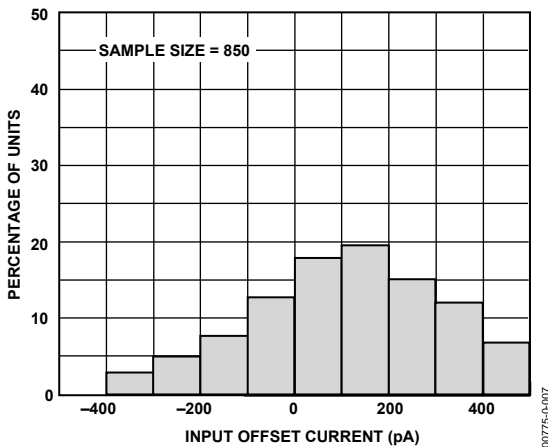


Figure 5. Typical Distribution of Input Offset Current

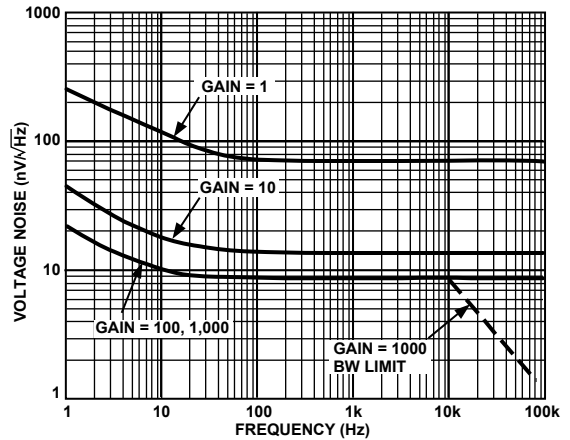


Figure 8. Voltage Noise Spectral Density vs. Frequency ($G = 1-1000$)

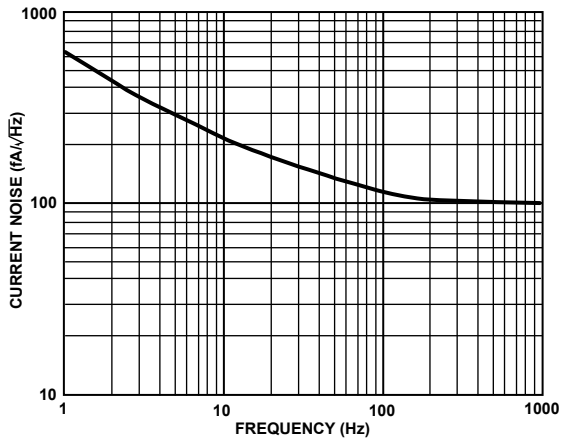


Figure 9. Current Noise Spectral Density vs. Frequency

00775-0-011

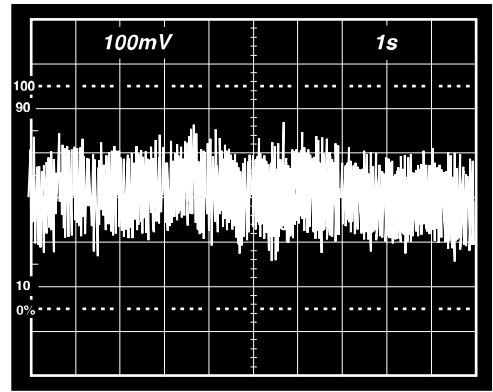


Figure 12. 0.1 Hz to 10 Hz Current Noise, 5 pA/Div

00775-0-014

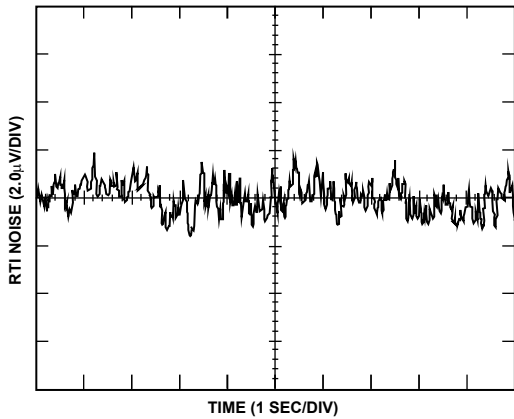


Figure 10. 0.1 Hz to 10 Hz RTI Voltage Noise (G = 1)

00775-0-012

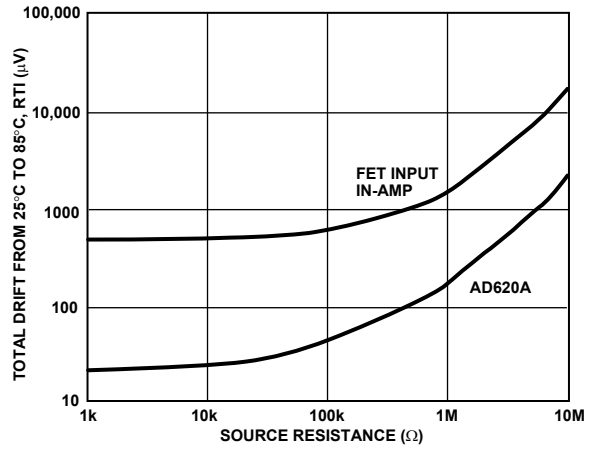


Figure 13. Total Drift vs. Source Resistance

00775-0-015

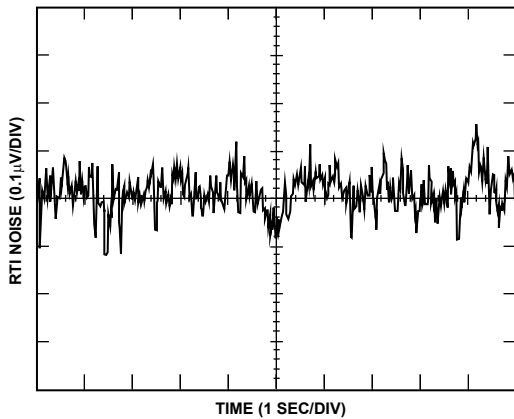


Figure 11. 0.1 Hz to 10 Hz RTI Voltage Noise (G = 1000)

00775-0-013

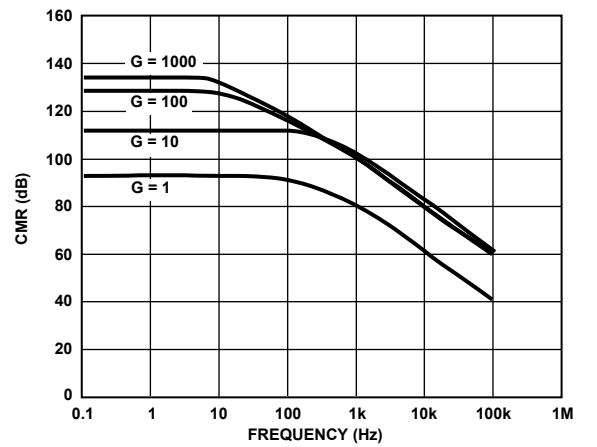


Figure 14. Typical CMR vs. Frequency, RTI, Zero to 1 kΩ Source Imbalance

00775-0-016

AD620

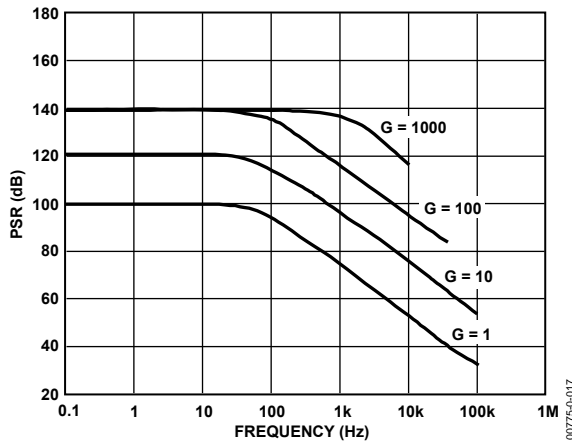


Figure 15. Positive PSR vs. Frequency, RTI (G = 1–1000)

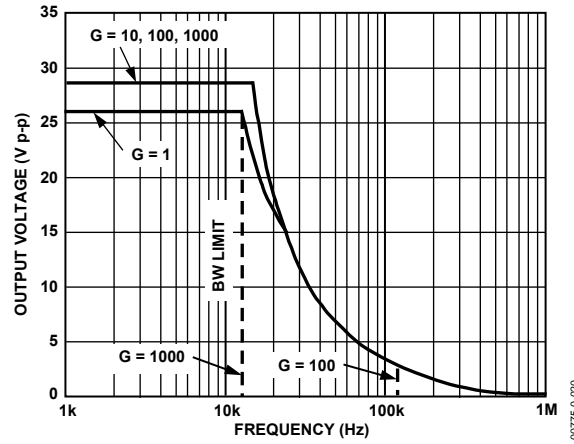


Figure 18. Large Signal Frequency Response

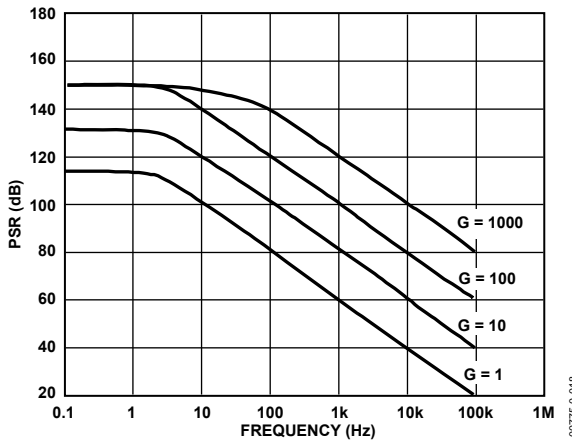


Figure 16. Negative PSR vs. Frequency, RTI (G = 1–1000)

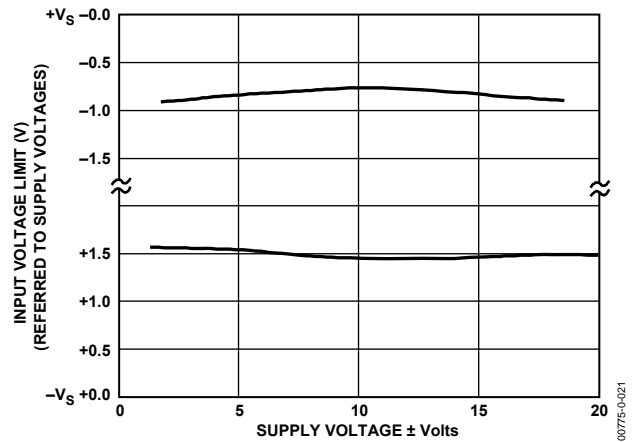


Figure 19. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, G = 1

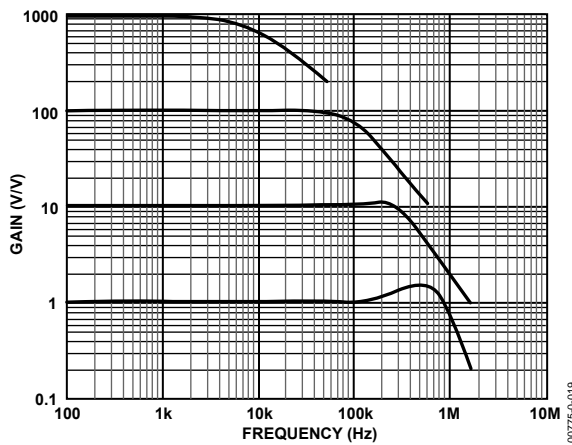


Figure 17. Gain vs. Frequency

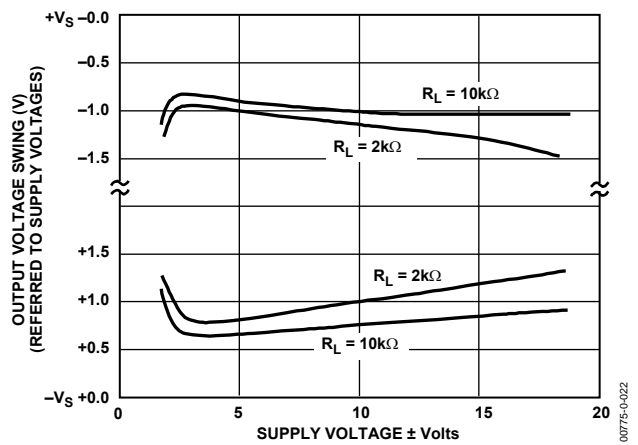


Figure 20. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage, G = 10

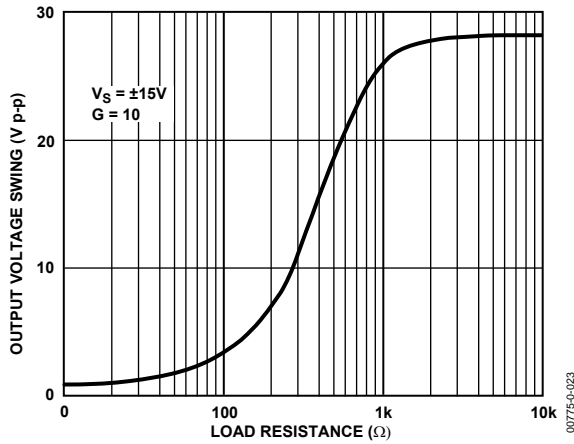


Figure 21. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

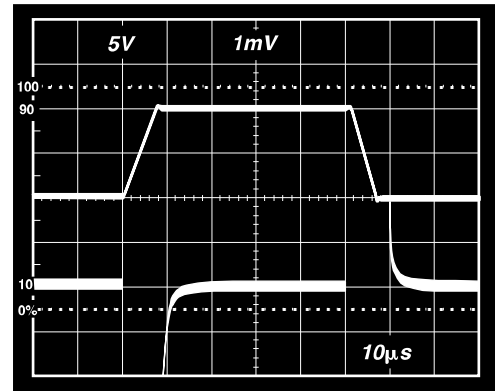


Figure 24. Large Signal Response and Settling Time, $G = 10$ ($0.5 \text{ mV} = 0.01\%$)

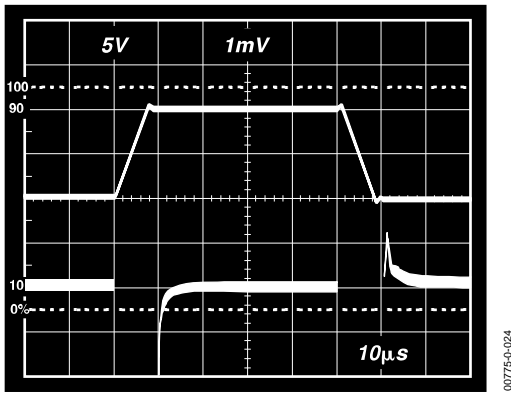


Figure 22. Large Signal Pulse Response and Settling Time $G = 1$ ($0.5 \text{ mV} = 0.01\%$)

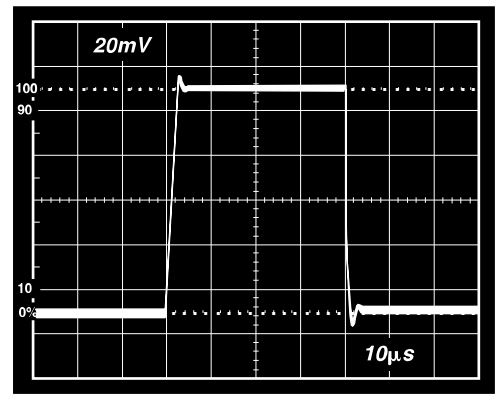


Figure 25. Small Signal Response, $G = 10$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$

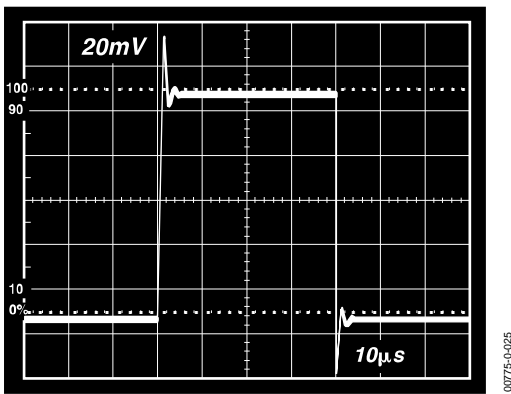


Figure 23. Small Signal Response, $G = 1$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$

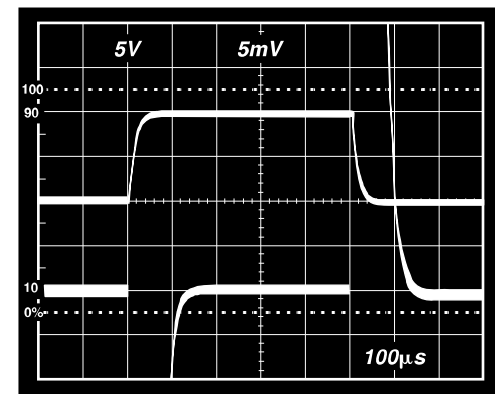


Figure 26. Large Signal Response and Settling Time, $G = 100$ ($0.5 \text{ mV} = 0.01\%$)

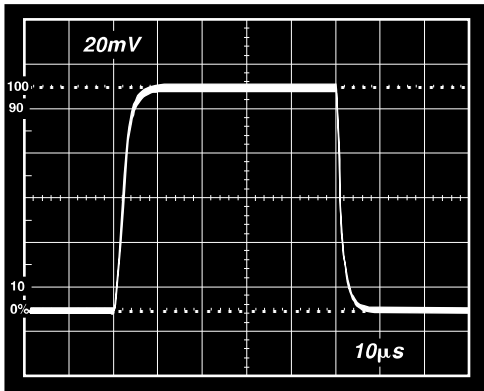


Figure 27. Small Signal Pulse Response, $G = 100$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$

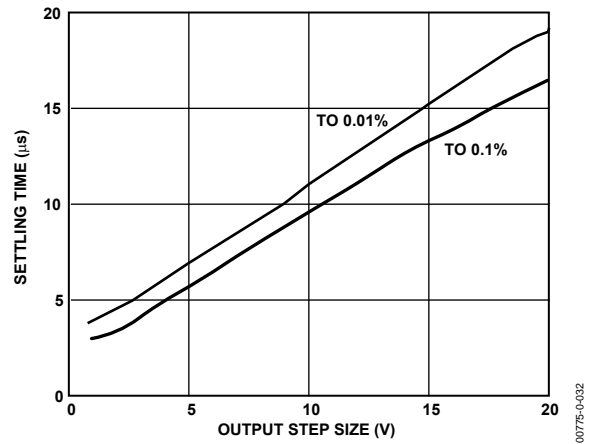


Figure 30. Settling Time vs. Step Size ($G = 1$)

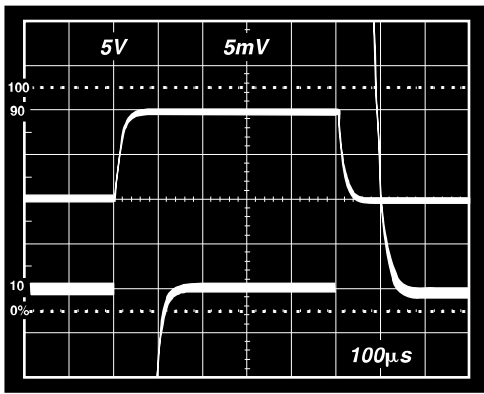


Figure 28. Large Signal Response and Settling Time, $G = 1000$ ($0.5 \text{ mV} = 0.01\%$)

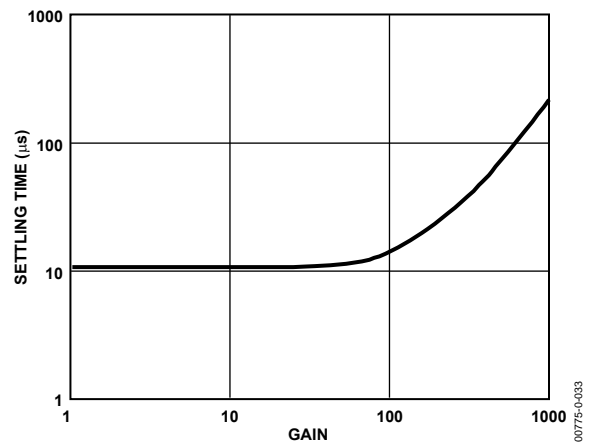


Figure 31. Settling Time to 0.01% vs. Gain, for a 10V Step

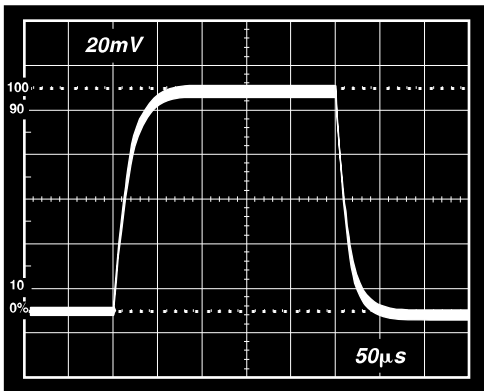


Figure 29. Small Signal Pulse Response, $G = 1000$, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$

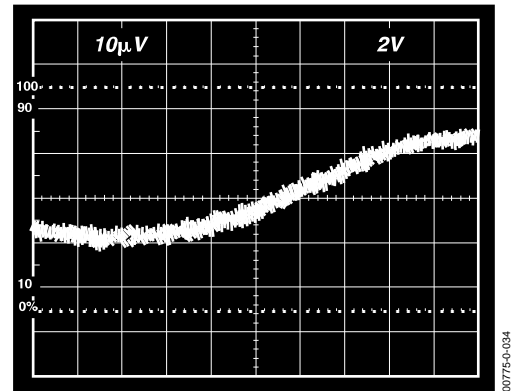
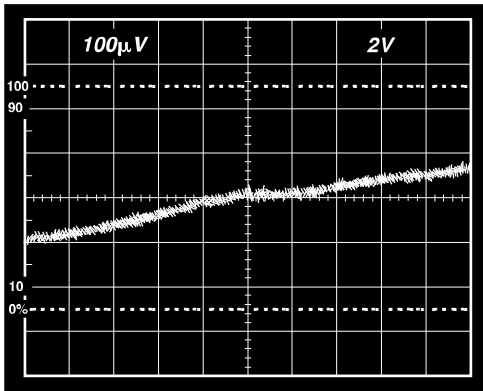
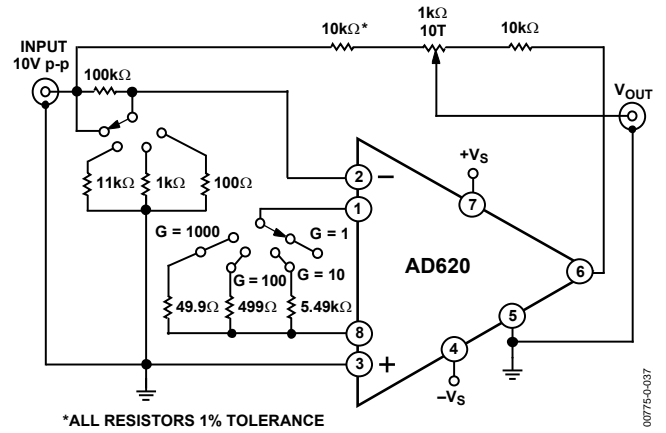


Figure 32. Gain Nonlinearity, $G = 1$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ ($10 \text{ μV} = 1 \text{ ppm}$)



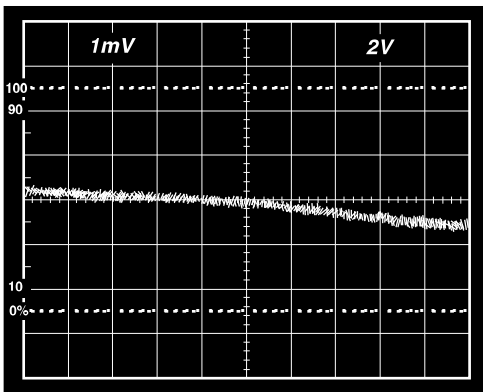
00775-0-035

Figure 33. Gain Nonlinearity, $G = 100$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$
($100\text{ }\mu\text{V} = 10\text{ ppm}$)



00775-0-037

Figure 35. Settling Time Test Circuit



00775-0-038

Figure 34. Gain Nonlinearity, $G = 1000$, $R_L = 10\text{ k}\Omega$
($1\text{ mV} = 100\text{ ppm}$)

THEORY OF OPERATION

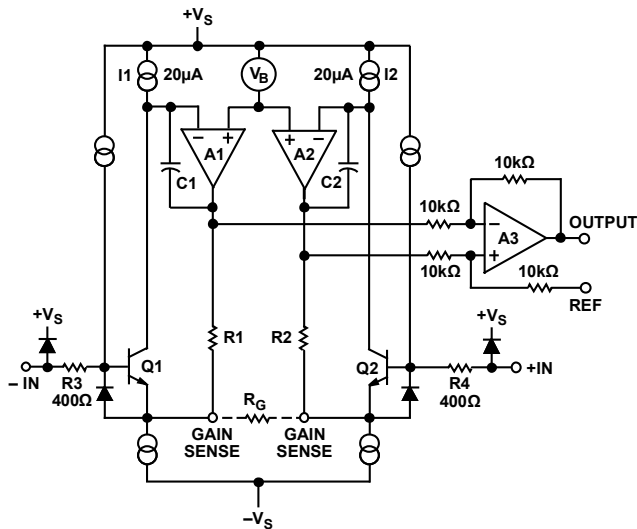


Figure 36. Simplified Schematic of AD620

The AD620 is a monolithic instrumentation amplifier based on a modification of the classic three op amp approach. Absolute value trimming allows the user to program gain *accurately* (to 0.15% at $G = 100$) with only one resistor. Monolithic construction and laser wafer trimming allow the tight matching and tracking of circuit components, thus ensuring the high level of performance inherent in this circuit.

The input transistors Q1 and Q2 provide a single differential-pair bipolar input for high precision (Figure 36), yet offer $10\times$ lower input bias current thanks to Superbeta processing. Feedback through the Q1-A1-R1 loop and the Q2-A2-R2 loop maintains constant collector current of the input devices Q1 and Q2, thereby impressing the input voltage across the external gain setting resistor R_G . This creates a differential gain from the inputs to the A1/A2 outputs given by $G = (R1 + R2)/R_G + 1$. The unity-gain subtractor, A3, removes any common-mode signal, yielding a single-ended output referred to the REF pin potential.

The value of R_G also determines the transconductance of the preamp stage. As R_G is reduced for larger gains, the transconductance increases asymptotically to that of the input transistors. This has three important advantages: (a) Open-loop gain is boosted for increasing programmed gain, thus reducing gain related errors. (b) The gain-bandwidth product (determined by C1 and C2 and the preamp transconductance) increases with programmed gain, thus optimizing frequency response. (c) The input voltage noise is reduced to a value of $9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, determined mainly by the collector current and base resistance of the input devices.

The internal gain resistors, R1 and R2, are trimmed to an absolute value of 24.7 kΩ, allowing the gain to be programmed accurately with a single external resistor.

The gain equation is then

$$G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{R_G} + 1$$

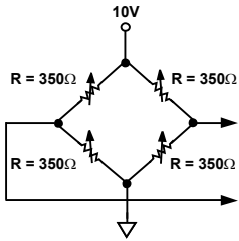
$$R_G = \frac{49.4 \text{ k}\Omega}{G - 1}$$

Make vs. Buy: a Typical Bridge Application Error Budget

The AD620 offers improved performance over “homebrew” three op amp IA designs, along with smaller size, fewer components, and $10\times$ lower supply current. In the typical application, shown in Figure 37, a gain of 100 is required to amplify a bridge output of 20 mV full-scale over the industrial temperature range of -40°C to $+85^\circ\text{C}$. Table 4 shows how to calculate the effect various error sources have on circuit accuracy.

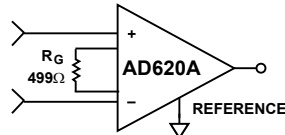
Regardless of the system in which it is being used, the AD620 provides greater accuracy at low power and price. In simple systems, absolute accuracy and drift errors are by far the most significant contributors to error. In more complex systems with an intelligent processor, an autogain/autozero cycle removes all absolute accuracy and drift errors, leaving only the resolution errors of gain, nonlinearity, and noise, thus allowing full 14-bit accuracy.

Note that for the homebrew circuit, the OP07 specifications for input voltage offset and noise have been multiplied by $\sqrt{2}$. This is because a three op amp type in-amp has two op amps at its inputs, both contributing to the overall input error.



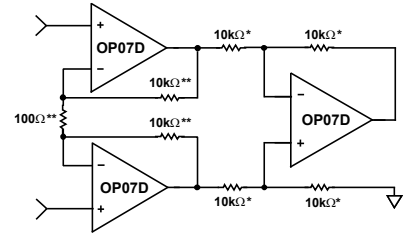
PRECISION BRIDGE TRANSDUCER

00775-0-038



AD620A MONOLITHIC INSTRUMENTATION AMPLIFIER, G = 100
SUPPLY CURRENT = 1.3mA MAX

00775-0-040



"HOMEBREW" IN-AMP, G = 100
*0.02% RESISTOR MATCH, 3ppm/°C TRACKING
**DISCRETE 1% RESISTOR, 100ppm/°C TRACKING
SUPPLY CURRENT = 15mA MAX

00775-0-041

Figure 37. Make vs. Buy

Table 4. Make vs. Buy Error Budget

Error Source	AD620 Circuit Calculation	"Homebrew" Circuit Calculation	Error, ppm of Full Scale	
			AD620	Homebrew
ABSOLUTE ACCURACY at T_A = 25°C				
Input Offset Voltage, μV	125 $\mu\text{V}/20\text{ mV}$	$(150\ \mu\text{V} \times \sqrt{2})/20\text{ mV}$	6,250	10,607
Output Offset Voltage, μV	1000 $\mu\text{V}/100\text{ mV}/20\text{ mV}$	$((150\ \mu\text{V} \times 2)/100)/20\text{ mV}$	500	150
Input Offset Current, nA	2 nA $\times 350\ \Omega/20\text{ mV}$	$(6\text{ nA} \times 350\ \Omega)/20\text{ mV}$	18	53
CMR, dB	110 dB(3.16 ppm) $\times 5\text{ V}/20\text{ mV}$	$(0.02\% \text{ Match} \times 5\text{ V})/20\text{ mV}/100$	791	500
Total Absolute Error			7,559	11,310
DRIFT TO 85°C				
Gain Drift, ppm/°C	$(50\text{ ppm} + 10\text{ ppm}) \times 60^\circ\text{C}$	100 ppm/°C Track $\times 60^\circ\text{C}$	3,600	6,000
Input Offset Voltage Drift, $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C} \times 60^\circ\text{C}/20\text{ mV}$	$(2.5\ \mu\text{V}/^\circ\text{C} \times \sqrt{2} \times 60^\circ\text{C})/20\text{ mV}$	3,000	10,607
Output Offset Voltage Drift, $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	15 $\mu\text{V}/^\circ\text{C} \times 60^\circ\text{C}/100\text{ mV}/20\text{ mV}$	$(2.5\ \mu\text{V}/^\circ\text{C} \times 2 \times 60^\circ\text{C})/100\text{ mV}/20\text{ mV}$	450	150
Total Drift Error			7,050	16,757
RESOLUTION				
Gain Nonlinearity, ppm of Full Scale	40 ppm	40 ppm	40	40
Typ 0.1 Hz to 10 Hz Voltage Noise, $\mu\text{V p-p}$	0.28 $\mu\text{V p-p}/20\text{ mV}$	$(0.38\ \mu\text{V p-p} \times \sqrt{2})/20\text{ mV}$	14	27
Total Resolution Error			54	67
Grand Total Error			14,663	28,134

G = 100, V_s = $\pm 15\text{ V}$.

(All errors are min/max and referred to input.)

AD620

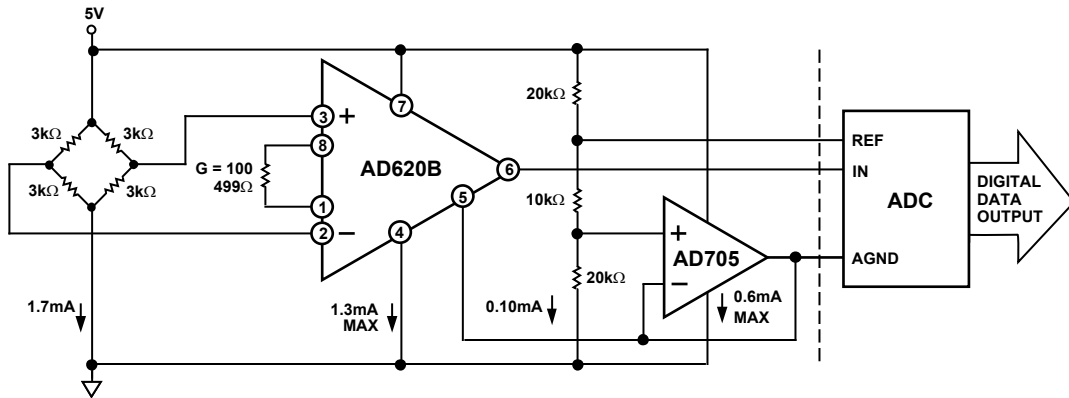


Figure 38. A Pressure Monitor Circuit that Operates on a 5 V Single Supply

00775-0-042

Pressure Measurement

Although useful in many bridge applications, such as weigh scales, the AD620 is especially suitable for higher resistance pressure sensors powered at lower voltages where small size and low power become more significant.

Figure 38 shows a 3 kΩ pressure transducer bridge powered from 5 V. In such a circuit, the bridge consumes only 1.7 mA. Adding the AD620 and a buffered voltage divider allows the signal to be conditioned for only 3.8 mA of total supply current.

Small size and low cost make the AD620 especially attractive for voltage output pressure transducers. Since it delivers low noise and drift, it also serves applications such as diagnostic noninvasive blood pressure measurement.

Medical ECG

The low current noise of the AD620 allows its use in ECG monitors (Figure 39) where high source resistances of 1 MΩ or higher are not uncommon. The AD620's low power, low supply voltage requirements, and space-saving 8-lead mini-DIP and SOIC package offerings make it an excellent choice for battery-powered data recorders.

Furthermore, the low bias currents and low current noise, coupled with the low voltage noise of the AD620, improve the dynamic range for better performance.

The value of capacitor C1 is chosen to maintain stability of the right leg drive loop. Proper safeguards, such as isolation, must be added to this circuit to protect the patient from possible harm.

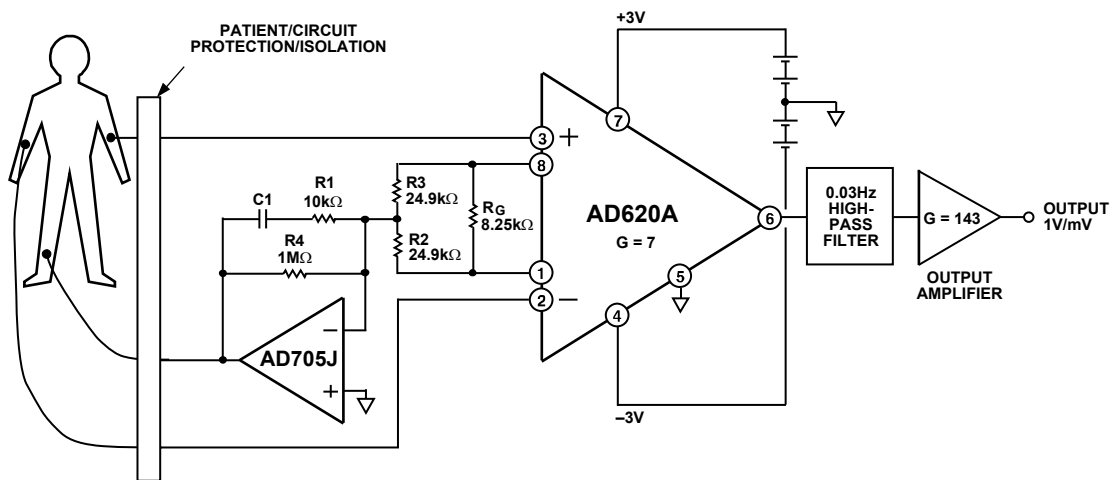


Figure 39. A Medical ECG Monitor Circuit

00775-0-043

Precision V-I Converter

The AD620, along with another op amp and two resistors, makes a precision current source (Figure 40). The op amp buffers the reference terminal to maintain good CMR. The output voltage, V_x , of the AD620 appears across R_1 , which converts it to a current. This current, less only the input bias current of the op amp, then flows out to the load.

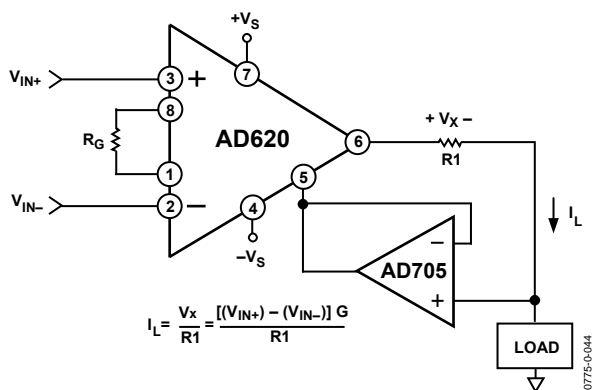


Figure 40. Precision Voltage-to-Current Converter (Operates on 1.8 mA, ± 3 V)

GAIN SELECTION

The AD620 gain is resistor-programmed by R_G , or more precisely, by whatever impedance appears between Pins 1 and 8. The AD620 is designed to offer accurate gains using 0.1% to 1% resistors. Table 5 shows required values of R_G for various gains. Note that for $G = 1$, the R_G pins are unconnected ($R_G = \infty$). For any arbitrary gain, R_G can be calculated by using the formula:

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G-1}$$

To minimize gain error, avoid high parasitic resistance in series with R_G ; to minimize gain drift, R_G should have a low TC—less than 10 ppm/ $^{\circ}$ C—for the best performance.

Table 5. Required Values of Gain Resistors

1% Std Table Value of $R_G(\Omega)$	Calculated Gain	0.1% Std Table Value of $R_G(\Omega)$	Calculated Gain
49.9 k	1.990	49.3 k	2.002
12.4 k	4.984	12.4 k	4.984
5.49 k	9.998	5.49 k	9.998
2.61 k	19.93	2.61 k	19.93
1.00 k	50.40	1.01 k	49.91
499	100.0	499	100.0
249	199.4	249	199.4
100	495.0	98.8	501.0
49.9	991.0	49.3	1,003.0

INPUT AND OUTPUT OFFSET VOLTAGE

The low errors of the AD620 are attributed to two sources, input and output errors. The output error is divided by G when referred to the input. In practice, the input errors dominate at high gains, and the output errors dominate at low gains. The total V_{OS} for a given gain is calculated as

$$\text{Total Error RTI} = \text{input error} + (\text{output error}/G)$$

$$\text{Total Error RTO} = (\text{input error} \times G) + \text{output error}$$

REFERENCE TERMINAL

The reference terminal potential defines the zero output voltage and is especially useful when the load does not share a precise ground with the rest of the system. It provides a direct means of injecting a precise offset to the output, with an allowable range of 2 V within the supply voltages. Parasitic resistance should be kept to a minimum for optimum CMR.

INPUT PROTECTION

The AD620 safely withstands an input current of ± 60 mA for several hours at room temperature. This is true for all gains and power on and off, which is useful if the signal source and amplifier are powered separately. For longer time periods, the input current should not exceed 6 mA.

For input voltages beyond the supplies, a protection resistor should be placed in series with each input to limit the current to 6 mA. These can be the same resistors as those used in the RFI filter. High values of resistance can impact the noise and AC CMRR performance of the system. Low leakage diodes (such as the BAV199) can be placed at the inputs to reduce the required protection resistance.

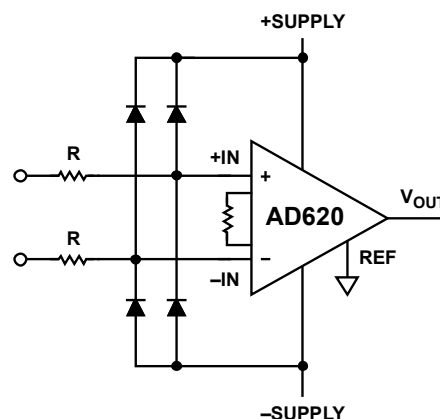


Figure 41. Diode Protection for Voltages Beyond Supply

RF INTERFERENCE

All instrumentation amplifiers rectify small out of band signals. The disturbance may appear as a small dc voltage offset. High frequency signals can be filtered with a low pass R-C network placed at the input of the instrumentation amplifier. Figure 42 demonstrates such a configuration. The filter limits the input

AD620

signal according to the following relationship:

$$FilterFreq_{DIFF} = \frac{1}{2\pi R(2C_D + C_C)}$$

$$FilterFreq_{CM} = \frac{1}{2\pi RC_C}$$

where $C_D \geq 10C_C$.

C_D affects the difference signal. C_C affects the common-mode signal. Any mismatch in $R \times C_C$ degrades the AD620 CMRR. To avoid inadvertently reducing CMRR-bandwidth performance, make sure that C_C is at least one magnitude smaller than C_D . The effect of mismatched C_C s is reduced with a larger $C_D:C_C$ ratio.

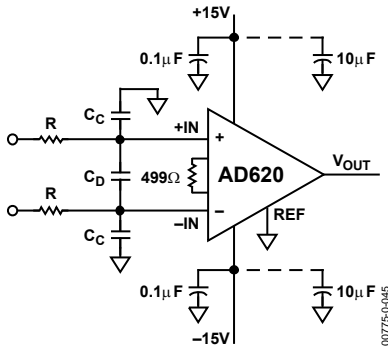


Figure 42. Circuit to Attenuate RF Interference

COMMON-MODE REJECTION

Instrumentation amplifiers, such as the AD620, offer high CMR, which is a measure of the change in output voltage when both inputs are changed by equal amounts. These specifications are usually given for a full-range input voltage change and a specified source imbalance.

For optimal CMR, the reference terminal should be tied to a low impedance point, and differences in capacitance and resistance should be kept to a minimum between the two inputs. In many applications, shielded cables are used to minimize noise; for best CMR over frequency, the shield should be properly driven. Figure 43 and Figure 44 show active data guards that are configured to improve ac common-mode rejections by “bootstrapping” the capacitances of input cable shields, thus minimizing the capacitance mismatch between the inputs.

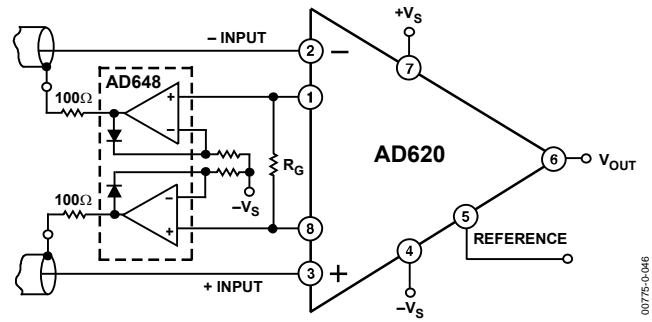


Figure 43. Differential Shield Driver

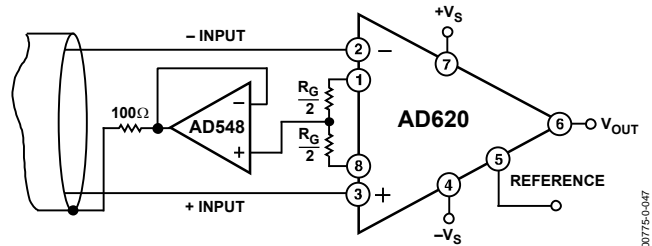


Figure 44. Common-Mode Shield Driver

GROUNDING

Since the AD620 output voltage is developed with respect to the potential on the reference terminal, it can solve many grounding problems by simply tying the REF pin to the appropriate “local ground.”

To isolate low level analog signals from a noisy digital environment, many data-acquisition components have separate analog and digital ground pins (Figure 45). It would be convenient to use a single ground line; however, current through ground wires and PC runs of the circuit card can cause hundreds of millivolts of error. Therefore, separate ground returns should be provided to minimize the current flow from the sensitive points to the system ground. These ground returns must be tied together at some point, usually best at the ADC package shown in Figure 45.

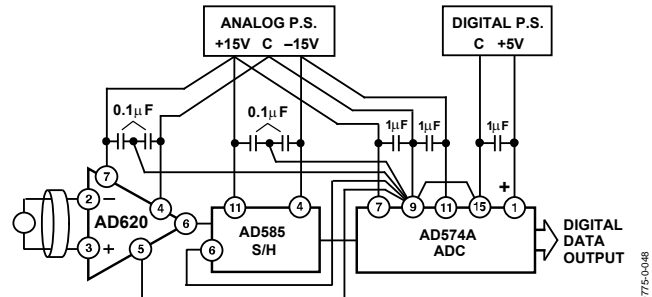


Figure 45. Basic Grounding Practice

GROUND RETURNS FOR INPUT BIAS CURRENTS

Input bias currents are those currents necessary to bias the input transistors of an amplifier. There must be a direct return path for these currents. Therefore, when amplifying “floating” input sources, such as transformers or ac-coupled sources, there must be a dc path from each input to ground, as shown in Figure 46, Figure 47, and Figure 48. Refer to *A Designer’s Guide to Instrumentation Amplifiers* (free from Analog Devices) for more information regarding in-amp applications.

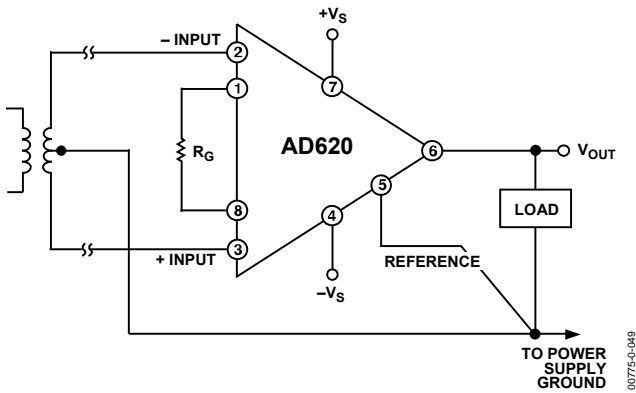


Figure 46. Ground Returns for Bias Currents with Transformer-Coupled Inputs

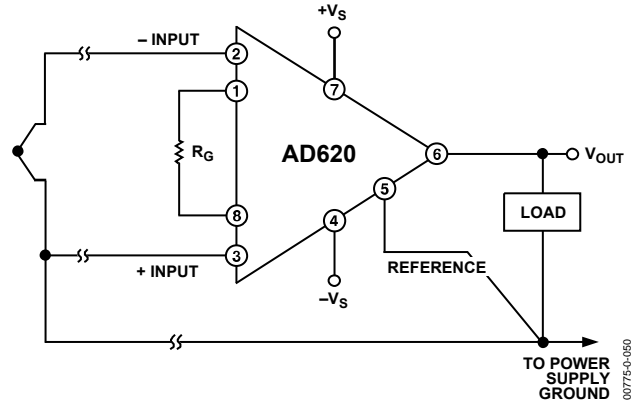


Figure 47. Ground Returns for Bias Currents with Thermocouple Inputs

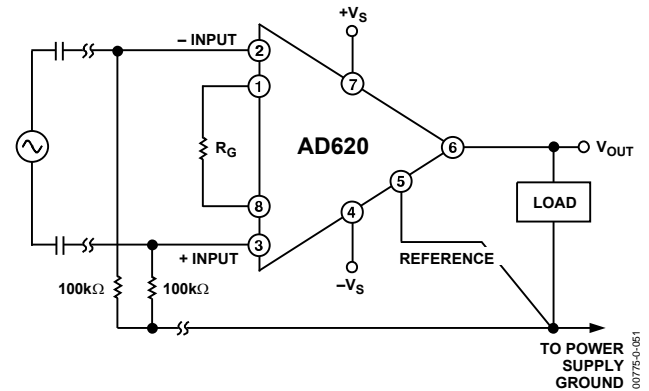


Figure 48. Ground Returns for Bias Currents with AC-Coupled Inputs

AD620

AD620ACHIPS INFORMATION

Die size: 1803 μm \times 3175 μm

Die thickness: 483 μm

Bond Pad Metal: 1% Copper Doped Aluminum

To minimize gain errors introduced by the bond wires, use Kelvin connections between the chip and the gain resistor, R_G , by connecting Pad 1A and Pad 1B in parallel to one end of R_G and Pad 8A and Pad 8B in parallel to the other end of R_G . For unity gain applications where R_G is not required, Pad 1A and Pad 1B must be bonded together as well as the Pad 8A and Pad 8B.

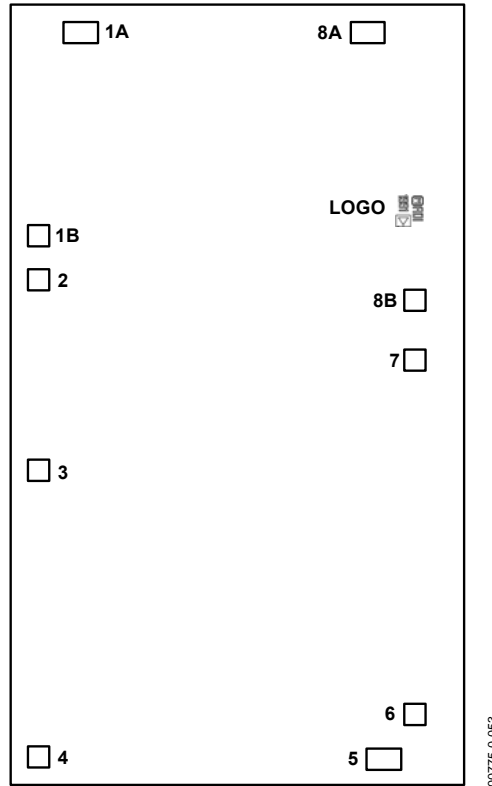


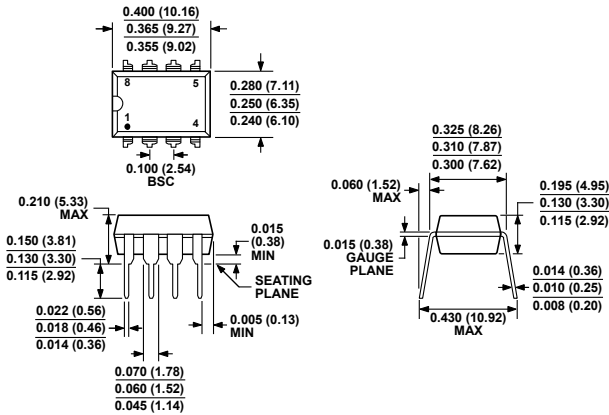
Figure 49. Bond Pad Diagram

Table 6. Bond Pad Information

Pad No.	Mnemonic	Pad Coordinates ¹	
		X (μm)	Y (μm)
1A	R_G	-623	+1424
1B	R_G	-789	+628
2	-IN	-790	+453
3	+IN	-790	-294
4	$-V_S$	-788	-1419
5	REF	+570	-1429
6	OUTPUT	+693	-1254
7	$+V_S$	+693	+139
8A	R_G	+505	+1423
8B	R_G	+693	+372

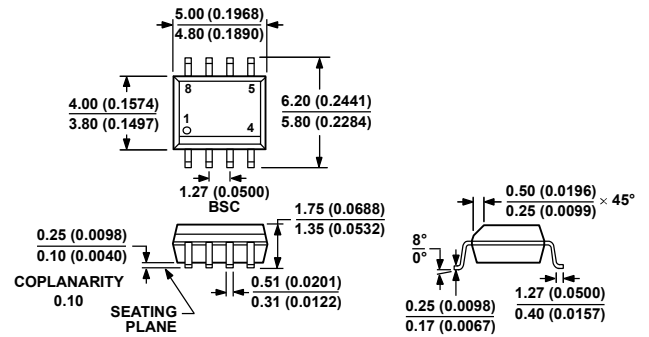
¹ The pad coordinates indicate the center of each pad, referenced to the center of the die. The die orientation is indicated by the logo, as shown in Figure 49.

OUTLINE DIMENSIONS



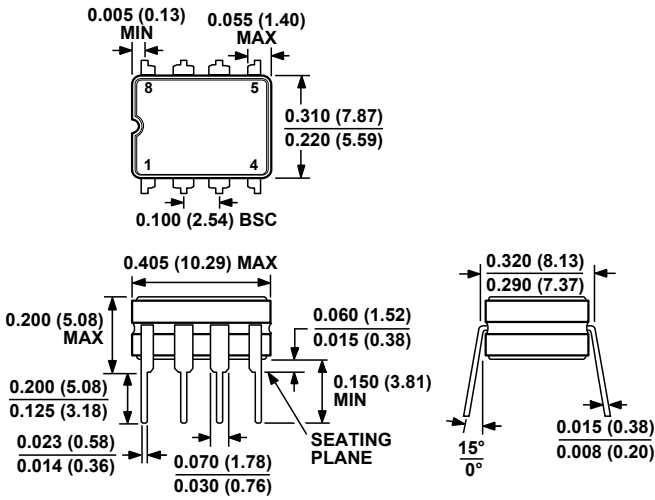
COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-001
 CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN. CORNER LEADS MAY BE CONFIGURED AS WHOLE OR HALF LEADS.

Figure 50. 8-Lead Plastic Dual In-Line Package [PDIP] Narrow Body (N-8).
 Dimensions shown in inches and (millimeters)



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-012-AA
 CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS; INCH DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 52. 8-Lead Standard Small Outline Package [SOIC_N] Narrow Body (R-8)
 Dimensions shown in millimeters and (inches)



CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 51. 8-Lead Ceramic Dual In-Line Package [CERDIP] (Q-8)
 Dimensions shown in inches and (millimeters)

AD620

ORDERING GUIDE

Model ¹	Temperature Range	Package Description	Package Option
AD620AN	-40°C to +85°C	8-Lead PDIP	N-8
AD620ANZ	-40°C to +85°C	8-Lead PDIP	N-8
AD620BN	-40°C to +85°C	8-Lead PDIP	N-8
AD620BNZ	-40°C to +85°C	8-Lead PDIP	N-8
AD620AR	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N	R-8
AD620ARZ	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N	R-8
AD620AR-REEL	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N, 13" Tape and Reel	R-8
AD620ARZ-REEL	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N, 13" Tape and Reel	R-8
AD620AR-REEL7	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N, 7" Tape and Reel	R-8
AD620ARZ-REEL7	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N, 7" Tape and Reel	R-8
AD620BR	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N	R-8
AD620BRZ	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N	R-8
AD620BR-REEL	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N, 13" Tape and Reel	R-8
AD620BRZ-RL	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N, 13" Tape and Reel	R-8
AD620BR-REEL7	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N, 7" Tape and Reel	R-8
AD620BRZ-R7	-40°C to +85°C	8-Lead SOIC_N, 7" Tape and Reel	R-8
AD620ACHIPS	-40°C to +85°C	Die Form	
AD620SQ/883B	-55°C to +125°C	8-Lead CERDIP	Q-8

¹ Z = RoHS Compliant Part.

Varvtal [RPM]	Vridmoment [Nm]	Hästkrafter [hk]	Börvärde [RPM]	Styrsignal	Servosignal	Samplingstid [ms]	Servosignal vid manuell bromsning
0	0	0	2896	750	1800	123	1792
17	0,05	0	2896	750	1800	152	1792
29	0,18	0	2896	750	1800	124	1792
116	0,09	0	2896	750	1800	153	1792
177	0,18	0	2896	750	1800	124	1792
304	0,23	0,01	2896	750	1800	152	1792
393	0,26	0,01	2896	750	1800	124	1792
536	0,29	0,02	2896	750	1800	153	1792
636	0,31	0,03	2896	750	1800	124	1792
793	0,33	0,04	2896	750	1800	155	1792
903	0,35	0,04	2896	750	1800	124	1792
1062	0,39	0,06	2896	750	1800	153	1792
1173	0,43	0,07	2896	750	1800	124	1792
1337	0,44	0,08	2896	750	1800	153	1792
1451	0,47	0,1	2896	750	1800	125	1792
1613	0,48	0,11	2896	750	1800	154	1792
1726	0,49	0,12	2896	750	1800	124	1792
1885	0,52	0,14	2896	727,95	1784	154	1792
1996	0,53	0,15	2896	750	1800	126	1792
2146	0,56	0,17	2896	637,5	1724	153	1792
2251	0,57	0,18	2896	612,75	1708	128	1792
2377	0,59	0,2	2896	468,3	1612	155	1792
2466	0,53	0,19	2896	394,8	1562	125	1792
2567	0,51	0,19	2896	239,85	1459	155	1792
2638	0,52	0,2	2896	142,95	1394	125	1792
2711	0,61	0,24	2896	139,78	1392	157	1792
2762	0,64	0,25	2896	137,62	1391	127	1792
2800	0,66	0,26	2896	135,97	1390	157	1792
2827	0,67	0,27	2896	134,8	1389	126	1792
2854	0,69	0,28	2896	133,35	1388	158	1792
2873	0,68	0,28	2896	132,26	1388	130	1792
2885	0,67	0,27	2896	131,54	1387	158	1792
2894	0,66	0,27	2896	130,93	1386	128	1792
2907	0,69	0,28	2896	129,91	1386	156	1792
2916	0,69	0,29	2896	129,07	1386	126	1792
2920	0,69	0,28	2896	128,53	1385	157	1792
2923	0,69	0,29	2896	128,04	1385	126	1792
2923	0,71	0,3	2896	127,76	1384	157	1792
2923	0,68	0,28	2896	127,47	1384	126	1792
2927	0,7	0,29	2896	126,87	1384	156	1792
2930	0,69	0,29	2896	126,3	1384	126	1792
2928	0,7	0,29	2896	126,1	1384	160	1792
2927	0,7	0,29	2896	125,85	1383	127	1792
2930	0,68	0,28	2896	125,28	1383	157	1792
2932	0,69	0,29	2896	124,76	1382	127	1792
2928	0,71	0,29	2896	124,71	1382	157	1792
2925	0,7	0,29	2896	124,61	1382	126	1792
2926	0,71	0,3	2896	124,23	1382	156	1792
2927	0,71	0,3	2896	123,83	1382	127	1792
2928	0,69	0,29	2896	123,43	1382	157	1792

2928	0,69	0,29	2896	123,09	1382	127	1792
2927	0,71	0,29	2896	122,84	1381	157	1792
2926	0,69	0,29	2896	122,59	1381	129	1792
2928	0,7	0,29	2896	122,11	1381	156	1792
2930	0,7	0,29	2896	121,62	1380	126	1792
2933	0,69	0,29	2896	121,02	1380	156	1792
2935	0,69	0,29	2896	120,47	1380	127	1792
2933	0,69	0,29	2896	120,22	1380	157	1792
2932	0,69	0,29	2896	119,91	1379	127	1792
2931	0,69	0,29	2896	119,62	1379	158	1792
2931	0,69	0,29	2896	119,25	1379	127	1792
2932	0,7	0,29	2896	118,8	1378	156	1792
2933	0,7	0,29	2896	118,34	1378	130	1792
2930	0,7	0,29	2896	118,19	1378	156	1792
2928	0,7	0,29	2896	118	1378	126	1792
2927	0,7	0,29	2896	117,74	1378	157	1792
2926	0,7	0,29	2896	117,5	1378	126	1792
2927	0,72	0,3	2896	117,1	1378	156	1792
2928	0,72	0,3	2896	116,7	1377	126	1792
2932	0,71	0,3	2896	116,04	1377	156	1792
2935	0,71	0,3	2896	115,42	1376	126	1792
2935	0,72	0,3	2896	115,01	1376	157	1792
2935	0,71	0,3	2896	114,6	1376	127	1792
2933	0,75	0,31	2896	114,35	1376	160	1792
2932	0,74	0,31	2896	114,04	1376	127	1792
2929	0,73	0,3	2896	113,91	1375	157	1792
2926	0,73	0,31	2896	113,8	1375	127	1792
2930	0,74	0,31	2896	113,16	1375	156	1792
2933	0,74	0,31	2896	112,57	1374	127	1792
2931	0,74	0,31	2896	112,34	1374	158	1792
2930	0,75	0,31	2896	112,05	1374	128	1792
2932	0,73	0,31	2896	111,53	1374	158	1792
2933	0,73	0,3	2896	111,08	1374	128	1792
2930	0,74	0,31	2896	110,93	1373	158	1792
2927	0,73	0,3	2896	110,81	1373	129	1792
2934	0,71	0,3	2896	109,92	1372	157	1792
2939	0,72	0,3	2896	109,12	1372	127	1792
2935	0,73	0,31	2896	108,99	1372	158	1792
2932	0,72	0,3	2896	108,82	1372	127	1792
2929	0,72	0,3	2896	108,69	1372	157	1792
2926	0,74	0,31	2896	108,58	1372	126	1792
2930	0,74	0,31	2896	107,95	1371	156	1792
2933	0,74	0,31	2896	107,35	1371	128	1792
2932	0,74	0,31	2896	107,04	1371	157	1792
2932	0,73	0,3	2896	106,66	1370	129	1792
2932	0,75	0,31	2896	106,28	1370	157	1792
2932	0,74	0,31	2896	105,91	1370	127	1792
2933	0,73	0,3	2896	105,45	1370	157	1792
2934	0,72	0,3	2896	104,98	1369	127	1792
2934	0,73	0,31	2896	104,58	1369	156	1792
2934	0,74	0,31	2896	104,18	1369	126	1792
2931	0,74	0,31	2896	104,02	1369	157	1792
2929	0,74	0,31	2896	103,82	1368	126	1792
2931	0,75	0,31	2896	103,31	1368	157	1792
2932	0,72	0,3	2896	102,86	1368	127	1792
2932	0,7	0,29	2896	102,48	1368	160	1792

2932	0,73	0,31	2896	102,1	1368	127	1792
2932	0,74	0,31	2896	101,73	1367	157	1792
2932	0,73	0,3	2896	101,35	1367	127	1792
2932	0,74	0,31	2896	100,97	1366	157	1792
2932	0,76	0,32	2896	100,59	1366	126	1792
2933	0,73	0,3	2896	100,13	1366	157	1792
2934	0,76	0,32	2896	99,67	1366	127	1792
2930	0,75	0,31	2896	99,59	1366	157	1792
2927	0,75	0,31	2896	99,47	1366	126	1792
2931	0,74	0,31	2896	98,83	1365	156	1792
2934	0,76	0,32	2896	98,22	1365	130	1792
2934	0,74	0,31	2896	97,82	1364	158	1792
2934	0,73	0,31	2896	97,42	1364	127	1792
2935	0,73	0,31	2896	96,94	1364	157	1792
2935	0,76	0,32	2896	96,53	1364	128	1792
2935	0,75	0,31	2896	96,12	1364	158	1792
2935	0,74	0,31	2896	95,71	1363	128	1792
2937	0,76	0,32	2896	95,14	1363	156	1792
2938	0,75	0,31	2896	94,63	1362	127	1792
2936	0,74	0,31	2896	94,35	1362	157	1792
2935	0,76	0,32	2896	94,01	1362	126	1792
2933	0,77	0,32	2896	93,76	1362	160	1792
2932	0,76	0,32	2896	93,45	1362	128	1792
2933	0,8	0,33	2896	92,99	1361	157	1792
2934	0,8	0,33	2896	92,53	1361	127	1792
2933	0,78	0,33	2896	92,21	1361	156	1792
2932	0,77	0,32	2896	91,9	1360	128	1792
2932	0,81	0,34	2896	91,52	1360	157	1792
2932	0,8	0,33	2896	91,14	1360	127	1792
2932	0,82	0,34	2896	90,76	1360	157	1792
2932	0,84	0,35	2896	90,39	1360	126	1792
2932	0,83	0,35	2896	90,01	1360	158	1792
2932	0,81	0,34	2896	89,63	1359	126	1792
2931	0,84	0,35	2896	89,33	1359	157	1792
2931	0,86	0,36	2896	88,97	1358	127	1792
2931	0,87	0,36	2896	88,6	1358	158	1792
2931	0,9	0,37	2896	88,23	1358	127	1792
2929	0,89	0,37	2896	88,02	1358	157	1792
2928	0,89	0,37	2896	87,76	1358	127	1792
2935	0,92	0,38	2896	86,86	1357	157	1792
2940	0,94	0,39	2896	86,05	1357	127	1792
2937	0,92	0,39	2896	85,83	1356	157	1792
2935	0,94	0,39	2896	85,56	1356	129	1792
2930	0,99	0,41	2896	85,55	1356	157	1792
2926	1,01	0,42	2896	85,51	1356	126	1792
2925	1,02	0,43	2896	85,28	1356	160	1792
2925	1,04	0,43	2896	84,98	1356	130	1792
2928	1,01	0,42	2896	84,43	1356	159	1792
2931	1,01	0,42	2896	83,85	1355	129	1792
2927	1,04	0,43	2896	83,81	1355	159	1792
2924	1,08	0,45	2896	83,72	1355	129	1792
2925	1,36	0,57	2896	83,35	1355	160	1792
2925	1,95	0,81	2896	83,04	1355	130	1792
2919	2,41	1	2896	83,22	1355	163	1792
2914	2,27	0,94	2896	83,38	1355	129	1792
2909	2,22	0,92	2896	83,6	1355	159	1792

2905	1,99	0,82	2896	83,78	1355	129	1792
2899	2,03	0,84	2896	84,17	1356	160	1792
2895	1,97	0,81	2896	84,46	1356	129	1792
2894	2,13	0,88	2896	84,55	1356	160	1792
2893	1,95	0,8	2896	84,65	1356	129	1792
2894	2,16	0,89	2896	84,6	1356	159	1792
2895	1,99	0,82	2896	84,55	1356	129	1792
2894	2	0,83	2896	84,64	1356	160	1792
2893	1,95	0,8	2896	84,74	1356	132	1792
2892	2,1	0,87	2896	84,85	1356	159	1792
2892	1,9	0,78	2896	84,89	1356	129	1792
2894	2,13	0,88	2896	84,77	1356	161	1792
2895	1,98	0,82	2896	84,71	1356	129	1792
2893	1,97	0,81	2896	84,88	1356	160	1792
2891	1,94	0,8	2896	85,08	1356	130	1792
2890	2,05	0,84	2896	85,21	1356	160	1792
2889	1,89	0,78	2896	85,35	1356	129	1792
2889	2,12	0,87	2896	85,43	1356	160	1792
2889	1,96	0,81	2896	85,5	1356	129	1792
2890	1,98	0,82	2896	85,49	1356	163	1792
2891	1,91	0,79	2896	85,48	1356	129	1792
2893	2,07	0,85	2896	85,37	1356	159	1792
2894	2,03	0,83	2896	85,32	1356	129	1792
2897	2,11	0,87	2896	85,1	1356	159	1792
2899	1,89	0,78	2896	84,93	1356	129	1792
2894	1,96	0,81	2896	85,3	1356	160	1792
2890	1,83	0,75	2896	85,64	1356	129	1792
2891	2,08	0,86	2896	85,62	1356	160	1792
2892	1,86	0,77	2896	85,6	1356	130	1792
2892	2,12	0,87	2896	85,64	1356	160	1792
2892	1,84	0,76	2896	85,68	1356	132	1792
2890	2,02	0,83	2896	85,88	1356	161	1792
2889	1,83	0,75	2896	86,03	1357	129	1792
2890	2,08	0,86	2896	86,02	1357	161	1792
2891	1,86	0,77	2896	86	1357	129	1792
2896	2,06	0,85	2896	85,65	1356	161	1792
2900	1,79	0,74	2896	85,33	1356	129	1792
2900	2,03	0,84	2896	85,29	1356	159	1792
2900	1,79	0,74	2896	85,25	1356	129	1792
2899	2,05	0,85	2896	85,28	1356	160	1792
2898	1,85	0,76	2896	85,33	1356	129	1792
2898	1,98	0,82	2896	85,31	1356	163	1792
2898	1,71	0,7	2896	85,29	1356	130	1792
2898	2,01	0,83	2896	85,27	1356	160	1792
2898	1,79	0,74	2896	85,25	1356	129	1792
2895	1,95	0,81	2896	85,47	1356	161	1792
2893	1,69	0,7	2896	85,64	1356	130	1792
2895	1,81	0,75	2896	85,51	1356	160	1792
2896	1,79	0,74	2896	85,44	1356	129	1792
2897	1,95	0,81	2896	85,36	1356	161	1792
2898	1,95	0,8	2896	85,27	1356	129	1792
2897	1,78	0,73	2896	85,33	1356	161	1792
2896	1,81	0,74	2896	85,4	1356	132	1792
2901	1,67	0,69	2896	85	1356	160	1792
2905	1,89	0,78	2896	84,62	1356	129	1792
2905	1,78	0,73	2896	84,53	1356	159	1792

2905	1,98	0,82	2896	84,43	1356	129	1792
2903	1,66	0,68	2896	84,5	1356	160	1792
2902	1,9	0,78	2896	84,51	1356	130	1792
2901	1,67	0,69	2896	84,52	1356	160	1792
2900	1,91	0,79	2896	84,55	1356	129	1792
2898	1,63	0,67	2896	84,67	1356	164	1792
2900	1,73	0,71	2896	84,49	1356	249	1792
2901	1,66	0,69	2896	84,37	1356	162	1792
2900	1,83	0,75	2896	84,39	1356	129	1792
2899	1,7	0,7	2896	84,43	1356	160	1792
2899	1,88	0,77	2896	84,4	1356	129	1792
2899	1,63	0,67	2896	84,37	1356	159	1792
2902	1,87	0,77	2896	84,1	1356	129	1792
2904	1,63	0,67	2896	83,87	1355	159	1792
2904	1,84	0,76	2896	83,79	1355	129	1792
2904	1,57	0,65	2896	83,71	1355	160	1792
2903	1,72	0,71	2896	83,7	1355	130	1792
2902	1,69	0,7	2896	83,71	1355	161	1792
2900	1,79	0,74	2896	83,81	1355	132	1792
2899	1,85	0,76	2896	83,85	1355	161	1792
2899	1,57	0,65	2896	83,81	1355	130	1792
2899	1,77	0,73	2896	83,78	1355	161	1792
2901	1,54	0,64	2896	83,59	1355	130	1792
2902	1,86	0,77	2896	83,46	1355	161	1792
2904	1,54	0,64	2896	83,23	1355	130	1792
2905	1,77	0,73	2896	83,07	1355	159	1792
2905	1,57	0,65	2896	82,97	1354	129	1792
2905	1,81	0,75	2896	82,88	1354	159	1792
2905	1,76	0,73	2896	82,78	1354	132	1792
2905	1,67	0,69	2896	82,69	1354	160	1792
2905	1,7	0,7	2896	82,6	1354	130	1792
2905	1,51	0,62	2896	82,5	1354	161	1792
2907	1,88	0,78	2896	82,25	1354	131	1792
2908	1,53	0,64	2896	82,05	1354	160	1792
2904	1,8	0,74	2896	82,25	1354	130	1792
2901	1,53	0,63	2896	82,4	1354	161	1792
2902	1,85	0,77	2896	82,27	1354	131	1792
2903	1,72	0,71	2896	82,13	1354	161	1792
2894	1,61	0,66	2896	82,78	1354	130	1792
2888	1,18	0,49	2896	83,28	1355	163	1792
2864	1,01	0,41	2896	85,3	1356	130	1792
2848	0,94	0,38	2896	86,92	1357	161	1792
2818	0,89	0,36	2896	89,84	1359	128	1792
2797	0,87	0,34	2896	92,35	1361	157	1792
2763	0,85	0,34	2896	96,13	1364	127	1792
2739	0,82	0,32	2896	99,46	1366	158	1792
2705	0,84	0,32	2896	103,84	1368	127	1792
2681	0,81	0,31	2896	107,78	1371	157	1792
2647	0,79	0,3	2896	112,77	1374	127	1792
2623	0,79	0,29	2896	117,32	1378	158	1792
2592	0,81	0,3	2896	122,68	1381	130	1792
2571	0,85	0,31	2896	127,56	1384	157	1792
2540	0,85	0,31	2896	133,47	1388	127	1792
2518	0,81	0,29	2896	138,98	1392	158	1792
2484	0,8	0,28	2896	145,69	1396	127	1792
2460	0,78	0,27	2896	151,94	1400	158	1792

2431	0,79	0,27	2896	158,86	1405	126	1792
2411	0,79	0,27	2896	165,35	1410	158	1792
2381	0,79	0,27	2896	172,86	1414	127	1792
2360	0,77	0,26	2896	179,96	1419	158	1792
2332	0,74	0,24	2896	187,84	1424	127	1792
2312	0,71	0,23	2896	195,37	1430	161	1792
2281	0,69	0,23	2896	204	1435	127	1792
2259	0,67	0,22	2896	556,65	1670	156	1792
2233	0,64	0,2	2896	750	1800	125	1792
2215	0,64	0,2	2896	750	1800	155	1792
2192	0,58	0,18	2896	750	1800	123	1792
2176	0,55	0,17	2896	750	1800	154	1792
2147	0,54	0,17	2896	750	1800	124	1792
2126	0,52	0,16	2896	750	1800	155	1792
2101	0,52	0,16	2896	750	1800	125	1792
2083	0,52	0,15	2896	750	1800	156	1792
2064	0,5	0,15	2896	750	1800	125	1792
2050	0,5	0,14	2896	750	1800	154	1792
2023	0,49	0,14	2896	750	1800	124	1792
2004	0,49	0,14	2896	750	1800	154	1792
1986	0,49	0,14	2896	750	1800	123	1792
1974	0,48	0,13	2896	750	1800	154	1792
1951	0,47	0,13	2896	750	1800	124	1792
1935	0,47	0,13	2896	750	1800	154	1792
1911	0,46	0,13	2896	750	1800	124	1792
1894	0,45	0,12	2896	750	1800	152	1792
1875	0,45	0,12	2896	750	1800	127	1792
1861	0,45	0,12	2896	750	1800	155	1792
1841	0,46	0,12	2896	750	1800	125	1792
1827	0,46	0,12	2896	750	1800	154	1792
1805	0,47	0,12	2896	750	1800	123	1792
1790	0,46	0,12	2896	750	1800	153	1792
1770	0,46	0,12	2896	750	1800	124	1792
1756	0,46	0,12	2896	750	1800	154	1792
1736	0,46	0,11	2896	750	1800	124	1792
1722	0,46	0,11	2896	750	1800	153	1792
1703	0,46	0,11	2896	750	1800	124	1792
1690	0,46	0,11	2896	750	1800	156	1792
1674	0,45	0,11	2896	750	1800	124	1792
1662	0,44	0,1	2896	750	1800	153	1792
1643	0,44	0,1	2896	750	1800	123	1792
1630	0,44	0,1	2896	750	1800	154	1792
1610	0,44	0,1	2896	750	1800	124	1792
1596	0,44	0,1	2896	750	1800	153	1792
1577	0,43	0,1	2896	750	1800	124	1792
1564	0,43	0,1	2896	750	1800	153	1792
1546	0,43	0,09	2896	750	1800	124	1792
1533	0,42	0,09	2896	750	1800	157	1792
1516	0,42	0,09	2896	750	1800	125	1792
1504	0,42	0,09	2896	750	1800	153	1792
1488	0,41	0,09	2896	750	1800	124	1792
1476	0,41	0,09	2896	750	1800	154	1792
1456	0,4	0,08	2896	750	1800	124	1792
1442	0,4	0,08	2896	750	1800	154	1792
1425	0,4	0,08	2896	750	1800	124	1792
1413	0,4	0,08	2896	750	1800	153	1792

1399	0,4	0,08	2896	750	1800	124	1792
1390	0,4	0,08	2896	750	1800	153	1792
1373	0,4	0,08	2896	750	1800	126	1792
1361	0,4	0,08	2896	750	1800	153	1792
1345	0,39	0,07	2896	750	1800	124	1792
1334	0,39	0,07	2896	750	1800	154	1792
1316	0,38	0,07	2896	750	1800	125	1792
1304	0,38	0,07	2896	750	1800	154	1792
1289	0,38	0,07	2896	750	1800	124	1792
1279	0,37	0,07	2896	750	1800	153	1792
1264	0,38	0,07	2896	750	1800	124	1792
1254	0,37	0,07	2896	750	1800	153	1792
1239	0,36	0,06	2896	750	1800	124	1792
1228	0,36	0,06	2896	750	1800	156	1792
1213	0,36	0,06	2896	750	1800	124	1792
1202	0,35	0,06	2896	750	1800	154	1792
1188	0,35	0,06	2896	750	1800	124	1792
1178	0,35	0,06	2896	750	1800	154	1792
1163	0,35	0,06	2896	750	1800	124	1792
1152	0,34	0,06	2896	750	1800	153	1792
1139	0,34	0,06	2896	750	1800	125	1792
1130	0,34	0,06	2896	750	1800	154	1792
1116	0,34	0,05	2896	750	1800	124	1792
1106	0,34	0,05	2896	750	1800	155	1792
1093	0,33	0,05	2896	750	1800	124	1792
1084	0,34	0,05	2896	750	1800	153	1792
1068	0,34	0,05	2896	750	1800	124	1792
1057	0,34	0,05	2896	750	1800	154	1792
1044	0,34	0,05	2896	750	1800	124	1792
1035	0,33	0,05	2896	750	1800	152	1792
1024	0,33	0,05	2896	750	1800	124	1792
1016	0,33	0,05	2896	750	1800	153	1792
1001	0,32	0,05	2896	750	1800	124	1792
990	0,31	0,04	2896	750	1800	152	1792
978	0,31	0,04	2896	750	1800	126	1792
969	0,3	0,04	2896	750	1800	154	1792
955	0,3	0,04	2896	750	1800	124	1792
946	0,3	0,04	2896	750	1800	154	1792
935	0,3	0,04	2896	750	1800	123	1792
927	0,3	0,04	2896	750	1800	154	1792
914	0,29	0,04	2896	750	1800	123	1792
905	0,29	0,04	2896	750	1800	153	1792
894	0,29	0,04	2896	750	1800	123	1792
886	0,29	0,04	2896	750	1800	153	1792
874	0,29	0,04	2896	750	1800	124	1792
866	0,29	0,04	2896	750	1800	156	1792
856	0,28	0,03	2896	750	1800	124	1792
849	0,28	0,03	2896	750	1800	153	1792
837	0,28	0,03	2896	750	1800	124	1792
828	0,28	0,03	2896	750	1800	155	1792
816	0,28	0,03	2896	750	1800	124	1792
807	0,28	0,03	2896	750	1800	154	1792
796	0,28	0,03	2896	750	1800	124	1792
788	0,28	0,03	2896	750	1800	152	1792
776	0,28	0,03	2896	750	1800	124	1792
767	0,28	0,03	2896	750	1800	153	1792

755	0,28	0,03	2896	750	1800	126	1792
747	0,27	0,03	2896	750	1800	153	1792
740	0,27	0,03	2896	750	1800	124	1792
735	0,27	0,03	2896	750	1800	153	1792
722	0,27	0,03	2896	750	1800	124	1792
713	0,26	0,03	2896	750	1800	152	1792
704	0,26	0,03	2896	750	1800	123	1792
698	0,26	0,03	2896	750	1800	153	1792
686	0,26	0,03	2896	750	1800	123	1792
678	0,25	0,02	2896	750	1800	154	1792
670	0,26	0,02	2896	750	1800	124	1792
664	0,25	0,02	2896	750	1800	155	1792
652	0,25	0,02	2896	750	1800	124	1792
644	0,25	0,02	2896	750	1800	154	1792
634	0,25	0,02	2896	750	1800	123	1792
627	0,25	0,02	2896	750	1800	152	1792
619	0,25	0,02	2896	750	1800	124	1792
613	0,24	0,02	2896	750	1800	153	1792
602	0,24	0,02	2896	750	1800	124	1792
594	0,23	0,02	2896	750	1800	152	1792
585	0,23	0,02	2896	750	1800	123	1792
579	0,23	0,02	2896	750	1800	154	1792
571	0,23	0,02	2896	750	1800	126	1792
565	0,23	0,02	2896	750	1800	153	1792
555	0,24	0,02	2896	750	1800	124	1792
548	0,23	0,02	2896	750	1800	154	1792
538	0,23	0,02	2896	750	1800	124	1792
531	0,22	0,02	2896	750	1800	154	1792
522	0,23	0,02	2896	750	1800	124	1792
516	0,22	0,02	2896	750	1800	152	1792
507	0,22	0,02	2896	750	1800	124	1792
501	0,22	0,02	2896	750	1800	154	1792
493	0,22	0,02	2896	750	1800	124	1792
487	0,23	0,02	2896	750	1800	156	1792
478	0,21	0,01	2896	750	1800	125	1792
472	0,21	0,01	2896	750	1800	153	1792
464	0,22	0,01	2896	750	1800	124	1792
458	0,21	0,01	2896	750	1800	153	1792
448	0,22	0,01	2896	750	1800	124	1792
441	0,2	0,01	2896	750	1800	153	1792
435	0,21	0,01	2896	750	1800	124	1792
431	0,21	0,01	2896	750	1800	153	1792
422	0,2	0,01	2896	750	1800	124	1792
416	0,21	0,01	2896	750	1800	152	1792
408	0,19	0,01	2896	750	1800	120	1792
402	0,19	0,01	2896	750	1800	154	1792
395	0,18	0,01	2896	750	1800	124	1792
390	0,18	0,01	2896	750	1800	154	1792
381	0,18	0,01	2896	750	1800	124	1792
374	0,2	0,01	2896	750	1800	153	1792
368	0,2	0,01	2896	750	1800	124	1792
364	0,2	0,01	2896	750	1800	153	1792
356	0,17	0,01	2896	750	1800	124	1792
350	0,16	0,01	2896	750	1800	153	1792
345	0,2	0,01	2896	750	1800	127	1792
342	0,2	0,01	2896	750	1800	154	1792

333	0,2	0,01	2896	750	1800	124	1792
327	0,14	0,01	2896	750	1800	154	1792
319	0,14	0,01	2896	750	1800	125	1792
313	0,18	0,01	2896	750	1800	153	1792
307	0,16	0,01	2896	750	1800	125	1792
303	0,14	0,01	2896	750	1800	153	1792
295	0,19	0,01	2896	750	1800	124	1792
289	0,17	0,01	2896	750	1800	153	1792
284	0,17	0,01	2896	750	1800	125	1792
280	0,2	0,01	2896	750	1800	156	1792
273	0,17	0,01	2896	750	1800	124	1792
268	0,18	0,01	2896	750	1800	154	1792
262	0,19	0,01	2896	750	1800	125	1792
258	0,15	0,01	2896	750	1800	152	1792
251	0,19	0,01	2896	750	1800	125	1792
246	0,12	0	2896	750	1800	154	1792
241	0,19	0,01	2896	750	1800	124	1792
237	0,11	0	2896	750	1800	153	1792
230	0,19	0,01	2896	750	1800	124	1792
225	0,1	0	2896	750	1800	154	1792
220	0,1	0	2896	750	1800	127	1792
217	0,06	0	2896	750	1800	153	1792
210	0,17	0,01	2896	750	1800	123	1792
205	0,07	0	2896	750	1800	152	1792
200	0,19	0,01	2896	750	1800	124	1792
197	0,05	0	2896	750	1800	154	1792
191	0,16	0	2896	750	1800	124	1792
187	0,05	0	2896	750	1800	152	1792
182	0,06	0	2896	750	1800	124	1792
179	0,16	0	2896	750	1800	153	1792
175	0,07	0	2896	750	1800	124	1792
172	0,16	0	2896	750	1800	155	1792
164	0,05	0	2896	750	1800	125	1792
158	0	0	2896	750	1800	153	1792
155	0,2	0	2896	750	1800	125	1792
152	0,05	0	2896	750	1800	154	1792
145	0,01	0	2896	750	1800	124	1792
140	0,19	0	2896	750	1800	152	1792
137	0,12	0	2896	750	1800	124	1792
135	0	0	2896	750	1800	154	1792
129	0,07	0	2896	750	1800	124	1792
125	0,17	0	2896	750	1800	152	1792
119	0,02	0	2896	750	1800	126	1792
115	0	0	2896	750	1800	153	1792
112	0,16	0	2896	750	1800	125	1792
110	0,11	0	2896	750	1800	153	1792
105	0,09	0	2896	750	1800	123	1792
102	0	0	2896	750	1800	153	1792
96	0,06	0	2896	750	1800	124	1792
92	0,17	0	2896	750	1800	153	1792
89	0,13	0	2896	750	1800	124	1792
87	0,02	0	2896	750	1800	152	1792
82	0	0	2896	750	1800	125	1792
78	0,01	0	2896	750	1800	156	1792
75	0,15	0	2896	750	1800	125	1792
73	0,17	0	2896	750	1800	153	1792

68	0,08	0	2896	750	1800	125	1792
65	0,11	0	2896	750	1800	153	1792
59	0	0	2896	750	1800	124	1792
55	0	0	2896	750	1800	153	1792
52	0	0	2896	750	1800	124	1792
50	0,08	0	2896	750	1800	152	1792
45	0,14	0	2896	750	1800	124	1792
42	0,16	0	2896	750	1800	154	1792
39	0,2	0	2896	750	1800	127	1792
37	0,04	0	2896	750	1800	151	1792
34	0	0	2896	750	1800	124	1792
32	0,01	0	2896	750	1800	153	1792
27	0,18	0	2896	750	1800	125	1792
24	0,23	0	2896	750	1800	153	1792
18	0,1	0	2896	750	1800	124	1792
14	0	0	2896	750	1800	153	1792
9	0	0	2896	750	1800	124	1792
6	0	0	2896	750	1800	153	1792
4	0	0	2896	750	1800	123	1792
2	0	0	2896	750	1800	156	1792
1	0	0	2896	750	1800	124	1792
0	0	0	2896	750	1800	153	1792