

Halvledare för höga strömmar i fordon



Göteborg 2003
Volvo Truck Corporation

Halvledare för höga strömmar i fordon

Projekt:

Examensarbete

Title:

Controlling high currents in vehicles.

Titel:

Halvledare för höga strömmar I fordon.

Författare:

Bergkvist Björn, Chalmers tekniska högskola

Marmander Daniel, Chalmers tekniska högskola

Handledare:

Martander Olof, Volvo Truck Corporation

Westerlind Hans, Volvo Truck Corporation

Examinator:

Thiringer Torbjörn, Chalmers tekniska högskola

Foreword

This is a master thesis in cooperation between Chalmers University of Technology, the department for electric power engineering and Volvo Truck Corporation. We would like to thank Olof Martander, Hans Westerlind and all other at department 26323 for supervising and also the nice and gently people at the instrument pool, department 26793. A special thanks to Lennart Nygren and his department 26342 for letting us use the laboratory. At Chalmers we want to thank Thorbjörn Thiringer, who has been examiner for the work and Robert Karlsson for practical advices.

Abstract

Mechanical relays are more and more being replaced with semiconductor technology. In this thesis it is investigated if and how the larger loads could be controlled by transistors. The main part of this work aims to create and verify a solution that can control the starter motor, as well as protect it in case of any failure. The different malfunctions that the solution protects against is high current, too high peak current, low current, maximum crank time and minimum cool off time. The timers also protect indirectly against overheating of the starter engine.

The transistors used are BTS555, from Infineon. Typical rated current of the transistor is 158 A and it has integrated functions such as temperature protection, short circuit protection and current sensing. The functions was tested and evaluated. The temperature protection and current sensor was found to satisfy the specification. The short circuit protection did not protect against all kinds of short circuit failures thus an external over current protection has been added.

To control the starter motor, twelve transistors were connected in parallel, to allow for a total of initial start current 2 000 A and a continuous maximum current of 1 150 A. A series of tests were performed on the transistors, the external protections and the starter motor, until everything worked together as planned. The control circuits is designed with simple gate logic in combination with other active and passive components.

The transistors are the largest expense. The used solution has an estimated price of 400 SEK, assembling excluded. The assembling is estimated to take one hour.

Conclusions made from measurements and tests shows that it is possible to control the starter motor by using semiconductor technology. Since the solenoid in the current starter relay will not be excluded, the solution might be hard to motivate in an economic aspect. The advantages with a semiconductor solution are the protective functions and that the starter motor will be disconnected from the batteries when not being used.

To control the smaller loads, such as the preheater, the semi conductor relay is a competitive alternative since the mechanical relay and the fuse can be replaced.

Förord

Examensarbetet är ett samarbete mellan Chalmers, institutionen för elteknik och Volvo Truck Corporation. Stort tack riktas till Olof Martander, Hans Westerlind, alla andra på avdelning 26 323 för handledning. Tack riktas även till instrumentutlåningen som aldrig tröttnat på att lämna ut instrument och komponenter. Tack även till Lennart Nygren och hans personal på El-lab, avdelning 26342, för upplåtande av labbplats. Vid Chalmers vill vi tacka Thorbjörn Thiringer, som varit examinator för arbetet och Robert Karlsson för praktisk handledning.

Sammanfattning

Mekaniska reläer byts successivt ut mot halvledarteknik och i detta arbete studeras det hur de större lasterna skulle kunna drivas med den nya tekniken. Arbetet handlar till största del om startmotorn eftersom den är den svåraste och största lasten. Arbetet syftar till att ta fram en lösning med transistorer som ska kunna driva startmotorn och även skydda den vid fel som kan uppkomma. Fel som transistorerna skyddar mot är överström, underström, för hög initialström, drifttid och minsta avsvälningstid. De två sista skyddar startmotorn indirekt mot överhettning.

Transistorn är av modell BTS555 från Infineon, den tål typiskt 158 A och har integrerade funktioner så som temperaturskydd, kortslutningsskydd och strömmätning. Funktionerna testades och utvärderades och det konstaterades att temperaturskyddet samt strömmätningen fungerar bra. Kortslutningsskyddet är inte tillräckligt utan ett externt överströmsskyddet är nödvändigt.

För att driva startmotorn parallellkopplades tolv transistorer. Startmotorns initialström ska maximalt vara 2 000 A för att sedan minska till den kontinuerliga, maximalt 1 150 A. Lösningen lämnar utrymme för variationer mellan transistorerna eftersom viss överdimensionering föreligger. Flertalet tester utfördes på transistorerna, skydden och startmotorn tills allt fungerade som det var tänkt. Styrkretsarna till styrningen är uppbyggda med enkel grindlogik och aktiva samt passiva komponenter.

Tester har även gjorts på förvärmningselementet till insugningsluften. Halvledarreläet består av likadana transistorer som för startmotorn men med enklare styrkrets – bara tillslag samt överström. Värmeelementets lastström är cirka 200 A varvid två transistorer räcker.

Transistorerna och kylfläns med bearbetning står för de största kostnaderna. Lösningen som föreslås kostar cirka 400 kronor plus montage av transistorerna och bearbetningen av kylflänsen – vilket beräknas ta cirka en timme.

Slutsatser från mätningar och tester visar att det går utmärkt att driva startmotorn med halvledarteknik. Eftersom det inte verkar aktuellt att ta bort solenoiden och det nuvarande huvudreläet till startmotorn är lösningen svår att motivera ekonomiskt. Fördelarna med halvledarlösningen är skyddsfunktionerna och att startmotorn blir spänningslös när den inte används. Nackdelarna är dels att det är en oprövad lösning samt att det är tveksamt huruvida startmotortillverkaren kommer att kunna ersätta huvudreläet med enbart en solenoid.

Till de mindre lasterna så som förvärmningselementet är halvledarreläet ett konkurrensmässigt alternativ eftersom både det mekaniska reläet och säkringen kan bytas ut.

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| <u>1.</u> | <u>Inledning</u> | 7 |
| <u>1.1.</u> | <u>Bakgrund</u> | 7 |
| <u>1.2.</u> | <u>Problemdefinition</u> | 7 |
| 1.2.1. | <u>Specifikationer</u> | 8 |
| 1.2.2. | <u>Begränsningar</u> | 8 |
| <u>1.3.</u> | <u>Syfte</u> | 8 |
| <u>2.</u> | <u>Komponenterna</u> | 9 |
| <u>2.1.</u> | <u>Möjliga transistorer</u> | 9 |
| <u>2.2.</u> | <u>Funktion av BTS555</u> | 10 |
| <u>2.3.</u> | <u>Strömmätning med BTS555</u> | 11 |
| 2.3.1. | <u>Mätning av höga strömmar</u> | 12 |
| 2.3.2. | <u>Strömmätning av parallella transistorer</u> | 13 |
| 2.3.3. | <u>Strömmätningstoleranser</u> | 13 |
| <u>2.4.</u> | <u>Test av de inbyggda skydden i BTS555</u> | 14 |
| 2.4.1. | <u>Kortslutningsskydd</u> | 14 |
| 2.4.2. | <u>Temperaturskydd</u> | 16 |
| 2.4.3. | <u>Överspänningsskydd</u> | 17 |
| 2.4.4. | <u>Skydd mot polvändning.</u> | 17 |
| <u>3.</u> | <u>Småskaliga prover</u> | 19 |
| <u>3.1.</u> | <u>Styrkrets</u> | 19 |
| <u>3.2.</u> | <u>Två stycken parallella transistorer</u> | 20 |
| 3.2.1. | <u>Resultat</u> | 20 |
| <u>3.3.</u> | <u>Tio stycken parallella transistorer</u> | 21 |
| 3.3.1. | <u>Värmeutveckling</u> | 23 |
| 3.3.2. | <u>Resultat och förbättringar</u> | 24 |
| <u>4.</u> | <u>Förvärmningselementet</u> | 25 |
| <u>4.1.</u> | <u>Drivkretsen</u> | 25 |
| <u>4.2.</u> | <u>Resultat</u> | 26 |
| <u>5.</u> | <u>Styrkrets för startmotor</u> | 28 |
| <u>5.1.</u> | <u>Överströmskydd</u> | 28 |
| 5.1.1. | <u>Skydd mot långvarig överström</u> | 29 |
| 5.1.2. | <u>Skydd mot kortslutning</u> | 30 |
| <u>5.2.</u> | <u>Skydd mot underström</u> | 30 |
| 5.2.1. | <u>Test av underströmsskydd</u> | 30 |
| <u>5.3.</u> | <u>Tidskydd</u> | 31 |
| 5.3.1. | <u>Skydd mot för lång kranktid</u> | 31 |
| 5.3.2. | <u>Skydd mot för kort avsvälningstid</u> | 31 |
| <u>5.4.</u> | <u>Tillslag</u> | 31 |
| <u>5.5.</u> | <u>Underspänningsskydd</u> | 32 |
| <u>6.</u> | <u>Inledande test på startmotor</u> | 34 |

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| <u>6.1.</u> | <u>Montering av transistorerna</u> | 34 |
| 6.1.1. | <u>Förbättringar</u> | 35 |
| <u>6.2.</u> | <u>Mätningar på startmotor</u> | 35 |
| 6.2.1. | <u>Tillslag</u> | 35 |
| 6.2.2. | <u>Frånslag</u> | 36 |
| <u>6.3.</u> | <u>Frihjulsdiod</u> | 37 |
| 6.3.1. | <u>Diodström</u> | 37 |
| 6.3.2. | <u>Dimensionering</u> | 39 |
| <u>6.4.</u> | <u>Spänningar</u> | 39 |
| <u>6.5.</u> | <u>Resultat</u> | 43 |
| <u>7.</u> | <u>Avslutande prover</u> | 44 |
| 7.1. | <u>Start av lastbil</u> | 44 |
| 7.1.1. | <u>Start av kall motor</u> | 44 |
| 7.2. | <u>Miljöprover</u> | 45 |
| 7.3. | <u>Matningsspänningsprov</u> | 45 |
| <u>8.</u> | <u>Alternativ lösning</u> | 46 |
| 8.1. | <u>Slutsatser</u> | 47 |
| <u>9.</u> | <u>Ekonomi och kostnader</u> | 48 |
| 9.1. | <u>Huvudsakliga materialkostnader</u> | 48 |
| 9.2. | <u>Tillverkningskostnader</u> | 48 |
| 9.3. | <u>Totalkostnad</u> | 48 |
| <u>10.</u> | <u>Diskussioner och slutsatser</u> | 50 |
| 10.1. | <u>Diskussion</u> | 50 |
| 10.1.1. | <u>Startmotor</u> | 50 |
| 10.1.2. | <u>Övriga laster</u> | 50 |
| 10.2. | <u>Slutsatser</u> | 50 |
| <u>11.</u> | <u>Fortsatt arbete</u> | 51 |
| <u>12.</u> | <u>Referenser</u> | 52 |
| <u>13.</u> | <u>Instrumentreferenser</u> | 53 |
| 13.1. | <u>Instrument som används men ej refererat till</u> | 53 |

Bilaga 1 : Specifikationer

Bilaga 2: Datablad BTS555

Bilaga 3 : Ritning på kylfläns och transistor montage för startmotorn

Bilaga 4 : Kretsschema för styrkretsen åt startmotorn

Bilaga 5 : Komponentlista till förvärmstyrning

Bilaga 6 : Komponentlista till startmotorstyrning

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Dagens lastbilar har stora strömförbrukare. Startmotorn är den största av dessa och matas idag direkt från batteriet utan någon form av skydd och är alltid spänningssatt. Som bäst är den utrustad med ett värmeskydd mot för lång kranktid. Uppstår det fel vid till exempel kollision kan anslutningen kortslutas och en hög kortslutningsström dras från batteriet. Värmeutvecklingen blir hög och det föreligger brandrisk.

Eftersom fler och fler reläer redan idag ersätts av halvledareteknik är bakgrunden att undersöka och prova om halvledare även kan användas för att driva de större lasterna, till exempel startmotorn. Kortslutningsfaran skulle kunna minskas och startmotorn skulle kunna skyddas betydligt bättre än idag.

I samband med halvledartekniken skulle även strömmen kunna mätas för att studera konditionen på startmotorn, mer om detta i avsnitt 11.

1.2. Problemdefinition

Av de stora lasterna som finns på lastbilen har i detta arbete främst två laster studerats, det är startmotorn och ett förvärmingsselement åt luften i insugningsröret. Startmotorn är den största lasten och kännetecknas av att den har en hög initialström, låg resistans och ett induktivt beteende. Förvärmaren är en ren värmare och uppvisar resistiva egenskaper och dess lastström är cirka 200 A. Startmotorn kan dra uppemot 1 000 A i drift och 2 000 A i initialström. Förvärmaren används för att värma insugningsluften till motorn och minskar problemet med vitrök vid kallstart.

För att utveckla strömförsörjningen till större laster ska halvledarkomponenter som ersättare för reläer utvärderas, för att se om det går att använda den tekniken även för de större lasterna. Fördelarna som kan erhållas är framför allt kontrollmöjligheter och skyddsfunktioner. Eftersom startmotorn är den svåraste lasten, utgår mycket av arbetet från den. Kan den svåraste lasten drivas och kontrolleras kan även de enklare och mindre lasterna det.

Kretsen som konstrueras ska klara av att mata startmotorn med dess behövliga ström, se tabell 1, Bilaga 1. För att dra nytta av fördelarna med elektriskt styrda komponenter ska startmotorn skyddas mot:

- Överström
- Underström
- Indirekt överhettning

Överströmskyddet ska förhindra att startmotorn körs med för hög last, till exempel vid startförsök med ilagd växel. Underströmskyddet skyddar startmotorn mot övervarv vid för låg last. Typiskt fel vid för låg last är om startdrevet inte kuggar i kuggkransen på svänghjulet. Körs startmotorn för länge kan den skadas av värmeutvecklingen i den, därför implementeras en tids-

begränsning för maximal kranktid och en minsta tid för väntan innan nästa startförsök kan ske. Detta för att förhindra indirekt överhettning. När dieselmotorn startat ska startmotorn stängas av, även om föraren inte släppt startnyckeln. Skydden kan implementeras på de övriga lasterna men eftersom startmotorn är den svåraste lasten utgås det alltid från den.

1.2.1. Specifikationer

I tabell 1 till och med 3 i Bilaga 1 finns specifikationer för startmotor, övriga laster samt miljöspecifikationer.

För styrkretsen gäller följande specifikationer. Matande spänningen kan sjunka till cirka 13 V när startmotorn körs [2]. Den måste även klara av de spänningsspikar som de utsätts för från generator. Lasten ska skyddas även vid fel i styrkretsen.

1.2.2. Begränsningar

Arbetet syftar huvudsakligen till att undersöka och styra transistorer för reläuppgiften. Startmotorskydd har konstruerats men övervakningen har lagts åt sidan för tillfället, se avsnitt 11.

I och med att den maximala startströmmen begränsas kan det bli omöjligt att starta med växel i. Att krankköra sliter hårt på startmotorn, men att krankköra kan vara det enda alternativet i en nödsituation. Kretsarna är konstruerade så att det är förhållandevis enkelt att ändra nivåerna för strömskydden. Viktigt att komma ihåg är att i detta arbete har fokus varit på startmotorns bästa.

1.3. Syfte

För att utveckla moderna lastbilar behövs modernare lösningar utvecklas och jämföras. Redan i dagsläget ersätts säkringar och reläer med halvledartechnik. Arbetet syftar till att konstruera ett halvledarrelä som även klarar de stora induktiva lasterna och är ekonomiskt försvarbar. Syftet är att få en krets som klarar av att driva sin avsedda last och även skydda den från fel som kan uppstå.

2. Komponenterna

Halvledare som klarar strömmar i området 1 000A för lågspänningsapplikationer finns inte hos någon av de större tillverkarna. Genom att parallellkoppla flera stycken mindre transistorer kan en hög ström hanteras. Alla komponenter som används ska klara temperaturkraven från tabell 3, Bilaga 1.

2.1. Möjliga transistorer

Spänningsfallet över transistorn under drift är av största vikt. Vid cirka 1000 A och tio parallellkopplade transistorer är spänningsfallet 0,1 V / mΩ. Det har gjort att många transistorer har sorterats bort eftersom spänningsfall över 1 V inte kan accepteras. En sammanställning över de mest intressanta presenteras i Tabell 1. Det är ett urval där modeller som är alltför dyra, utgående eller har oönskade parametrar, som till exempel för låg driftspänning eller för hög ledningsresistans, har sorterats bort. Utbudet av p-mos komponenter är däremot litet och istället måste n-mos tas i beaktande. Dessutom har n-mos kretsarna bättre mobilitet och är att föredra. Nackdelen är att styrkretsen ska konstrueras så att spänningen på gaten måste vara högre än på drain för att transistorn ska bryta helt, se mer i avsnitt 8.

Tabell 1 Alternativa användbara transistorer

| Leverantör | Komponent | Data | | | Antal | Pris ¹ |
|-------------|------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------|-------|-------------------|
| | | kont. Ström | V _{ds} / V _{ce} | R _{DS(on)} mΩ | | |
| 1. Elfa | IGBT: IXSH24N60A | 48 | 600 | 2,7V ² | 24 | 1 764 |
| 2. Elfa | IGBT: IXGH31N60 | 40 | 600 | 1,8V ² | 29 | 2 050 |
| 3. Farnell | SUP75P05-08 | 75 | 50 | 8 | 16 | 1061 |
| 4. Elfa | STE180NE10/STM | 180 | 100 | 4,5 | 7 | 4 949 |
| 5. Elfa | STP80NE06-10/STM | 80 | 100 | 8,5 | 15 | 735 |
| 6. Farnell | IRL2505S | 104 | 55 | 8 | 11 | 1 153 |
| 7. Farnell | SPB80N06S2L-07 | 80 | 55 | 7 | 15 | 424 |
| 8. Farnell | IRL1004 | 130 | 40 | 6,5 | 9 | 603 |
| 9. Farnell | IRF1404 | 162 | 40 | 4 | 7 | 432 |
| 10. Farnell | IRF1405 | 169 | 55 | 5,3 | 7 | 432 |
| 11. Farnell | BTS555 | 158 | 42 | 3 | 8 | 790,96 |

Den enda transistorn med p-mos teknologi är nummer 3, men priset och den lägre strömtåligheten gör att den väljs bort. Varje transistor tar upp ungefär lika mycket plats – att ha färre transistorer ger mindre platsbehov. De två IGBT-erna har ungefär diodframspänningsfall, är dyra och väljs därför bort. Kvar återstår det en del likvärdiga transistorer nummer 4-10 samt nummer 11. Bland de likvärdiga kan den billigaste och med minst R_{DS(on)} väljas –

¹ Räknat på det behövda antalet (1150 / I_{kon}) gånger styckpriset per transistor.

² 2,7 respektive 1,8 V V_{ce} saturated

nämligen nummer 9, IRF1404 som ska jämföras mot BTS555. Valet hamnade på BTS555 .

Den valdes bland de möjliga komponenterna och dess egenskaper undersöks noggrannare. I Bilaga 2 finns närmare data över BTS555.

Kretsen har valts att användas i denna applikation på grund av:

- Låg ledningsresistans
- Förmåga att tåla en hög kontinuerlig ström
- Integrerad strömmätning
- Integrerade skyddskretsar för till exempel över- och underspänning.
- Felaktigt lågt inköpspris

Från början kostade BTS555 14,47 kronor från Farnell. Ett mycket låg pris och den började användas direkt. Efter närmare undersökning och kontakt med Farnell höjde de sedan priset till cirka 98 kronor per styck för transistorerna. Det mycket låga katalogpriset bidrog till att transistorn valdes från början, trots allt levererade Farnell totalt 75 stycken transistorer till det låga priset. Arrow, Infineons största svenska återförsäljare kan sälja transistorerna för 28 kronor per styck vid köp av 100 000 stycken per år. Det är det pris som kommer att användas vid kostnadsberäkningar.

När sanningarna om priserna har uppdagats hamnar i IRF1404 i bättre position, mer om denna komponent som alternativ lösning finns i avsnitt 8.

BTS555 har stora likheter med transistorn BTS650P. Enligt databladen verkar BTS555 vara två parallellkopplade BTS650P med hållkrets på temperaturskyddet. Om temperaturskyddet stänger av så måste BTS555 slås av innan återstart tillskillnad från BTS650P.

2.2. Funktion av BTS555

BTS555 [3] bygger på n-mos teknologi men tack vare en integrerad ”charge pump” kan den användas för att bryta matande spänning utan speciella krav på styrkretsen. Kretsen har kapsling TO-218 AB /5 och har fem ben. Ben nummer 1 och 5 är utgång från kretsen, ben nummer 3 samt höljet är ingång, ben nummer 2 är styrsignal och ben nummer 4 är strömmätningen.

Kretsen är utrustad med en del skyddsfunktioner för att skydda sig själv. Kortslutningsskydd, överspänningsskydd, maximal temperatur samt ESD-skydd finns. Dessutom har den integrerad strömmätning vilket gör att startströmmen hos startmotorn kan mätas enkelt.

Tillslag sker genom att jorda gate-ingången. Att jorda är smidigt konstruktionsmässigt eftersom gate-spänningen inte påverkas av variationer i styrkretsspänningen och liknande. Nackdelen visade sig vara att vid oan sluten jordningen gick transistorn i det resistiva läget och förstördes.

Nackdelar med kretsen är dels den klena kapslingen, dels att transistorn har mycket vida toleranser. De stora toleranserna kan göra att dess egenskaper varierar mellan varje transistor.

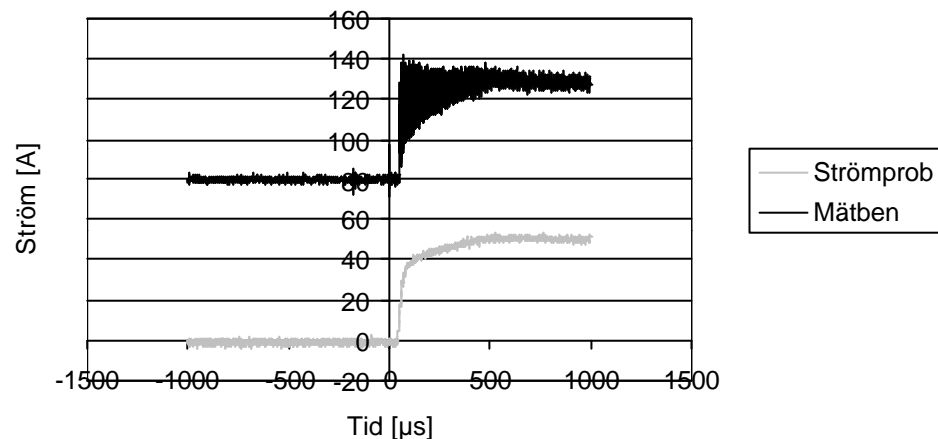
Övriga komponenter är standardkomponenter som återfinns hos varje väl-sorterad elektronikhandlare och är närmare beskrivna där de används.

2.3. Strömmätning med BTS555

Transistorn BTS555 är utrustade med en strömmätningsskrets, där den utgående mätströmmen är ca 30 000 gånger lägre än den verkliga strömmen. Strömmätningen kontrollerades genom att driva en last på cirka 50 A och mäta strömmen genom transistorn med hjälp av mätbenet. Mätströmmen kopplades till ett motstånd på 1.2 kΩ. Genom att mäta spänningen över motståndet kan strömmen i transistorn räknas ut genom sambandet:

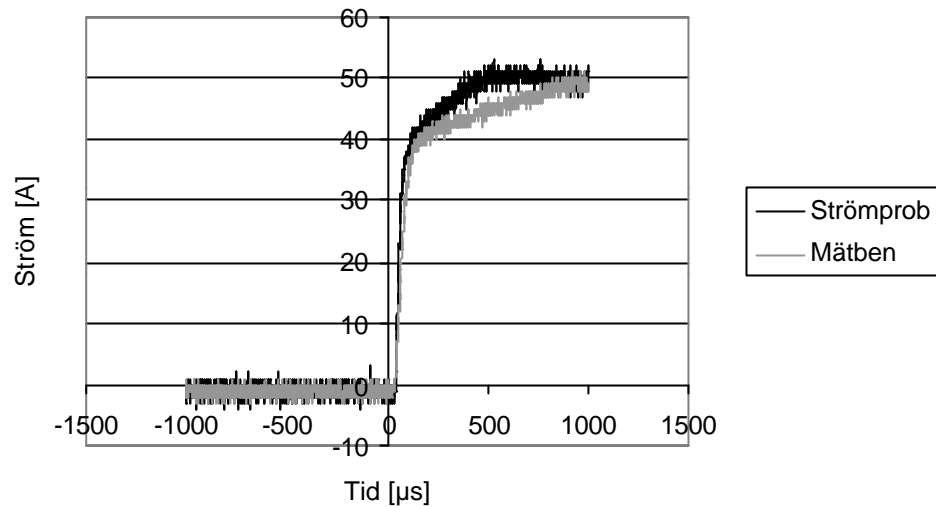
$$\text{Ekvation 1 } I_T = \frac{U_{\text{uppmätt}}}{R_{\text{mät}}} \cdot 30000$$

En tångampereprob {1} användes för att verifiera mätningen, se Figur 1.



Figur 1 Strömmätning med BTS555

Observera att den övre kurvan är förskjuten 80 A i vertikalled för att öka tydligheten. Mätningarna på mätbenet ripplar mycket varvid en kondensator på 4.7 nF parallellkopplas över mätmotståndet och mätningarna med strömbenet kan verifieras med hjälp av strömproben, se Figur 2.

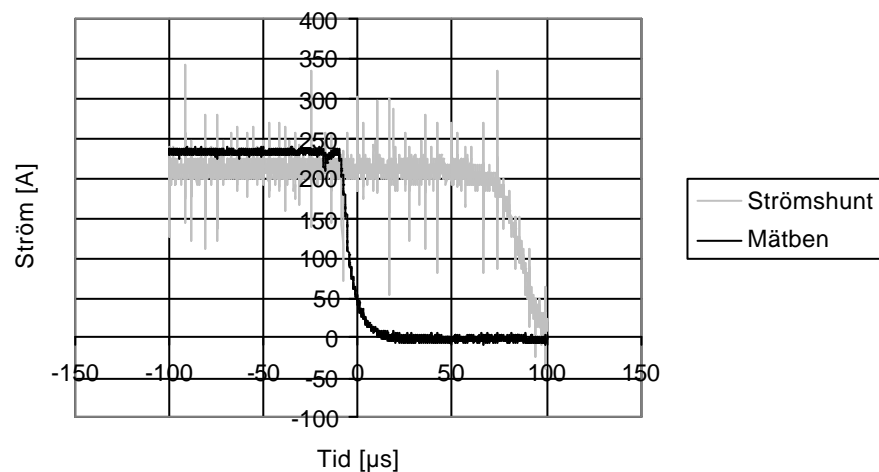


Figur 2 Mätning med filterkondensator inkopplad

Transistorns mätben fungerar för att mäta lastströmmen genom den och en filtrering av signalen underlättare avläsandet avsevärt. I fortsättningen görs alla mätningar med en filterkondensator inkopplad för att erhålla avläsbara signaler.

2.3.1. Mätning av höga strömmar

Vid strömmar över cirka 150 A riskerar strömmätningen att vara olinjär [3]. Därför mäts även strömmar runt 200 A med mätbenet och kontrolleras med en strömshunt [2]. Enligt strömshunten var lastströmmen 216 A och enligt mätbenet 235 A, se Figur 3, en skillnad på ungefär 9 %. Denna skillnad kan accepteras under de korta förlopp som lastströmmen genom transistorerna är så stora. Enligt databladet ska det bero på strömbegränsning som transistor utför, dess funktion har ej verifierats experimentellt.



Figur 3 Strömmätning vid strömmar runt 200 A

Förklaringen till grafens något konstiga utseende vid frånslag är att ströms-hunten är långsammare än transistorns mätben och det är därför den indikerar strömförändringen senare i tiden.

2.3.2. Strömmätning av parallella transistorer

Vid parallellkoppling av transistorer mättes strömmen genom att transistorernas strömben parallellkopplades och anslöts till ett mätmotstånd av lämplig storlek. Genom att mäta inkommande ström med prob och mätbenen kunde det verifieras att strömmätningen fungerar. I testkretsen kunde varje enskild transistorström mätas samt även den totala strömmen. Mätmotståndet för den totala strömmen sitter i serie med de parallella individuella mätmotstånden. Metoden valdes för att kunna mäta de specifika strömmarna för varje transistor såväl som den totala strömmen.

2.3.3. Strömmätningstoleranser

Strömmätningen med BTS555 är naturligtvis inte exakt. Omsättningen mellan mätströmmen och ledningsströmmen varierar, det finns ett mätmotstånd och andra källor till fel. Följande överslagsberäkningar har gjorts för att försöka uppskatta storleken på mätfelen. Transistorernas strömsömsättning är angiven vid olika strömmar, olika temperaturer samt för minsta, största och typiska värdet [3]. De strömmar som finns angivna är 8, 16, 30 och 180 A, vid -40°C , 25°C och 150°C . Omsättningen för strömmar däremellan är enligt databladet [3] linjär. Varken 30 A eller 180 A är särskilt intressanta att studera, istället ska strömmarna vid 16, 60 och 100 A studeras. 100 A per transistor motsvarar full last både för förvärmningselementet och startmotorn. 60 A motsvarar en start av dieselmotor utan extrema förhållande. 16 A motsvarar när startmotorn går lätt. Omsättningen varierar ganska mycket, se Tabell 2.

Tabell 2 Omsättning, temperatur och strömmar

| Ström [A] | Temp. $^{\circ}\text{C}$ | Omsättning | | | I_L / I_S |
|-----------|-----------------------------|------------|--------|--------|-----------------------------|
| | | Min | Max | Typ | |
| 100 | -40 | 26 300 | 33 640 | 30 000 | $30000 \pm 12\%$ |
| 100 | 25 | 26 250 | 33 150 | 29 375 | $30000^{+10,5\%}_{-12,5\%}$ |
| 100 | 150 | 25 000 | 29 300 | 26 600 | $30000^{-2,3\%}_{-17\%}$ |
| 60 | -40 | 25 800 | 35 000 | 30 000 | $30000^{+17\%}_{-14\%}$ |
| 60 | 25 | 25 900 | 33 750 | 30 000 | $30000^{+13,7\%}_{-12,5\%}$ |
| 60 | 150 | 25 000 | 29 300 | 26 600 | $30000^{-2,3\%}_{-17\%}$ |
| 16 | -40 | 24 000 | 45 000 | 35 000 | $30000^{+50\%}_{-20\%}$ |
| 16 | 25 | 24 000 | 40 000 | 31 500 | $30000^{+33\%}_{-20\%}$ |
| 16 | 150 | 24 000 | 27 700 | 31 000 | $30000^{+3,3\%}_{-20\%}$ |

Toleranserna är ofta ganska vida. Viktigt att komma ihåg är att typiska värden inte varierar särskilt mycket från 30 000. I alla praktiska mätningar som har gjorts har skillnaden mellan transistorernas strömmätning och andra mätton har inte överstigit 5 %. En rimlig uppskattning av mätonoggranheten kan vara $\pm 15 \%$.

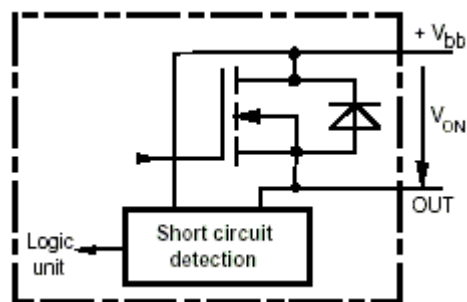
Slutsatserna om strömmätningen är att mätfelet kan vara ganska stort, mycket beroende på var i toleransområdet transistorernas omsättning hamnar. I testerna har strömmätningen visat sig fungera klanderfritt och ett visst fel i mätningen är acceptabelt. I testerna har felet inte överstigit $\pm 5 \%$.

2.4. Test av de inbyggda skydden i BTS555

I transistron BTS555 finns ett antal inbyggda skydd. För att lättare kunna förutsäga transistorernas och de olika kringkretsars beteende vid eventuell felbelastning har dessa skydd undersökts närmare.

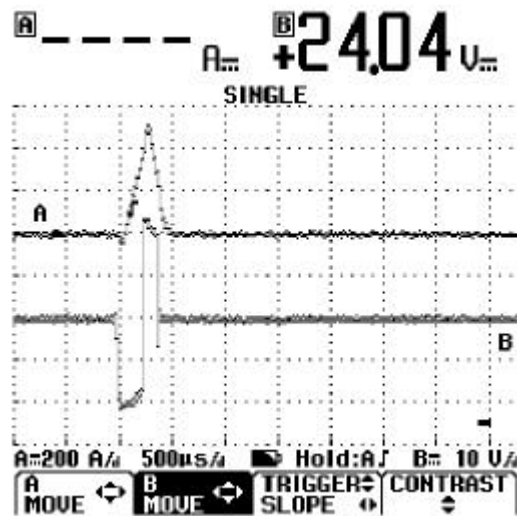
2.4.1. Kortslutningsskydd

Transistorn är skyddad mot direkta kortslutningar. För att transistorn ska kunna detektera en kortslutning mäts spänningsfallet V_{ON} . Om lastströmmen stiger, stiger även spänningsfallet. Då spänningsfallet överstiger ett förutbestämt värde $V_{ON(SC)}$ (typiskt 6 V), slår transistorn av på grund av kortslutning. Det krävs en kortslutning i minst 80-300 μs för att skyddet ska hinna lösa ut. Figur 4 visar en principskiss över kortslutningsskyddet.



Figur 4 Kortslutningsskydd i BTS555

För att testa kortslutningsskyddet anslöts en transistor direkt till batterierna, och en kortslutning ersatte lasten. Då transistorn slogs till rusade därför strömmen tills kortslutningsskyddet slog från transistorn. Figur 5 visar hur transistorn slår från när V_{ON} överstiger $V_{ON(SC)}$ {3}.

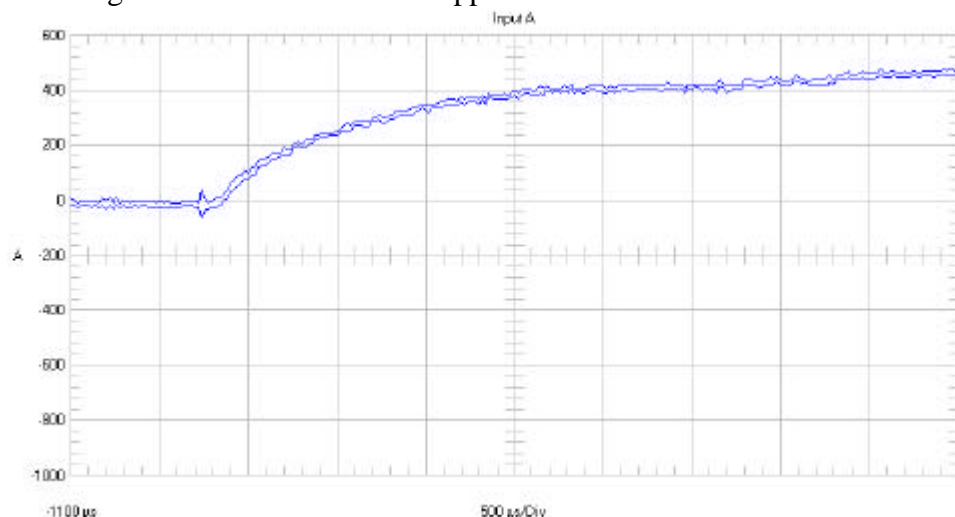


Figur 5 Strömkaraktäristik vid aktivering av kortslutningsskydd.

Tabell 3 Förklaring av kurvor till Figur 5

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|-----------------------|-------------|
| A | Ström, 200 A / ruta | 500 μ s |
| B | Spänning, 10 V / ruta | 500 μ s |

Om en kortslutningsbrytare monteras parallellt med en last och kortslutningen slås till när transistorn driver lasten uppvisar den ett annat beteende. Transistorn hinner inte slå av tillräckligt snabbt, och kommer därför gå sönder. I Figur 6 ser vi ett sådant förlopp.



Figur 6 Strömkaraktäristik vid kortslutning av tillslagen transistor

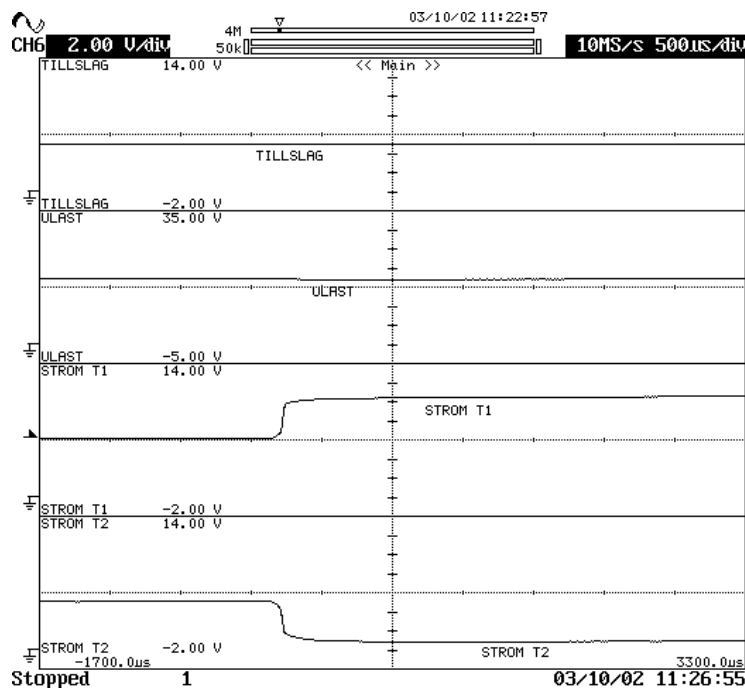
Försöket visar att transistorn inte klarar en kortslutning under drift, då måste externa skydd vara snabba nog för att detektera kortslutning och genast slå av transistorn. Någon förklaring till varför transistorn går sönder har inte hittats i databladet, en förklaring kan vara att eftersom transistorn leder fullt ut så kommer kortslutningen för snabbt och transistorn hinner inte slå av. Genom att studera stigtiden hos strömmen vid en kortslutning och jämföra

med de externa skyddens snabbhet kan man avgöra om systemet i sin helhet kommer att klara av att hantera en kortslutning under drift.

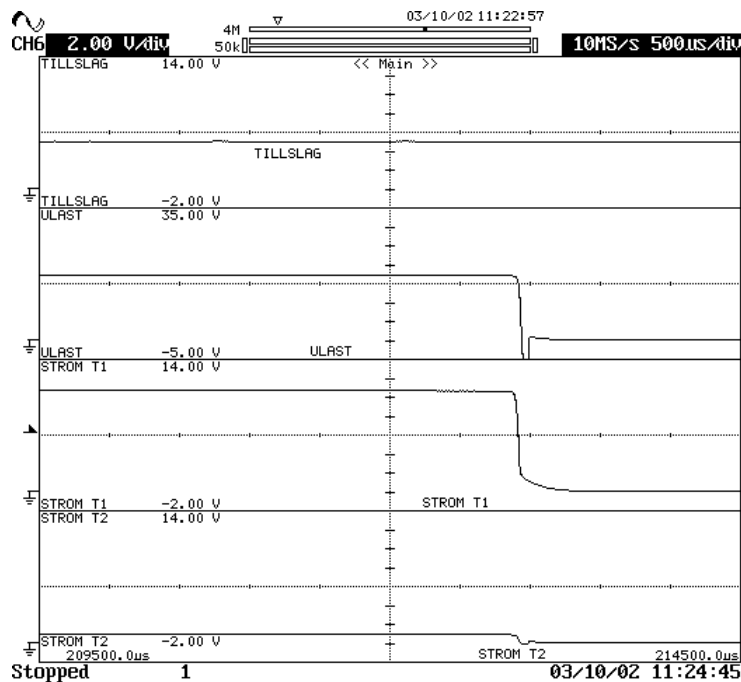
2.4.2. Temperaturskydd

Transistorn har ett inbyggt temperaturskydd. Skyddet ska stänga av transistorn vid en temperatur av minst 150°C. Försök gjordes på en transistor genom att låta den driva en last och sedan värma den med varmluftspistol. Resultatet blev att den i enlighet med databladet [3] stängde av.

Försök gjordes för att bekräfta att temperaturskydden fungerar när två transistorer arbetar parallellt. Två transistorer monterades parallellt och lastades med cirka 220 A. För att kontrollera temperaturskyddet och hur två parallellkopplade transistorer beter sig om den ena slår av värmdes en transistor med hjälp av varmluftspistol. Temperaturskyddet i transistorn som värmdes slog av, den ledande tog över belastningen helt för en tid innan även den slog av på grund av temperaturen eftersom den fick leda mer ström än vad den är avsedd för. Figur 7 och Figur 8 visar detta. Temperaturskyddet är mycket användbart i tillämpningen eftersom transistorerna skyddar sig själv mot för hög temperatur.



Figur 7 Transistor två slår från på grund av övertemperatur



Figur 8 Transistor ett slår från på grund av övertemperatur

Tabell 4 Förklaring till kurvorna för Figur 7 och Figur 8

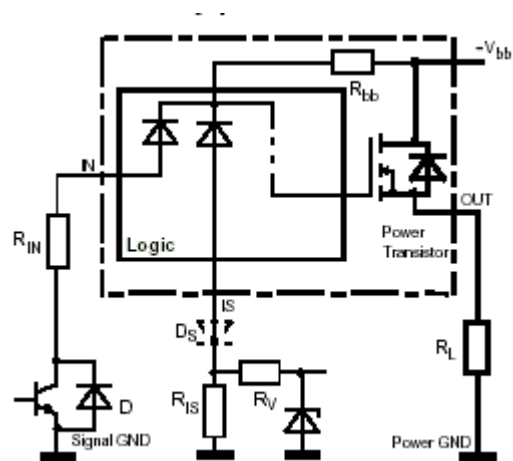
| Kurva: | Måter: | Tidssteg: |
|------------|-------------------------------------|-------------|
| Tillslag | Tillslaget, 2 V / ruta | 500 μ s |
| U_{last} | Spänningen över lasten, 5 V / ruta | 500 μ s |
| Strom T1 | Ström, transistor 1, ca 44 A / ruta | 500 μ s |
| Strom T2 | Ström, transistor 2, ca 44 A / ruta | 500 μ s |

2.4.3. Överspänningsskydd

BTS555 är även utrustad med ett överspänningsskydd. Funktionen av detta har ej kontrollerats. Detta beror på att adekvat laborationsutrustning ej har funnits tillgänglig. Nivån på skyddet är 62 V och är dessutom högre än vad som kan förväntas i 24 V systemet.

2.4.4. Skydd mot polvändning.

För att skydda mot polvändning måste även styrkretsen konstrueras korrekt, Figur 9 visar bland annat hur dioder bör implementeras. Vid växlade batteripoler kommer dioden D orsaka att transistorns ingång blir hög, vilket gör att transistorn hålls frånslagen. R_N skyddar i sin tur D mot överström. Den interna dioden i transistorn är kopplad antiparallellt med transistorn och tål lika mycket ström som den [3]. Lastströmmen kommer att flyta genom dioden. Syftet med skyddet är att skydda transistorn.



Figur 9 Skydd mot batteripolvändning

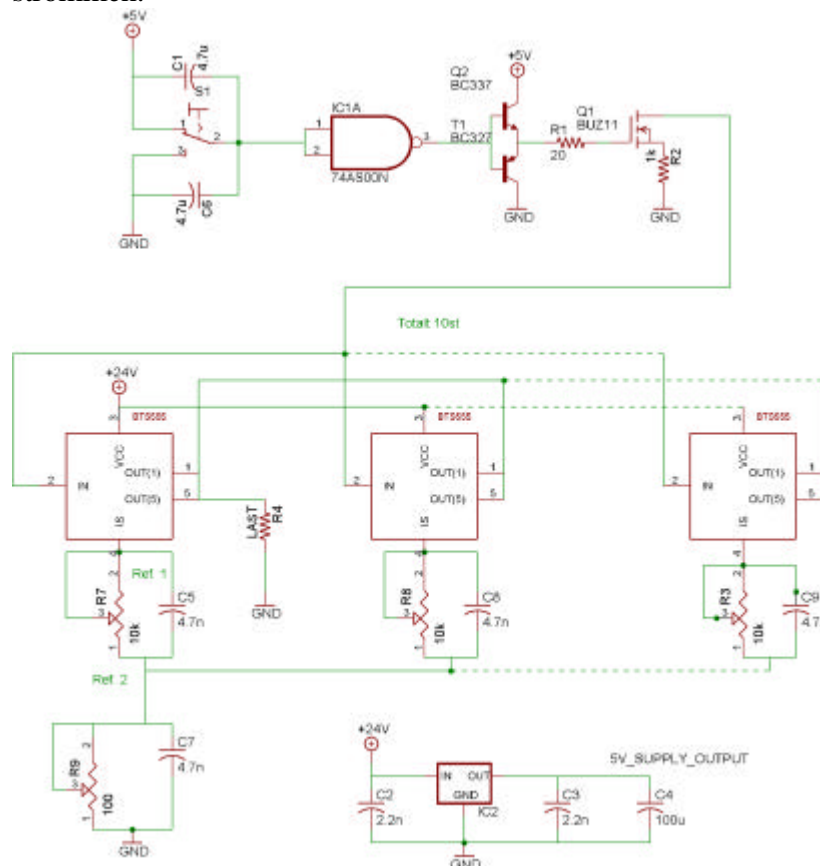
Enligt databladet [3] och praktiska försök fungerar detta, se även Bilaga 4.

3. Småskaliga prover

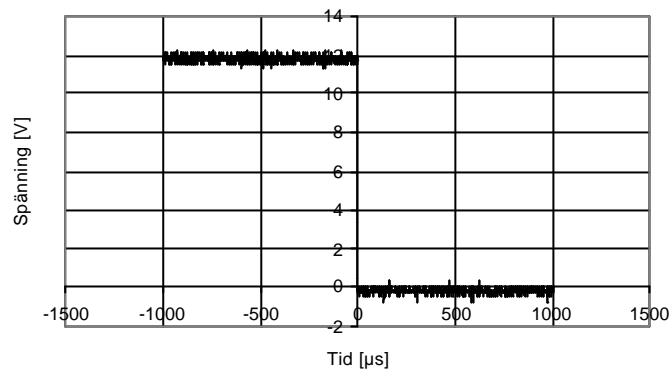
Innan arbetet med startmotorn påbörjades gjordes ett antal prover i mindre skala för att utröna om transistorerna var användbara. Parallellkopplingar av transistorer som fick driva mindre laster för att kunna mäta strömdelning och temperatur.

3.1. Styrkrets

En enkel styrkrets för att kontrollera transistorerna konstruerades, se Figur 10. Kretsen fungerar enligt följande. Överst finns en 5 V matning bestående av en 7805 och kondensatorer för att stabilisera in och utspänning. Längst till vänster finns en tillslagsbrytare. Kondensatorerna är till för att erhålla studs fria tillslag. Inverteraren är till för att erhålla diskreta lägen men även för att övergå till logiknivå. Transistorparet T1 bildar ett drivsteg som driver en MOSFET, BUZ11, som i sin tur driver BTS555:orna. När tillslag ges öppnar MOSFETen och jordar BTS555:orna via motståndet R2. Via R7, ett R7 för varje transistor, kan de individuella strömmarna mätas och via R8 kan den totala strömmen mätas. Kretslösningen är gjord för att erhålla snabba och studs fria stegfunktioner när manöverkontrollen slås till respektive från, vilket mätningar presenterade i Figur 11 verifierar. Ett bra insteg gör det lättare att studera tillslaget av transistorerna. Till styrkretsen kopplades även mätmotstånd för tio transistorer i serie med ett mätmotstånd för totala strömmen.



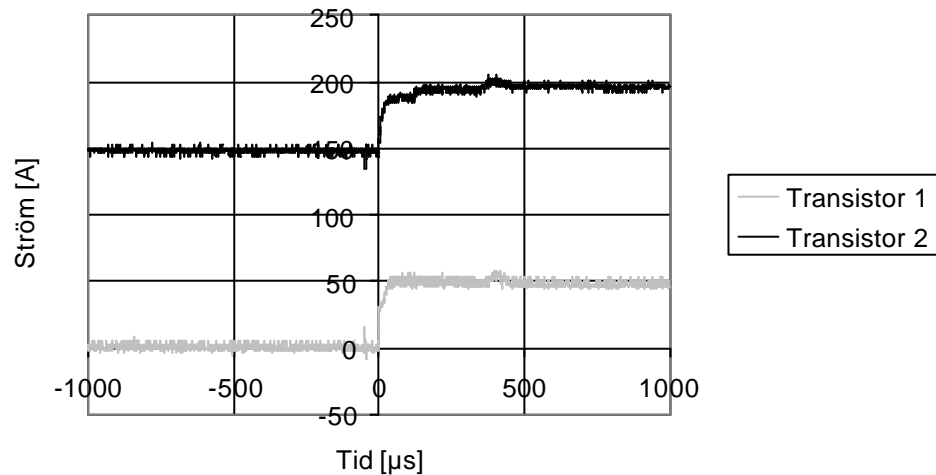
Figur 10 Kontrollkrets för BTS555or



Figur 11 Tillslaget från kontrollkretsen

3.2. Två stycken parallella transistorer

För att kunna driva större laster parallellkopplas flera transistorer för att dela på strömmen. Tester gjordes för att studera hur tillslag och strömdelning ser ut mellan de olika transistorerna. I ett inledande skede provades två parallella, för att utökas till fyra och slutligen tio. Tio behövs för att kunna driva startmotorn. De två transistorerna kopplades till en last av ungefär 100 A och tillslaget mättes med mätbenen. Resultatet visas i Figur 12.

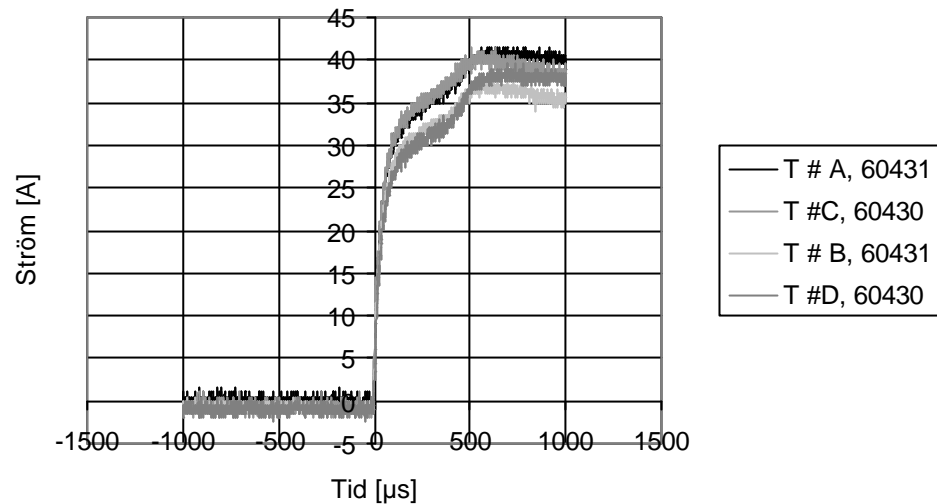


Figur 12 Tillslag för två parallella transistorer

3.2.1. Resultat

Variationerna mellan strömmarna är små och resultatet har funnits vara tillräckligt bra för att arbeta vidare med. Om en transistor är mycket snabbare vid tillslag än den andra skulle den snabbare initialt leda en mycket större ström. Ett sådant förlopp skulle bidra till ökat slitage, eller till och med direkt haveri, på den snabbare transistorn. En fördel med transistorer av mosfet typ är att de har en positiv temperaturkoefficient. Drar en transistor mer ström, blir den varmare och resistansen i den ökar. Den ökade resistansen gör att mindre ström flyter genom transistorn och den andra transistorn leder mer ström till dess att skillnaderna mellan dem är utjämnade. Värmeutvecklingen mellan transistorerna är jämnt uppdelade mellan dem och studeras

närmare i 3.3.1. Proverna upprepades för fyra transistorer och liknande resultat nåddes där, se Figur 13. Skillnaden i ström mellan dem är inte så stor och kan bero på olika resistans i ledaren till transistorerna, varierande inre resistans och varierande strömmätning.

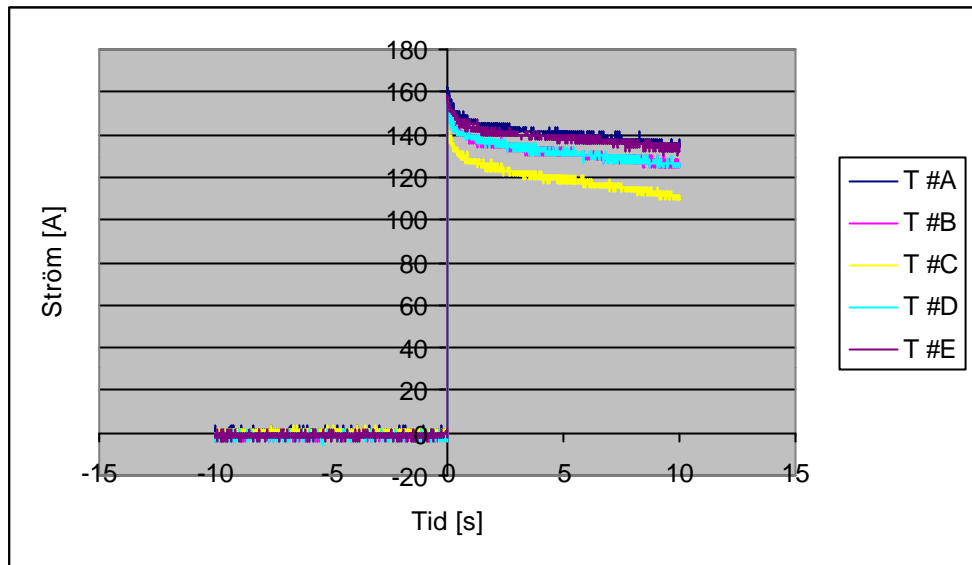


Figur 13 Tillslag för fyra parallella transistorer

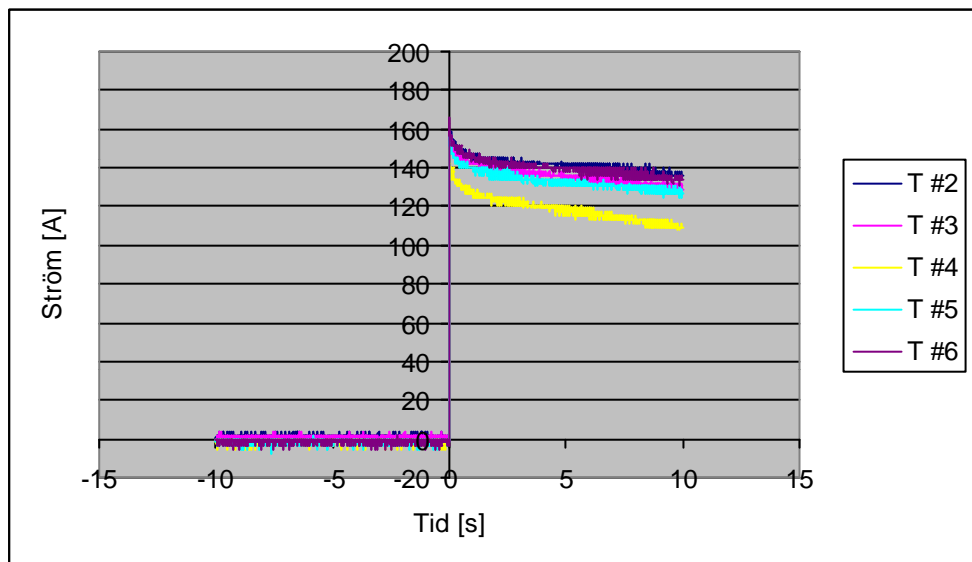
3.3. Tio stycken parallella transistorer

Provet utökades till mätningar på tio stycken parallella transistorer. Till transistorerna anslöts en last på 1150 A vid 12 V. Anledningen att 12 V användes och inte 24 V var att lasten klarade maximalt $1500 \times 12 = 18 \text{ kW}$ (eller 750 A vid 24 V). Eftersom det är de höga strömmarna som orsakar värmeutvecklingen kunde 12 V användas. Lasten, {4} är förhållandevis långsam i sitt förlopp varvid själva tillslaget är svårt att mäta på ett korrekt sätt. Istället är den kontinuerliga strömmen som varje transistor leder av intresse, för att kontrollera att ström- och temperaturlagningen mellan transistorerna är jämn.

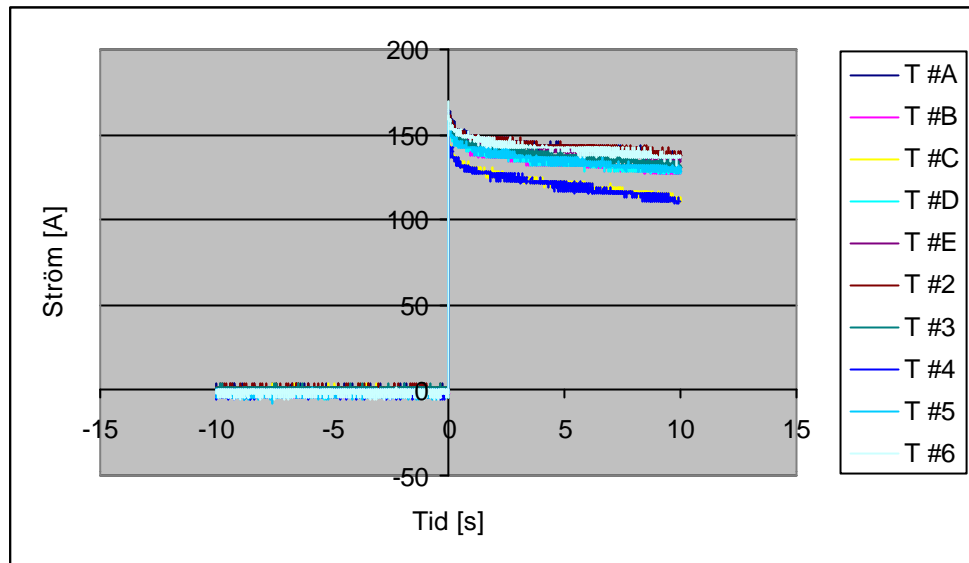
Det har inte funnits tillgång till något tiokanals oscilloskop, istället har strömmen genom fyra transistorer mätts, med två olika oscilloskop {5}, {6} och sedan flyttas till fyra nya och på det viset fått fram alla strömmar. En nackdel är att alla strömmar inte mäts vid samma tillfälle. Lastströmmarna är förhållandevis konstanta och därför valdes metoden istället för att mäta med fem olika oscilloskop som även det ger upphov till onoggrannheter. Transistorerna är monterade i rad på en platt aluminiumprofil. Inkommande ström är placerad i mitten och transistorerna i graferna nedan som är döpta A till E sitter till vänster om ingången och de som är döpta 2-6 sitter till höger om ingången. Strömmarna mättes med transistorernas egna mätben, med samma testkrets som i Figur 10. Resultatet av mätningarna finns i figureerna nedan.



Figur 14 Strömmen genom transistorerna A till och med E



Figur 15 Strömmen genom transistorerna 2 till och med 6



Figur 16 Strömmen genom alla transistorerna

Variationer i strömmarna kan bero på monteringen vid plattprofilen. Ledningsresistansen till transistorerna längst ut på profilen är högre än för de som är monterade närmast anslutningen, det kan påverka strömdelningen. Små variationer i lastströmmen och att batterispänningen kan ha sjunkit mellan testerna. Den linjära minskningen mellan två och tio sekunder beror på variationer i strömmätningen på grund av temperaturen. Under den första sekunden påverkar lasten och batterier.

Efter en period om 10 sekunder ökade temperaturen med cirka 25 °C. Det kan även påverka hur mycket ström som flyter genom varje transistor. Mätningarna är gjorda genom att mäta E och A samtidigt, de med störst inbördes avstånd, för att sedan mäta D och B och så vidare.

3.3.1. Värmeutveckling

Transistorerna belastades med 1150 A under 3 stycken 15 s långa intervall med en avsvälningstid på 2.5 minuter. Transistorerna hinner inte svalna helt under denna tid, men tillräckligt mycket för att den totala temperaturdifferensen inte ska bli för hög. I försöket var initialtemperaturen ca 30°C. Temperaturskillnaden mellan varje cykel är cirka 15°C. En lite högre temperatur uppnås först, sedan kyls transistorerna av under vilocykeln.

Värmeutvecklingen i transistorerna är av högsta vikt för att kunna dimensionera kylningen. Då tiderna är korta kommer det att vara svårt att kyla transistorerna, istället måste värmen ledas bort och fördelas i en kylfläns som får absorbera värmen. För att få en uppfattning om kylflänsens storlek kan följande beräkningar och antagande göras:

$$\text{Specifik värmekapacitet: } c_{\text{aluminium}} = 903 \frac{\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \quad [4]$$

$$\text{Densitet: } d_{\text{aluminium}} = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad [4]$$

Ett värsta fall antas, nämligen maximal resistans, hög initialvärme på kretsarna och maximal startström. Antagandet är osannolikt eftersom transistorerna sällan har en temperatur av 85°C och motorn ska kallstartas. Scenariot är ändå intressant eftersom det ger en god fingervisning av vad transistorerna ska kunna tåla. Startmotorn ska gå att köra i tio sekunder och vi räknar med att sex stycken startförsök kan göras.

$$R_{max}=5,0 \text{ m}\Omega \text{ vid } 85^\circ\text{C}$$

$$n=10 \text{ st, antalet parallella transistorer som används.}$$

$$I_L=1150 \text{ A}$$

$$T_{start}=85^\circ\text{C}$$

$$t=10 \text{ s} \times 6 \text{ försök} = 60 \text{ s.}$$

$$T_{slut} \quad 150^\circ\text{C}$$

Ekvation 2 Beräkning av erforderlig volym hos kylflänsen

$$V = \frac{W}{C \cdot d \cdot \Delta T} = \frac{R_{inre} \cdot I_L^2 \cdot t}{C \cdot d \cdot \Delta T \cdot n} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1150^2 \cdot 60}{903 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 65 \cdot 10} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 0,25 \text{ dm}^3$$

Resultaten visar att värmeutvecklingen är ett fullt lösbart problem. Temperaturerna är uppmätta med ett termoelement fäst mot kylflänsen så temperaturen i transistorerna kan vara högre. Vid en hög startström är det troligtvis kallt ute vilket även sänker arbetstemperaturen.

3.3.2. Resultat och förbättringar

Tio stycken parallellkopplade transistorer fungerar bra att använda för att driva en last. Inga större temperaturvariationer mellan transistorerna har kunnats kännas med fingrarna på transistorerna och strömdelningen är acceptabel. En kylfläns kan monteras för att påskynda avkylningen vid pausen mellan startförsöken.

4. Förvärmningselementet

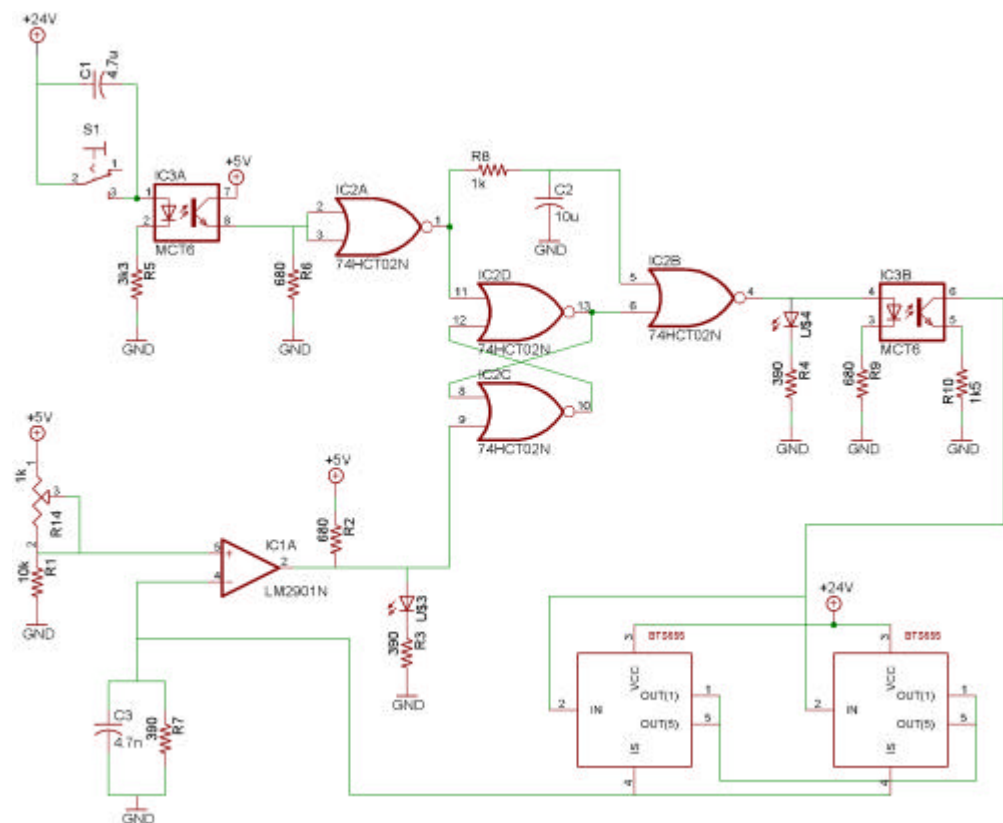
Utifrån de inledande proverna konstruerades en prototyp för hur reläet som sköter värmeelementet till insugningsluften kan ersättas med transistorer. Enligt specifikationerna i tabell 2, Bilaga 1 drar värmaren maximalt 225 A – vilket ger att 2 transistorer räcker för att klara lasten.

4.1. Drivkretsen

Drivkretsen till transistorerna är uppbyggd enligt Figur 17. En kontinuerlig signal på 24 V ges som startsignal och aktiverar en optokopplare som ger signalen tillslag. Ytterligare en optokopplare används för att aktivera transistorerna om inte överströmsskyddet som finns i kretsen är aktiverat. Optokopplare används för att få galvanisk åtskiljning samt att de är lätta att handha. Totala strömmen genom transistorerna mäts genom att benen parallellkopplas och ansluts till ett mätmotstånd. Överströmsskyddet mäter spänningen över mätmotståndet och jämför den med en referensspänning. Flyter det en ström större än 225 A aktiveras en SR-latch av NOR-grindar och styrsignalen avbryts. Latchen används för att överströmsskyddet ska ligga kvar även sedan strömmen minskas. Latchen bryter skyddet tills dess att en resetsignal ges. Resetsignalen erhålles när styrsignalen slås av. Tillslaget är fördröjt cirka 50 μ s för att säkerställa att latchen inte är i något förbjudet läge.

Transistorerna monteras på en aluminiumprofil med en kylfläns på toppen. Kretskort och transistorer monteras och försluts i en låda med en inkommande anslutning och en utgående. En fyrledad styrkabel finns även till lådan, där kablarna har följande funktioner:

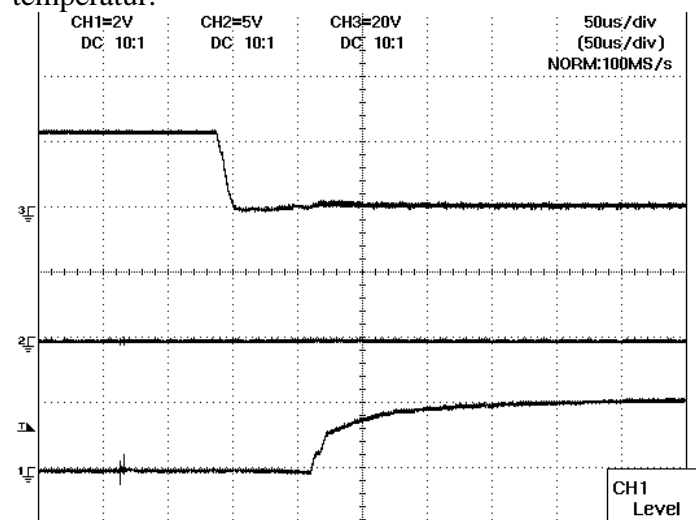
| | |
|--------|--|
| Svart: | Inkommande jordningen. Observera att den måste vara ansluten annars föreligger skaderisk på transistorerna |
| Röd: | Strömmätning ut. Mäter spänningen över mätmotståndet om strömmen till värmaren vill mätas externt. |
| Grå: | Tillslag, +24 V |
| Gul: | Indikation överström |



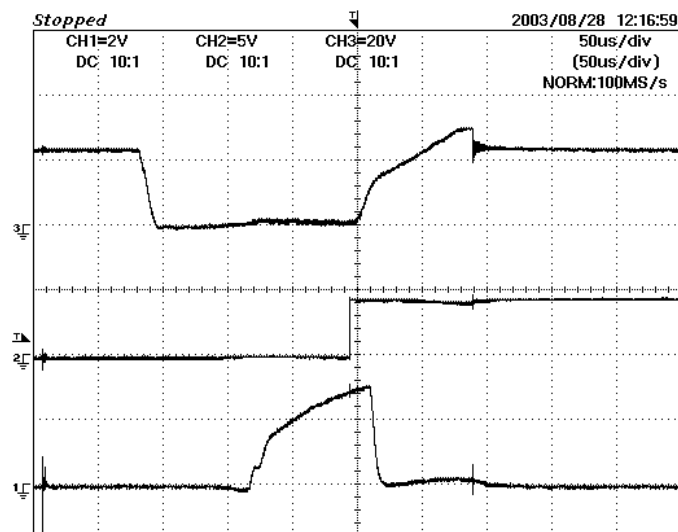
Figur 17 Drivkretsen till värmaren

4.2. Resultat

Prover gjordes på kretsen av tillslag, frånslag, frånslag vid överström och temperatur.



Figur 18 Tillslag av förvärmare, för förklaringar, se Tabell 5



Figur 19 Frånslag vid överström

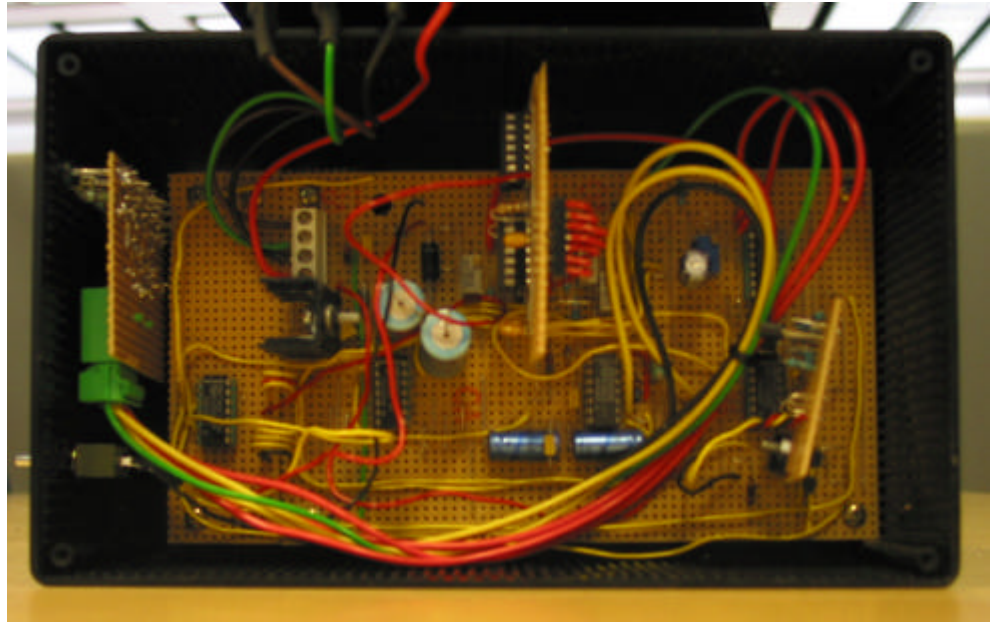
Tabell 5 Förklaringar till Figur 19 och Figur 18

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|-----------------------------------|-------------------|
| 1 | Ström, mätben cirka 150 A / ruta | 50 μ s / ruta |
| 2 | Överström, hög signal = aktiverat | 50 μ s / ruta |
| 3 | Tillslag, låg signal = Tillslag | 50 μ s / ruta |

När överströmskyddet indikerar överström vid exempel en kortslutning slås transistorn ifrån och strömmen återgår till noll på mindre än 50 μ s. Brytningen av strömmen är mycket snabb och förhindrar att för stora strömmar flyter i kretsen för länge.

5. Styrkrets för startmotor

Utifrån värmaren och testerna på transistorerna har en styrkrets för startmotorn konstrueras. För komplett kretsschema se Bilaga 4. Hur den färdiga kretsen ser ut visas i Figur 20.



Figur 20 Styrkrets för startmotor

Kretsen består av skyddskretsar och tillslagskomponenter. Startmotorn kan främst ta skada av höga temperaturer, men även överström eller för lågt bromsmoment – det vill säga underström så att övervarv detekteras genom underström. Fem olika skyddsfunktioner implementeras, och varje enskild funktion bryter startströmmen om ett fel uppstår. Skydden som implementeras är överström, strömspikar, underström samt drift- och avsvälningstid. Överström och strömspikskyddet skyddar även mot kortslutning. Inget externt temperaturskydd finns mer än att drifttiden begränsas och att startmotor får tid att svalna mellan startförsöken. Ett ytterligare skydd har konstrueras för att skydda transistorerna mot underspänningar, eftersom de lätt tar skada av att arbeta i det linjära området.

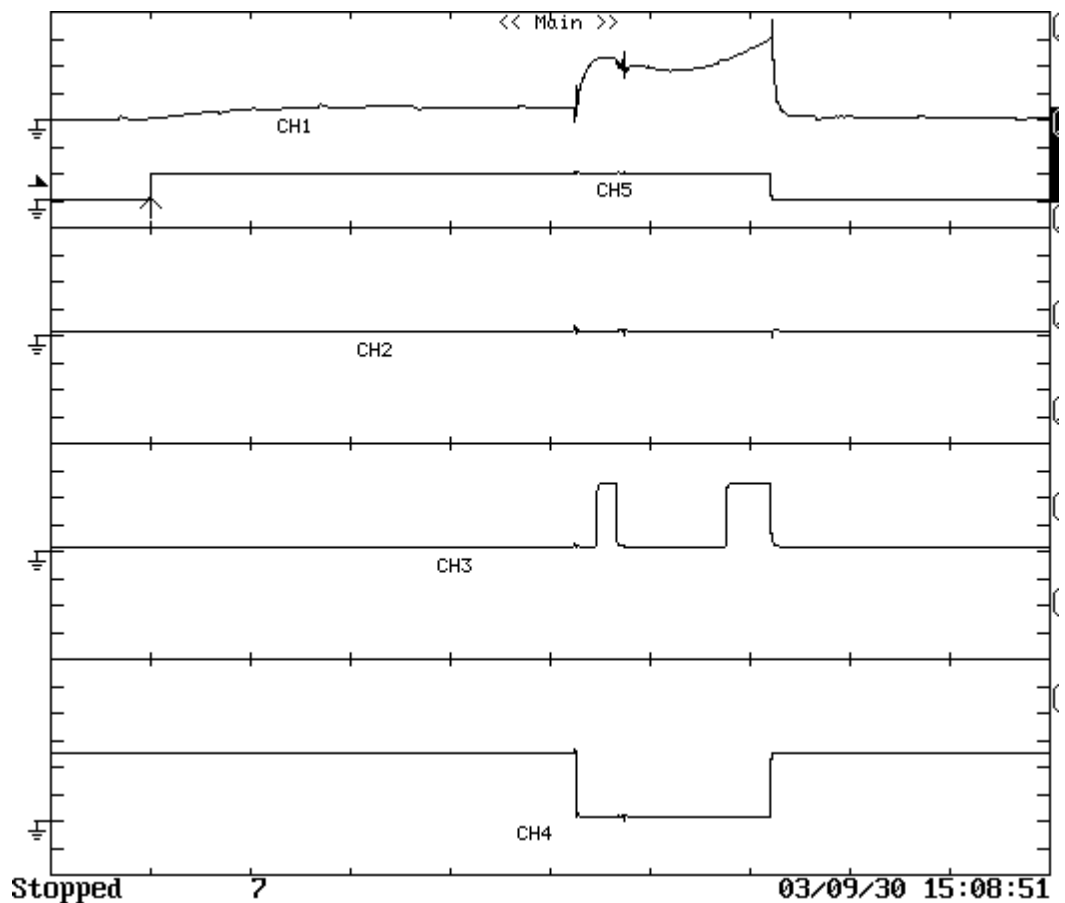
5.1. Överströmskydd

Till båda överströmskydden används komparatorn LM2901N [5]. Valet av komparator är baserat främst på dess temperaturlåglighet och dess enkla handhavande. En referensspänning skapas genom spänningsdelning och stabiliseras med kondensatorer. Logisk etta på komparatorns utgång indikerar fel. För att inte få ett oscillerande förlopp vid överström används en hållkrets, precis som för förvärmningselementet, bestående av en SR-latch. Detekterar komparatorn en överström kommer latchens set-ingång att gå hög. Resultatet blir att latches låser detta värde på sin utgång och grindlogiken bryter tillslaget då ett fel föreligger. När tillslagsbrytaren ändras till frånslag erhålls en resetsignal. Resetsignalen är fördröjd för att förhindra att latches hamnar i det förbjudna läget. Förbjudet läge är när reset- och setsignal är

höga samtidigt. Låskretsen säkerställer att startnyckeln måste släppas efter en överström för att ett nytt startförsök ska kunna göras.

5.1.1. Skydd mot långvarig överström

För att skydda mot långvarig överström implementeras ett överströmskydd med tidsfördröjning. Enligt specifikation angiven i tabell 1, Bilaga 1 kan en strömspik på maximalt 10 ms tolereras. En överström kan vara orsakad av direkta kortslutningar som uppkommit till följd av felmontage, slitage, fabriktionsfel eller liknande. En sådan kortslutning orsakar inte startmotorn någon direkt skada, och är därför ovidkommande i sammanhanget bortsett från att den orsakar kraftig värme. Transistorn har inbyggda skydd mot bland annat överström och det är enbart startmotorn som behöver skyddas med ytterligare kretsar. Överström kan även orsakas av att en växel är ilagd, vilket i sin tur kräver ett mycket stort vridmoment för att dra runt förbränningsmotorn. Den sista viktiga orsaken till överström är interna fel i startmotorn, till exempel skadade lindningar eller lager. Vid ett sådant fel är det stor risk för ytterligare skador på startmotorn. I Figur 21 ser man tydligt hur överströmskyddet, kanal 3, slår från transistorerna först efter att den maximala tiden för startströmspik uppnåtts. Tillslag och ström visas i kanal 5 respektive kanal 1. Strömmen visar ca 500 A / ruta {7}. Då det mekaniska reläet är relativt långsamt, har tiden trimmats in till att motsvara ca 10ms plus reläets tillslagstid. Det syns även tydligt hur underströmskyddet, kanal 4, löser ut då strömmen minskat tillräckligt mycket. Kanal 2 visar strömspikskyddet, vilket ej löser ut. Tidsskalan är 10 ms / ruta.



Figur 21 Överströmskyddet aktiveras

5.1.2. Skydd mot kortslutning

En kraftig strömspik tyder på ett abnormt beteende hos startmotorn och den bör skyddas från dessa. Den maximala strömstyrka som tolereras kortvarigt är enligt specifikation 2 000 A, under en tid av max 10 ms. Eftersom det aldrig ska tolereras strömmar över 2000 A, impliceras ett enkelt överströmskydd som bryter direkt vid denna ström.

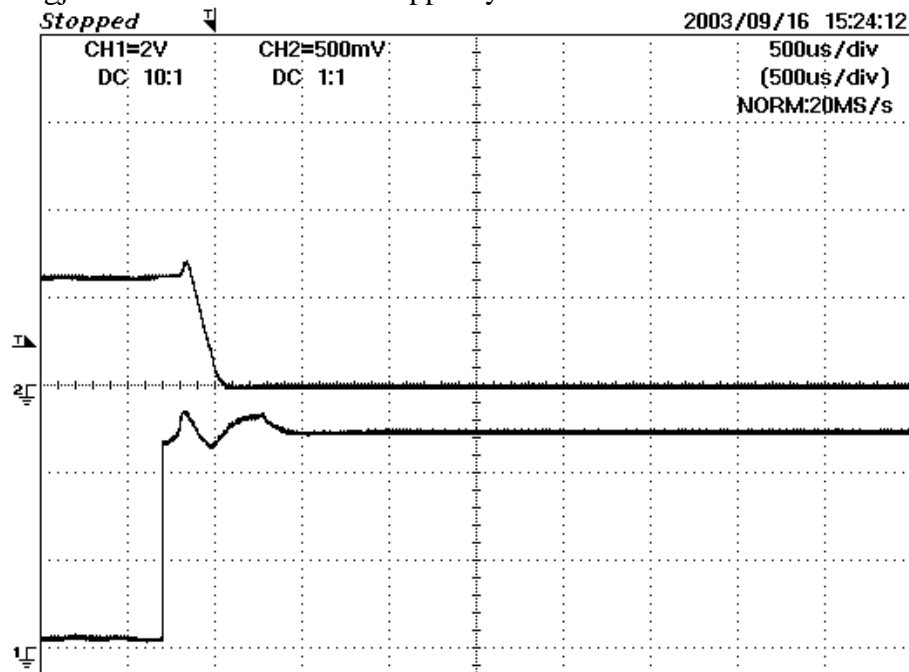
5.2. Skydd mot underström

En låg ström genom startmotorn kan betyda olika saker. I ett initialt läge måste startströmmen först stiga, eftersom den före tillslaget är noll. För att inte underströmskyddet ska lösa ut i detta skede fördröjs aktiveringen av detta skydd med 10ms. Om startströmmen inte stiger till ett tillräckligt högt värde tyder detta på att startmotorns drev inte kuggat i kuggkransen på svänghjulet korrekt. Detta är ett fel, och underströmskyddet ska bryta strömmen.

5.2.1. Test av underströmsskydd

För att verifiera att strömskyddet fungerar kopplades kretsen upp och motorn startades. Lasten minskades sedan till dess att underströmsskyddet löste

ut, se Figur 22. Skalorna är för stora för att se minskningen tydligt och hade de gjorts mindre hade inte förloppet syns.



Figur 22 Frånslag från underströmskyddet

Tabell 6 Förklaringar till Figur 22

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|------------------------------------|---------------|
| 1 | Underströmskydd, 2 V / ruta | 500 µs / ruta |
| 2 | Ström, med strömprob, 500 A / ruta | 500 µs / ruta |

5.3. Tidskydd

5.3.1. Skydd mot för lång kranktid

För att skydda transistorer och startmotor mot överhettning tillåts bara en begränsad kranktid. Enligt specifikation är denna 10 s. Skyddet implementeras med hjälp av en timerkrets, SA555N [6]. Timerkretsen tillåter inte start så länge som startnyckeln inte vridits om till startläge. Vid startförsök genereras en puls som aktiverar timerkretsen och varefter den i maximalt 10 s tillåter start. När de tio sekunderna säkerställer kretsen att ingen start tillåts.

5.3.2. Skydd mot för kort avsvälningstid

För att transistorerna och startmotorn ska hinna svalna mellan startförsöken används en timerkrets som tillser att tillslag inte kan ske innan en förutbestämd tid gått. Vid frånslag, antingen manuellt eller orsakat av något fel, aktiveras timerkretsen och ingen start tillåts förrän efter två och en halv minut.

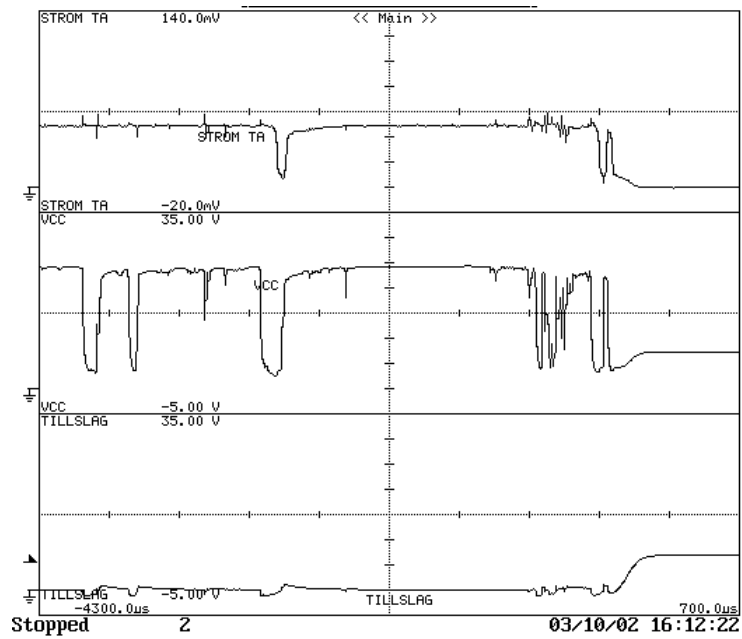
5.4. Tillslag

Tillslaget ges genom en brytare som är konstruerad för att erhålla studsritt tillslag. Istället för kondensatorer som för värmaren har en annan modell valts för att minska slitaget på brytarkontakterna när kondensatorerna laddas

upp. När tillslaget är aktiverat och inget fel föreligger i kretsen aktiveras ett drivsteg till en MOSFET, T1 som jordar ingångarna. Drivsteget är till för att göra ett snabbt tillslag och inte belasta grindlogiken med strömmar. Då tillslaget för BTS555 är relativt långsamt, finns inget behov av att transistorn som styr den slås till särskilt fort. Drivsteget i form av två bipolära transistorer skulle därför kunna uteslutas ur kretsen om motståndet R15 ersätts med ett 10 k Ω motstånd istället. Drivsteget orsakar dock ingen skada och har därför fått vara kvar för att försäkra sig om att styrkretsen klarar av att driva transistorn. MOSFETen som sköter jordningen är av modellen BUZ11, tål cirka 26 A och är kraftigt överdimensionerad men fanns tillgänglig. BUZ11 har dessutom ett lågt pris.

5.5. Underspänningsskydd

I anslutningen till MOSFETen sitter ett underspänningsskydd som ska se till att skydda transistorerna. För att skydda transistorerna mot underspänning har ett underspänningsskydd implementerats i startmotorstyrningen. Detta skydd är avsett att skydda transistorerna från att arbeta i det linjära området. Ett typiskt tillfälle då man riskerar att skada transistorn är om jordanslutningen inte är korrekt anluten. Ett sådant fel kan lätt uppstå vid slitage av kablar eller glapp i kontakter. Skyddet kommer att ge transistorn T1 en låg ingång om matningsspänningen sjunker under en viss nivå. Eftersom skyddet är kopplat direkt till matningsspänningen kommer fel att detekteras en stund innan de övriga kretsarna tappar sin matningsspänning, detta tack vare de två stora kondensatorerna i 5 V matningen. För att verifiera att skyddet fungerar, lastades 2 stycken BTS555 med ca 200 A, varvid jordanslutningen till skyddskretsarna kopplades bort. Skyddet fungerade som väntat och slog ifrån innan någon skada på transistorerna hunnit uppstå, se Figur 23. Ett flertal identiska försök gjordes och transistorn klarade alla testerna. Vid tidigare försök när jordanslutningen glappat eller glömts bort har transistorerna gått sönder.



Figur 23 Frånslag vid bruten jordning

Tabell 7 Förklaringar till Figur 23

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|---------------|
| 1 | Ström, transistorerna, ca 440 A / ruta | 500 µs / ruta |
| 2 | Matningsspänning 5 V / ruta | 500 µs / ruta |
| 3 | Tillslag (Hög signal = frånslag), 5 V / ruta | 500 µs / ruta |

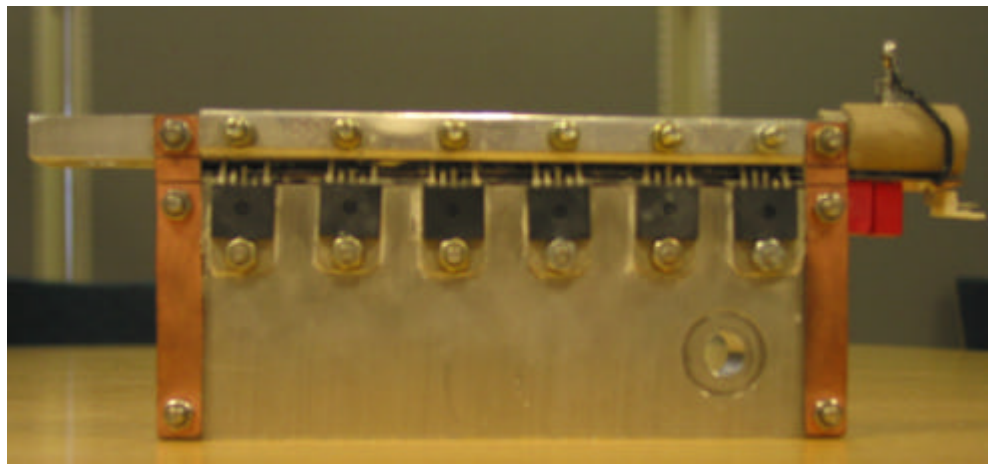
6. Inledande test på startmotor

De inledande testerna på startmotor genomfördes i en testrigg för startmotorer. Riggen bromsar motorn med hjälp av en bromstrumma, och uppvisar därför ett beteende som inte är riktigt likt en förbränningsmotor. De slutsatser som kan dras av dessa tester kan därför väntas vara av betydelse huvudsakligen för valet av frihjulsdiod. Syftet med mätningar i rigg var att kontrollera att transistorerna tål den höga startström som startmotorn drar initialt, dess kontinuerliga ström och brytning av strömmen vid avslag. Belastningen av startmotorn kan varieras för att prova över- och underström.

6.1. Montering av transistorerna

Transistorerna monterades på en fläns av aluminium. Anledningen till att aluminium istället för koppar valdes är dess lägre pris, att materialet är enklare att bearbeta och det fanns tillgängligt. Aluminiums höga energilagringsskapacitet och låga vikt är andra fördelar gentemot koppar. Tolv transistorer monteras i två rader på en 165 mm lång, 20 mm tjock och 60 mm bred platta, se Bilaga 3.

Transistorerna monteras i två rader, på ovan- och undersidan och benen ansluts genom att trycka fast dem emot en aluminiumprofil. Genom att ha anslutning och uttag i olika ändar av konstruktionen uppnås en ganska symmetrisk elektrisk delning. Styrbenen och strömmätbenen böjs ner mellan aluminiumprofilerna och lödes fast på ett dubbelsidigt kretskort där de även anslutes sinsemellan.



Figur 24 Transistorer, frihjulsdiod och kondensatorer monterade på kylblock

Volymen på profilen blir $1,65 \cdot 0,20 \cdot 0,60 \approx 0,2 \text{ dm}^3$ och den behövda volymen för tolv transistorer för att klara värmekraven är enligt Ekvation 2, avsnitt 3.3.1, $0,208 \text{ dm}^3$. Flänsen har ungefär rätt volym, den är lite mindre men skillnaden är liten och kraven vid volymberäkningen var höga.

Vid fel i någon transistor kommer den felande att tvingas leda en onormalt hög ström, vilket resulterar i att den går sönder och på det viset bryter

strömmen. Metoden kan uppfattas som brutal och osäker men det finns inget annat sätt att bryta en trasig transistor såvida inte en säkring eller liknande installeras på matningen. Att säkra varje transistor för sig resulterar i mer spänningsfall samt ökade kostnader. Eftersom transistorn ska fungera som säkring skulle det dessutom bli en ganska överdriven lösning med ytterligare säkringar, idag finns det ingen redundans över huvud taget ifall till exempel reläet fastnar. I denna applikation är det den felande transistorn som är svagaste länken och går sönder först. Att vi känner till vilken del som kommer att överbelastas är bra, eftersom vi då lättare kan förutspå hur systemet i sin helhet kommer att reagera. Lösningen ger dessutom en felindikering eftersom ben och eventuellt även kapslingen är trasiga.

6.1.1. Förbättringar

Ett problem med monteringen är att om en transistor går sönder, så kan de förkolnade resterna av transistorn kortsluta styrben och mätben. Detta gör att tillslag inte kan ske för att styrbenet matas med 24 V och kan inte jordas och strömskydden mäter 24 V och indikerar överström. För att förhindra detta problem kan säkringar monteras på det dubbelsidiga kretskortet. Förstör en transistor, går det för hög ström i styr och mätben och säkringarna bryter. Den trasiga transistorn blir elektriskt åtskild från övriga och tillslag kan återigen ske med de resterande transistorerna. Istället för säkringar kan även smala ledningsbanor användas.

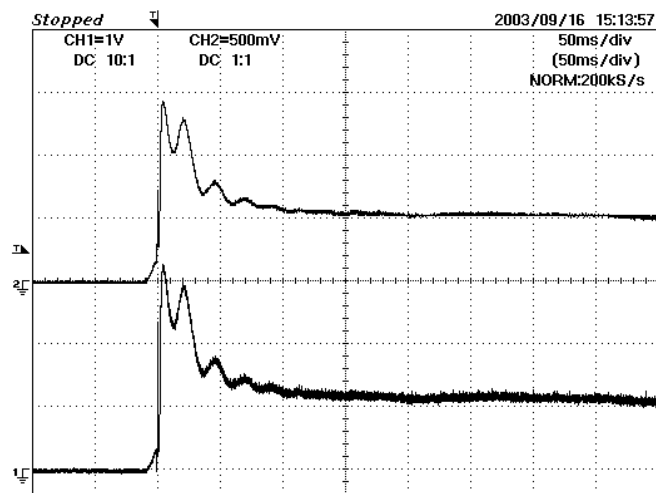
Nackdelen är att trasiga transistorer bör indikeras vilket utökar antalet utgående kablar med minst 12 stycken.

6.2. Mätningar på startmotor

Strömmen till startmotorn mättes med flera olika mätdon. Anledningen är att få en uppfattning om mätdonens tillförlitlighet i förhållande till varandra. Mätdonen som används är dels den inbyggda i BTS555, tångamperepob {8} (1 mV / A), två stycken 500 Amperes LEM-moduler {9}, en 500 Amperes LEM-modul {10} och en strömshunt {10}. Mätningarna visade att strömshunten och proben visade väldigt likvärdiga kurvor dock var strömshuntens signal förhållandevis brusig.

6.2.1. Tillslag

Tillslaget provades vid en last motsvarande cirka 500 A. Tillslaget visas i Figur 25.



Figur 25 Tillslag av startmotorn i riggen

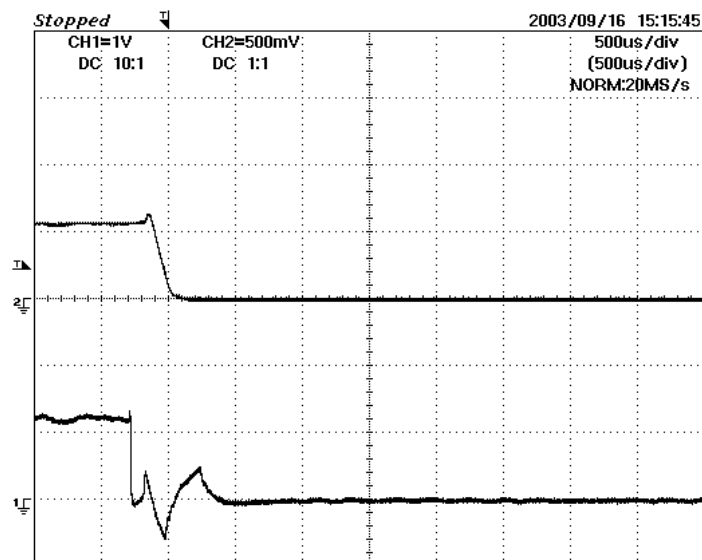
Tabell 8 Förklaringar till Figur 25

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|---|--------------|
| 1 | Inkommande ström, med mätben, ca 440 A / ruta | 50 ms / ruta |
| 2 | Inkommande ström, med strömprob, 500 A / ruta | 50 ms / ruta |

Den första lilla strömökningen vid cirka 80 ms är när solenoiden till startdrevet slår till. Efter den första strömökningen kommer spikar när startmotor ska magnetiseras och börjar driva lasten.

6.2.2. Frånslag

Frånslaget med hjälp av transistorerna uppvisar ett något oväntat beteende vilket visas i Figur 26.



Figur 26 Frånslag av startmotorn

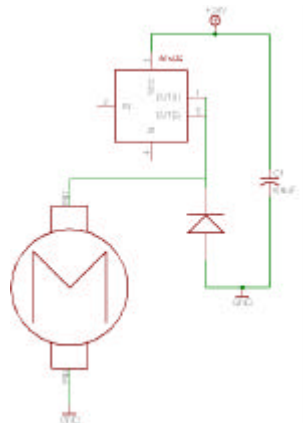
Tabell 9 Förklaringar till Figur 26

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|---|--------------------|
| 1 | Inkommande ström, mätben, ca 440 A / ruta | 500 μ s / ruta |
| 2 | Inkommande ström, med strömprob, 500 A / ruta | 500 μ s / ruta |

Det oönskade i beteendet är hur avslaget från mätbenet ser ut. Hur det snabbt minskar till noll och sedan har ett oscillerande förlopp i cirka 750 μ s. Medan strömproben däremot visar en avtagande ström. Förklaringen återfinns i databladet [3] att vid avslag av induktiva laster dröjer det cirka 500 μ s (teoretiskt värde) innan strömmätningen fungerar som den ska och visa det korrekta värdet noll. Tiden som erhöles i denna mätning är lite längre. Att strömmätningen är inkorrekt vid avslaget påverkar inte kretsarna eftersom avslaget redan är gjort.

6.3. Frihjulsdiod

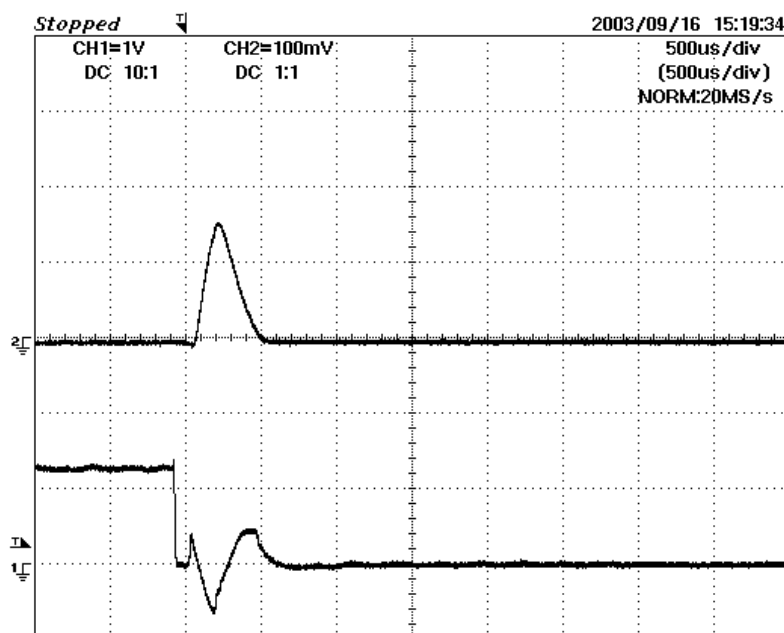
Eftersom startmotorn är en induktiv last, behövs det en frihjulsdiod som vid frånslag tar hand om den energi som finns lagrad i motorn. Dioden monteras antiparallellt med motorn och med minimalt avstånd från transistorerna, se Figur 27. Beroende på motorns inre resistans och induktans får strömmen genom frihjulsdioden olika amplitud och tidsomfattning. Diodströmmen bör bli lika stor som driftströmmen i ett initialt skede.



Figur 27 Frihjulsdiodens montering

6.3.1. Diodström

Diodströmmen mäts med strömproben och resultatet av mätningen redovisas i Figur 28.



Figur 28 Diodströmmen

Tabell 10 Förklaringar till Figur 28

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|---|---------------|
| 1 | Inkommande ström, mätben, ca 440 A / ruta | 500 µs / ruta |
| 2 | Diodström, 100 A / ruta | 500 µs / ruta |

Strömproben ger 1 mV / A vilket gör att toppströmmen på dioden uppnår till cirka 150 A. Mätmotståndet som mätbenen är kopplade till är på 68 Ω och strömmen före avslaget kan mätas till cirka $I_m = \frac{1,2}{68} \cdot 30000 \approx 530 \text{ A}$. Påståendet i 6.3 stämmer således inte. Diodströmmen är inte lika stor som driftströmmen – vilket den borde vara.

En frågeställning som ställs är om dioden inte börjar leda tillräckligt snabbt nog. För att evaluera detta anslöts en signalgenerator {12} till dioden seriekopplad med ett 56 Ω motstånd. En fyrkantvåg på 1 kHz användes. Mätningarna visade att dioden var mer än tillräckligt snabb, och att denna faktor skulle påverka kunde därför uteslutas.

Förklaringar till varför inte diodströmmen är lika stor som lastströmmen är följande:

- Delar av strömmen kan flyta genom transistorerna eftersom de slår av relativt långsamt.
- Solenoiden – Startmotorn klarar normalt att bryta strömmen genom att slå ifrån dess relä. Inga frihjulsdioder finns utan det är ett mekaniskt relä som sköter avslaget. Detta relä har inte kunnat monteras bort och finns fortfarande med och börjar även det slå av och därmed störa strömmen.

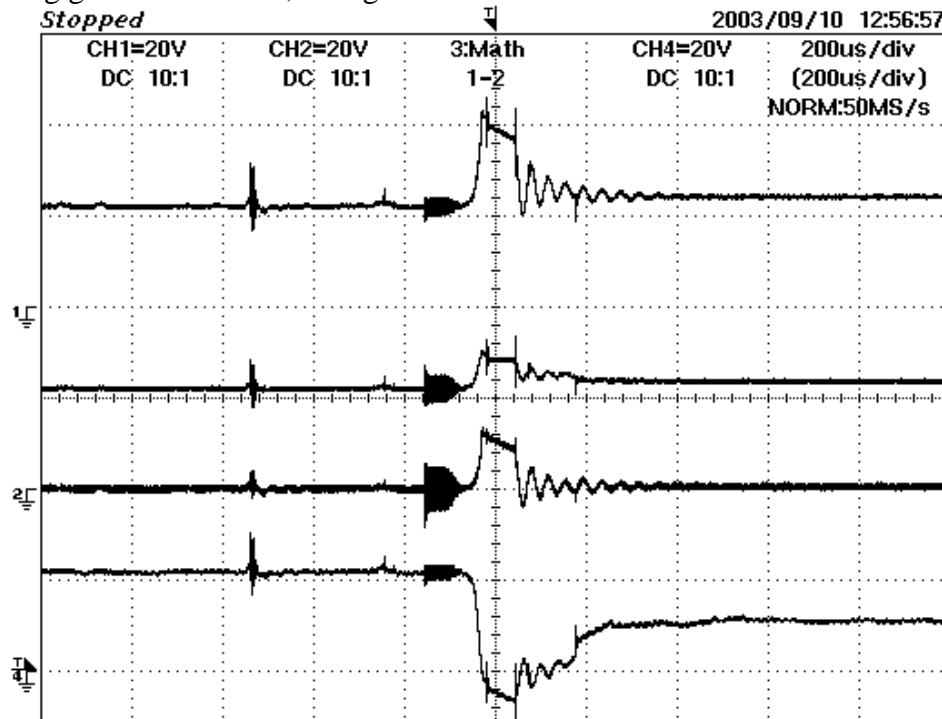
Kombinationer härutav följer. En del av strömmen tar vägen genom frihjulsdioden, en annan del går genom transistor och sen finns även reläet som bryter och urladdar induktanserna i startmotor och kablar.

6.3.2. Dimensionering

Utifrån dessa mätningar kan frihjulsdioden dimensioneras. En diod som fanns att tillgå användes först för att mäta strömmarna och sedan använda resultaten för dimensionera bättre då den första var onödigt stor. Vid dimensionering av en frihjulsdiod är diodens maximala driftström inte relevant. Dioder tål ofta många gånger sin maximala driftström om det bara sker under korta perioder. I fallet med en frihjulsdiod är förloppen korta. I mätningen ovan är tiden cirka 500 μ s. De faktorer som är viktiga att titta på är I^2t samt att dioden enkelt ska kunna monteras. Strömmen mättes till cirka 150 A i toppvärde och varade i ungefär 500 μ s. Det ger en I^2t faktor på $I^2t = 100^2 \cdot 500 \mu\text{s} = 5 \text{ A}^2\text{s}$. Utifrån kriteriet att den skulle vara lätt att montera valdes sedan en diod 12F10 från IR [7]. Dioden klarar av 100 V kontinuerligt och en I^2t faktor på cirka 350. Det gör att vi klarar en diodström på över 800 A i 500 μ s eller en ström på 600 A i 1 ms, vilket i praktiska prover visat sig vara fullt tillräckligt. Anodanslutningen är en skruv och monteras i ett gängat hål i aluminiumen och katoden jordas så nära kondensatorn C_1 i Figur 27 som möjligt.

6.4. Spänningar

Spänningsnivåerna i systemet är även av intresse eftersom det är stora strömmar och allt kablage och anslutningar har induktanser. En första mätning gav detta resultat, se Figur 29.

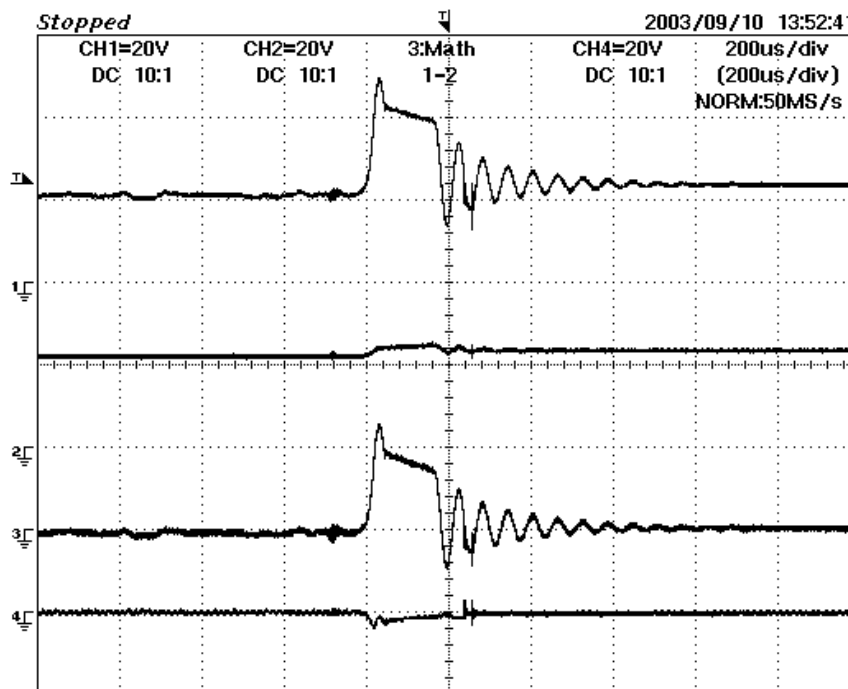


Figur 29 Spänningar vid fränslag av startmotorn

Tabell 11 Förklaringar till Figur 29

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|--------------------|
| 1 | Spänning, transistorringång, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |
| 2 | Batterispänning, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |
| 3 | Kanal 1 – Kanal 2 – spänningsfall i kablarna | 200 μ s / ruta |
| 4 | Spänning, Transistorutgång, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |

Spänningsspikar på upp mot 40 V förekommer på transistorringången för vid fränslag. Detta är viktigt att komma ihåg vid dimensionering av transistorerna. Transistorerna BTS555 tål att arbeta vid 34 V kontinuerligt och har överspänningsskydd vid 62 V. De existerande spänningsnivåerna borde inte vara skadliga för transistorn. För att vidare undersöka var dessa spänningstransienter uppstår anslöts en 3 meter lång, 25mm² kopparkabel i serie med ordinarie kablar på 70mm², resistansen och induktansen ökar. Den lilla kabeln lades i spolforn för att ytterligare öka induktansen. Försöket upprepadades och resultat återfinns i Figur 30.



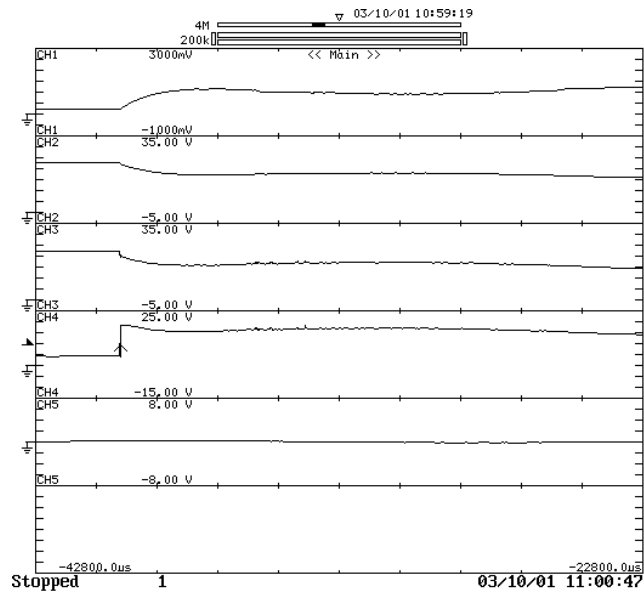
Figur 30 Spänningar vid fränslag av motorn med långa anslutningar

Tabell 12 Förklaringar till Figur 30

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|--------------------|
| 1 | Spänning, transistorringång, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |
| 2 | Batterispänning, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |
| 3 | Kanal 1 – Kanal 2 – spänningsfall i kablarna | 200 μ s / ruta |
| 4 | Spänning, motorutgång, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |

Nivån på spänningarna ändras inte med den ökande kabellängden men däremot ökar varaktigheterna av störningarna från 100 μ s till 200 μ s.

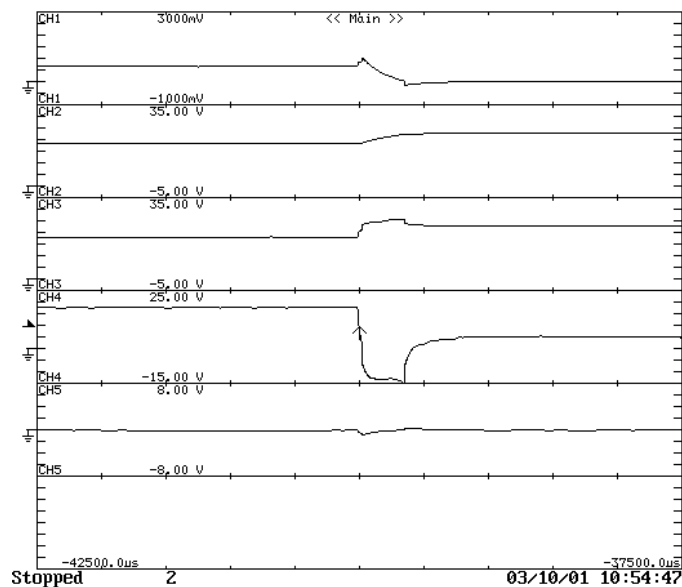
För att se hur mycket av spänningsvariationerna som orsakas av halvledarreläets konstruktion och egenskaper jämfördes till- och frånslag med och utan transistorer monterade.



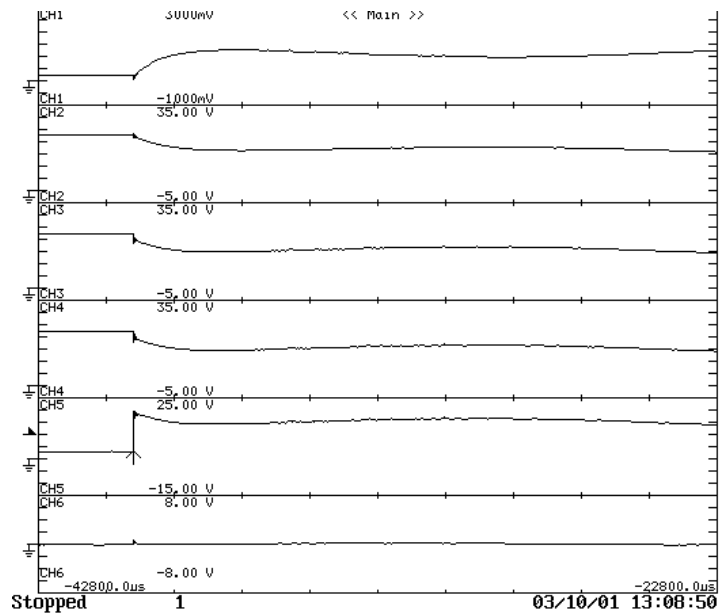
Figur 31 Tillslag av startmotor med konventionell utrustning

Tabell 13 Förklaringar till Figur 31 och Figur 32

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|-------------|
| 1 | Lastström med strömprob, 500 A / ruta | 2 ms / ruta |
| 2 | Batterispänning, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 3 | Matning vid solenoid, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 4 | Spänning mellan solenoid och motor, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 5 | Utgående anslutning vid motor, 2 V / ruta | 2 ms / ruta |



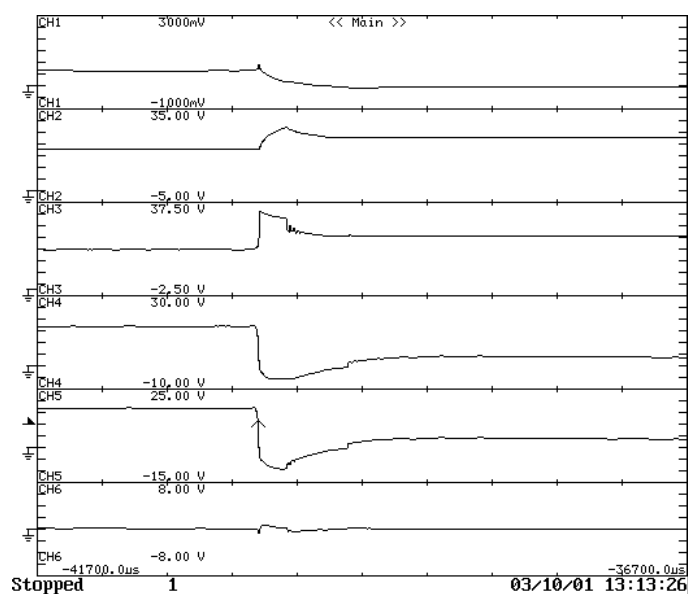
Figur 32 Frånslag av startmotor med konventionell utrustning, för förklaringar se Tabell 13



Figur 33 Tillslag av startmotor med transistorer

Tabell 14 Förklaringar till Figur 33 och Figur 34

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|---|-------------|
| 1 | Lastström med strömprob, 500 A / ruta | 2 ms / ruta |
| 2 | Batterispänning, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 3 | Matning till transistorer, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 4 | Spänning mellan transistorer och solenoid 5V / ruta | 2 ms / ruta |
| 5 | Anslutning mellan solenoid och motor, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 6 | Utgående anslutning från motor, 2V / ruta | 2 ms / ruta |



Figur 34 Frånslag av startmotor med transistorer, förklaringar se Tabell 14

6.5. Resultat

Resultaten av försöken har blivit att startmotorn kan köras med hjälp av transistorer och att de även klarar av frånslag. Vid frånslaget uppstår det en del spänningstransienter oberoende om transistorerna är inkopplade eller ej. Istället beror de på kablarnas resistans och induktans. Amplituden av transienterna är dock inte skadliga för transistorerna.

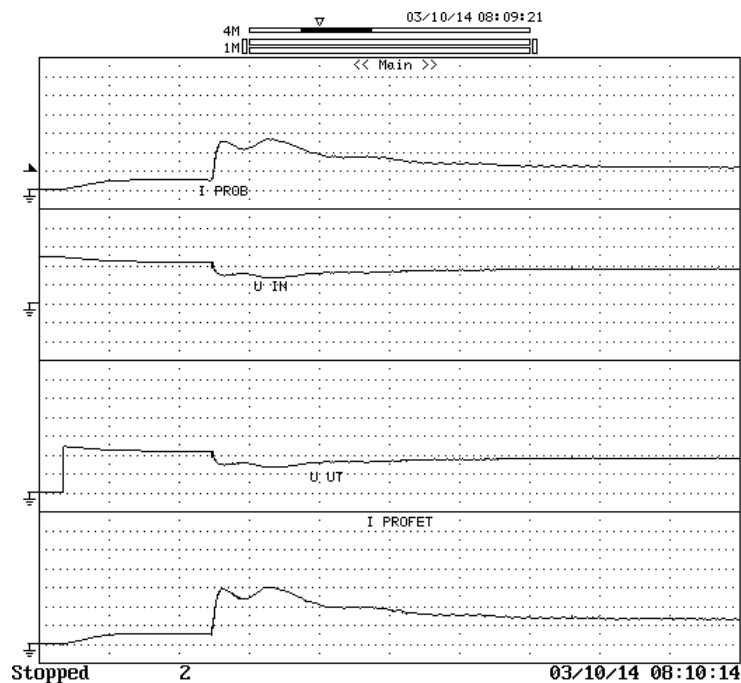
7. Avslutande prover

7.1. Start av lastbil

Provbilen som användes har en 16 liters, 610 Hks motor och således en av de största motorerna i sortimentet. De enda kopplingar som gjordes i lastbilen var att koppla in transistorerna mellan batteriet och startmotorn. Nyckeln behövdes således fortfarande vridas till läge start för att startmotorns reläer skulle slå till. Metoden valdes för att inte behöva göra modifikationer i lastbilen som skulle kunna påverka driften efter provena.

7.1.1. Start av kall motor

På morgonen utfördes starter av kall motor. Lastbilsstarten genomfördes vid en yttre temperatur av ca 3°C [8]. Resultatet av mätningen visas i Figur 35.



Figur 35 Start av lastbil

Tabell 15 Förklaringar till Figur 35

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|--------------|
| 1 | Startström enligt strömtång, 500 A / ruta | 20 ms / ruta |
| 2 | Spänning transistoringång, 10 V / ruta | 20 ms / ruta |
| 3 | Spänning transistorutgång, 10 V / ruta | 20 ms / ruta |
| 4 | Startström enligt transistor, 440 A / ruta | 20 ms / ruta |

Transistorerna blev inte kännbart uppvärmda, och inga transistorrelaterade problem inträffade. Vid start av aningen varmare motor, uppskattningsvis 10-15°C, drog startmotorn inte mer än cirka 150 A.

En önskad effekt var att laddströmmen från generatoren flöt genom transistorernas backriktning för att ladda batteriet. Förslag för att återgå detta är

att dra en separat kabel till generatorm. Det ger även fördelar för generatorm eftersom den kan kontrolleras för sig utan att påverkas av startmotorm.

Vill man trots det använda sig av samma kabel får strömmen ledas genom transistorens inbyggda diod eller en separat diod, monterad antiparallellt med transistorerna. Givaren för batterispänningen till generatorm får flyttas till batteriet så att generatorm genererar tillräckligt hög spänning. Spänningsfall över dioderna bör hållas så lågt som möjligt. Laddströmmen är cirka 80 A vid 24 V. Används transistorernas dioder bör man ta hänsyn till att kylningen av transistorerna måste förbättras eftersom förutsättningarna ändrats.

7.2. Miljöprover

Innan en produkt börjar användas i serieproduktion, måste den genomgå ett antal miljöprover. Dessa prover omfattar främst prover på värme- och vibrationstålighet. Då detta examensarbete inte handlar om att ta fram en färdig produkt, är sådana prover inte relevanta att göra. I produktion kommer antagligen mycket av skyddskretsarna ersättas av en processor, och all montering kommer att ske på mönsterkort.

7.3. Matningsspänningsprov

Vid bortfall eller spikar i matningsspänningen, måste kretsarna bete sig förutsägbart och inte ta skada. Vid spänningsbortfall från styrkretsen ska transistorerna bryta, eftersom stora skador annars kan uppstå på till exempel startmotorm. Det ska ej heller finnas möjlighet för styrkretsen att få transistorerna att operera i deras linjära område, eftersom det kan skada dem vid höga laster. För att skydda dem mot att arbeta i det linjära området har ett underspänningsskydd implementerats.

8. Alternativ lösning

Ett alternativ till att använda enbart transistorer av modellen BTS555, vore att kombinera ett antal diskreta transistorer med en BTS555. Materialkostnaden kan minskas men fortfarande kan strömmen mätas. Att bara mäta en delström kommer att ge ökade mätosäkerheter, eftersom komponenternas $R_{DS(on)}$ blir en viktig parameter för hur strömmen ska beräknas. Frånslaget till de diskreta komponenterna måste fördröjas lämplig tid eftersom BTS555 är långsammare. Så långsam att den riskerar skadas om den ensam tvingas leda stor ström vid frånslag.

Ett bra val av diskret transistor är IRF1404 [9], eftersom den har relativt lågt $R_{DS(on)}$, tål hög ström, och har ett lågt pris. Om en diskret NMOS-transistor används måste den ha en passande drivkrets. Drivkretsen behövs för att kunna bryta matningen till lasten och då måste spänningen på gaten vara högre än spänningen på drain för att transistorn ska slå ifrån helt. Det finns färdiga drivkretsar att köpa, en av dem är IR2125 [10]. IR2125 har till skillnad från många andra drivkretsar en minsta matningsspänning som tillåter att tidigare konstruerade 5 V-system används.

Följande beräkningar kan göras för att få en uppfattning om antalet transistorer.

Typiskt värde på $R_{DS(on)}$ är för BTS555 - 2.4 m Ω och för IRF1404 – 4 m Ω . Eftersom BTS555 har lägre resistans vill det gå en större ström genom den. Det kan förhindras antingen genom att parallellkoppla flera IRF1404 eller montera en lågohmig resistor i serie med BTS555an. Lösningen med resistor valdes bort eftersom det ger svårare montering samt att i en tillämpning där spänningsfallet ska vara så lågt som möjligt känns det fel att montera resistorer. Toleranserna för strömmätningen blir ytterligare sämre än tidigare eftersom även strömdelningen och $R_{DS(on)}$ påverkar.

Tabell 16 visar hur många IRF1404 som behövs vid ett visst antal BTS555or. Kostanden som visas är inklusive drivkretsen och baseras på uppgifterna ur Tabell 18. Kostanden för 10 stycken BTS555or är 288 kronor.

Tabell 16 Antal IRF1404 som behövs vid ett visst antal BTS555

| Antal BTSer | Antal IRFer | Kostnad |
|-------------|-------------|---------|
| 1 | 16 | 187,9 |
| 2 | 14 | 198,1 |
| 3 | 13 | 217,2 |
| 4 | 11 | 227,4 |
| 5 | 9 | 237,6 |
| 6 | 8 | 256,7 |
| 7 | 6 | 266,9 |
| 8 | 4 | 277,1 |
| 9 | 3 | 296,2 |

Lösningen med en BTS555 blir billigast. Det krävs i så fall 16 stycken IRF1404 och kostnaden blir cirka 188 kronor, alltså 65 % av det ursprungliga priset.

Ett annat alternativ är att montera en BTS555 och sedan räkna hur många diskreta transistorer av okänd typ det behövs vid bestämda $R_{DS(on)}$. Den diskreta transistorens strömtålighet måste också beräknas. Kolumnen maximalt pris anger hur mycket transistoren får kosta per styck för att kosta lika mycket som lösningen med bara BTS555or.

Tabell 17 Okänd modell av diskret transistor

| $R_{DS(on)}$ m Ω | I | Antal | Maximalt pris |
|-------------------------|-----|-------|---------------|
| 1 | 267 | 4 | 58 |
| 2 | 133 | 8 | 29 |
| 3 | 89 | 12 | 20 |
| 4 | 67 | 16 | 15 |
| 5 | 53 | 20 | 12 |
| 6 | 45 | 24 | 10 |
| 7 | 38 | 28 | 90 |
| 8 | 33 | 32 | 7 |
| 9 | 30 | 36 | 7 |
| 10 | 27 | 40 | 6 |

Vid 4 m Ω återfinns lösningen för IRF1404. Ur Tabell 1 är SPB80N06S2L-07 ett tänkbart alternativ ur tekniskt perspektiv. Eftersom det skulle kosta mer att använda SPB80N06S2L-07 än att använda IRF1404, finns det ingen anledning att undersöka den vidare.

Ytterligare ett alternativ är att enbart använda diskreta transistorer, av till exempel modellen IRF1404. Det skulle ge en kostnad på $89 + 17,5 = 106,5$ att jämföra med för BTS555 på 288 kronor. Nackdelen är att ingen strömmätning görs och alltså finns inga skydd för kortslutningar, överström eller underström.

8.1. Slutsatser

Materialkostnaden skulle minska relativt lite om man använde IRF1404 istället för BTS555, samtidigt som kostnaden för bearbetning av kylfläns och montering av transistorer skulle öka på grund av att det totala antalet transistorer ökar. Exakt hur mycket kostnaden minskar är därför svårt att avgöra, men sannolikt kommer den inte sjunka under 70 % av kostnaden vid användande av enbart BTS555. Värdet av de i BTS555 inbyggda skydden behöver med andra ord inte betraktas som särskilt högt för att kunna försvära dess högre pris i jämförelse med diskreta transistorer.

9. Ekonomi och kostnader

9.1. Huvudsakliga materialkostnader

Effekttransistorerna utgör en stor del av den totala materialkostnaden. Det är också viktigt att dimensionerna på kylflänsen hålls så små som möjligt, och att dess utformning ger så lite bearbetningsspill som möjligt. Genom att använda sig av en konstruktion bestående av släta aluminiumstycken som enbart bearbetats minimalt för transistorinfästningarna, kan ett sådant resultat uppnås. Förhållandet mellan antal transistorer och kylflänsens storlek bör beaktas, eftersom ett ökat antal transistorer tillåter en minskad kylfläns. Flera parallella transistorer minskar resistansen vilket leder till en minskad värmeutveckling och därför kan kylflänsen minskas. Detta förhållande kan naturligtvis inte betraktas enbart ur ekonomisk synvinkel, utan hänsyn måste även tas till pålitlighet, utrymmesbehov och värmeutveckling. Till applikationen har vi valt 12 transistorer och en kylfläns enligt Bilaga 4.

Tabell 18 visar priser från Arrow [11] på effekttransistorer samt drivkrets.

Tabell 18 Kostnader för komponenter

| Produkt | Pris | Vid köp av |
|-----------------------------------|-------|------------|
| BTS555, strömmätande | 28 | 500 000 |
| IRF1404, diskret n-mos transistor | 8,90 | 500 000 |
| IR2125, drivkrets | 17,50 | 50 000 |

9.2. Tillverkningskostnader

Kostnaderna för mekanisk bearbetning beror främst på kylflänsens utförande. Hålls denna enkel, kommer kostnaden för mekanisk bearbetning att hållas låg. Kostnaden för etsning av mönsterkort är så gott som oberoende av hur huvudkretsarna utformas. Det som främst påverkar är hur stor plats man har att disponera, eftersom ett kompakt mönsterkort ofta kräver en flerlagars teknik, vilket kostar mera.

Monteringskostnaderna beror till stor del på vilken utrustning som redan finns i den befintliga produktionen. Det är möjligt att använda ytmonterade komponenter till fullo, men i praktiken kan fallet bli annorlunda. Elektrolytkondensatorer är till exempel svåra att ytmontera och bör eventuellt bytas ut mot hålmonterade. Ska man hålmontera ett mycket litet antal komponenter kan det vara aktuellt att montera dem helt för hand, medan en mer krävande ytmontering i kombination med våglödning troligen blir lösningen om man har flera hålmonterade komponenter ihop med ytmonterade.

9.3. Totalkostnad

Det är svårt att avgöra exakt hur mycket en prototyp kommer att kosta, eftersom det delvis beror på kostnad för mönsterkort och montering. Istället för att utföra en fullständig analys av kostnaden, antas det att priset för kringkomponenter vid köp av 1000 enheter motsvarar priset för kringkomponenter, mönsterkort och montering vid köp av 50 000 enheter. Tabell 19 visar kostnaden för de olika delarna. Prisuppgifter för aluminium kommer

från Metallvaruhuset. Viktigt att notera är att metallpriser varierar och detta är dagspriset när uppgiften hämtades [12].

Tabell 19 Priser vid köp av 50 000 enheter

| Produkt | Pris³ |
|----------------------------|-------------------------|
| Kringkomponenter, mm | 30 |
| BTS555 | 336 |
| Aluminium, kylblock | 15 |
| Aluminium, motoranslutning | 2 |
| Summa | 383 |

Kylflänsen ska dock bearbetas och borraras med ett antal hål, transistorerna ska monteras på kylfläns, styrben lödas på kretskort och utgående ben klämmas fast mot utgående fläns. En rimlig uppskattning är att det tar cirka en timme att göra det, ifall kretskortet är etsat och klart, vilket är inräknat i kostnaden för kringkomponenter. Det är inte räknat med några avancerade maskiner och kostnaden för en timme är svår att uppskatta huruvida det ska betraktas som Volvo internt eller rena kostnaden för tiden. Därför anges istället en timme.

Sammanfattningsvis kan alltså sägas att en startmotorstyrning kostar knappt 400 kronor i material och ungefär en timmes tid i montering.

³ Vid köp av ett antal motsvarande 50 000 enheter/år

10. Diskussioner och slutsatser

10.1. *Diskussion*

10.1.1. Startmotor

Skydden som implementerats är för startmotorn och för med sig en del nackdelar som bör invägas i beslutet för hur en färdig produkt ska konstrueras. I och med att startström och tid begränsas, försvinner troligtvis möjligheten att kunna krankköra. Skydden har implementerats för att skydda transistorer och startmotor vid normala förlopp och det är därför viktigt att vara medveten om att möjlighet till start med växel i kan försvinna. Ytterligare en nackdel med användandet av halvledare istället för konventionella reläer är erfarenhet och utprovning. Konventionella reläer är väl utprovade och lider inte av barnsjukdomar längre. Halvledarreläer för stora strömmar är inte lika väl beprövade och kompetensen inom området är mindre.

10.1.2. Övriga laster

Reläer till andra tunga laster, till exempel förvärmaren, kan däremot bytas ut i sin helhet. Eftersom även säkring och säkringshållare ersätts av halvledarreläet, blir den ekonomiska merkostnaden mindre. I jämförelse med konventionella reläer är halvledarreläer till sådana applikationer ett alternativ som är värt att undersökas vidare ekonomiskt sett.

10.2. *Slutsatser*

Att byta ut konventionella reläer mot halvledarreläer har ett antal fördelar. En större möjlighet till övervakning och reläer kombineras med säkringar. Att använda ett halvledarrelä som huvudrelä till startmotorn eliminerar däremot inte behovet av en solenoid som slår till drevet. Att byta huvudreläet på startmotorn skulle därför innebära en ganska stor merkostnad, som kan vara svår att försvara ekonomiskt. Att införa halvledarrelä som huvudrelä till startmotorn måste troligen motiveras med ökade krav på diagnos och skydd för att bli aktuellt med dagens teknik och prisbild. För övriga kraftapplikationer i lastbilar kan halvledarreläer betraktas som ett potentiellt konkurrenskraftigt alternativ till konventionella reläer.

11. Fortsatt arbete

Strömmätningen som gjorts med BTS555 är inte alltid korrekt, till exempel vid frånslag, vilket syns i Figur 28. Detta påverkar inte styrkretsarna i denna applikation, men vid analyseringsarbete av kurvformer bör strömmätningen undersökas noggrannare. Genom att analysera utseendet på strömmen kan man avgöra vilken typ av fel som sannolikt har uppkommit eller kommer att uppkomma. Man kan till exempel avgöra om kuggarna på drevet är intakta eller ej. Vid analys av kurvformen kan det vara av intresse att korrigera för strömmätningens olinjäriteter vilket inte gjorts i detta arbete eftersom det endast är väl bestämda punkter som är relevanta.

Om man skall uppnå god precision bör man implementera korrigering för temperatur och vilken ström som går – för att bättre uppskatta strömomsättningen. Det innebär en ökande merkostnad och har inte varit försvarbart eftersom strömmätningen bara har en skyddande funktion.

Konstruktionen på styrkretsarna är lösta med hjälp av hårdvara. Detta har både för och nackdelar. En fördel är att inga buggar i ”programmet” finns och nackdelarna är att komponenter tar plats, åldras och har svårare att kommunicera med andra delar i systemet. Uppgiften lämpar sig bra för att implementeras med hjälp av en mikroprocessor. Vilket troligtvis är en bra lösning om kurvformer ska analyseras.

12. Referenser

- [1] Teknisk rapportering för teknologer, Gerd Eng och Ingemar Johansson, Chalmers, Göteborg
- [2] Results from winter test, engineering Report, Anders Gustavsson, 2001-04-17, ER-217328
- [3] Farnell, Datasheet BTS555,
<http://www.farnell.com/datasheets/33632.pdf>, 2003-06-13.
- [4] Physics Handbook, Carl Nordling, Jonny Österman, studentlitteratur, 1996, 5e upplagan, ISBN: 91-44-16575-7
- [5] Elfa, Produktinformation LM339N LM339M LM2901M LM2901N,
<http://www.elfa.se/pdf/73/730/07301500.pdf>, 2002-06-18.
- [6] Elfa, Produktinformation SA555N NE555D NA555N SA555D,
<http://www.elfa.se/pdf/73/730/07304116.pdf>, 2002-06-07.
- [7] Elfa, produktinformation, diod 12F10
<http://www.elfa.se/pdf/70/070/07014558.pdf>
- [8] Säve Flygplats, ESGP, MET-reports tisdagen den 14:e oktober 2003, via Svenska Ballong Federationen, <http://www.ballong.org>
- [9] Farnell, Datasheet IRF1404,
<http://www.farnell.com/datasheets/34020.pdf>, 2003-11-05.
- [10] Farnell, Datasheet IR2125,
<http://www.farnell.com/datasheets/13017.pdf>, 2003-11-05
- [11] Arrow Electronics, Janne Tägt 08-56265640, 2003-11-10
- [12] Metallvaruhuset, Göteborg, 031-742 10 70, 2003-11-12

13. Instrumentreferenser

- {1} Tångampereprob, Fluke, TAM0007
- {2} Strömshunt, 200 A, nr: VLAB 26342,A3 CSS60165
- {3} Oscilloskop, Fluke, Avd 26323, KOS60468
- {4} Last, DIGATRON Model no: BTR 1500/100-15/36, Serial no: 0281196, VLAB 26342,A3 PRA60422
- {5} Oscilloskop, Textronix THS 720A
- {6} Oscilloskop, Textronix THS 720A
- {7} Oscilloskop, Yokogawa 708E, KOS00405
- {8} Tångampereprob, Fluke, Avd 26323, TAM60467
- {9} LEM LT 500-S
- {10} LEM LT 505-S
- {11} Strömshunt, 100mV / 1000 A
- {12} Signalgenerator, Thurlby Thandar Instruments, TG 1010, AVD 26793,A3 TGF00012

13.1. *Instrument som används men ej refererat till*

- {13} Oscilloskop, Fluke, AVD 26390,A3
- {14} Nätaggregat, Powerbox 3 000, VLAB 26342,A3 LAG60101
- {15} Nätaggregat, Power Ten inc. Model no: 163D-30220, Serial no: 1006078
- {16} Oscilloskop, Yokogawa, Avd 26793, A3
- {17} Testofon 3000

Tabell 1 Specifikationer startmotor

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Maximal krankström | 1150 A |
| Maximal initialström | 2000 A |
| Max tid för initialström | 10 ms |
| Maximal kranktid | 10 s |
| Lägsta startström | 600 A ¹ |
| Minsta tid mellan startförsök | 2.5 min |
| Resistans startmotor D12 | 5.69mΩ |
| Induktans startmotor D12 | 17.9μH |
| Resistans startmotor D16 | 3.5mΩ |
| Induktans startmotor D16 | 16.4μH |

Tabell 2 Specifikationer övriga laster.

| Last | Strömspik [A] | | | Kontinuerlig ström [A] | | |
|----------------|---------------|-------|-------------|------------------------|------|-------------------------|
| | Nom | Max.. | Anm. | Nom. | Max. | Anm. |
| Hytt | 100 | 200 | Max 2 min | 10 | 50 | Min 5 A |
| Fronten, LCM | 30 | 125 | Max 1s | 5 | 25 | |
| Chassi, bakdel | 40 | 125 | Max 1s | 5 | 25 | |
| 12 V uttag | | 40 | Max 5 min | 5 | 20 | |
| Påbyggare | | 220 | | | 200 | 15 s till, 15 s från |
| Förvärmare | | 225 | Max 2x1 min | 150 | 170 | icke upprepande |

Tabell 3 Miljöspecifikationer

| | |
|--------------------|------|
| Min. temperatur °C | - 40 |
| Max. temperatur °C | 85 |
| Vibrationer | 4G |

¹ Gissat värde, som visade sig inte stämma

Smart Highside High Current Power Switch Reversave™

Reversave™

- Reverse battery protection by self turn on of power MOSFET

Features

- Overload protection
- Current limitation
- Short circuit protection
- Overtemperature protection
- Overvoltage protection (including load dump)
- Clamp of negative voltage at output
- Fast deenergizing of inductive loads ²⁾
- Low ohmic inverse current operation
- Diagnostic feedback with load current sense
- Open load detection via current sense
- Loss of V_{bb} protection³⁾
- Electrostatic discharge (ESD) protection

Application

- Power switch with current sense diagnostic feedback for 12 V and 24 V DC grounded loads
- Most suitable for loads with high inrush current like lamps and motors; all types of resistive and inductive loads
- Replaces electromechanical relays, fuses and discrete circuits

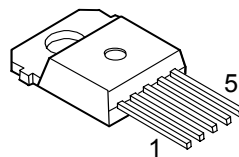
General Description

N channel vertical power FET with charge pump, current controlled input and diagnostic feedback with load current sense, integrated in Smart SIPMOS® chip on chip technology. Providing embedded protective functions.

Product Summary

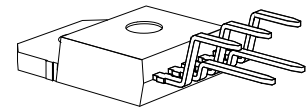
| | | | |
|----------------------------------|---------------|------------|----|
| Overvoltage protection | $V_{bb(AZ)}$ | 62 | V |
| Output clamp | $V_{ON(CL)}$ | 44 | V |
| Operating voltage | $V_{bb(on)}$ | 5.0 ... 34 | V |
| On-state resistance | $R_{ON}^{1)}$ | 2.5 | mΩ |
| Load current (ISO) | $I_L(ISO)$ | 165 | A |
| Short circuit current limitation | $I_L(SCp)$ | 520 | A |
| Current sense ratio | $I_L : I_S$ | 30 000 | |

TO-218AB/5

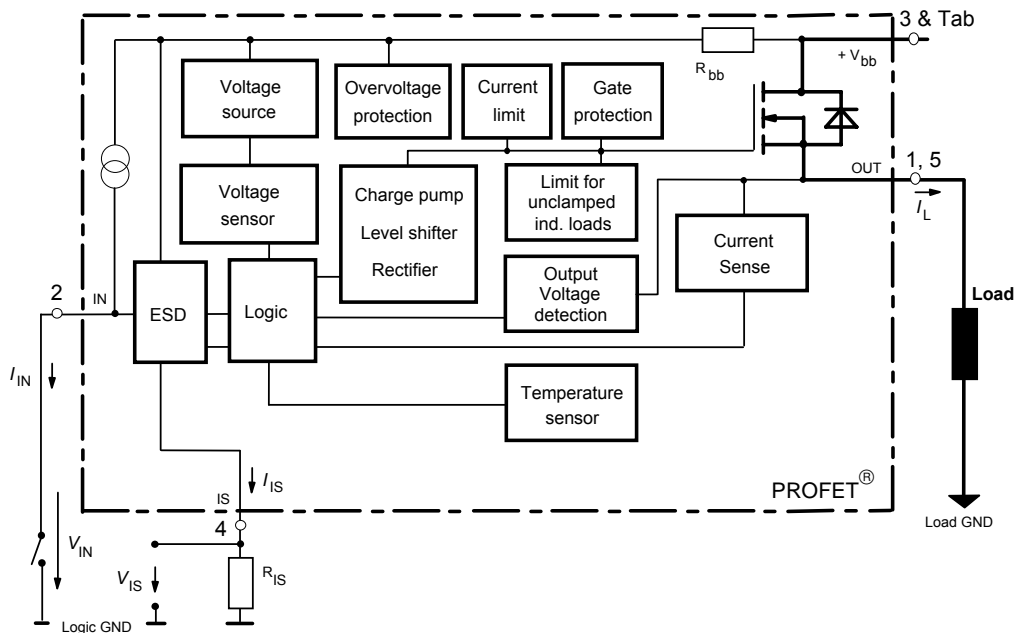


Straight leads

TO-218AB-5-1



Staggered leads



1) Due to the different lead frame geometry Ron @25°C is 0.3 mΩ higher in staggered than in straight version, and accordingly for other temperatures.
 2) With additional external diode.
 3) Additional external diode required for energized inductive loads (see page 9).

| Pin | Symbol | | Function |
|-----|-----------------|---|--|
| 1 | OUT | O | Output to the load. The pins 1 and 5 must be shorted with each other especially in high current applications! ⁴⁾ |
| 2 | IN | I | Input, activates the power switch in case of short to ground |
| 3 | V _{bb} | + | Positive power supply voltage, the tab is electrically connected to this pin. In high current applications the tab should be used for the V _{bb} connection instead of this pin ⁵⁾ . |
| 4 | IS | S | Diagnostic feedback providing a sense current proportional to the load current; zero current on failure (see Truth Table on page 7) |
| 5 | OUT | O | Output to the load. The pins 1 and 5 must be shorted with each other especially in high current applications! ⁴⁾ |

Maximum Ratings at $T_j = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified

| Parameter | Symbol | Values | Unit |
|---|--------------------------------------|--------------|------|
| Supply voltage (overvoltage protection see page 4) | V _{bb} | 40 | V |
| Supply voltage for full short circuit protection, (E _{AS} limitation see diagram on page 9) $T_{j,start} = -40 \dots +150\text{ °C}$: | V _{bb} | 34 | V |
| Load current (short circuit current, see page 5) | I _L | self-limited | A |
| Load dump protection $V_{LoadDump} = U_A + V_S$, $U_A = 13.5\text{ V}$ $R_1^{6)} = 2\ \Omega$, $R_L = 0.1\ \Omega$, $t_d = 200\text{ ms}$, IN, IS = open or grounded | V _{Load dump} ⁷⁾ | 80 | V |
| Operating temperature range | T _j | -40 ... +150 | °C |
| Storage temperature range | T _{stg} | -55 ... +150 | |
| Power dissipation (DC), T _C ≤ 25 °C | P _{tot} | 360 | W |
| Inductive load switch-off energy dissipation, single pulse V _{bb} = 12V, T _{j,start} = 150°C, T _C = 150°C const., I _L = 20 A, Z _L = 15 mH, 0Ω, see diagrams on page 10 | E _{AS} | 3 | J |
| Electrostatic discharge capability (ESD) Human Body Model acc. MIL-STD883D, method 3015.7 and ESD assn. std. S5.1-1993, C = 100 pF, R = 1.5 kΩ | V _{ESD} | 4.0 | kV |
| Current through input pin (DC) | I _{IN} | +15, -250 | mA |
| Current through current sense status pin (DC) see internal circuit diagrams on page 7 and 8 | I _{IS} | +15, -250 | |

- 4) Not shorting all outputs will considerably increase the on-state resistance, reduce the peak current capability and decrease the current sense accuracy
- 5) Otherwise add up to 0.5 mΩ (depending on used length of the pin) to the R_{ON} if the pin is used instead of the tab.
- 6) R₁ = internal resistance of the load dump test pulse generator.
- 7) V_{Load dump} is setup without the DUT connected to the generator per ISO 7637-1 and DIN 40839.



Thermal Characteristics

| Parameter and Conditions | Symbol | Values | | | Unit |
|--|-----------------|--------|-----|------|------|
| | | min | typ | max | |
| Thermal resistance chip - case: junction - ambient (free air): | $R_{thJC}^{8)}$ | -- | -- | 0.35 | K/W |
| | R_{thJA} | -- | 30 | -- | |

Electrical Characteristics

| Parameter and Conditions at $T_j = -40 \dots +150^\circ\text{C}$, $V_{bb} = 12\text{V}$ unless otherwise specified | Symbol | Values | | | Unit |
|--|--------|--------|-----|-----|------|
| | | min | typ | max | |

Load Switching Capabilities and Characteristics

| | | | | | | |
|--|-----------------------|--|-----|-----|------------------|---|
| On-state resistance (Tab to pins 1,5, see measurement circuit page 7) $I_L = 30\text{A}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$: $V_{IN} = 0$, $I_L = 30\text{A}$, $T_j = 150^\circ\text{C}$: $I_L = 120\text{A}$, $T_j = 150^\circ\text{C}$: $V_{bb} = 6\text{V}^9)$, $I_L = 20\text{A}$, $T_j = 150^\circ\text{C}$: | $R_{ON}^{1)}$ | -- | 1.9 | 2.5 | m Ω | |
| | | -- | 3.3 | 4.0 | | |
| | | -- | -- | 4.0 | | |
| | $R_{ON(Static)}^{1)}$ | -- | 4.6 | 9.0 | | |
| Nominal load current ¹⁰⁾ (Tab to pins 1,5) ISO 10483-1/6.7: $V_{ON} = 0.5\text{V}$, $T_C = 85^\circ\text{C}^{11)}$ | $I_{L(ISO)}$ | 128 | 165 | -- | A | |
| Maximum load current in resistive range (Tab to pins 1,5) see diagram on page 13 | $I_{L(Max)}$ | $V_{ON} = 1.8\text{V}$, $T_C = 25^\circ\text{C}$: | 520 | -- | -- | A |
| | | $V_{ON} = 1.8\text{V}$, $T_C = 150^\circ\text{C}$: | 360 | -- | -- | |
| Turn-on time ¹²⁾ I_{IN}  to 90% V_{OUT} : | t_{on} | 120 | -- | 600 | μs | |
| Turn-off time I_{IN}  to 10% V_{OUT} : $R_L = 1\Omega$, $T_j = -40\dots+150^\circ\text{C}$ | t_{off} | 50 | -- | 200 | | |
| Slew rate on ¹²⁾ (10 to 30% V_{OUT}) $R_L = 1\Omega$ | dV/dt_{on} | 0.3 | 0.5 | 0.8 | V/ μs | |
| Slew rate off ¹²⁾ (70 to 40% V_{OUT}) $R_L = 1\Omega$ | $-dV/dt_{off}$ | 0.3 | 0.7 | 1 | V/ μs | |

8) Thermal resistance R_{thCH} case to heatsink (about 0.25 K/W with silicone paste) not included!

9) Decrease of V_{bb} below 10 V causes slowly a dynamic increase of R_{ON} to a higher value of $R_{ON(Static)}$. As long as $V_{bIN} > V_{bIN(u) max}$, R_{ON} increase is less than 10 % per second for $T_j < 85^\circ\text{C}$.

10) not subject to production test, specified by design

11) T_j is about 105°C under these conditions.

12) See timing diagram on page 14.

| Parameter and Conditions at $T_j = -40 \dots +150^\circ\text{C}$, $V_{bb} = 12\text{ V}$ unless otherwise specified | Symbol | Values | | | Unit |
|---|--------|--------|-----|-----|------|
| | | min | typ | max | |

Inverse Load Current Operation

| | | | | | | |
|---|---|--------------------|-----|------------|------------|------------------|
| On-state resistance (Pins 1,5 to pin 3) $V_{bIN} = 12\text{ V}$, $I_L = -30\text{ A}$ see diagram on page 10 | $T_j = 25^\circ\text{C}$: $T_j = 150^\circ\text{C}$: | $R_{ON(inv)}^{1)}$ | -- | 1.9 3.3 | 2.5 4.0 | $\text{m}\Omega$ |
| Nominal inverse load current (Pins 1,5 to Tab) $V_{ON} = -0.5\text{ V}$, $T_C = 85^\circ\text{C}^{11}$ | | $I_{L(inv)}$ | 128 | 165 | -- | A |
| Drain-source diode voltage ($V_{out} > V_{bb}$) $I_L = -20\text{ A}$, $I_{IN} = 0$, $T_j = +150^\circ\text{C}$ | | $-V_{ON}$ | -- | 0.6 | 0.7 | V |

Operating Parameters

| | | | | | | |
|--|--|----------------|----------|----------|----------|---------------|
| Operating voltage ($V_{IN} = 0$) ¹³⁾ | | $V_{bb(on)}$ | 5.0 | -- | 34 | V |
| Undervoltage shutdown ¹⁴⁾ | | $V_{bIN(u)}$ | 1.5 | 3.0 | 4.5 | V |
| Undervoltage start of charge pump see diagram page 15 | | $V_{bIN(ucp)}$ | 3.0 | 4.5 | 6.0 | V |
| Overvoltage protection ¹⁵⁾ $I_{bb} = 15\text{ mA}$ | $T_j = -40^\circ\text{C}$: $T_j = 25\dots+150^\circ\text{C}$: | $V_{bIN(z)}$ | 60 62 | -- 66 | -- -- | V |
| Standby current $I_{IN} = 0$ | $T_j = -40\dots+25^\circ\text{C}$: $T_j = 150^\circ\text{C}$: | $I_{bb(off)}$ | -- -- | 15 25 | 25 50 | μA |

¹³⁾ If the device is turned on before a V_{bb} -decrease, the operating voltage range is extended down to $V_{bIN(u)}$. For the voltage range 0..34 V the device is fully protected against overtemperature and short circuit.

¹⁴⁾ $V_{bIN} = V_{bb} - V_{IN}$ see diagram on page 7. When V_{bIN} increases from less than $V_{bIN(u)}$ up to $V_{bIN(ucp)} = 5\text{ V}$ (typ.) the charge pump is not active and $V_{OUT} \approx V_{bb} - 3\text{ V}$.

¹⁵⁾ See also $V_{ON(CL)}$ in circuit diagram on page 8.

| Parameter and Conditions at $T_j = -40 \dots +150^\circ\text{C}$, $V_{bb} = 12\text{V}$ unless otherwise specified | Symbol | Values | | | Unit |
|--|--------|--------|-----|-----|------|
| | | min | typ | max | |

Protection Functions¹⁶⁾

| | | | | | |
|--|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Short circuit current limit (Tab to pins 1,5) ¹⁷⁾ $V_{ON} = 12\text{V}$, time until shutdown max. $300\ \mu\text{s}$ $T_c = -40^\circ\text{C}$: $T_c = 25^\circ\text{C}$: $T_c = +150^\circ\text{C}$: | $I_{L(SCP)}$ | 200 200 300 | 320 400 480 | 550 620 650 | A |
| Short circuit shutdown delay after input current positive slope, $V_{ON} > V_{ON(SC)}$ min. value valid only if input "off-signal" time exceeds $30\ \mu\text{s}$ | $t_{d(SC)}$ | 80 | -- | 300 | μs |
| Output clamp ¹⁸⁾ (inductive load switch off) $I_L = 40\ \text{mA}$: | $-V_{OUT(CL)}$ | 14 | 17 | 20 | V |
| Output clamp (inductive load switch off) at $V_{OUT} = V_{bb} - V_{ON(CL)}$ (e.g. overvoltage) $I_L = 40\ \text{mA}$ | $V_{ON(CL)}$ | 40 | 44 | 47 | V |
| Short circuit shutdown detection voltage (pin 3 to pins 1,5) | $V_{ON(SC)}$ | -- | 6 | -- | V |
| Thermal overload trip temperature | T_{jt} | 150 | -- | -- | $^\circ\text{C}$ |
| Thermal hysteresis | ΔT_{jt} | -- | 10 | -- | K |

Reverse Battery

| | | | | | |
|---|--------------------|-----------|------------|------------|------------------|
| Reverse battery voltage ¹⁹⁾ | $-V_{bb}$ | -- | -- | 16 | V |
| On-state resistance (Pins 1,5 to pin 3) $V_{bb} = -12\text{V}$, $V_{IN} = 0$, $I_L = -30\ \text{A}$, $R_{IS} = 1\ \text{k}\Omega$ | $R_{ON(rev)}^{1)}$ | -- | 2.3 3.9 | 3.0 4.7 | $\text{m}\Omega$ |
| Integrated resistor in V_{bb} line | R_{bb} | 90 105 | 110 125 | 135 150 | Ω |

¹⁶⁾ Integrated protection functions are designed to prevent IC destruction under fault conditions described in the data sheet. Fault conditions are considered as "outside" normal operating range. Protection functions are not designed for continuous repetitive operation.

¹⁷⁾ Short circuit is a failure mode. The device is not designed to operate continuously into a short circuit by permanent resetting the short circuit latch function. The lifetime will be reduced under such conditions.

¹⁸⁾ This output clamp can be "switched off" by using an additional diode at the IS-Pin (see page 8). If the diode is used, V_{OUT} is clamped to $V_{bb} - V_{ON(CL)}$ at inductive load switch off.

¹⁹⁾ The reverse load current through the intrinsic drain-source diode has to be limited by the connected load (as it is done with all polarity symmetric loads). Note that under off-conditions ($I_{IN} = I_{IS} = 0$) the power transistor is not activated. This results in raised power dissipation due to the higher voltage drop across the intrinsic drain-source diode. The temperature protection is not active during reverse current operation! Increasing reverse battery voltage capability is simply possible as described on page 9.

| Parameter and Conditions at $T_j = -40 \dots +150^\circ\text{C}$, $V_{bb} = 12\text{V}$ unless otherwise specified | Symbol | Values | | | Unit |
|--|--------|--------|-----|-----|------|
| | | min | typ | max | |

Diagnostic Characteristics

| | | | | | | |
|--|--|--------------|--------|--------|-------------------|---|
| Current sense ratio, static on-condition, $k_{ILIS} = I_L : I_{IS}$, $V_{ON} < 1.5\text{V}^{20)}$, $V_{IS} < V_{OUT} - 5\text{V}$, $V_{bIN} > 4.0\text{V}$ (see diagram on page 10) | $I_L = 120\text{A}$, $T_j = -40^\circ\text{C}$: $T_j = 25^\circ\text{C}$: $T_j = 150^\circ\text{C}$: | k_{ILIS} | 25 000 | 29 000 | 34 000 | |
| | $I_L = 30\text{A}$, $T_j = -40^\circ\text{C}$: $T_j = 25^\circ\text{C}$: $T_j = 150^\circ\text{C}$: | | 26 000 | 28 500 | 32 000 | |
| | $I_L = 16\text{A}$, $T_j = -40^\circ\text{C}$: $T_j = 25^\circ\text{C}$: $T_j = 150^\circ\text{C}$: | | 24 000 | 26 500 | 29 000 | |
| | $I_L = 12\text{A}$, $T_j = -40^\circ\text{C}$: $T_j = 25^\circ\text{C}$: $T_j = 150^\circ\text{C}$: | | 25 000 | 31 200 | 40 000 | |
| | | | 25 000 | 30 200 | 35 000 | |
| | | | 23 000 | 27 200 | 31 500 | |
| | | | 24 000 | 33 500 | 48 000 | |
| | | | 24 000 | 31 500 | 40 000 | |
| | | | 23 000 | 27 500 | 32 000 | |
| | | | 23 000 | 40 500 | 61 000 | |
| | | | 23 000 | 40 500 | 45 000 | |
| | | | 23 000 | 29 000 | 34 000 | |
| $I_{IS} = 0$ by $I_{IN} = 0$ (e.g. during deenergizing of inductive loads): | | | | | | |
| Sense current saturation | $I_{IS,lim}$ | 6.5 | -- | -- | mA | |
| Current sense leakage current | $I_{IN} = 0$, $V_{IS} = 0$: | $I_{IS(LL)}$ | -- | -- | 0.5 μA | |
| | $V_{IN} = 0$, $V_{IS} = 0$, $I_L \leq 0$: | $I_{IS(LH)}$ | -- | 2 | -- | |
| Current sense settling time ²¹⁾ | $t_s(IS)$ | -- | -- | 500 | μs | |
| Overvoltage protection $I_{bb} = 15\text{mA}$ | $T_j = -40^\circ\text{C}$: | $V_{bIS(Z)}$ | 60 | -- | -- | V |
| | $T_j = 25 \dots +150^\circ\text{C}$: | | 62 | 66 | -- | |

Input

| | | | | | |
|---|---------------|----|-----|-----|---------------|
| Input and operating current (see diagram page 13) IN grounded ($V_{IN} = 0$) | $I_{IN(on)}$ | -- | 0.8 | 1.5 | mA |
| Input current for turn-off ²²⁾ | $I_{IN(off)}$ | -- | -- | 40 | μA |

²⁰⁾ If V_{ON} is higher, the sense current is no longer proportional to the load current due to sense current saturation, see $I_{IS,lim}$.

²¹⁾ not subject to production test, specified by design

²²⁾ We recommend the resistance between IN and GND to be less than $0.5\text{k}\Omega$ for turn-on and more than $500\text{k}\Omega$ for turn-off. Consider that when the device is switched off ($I_{IN} = 0$) the voltage between IN and GND reaches almost V_{bb} .

Truth Table

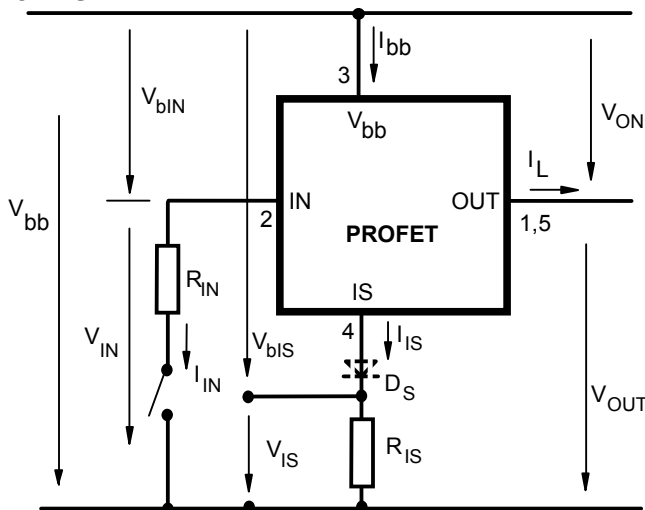
| | Input current level | Output level | Current Sense I_{IS} | Remark |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|---|
| Normal operation | L H | L H | 0 nominal | $=I_L / k_{IIS}$, up to $I_{IS}=I_{IS,lim}$ |
| Very high load current | H | H | $I_{IS,lim}$ | up to $V_{ON}=V_{ON(Fold\ back)}$ I_{IS} no longer proportional to I_L |
| Current-limitation | H | H | 0 | $V_{ON} > V_{ON(Fold\ back)}$ if $V_{ON} > V_{ON(SC)}$, shutdown will occur |
| Short circuit to GND | L H | L L | 0 0 | |
| Over-temperature | L H | L L | 0 0 | |
| Short circuit to V_{bb} | L H | H H | 0 <nominal ²³⁾ | |
| Open load | L H | Z ²⁴⁾ H | 0 0 | |
| Negative output voltage clamp | L | L | 0 | |
| Inverse load current | L H | H H | 0 0 | |

L = "Low" Level
H = "High" Level

Overtemperature reset via input: I_{IN} =low and $T_j < T_{jt}$ (see diagram on page14)

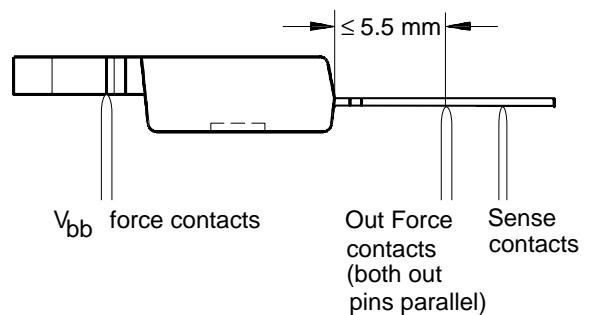
Short circuit to GND: Shutdown remains latched until next reset via input (see diagram on page 14)

Terms



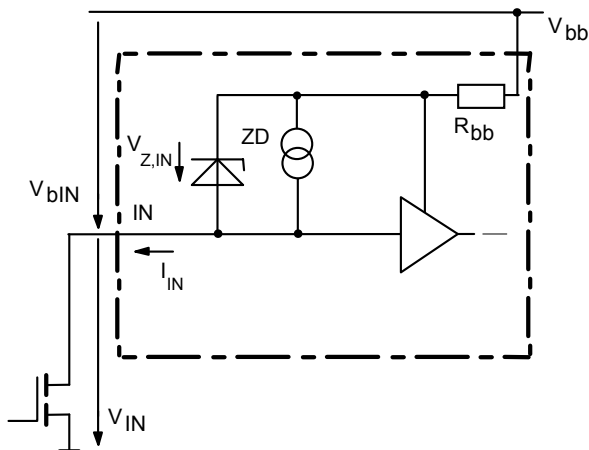
Two or more devices can easily be connected in parallel to increase load current capability.

R_{ON} measurement layout (straight leads)



23) Low ohmic short to V_{bb} may reduce the output current I_L and can thus be detected via the sense current I_{IS} .
24) Power Transistor "OFF", potential defined by external impedance.

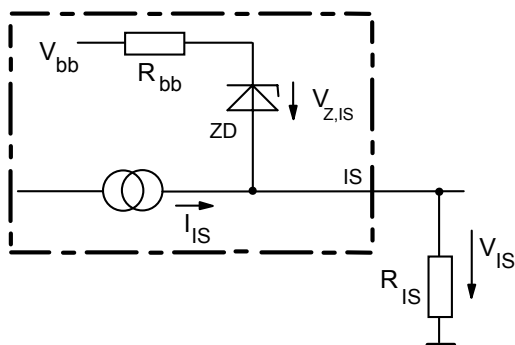
Input circuit (ESD protection)



When the device is switched off ($I_{IN} = 0$) the voltage between IN and GND reaches almost V_{bb} . Use a mechanical switch, a bipolar or MOS transistor with appropriate breakdown voltage as driver.

$V_{Z,IN} = 66\text{ V (typ.)}$.

Current sense status output

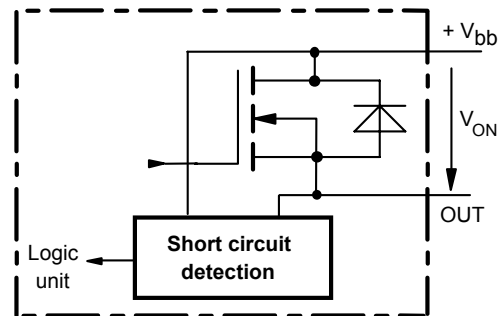


$V_{Z,IS} = 66\text{ V (typ.)}$, $R_{IS} = 1\text{ k}\Omega$ nominal (or $1\text{ k}\Omega / n$, if n devices are connected in parallel). $I_S = I_L / K_{iis}$ can be only driven by the internal circuit as long as $V_{out} - V_{IS} > 5\text{ V}$. If you want to measure load currents up to $I_{L(M)}$, R_{IS} should be less than $\frac{V_{bb} - 5\text{ V}}{I_{L(M)} / K_{iis}}$.

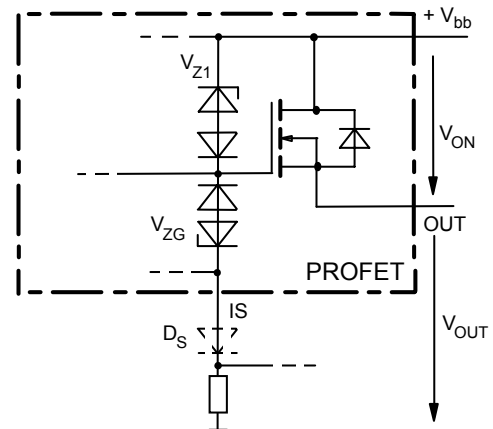
Note: For large values of R_{IS} the voltage V_{IS} can reach almost V_{bb} . See also overvoltage protection. If you don't use the current sense output in your application, you can leave it open.

Short circuit detection

Fault Condition: $V_{ON} > V_{ON(SC)}$ (6 V typ.) and $t > t_{d(SC)}$ ($80 \dots 300\ \mu\text{s}$).

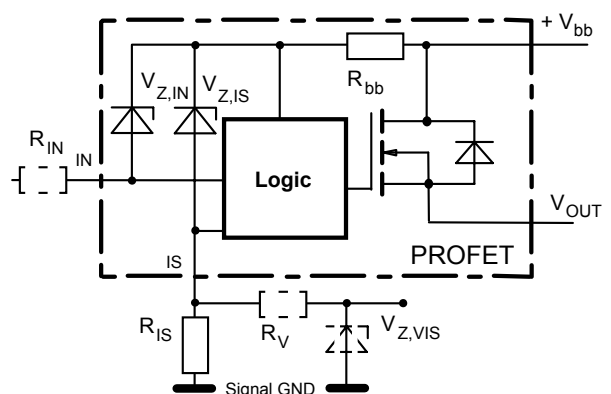


Inductive and overvoltage output clamp



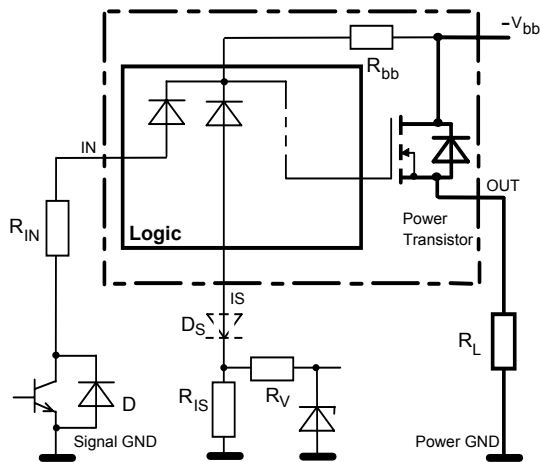
V_{ON} is clamped to $V_{ON(CL)} = 42\text{ V typ.}$ At inductive load switch-off without D_S , V_{OUT} is clamped to $V_{OUT(CL)} = -17\text{ V typ.}$ via V_{ZG} . With D_S , V_{OUT} is clamped to $V_{bb} - V_{ON(CL)}$ via V_{Z1} . Using D_S gives faster deenergizing of the inductive load, but higher peak power dissipation in the PROFET. In case of a floating ground with a potential higher than 19 V referring to the OUT – potential the device will switch on, if diode D_S is not used.

Overvoltage protection of logic part



$R_{bb} = 120\ \Omega$ typ., $V_{Z,IN} = V_{Z,IS} = 66\text{ V typ.}$, $R_{IS} = 1\text{ k}\Omega$ nominal. Note that when overvoltage exceeds 71 V typ. a voltage above 5 V can occur between IS and GND, if R_V , $V_{Z,IS}$ are not used.

Reverse battery protection



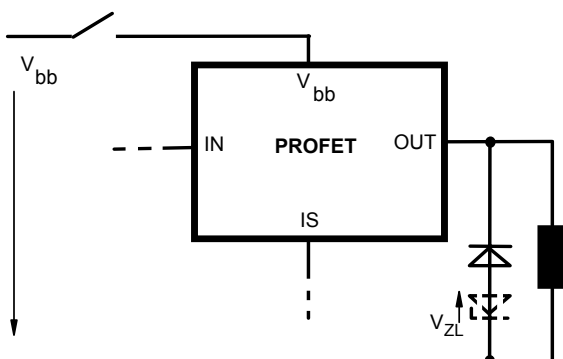
$R_V \geq 1 \text{ k}\Omega$, $R_{IS} = 1 \text{ k}\Omega$ nominal. Add R_{IN} for reverse battery protection in applications with V_{bb} above 16 V^{19} ; recommended value: $\frac{1}{R_{IN}} + \frac{1}{R_{IS}} + \frac{1}{R_V} = \frac{0.1 \text{ A}}{|V_{bb}| - 12 \text{ V}}$ if D_S is not used (or $\frac{1}{R_{IN}} = \frac{0.1 \text{ A}}{|V_{bb}| - 12 \text{ V}}$ if D_S is used).

To minimize power dissipation at reverse battery operation, the summarized current into the IN and IS pin should be about 120mA. The current can be provided by using a small signal diode D in parallel to the input switch, by using a MOSFET input switch or by proper adjusting the current through R_{IS} and R_V .

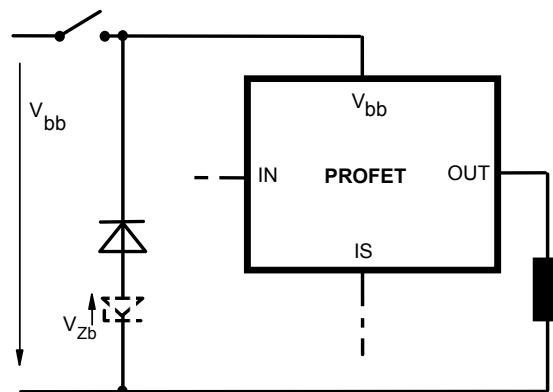
V_{bb} disconnect with energized inductive load

Provide a current path with load current capability by using a diode, a Z-diode, or a varistor. ($V_{ZL} < 72 \text{ V}$ or $V_{Zb} < 30 \text{ V}$ if $R_{IN}=0$). For higher clamp voltages currents at IN and IS have to be limited to 250 mA.

Version a:

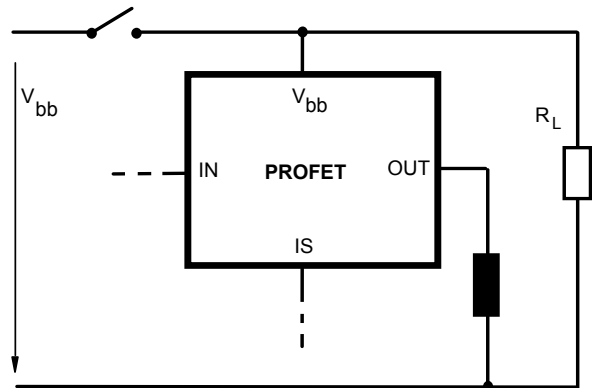


Version b:

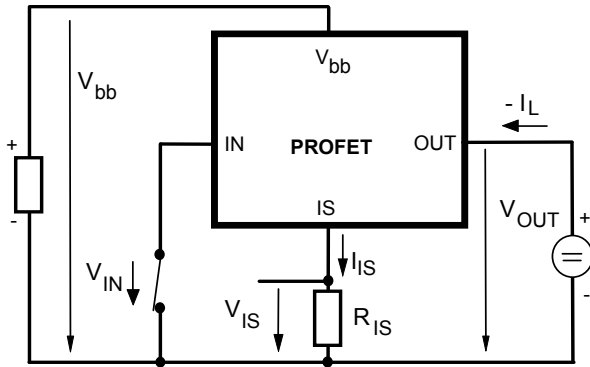


Note that there is no reverse battery protection when using a diode without additional Z-diode V_{ZL} , V_{Zb} .

Version c: Sometimes a necessary voltage clamp is given by non inductive loads R_L connected to the same switch and eliminates the need of clamping circuit:



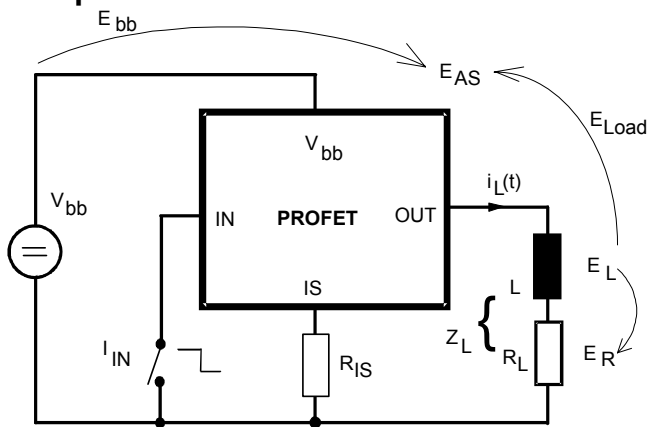
Inverse load current operation



The device is specified for inverse load current operation ($V_{OUT} > V_{bb} > 0V$). The current sense feature is not available during this kind of operation ($I_{IS} = 0$). With $I_{IN} = 0$ (e.g. input open) only the intrinsic drain source diode is conducting resulting in considerably increased power dissipation. If the device is switched on ($V_{IN} = 0$), this power dissipation is decreased to the much lower value $R_{ON(INV)} \cdot I^2$ (specifications see page 4).

Note: Temperature protection during inverse load current operation is not possible!

Inductive load switch-off energy dissipation



Energy stored in load inductance:

$$E_L = 1/2 \cdot L \cdot I_L^2$$

While demagnetizing load inductance, the energy dissipated in PROFET is

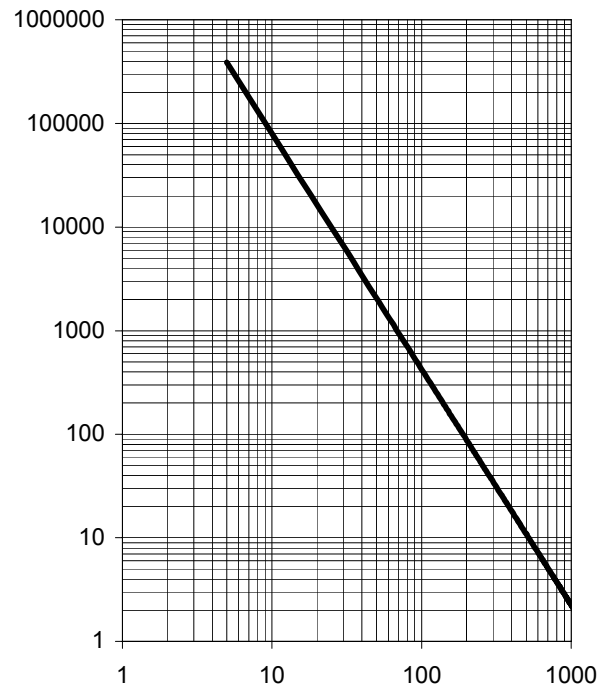
$$E_{AS} = E_{bb} + E_L - E_R = V_{ON(CL)} \cdot i_L(t) dt,$$

with an approximate solution for $R_L > 0 \Omega$:

$$E_{AS} = \frac{I_L \cdot L}{2 \cdot R_L} (V_{bb} + |V_{OUT(CL)}|) \ln \left(1 + \frac{I_L \cdot R_L}{|V_{OUT(CL)}|} \right)$$

Maximum allowable load inductance for a single switch off

$$L = f(I_L); T_{j,start} = 150^\circ C, V_{bb} = 12V, R_L = 0 \Omega$$

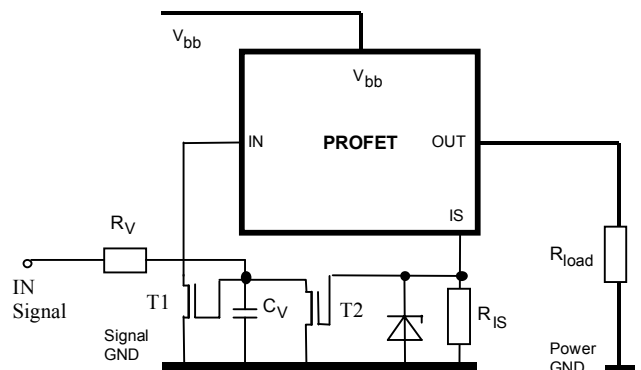


L [μH]

I_L [A]

Externally adjustable current limit

If the device is conducting, the sense current can be used to reduce the short circuit current and allow higher lead inductance (see diagram above). The device will be turned off, if the threshold voltage of T2 is reached by $I_s \cdot R_{IS}$. After a delay time defined by $R_V \cdot C_V$ T1 will be reset. The device is turned on again, the short circuit current is defined by $I_{L(SC)}$ and the device is shut down after $t_{d(SC)}$ with latch function.



Options Overview

| Type | BTS | 6510 | 550P 650P | 555 |
|---|-----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Overtemperature protection with hysteresis $T_j > 150\text{ °C}$, latch function ²⁵⁾ | | X | X | X |
| $T_j > 150\text{ °C}$, with auto-restart on cooling | | X | X | |
| Short circuit to GND protection with overtemperature shutdown | | X | | |
| switches off when $V_{ON} > 6\text{ V}$ typ. (when first turned on after approx. 180 μs) | | | X | X |
| Overvoltage shutdown | | - | - | - |
| Output negative voltage transient limit to $V_{bb} - V_{ON(CL)}$ to $V_{OUT} = -15\text{ V}$ typ | | X X ²⁶⁾ | X X ²⁶⁾ | X X ²⁶⁾ |

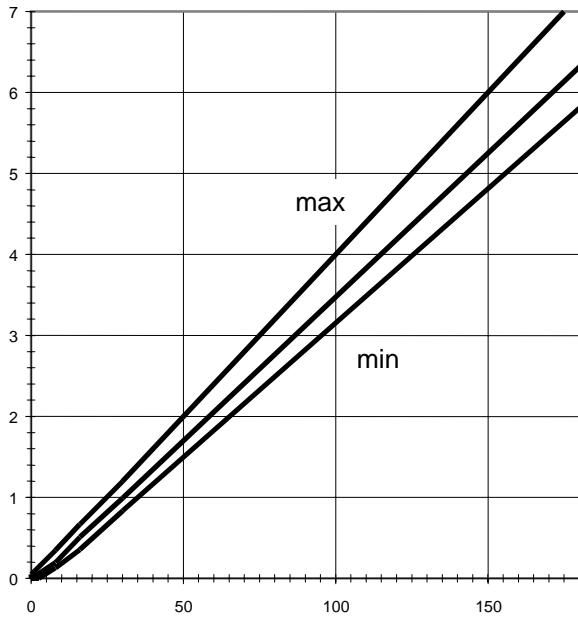
²⁵⁾ Latch except when $V_{bb} - V_{OUT} < V_{ON(SC)}$ after shutdown. In most cases $V_{OUT} = 0\text{ V}$ after shutdown ($V_{OUT} \neq 0\text{ V}$ only if forced externally). So the device remains latched unless $V_{bb} < V_{ON(SC)}$ (see page 5). No latch between turn on and $t_{d(SC)}$.

²⁶⁾ Can be "switched off" by using a diode D_S (see page 8) or leaving open the current sense output.

Characteristics

Current sense versus load current:

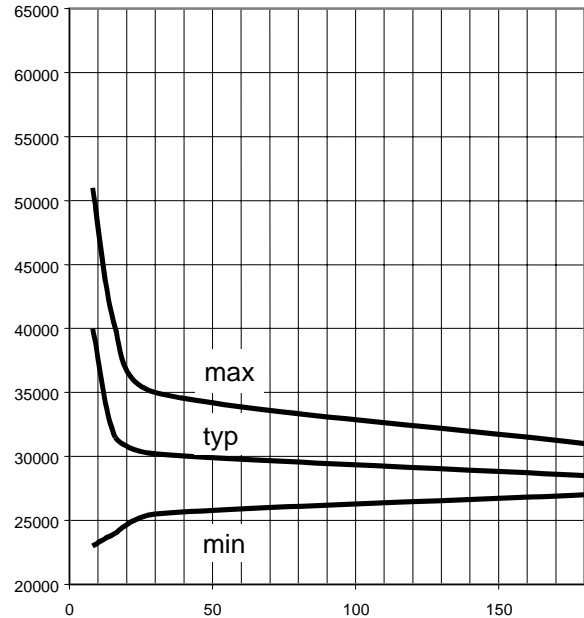
$i_S = f(i_L)$
 i_S [mA]



i_L [A]

Current sense ratio:

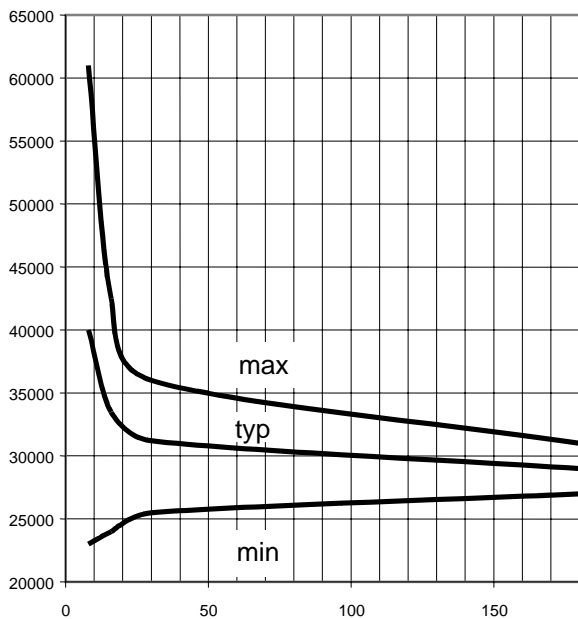
$K_{ILIS} = f(i_L), T_J = 25\text{ °C}$
 k_{ILIS}



i_L [A]

Current sense ratio:

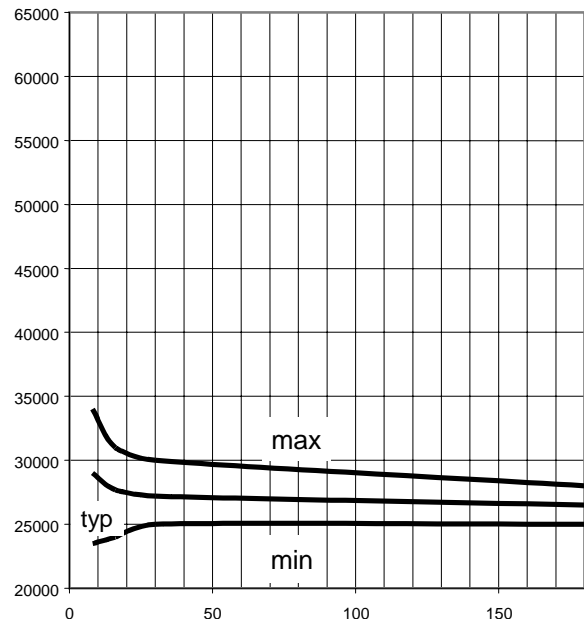
$K_{ILIS} = f(i_L), T_J = -40\text{ °C}$
 k_{ILIS}



i_L [A]

Current sense ratio:

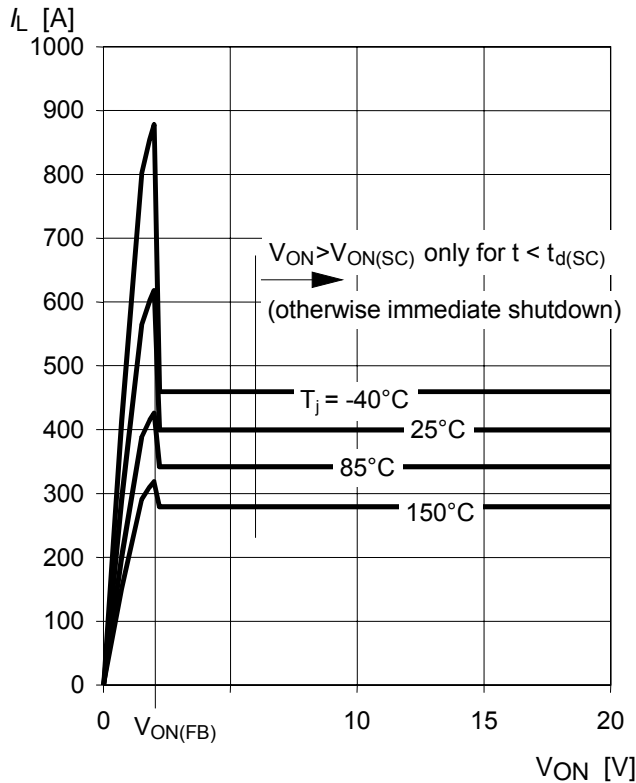
$K_{ILIS} = f(i_L), T_J = 150\text{ °C}$
 k_{ILIS}



i_L [A]

Typ. current limitation characteristic

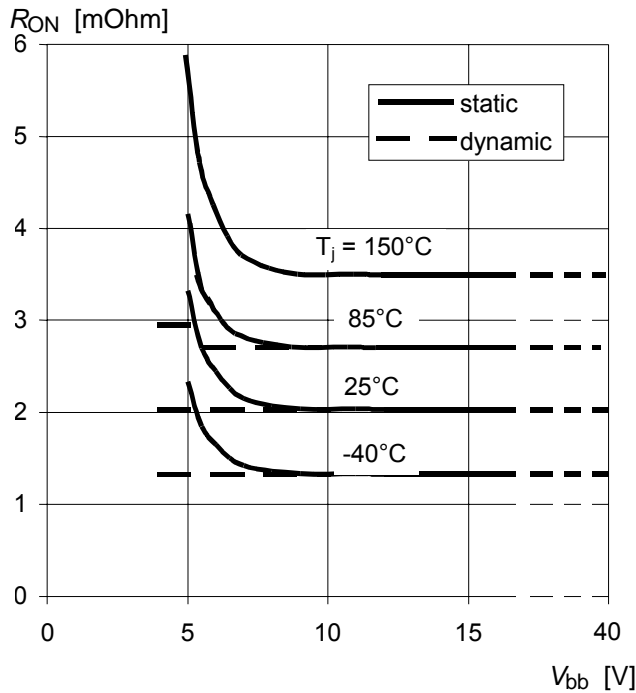
$I_L = f(V_{ON}, T_j)$



In case of $V_{ON} > V_{ON(SC)}$ (typ. 6 V) the device will be switched off by internal short circuit detection.

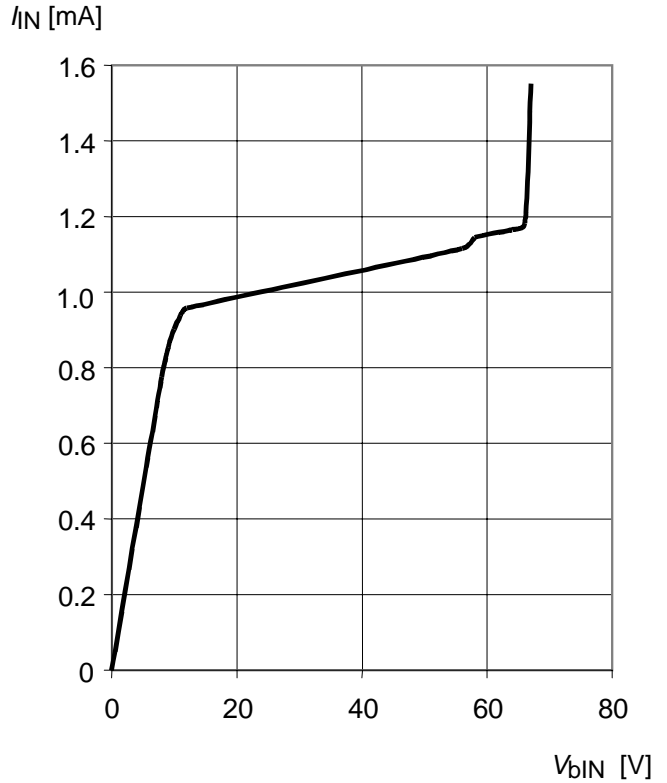
Typ. on-state resistance

$R_{ON} = f(V_{bb}, T_j); I_L = 30\text{ A}; V_{IN} = 0$



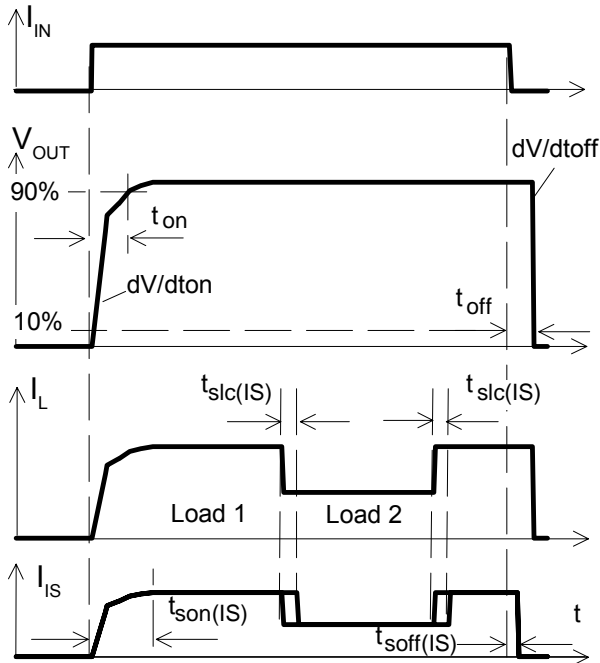
Typ. input current

$I_{IN} = f(V_{bIN}), V_{bIN} = V_{bb} - V_{IN}$



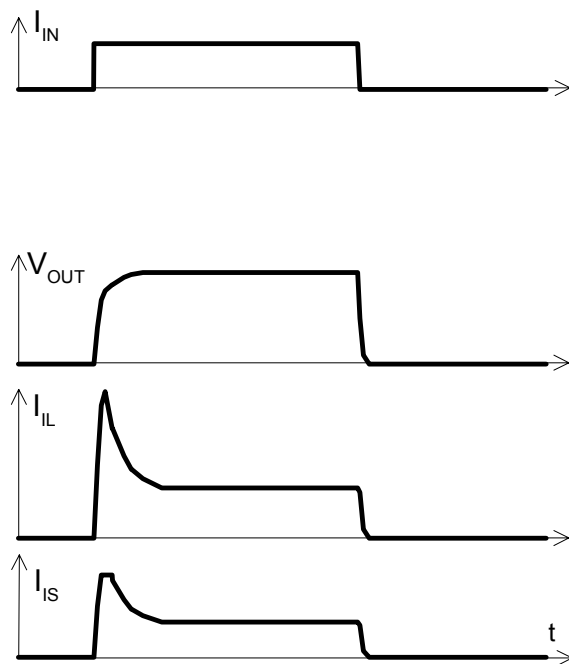
Timing diagrams

Figure 1a: Switching a resistive load, change of load current in on-condition:



The sense signal is not valid during a settling time after turn-on/off and after change of load current.

Figure 2a: Switching motors and lamps:



Sense current saturation can occur at very high inrush currents (see $I_{IS,lim}$ on page 6).

Figure 2b: Switching an inductive load:

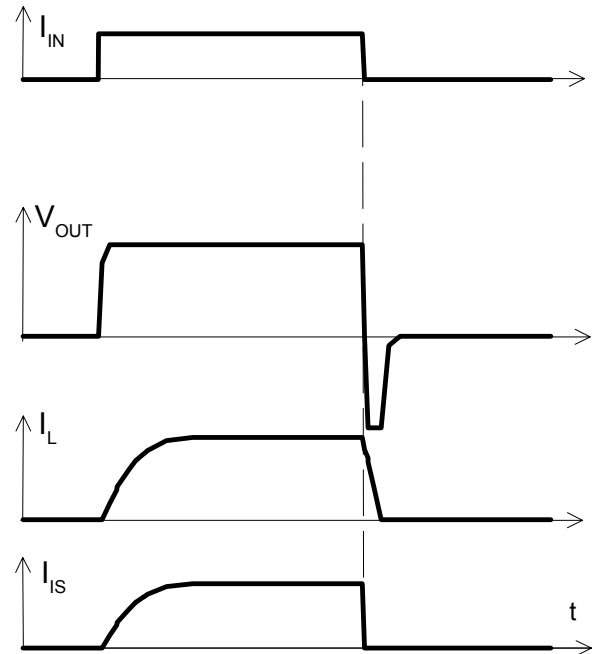
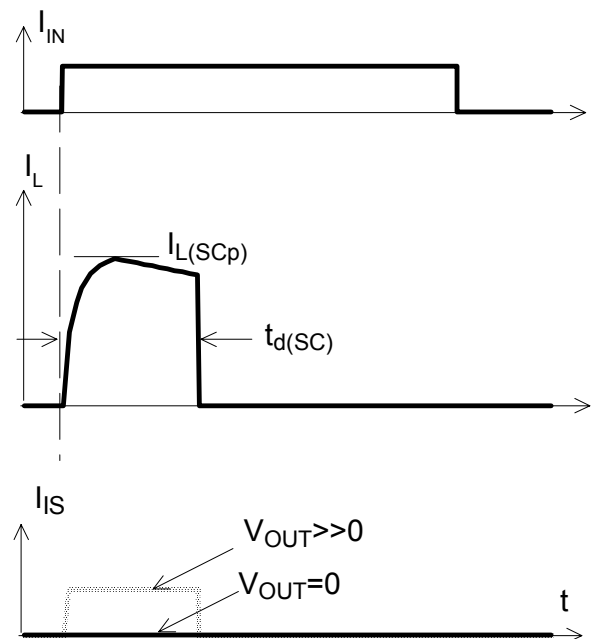


Figure 3a: Short circuit:

shut down by short circuit detection, reset by $I_{IN} = 0$.



Shut down remains latched until next reset via input.

Figure 4a: Overtemperature, Reset if (I_{IN} =low) and ($T_j < T_{jt}$)

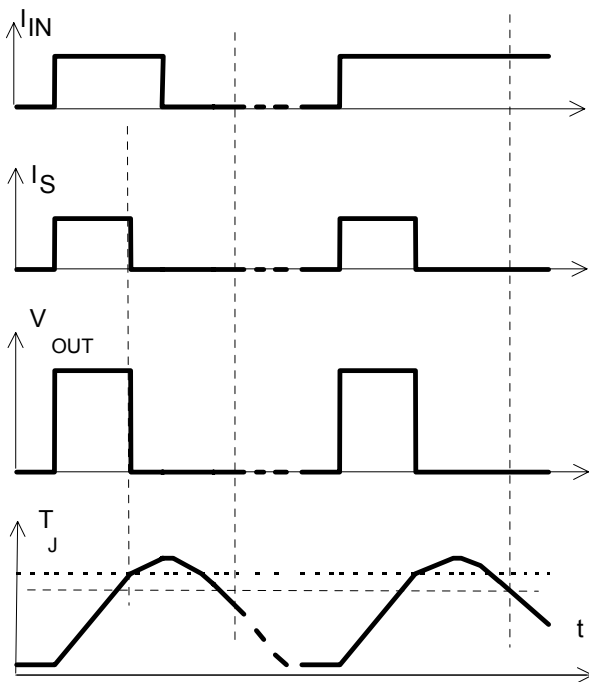
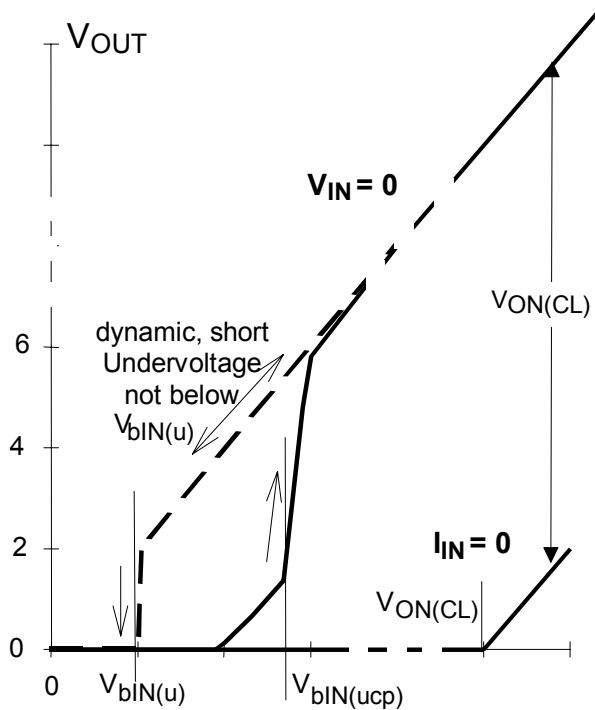


Figure 6a: Undervoltage restart of charge pump, overvoltage clamp

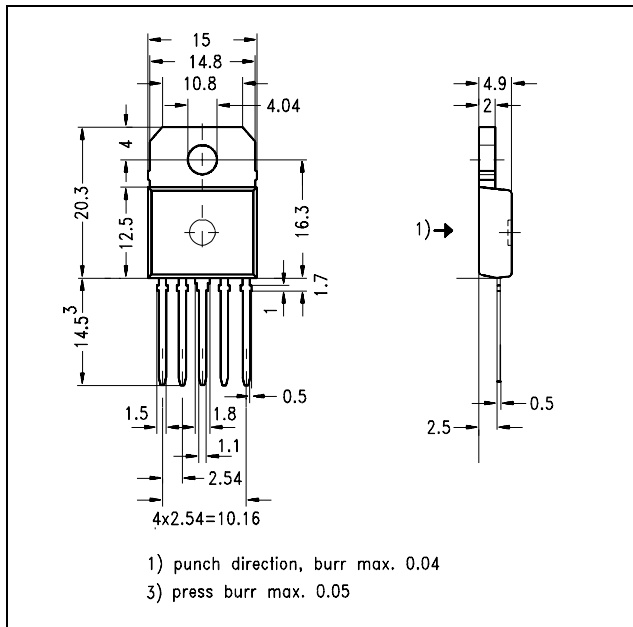


Package and Ordering Code

All dimensions in mm

TO-218AB/5 Option E3146 Ordering code

| | |
|--------------|----------------|
| BTS555 E3146 | Q67060-S6953A3 |
|--------------|----------------|



Published by
Infineon Technologies AG,
St.-Martin-Strasse 53,
D-81669 München
© Infineon Technologies AG 2001
All Rights Reserved.

Attention please!

The information herein is given to describe certain components and shall not be considered as a guarantee of characteristics.

Terms of delivery and rights to technical change reserved.

We hereby disclaim any and all warranties, including but not limited to warranties of non-infringement, regarding circuits, descriptions and charts stated herein.

Infineon Technologies is an approved CECC manufacturer.

Information

For further information on technology, delivery terms and conditions and prices please contact your nearest Infineon Technologies Office in Germany or our Infineon Technologies Representatives worldwide (see address list).

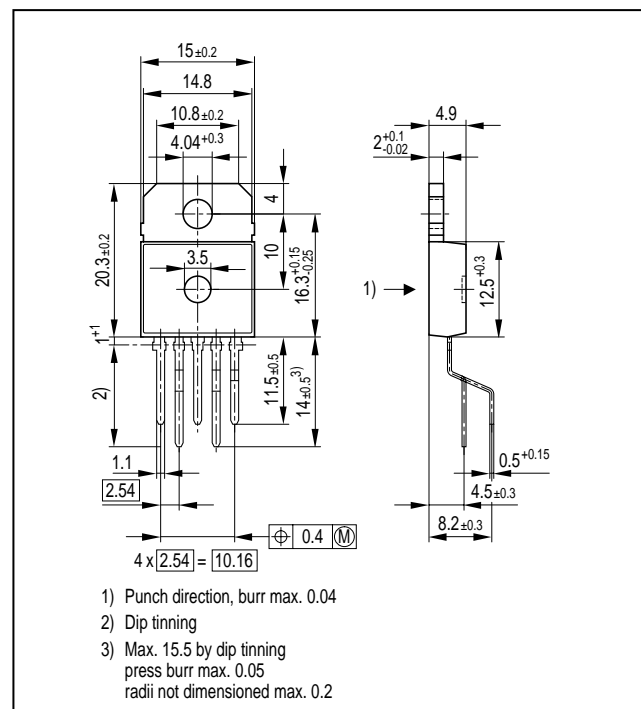
Warnings

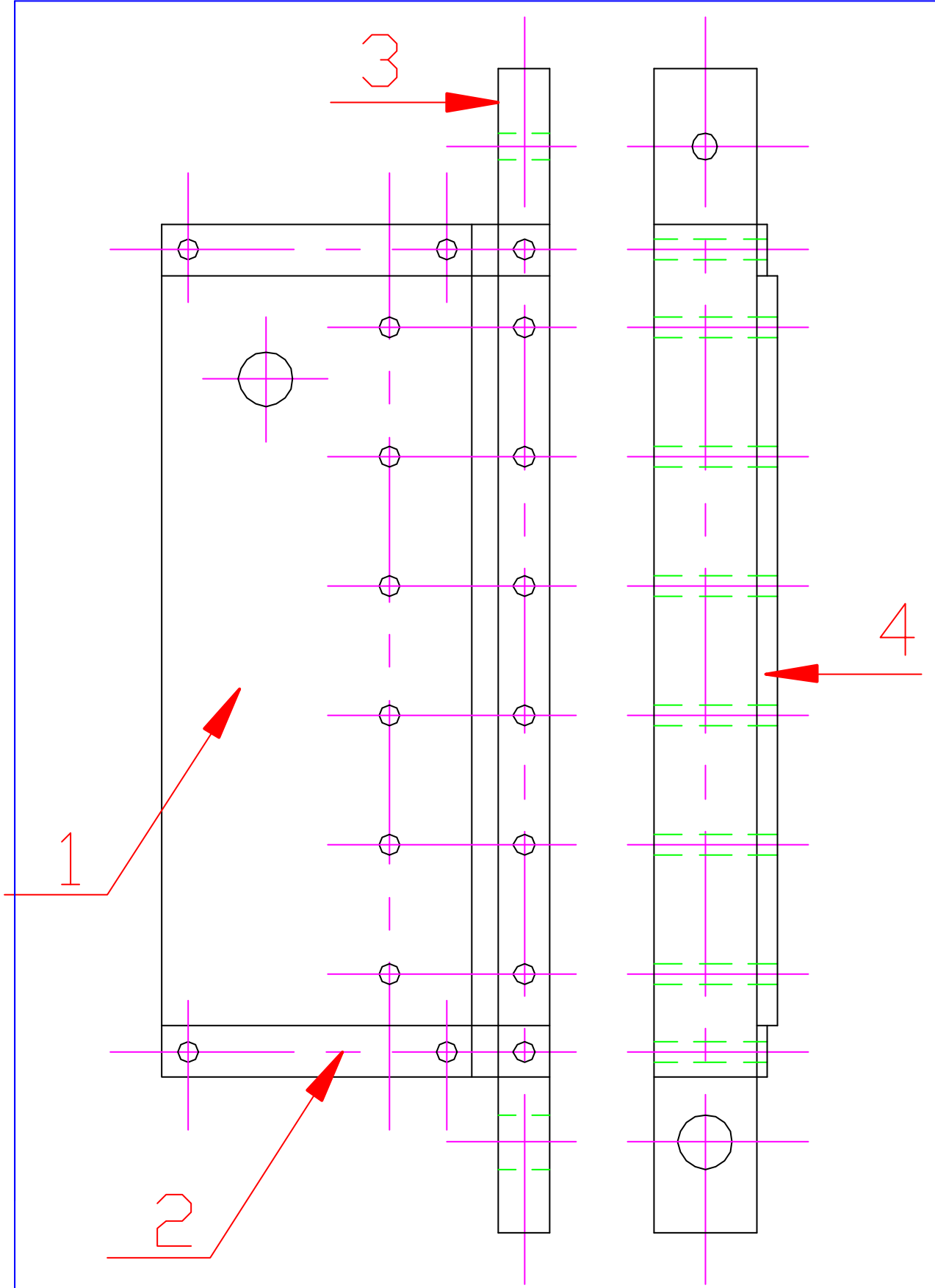
Due to technical requirements components may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact your nearest Infineon Technologies Office.

Infineon Technologies Components may only be used in life-support devices or systems with the express written approval of Infineon Technologies, if a failure of such components can reasonably be expected to cause the failure of that life-support device or system, or to affect the safety or effectiveness of that device or system. Life support devices or systems are intended to be implanted in the human body, or to support and/or maintain and sustain and/or protect human life. If they fail, it is reasonable to assume that the health of the user or other persons may be endangered.

TO-218AB/5-1 Ordering code

| | |
|--------|--------------|
| BTS555 | Q67060-S6954 |
|--------|--------------|

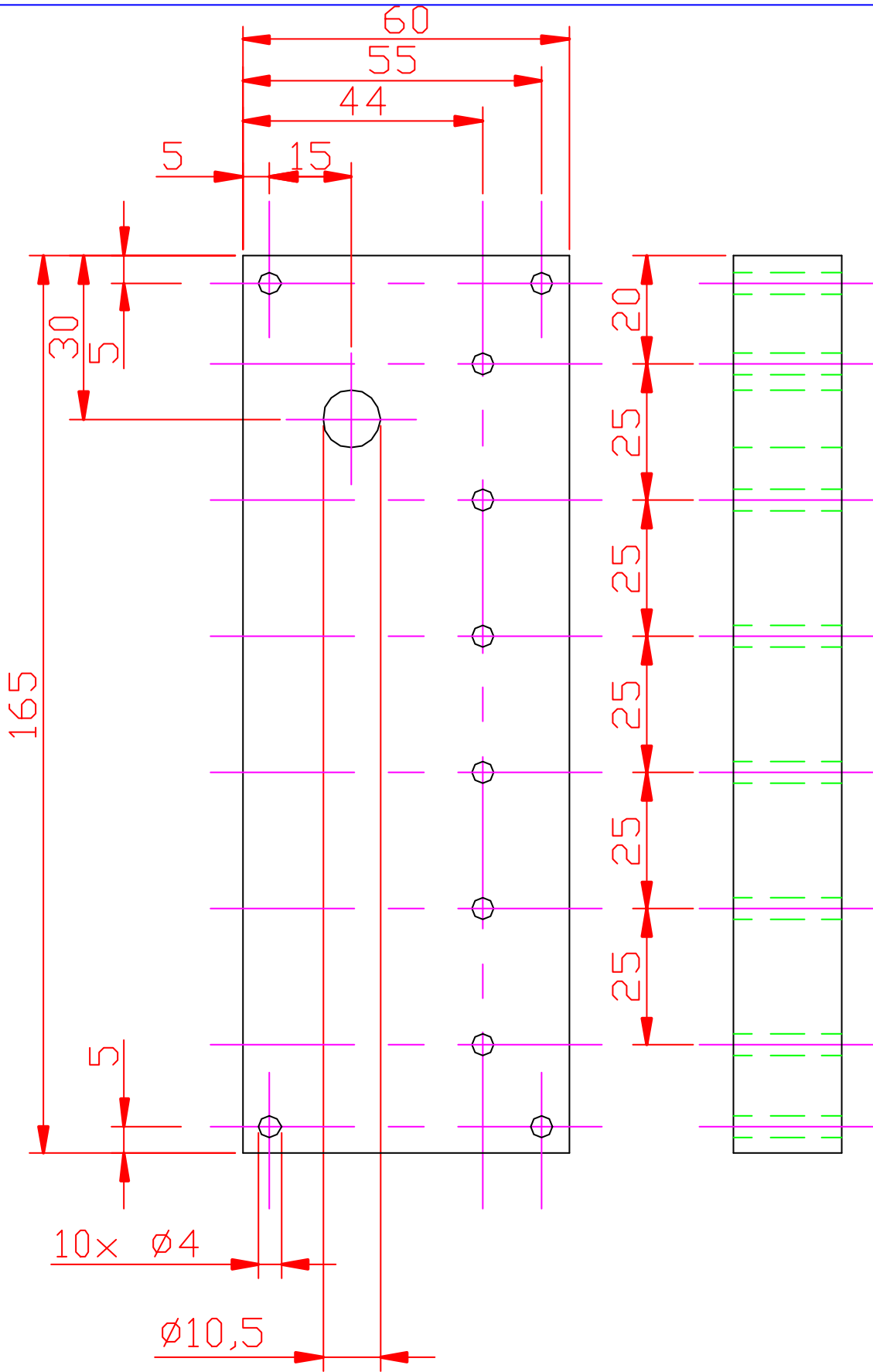




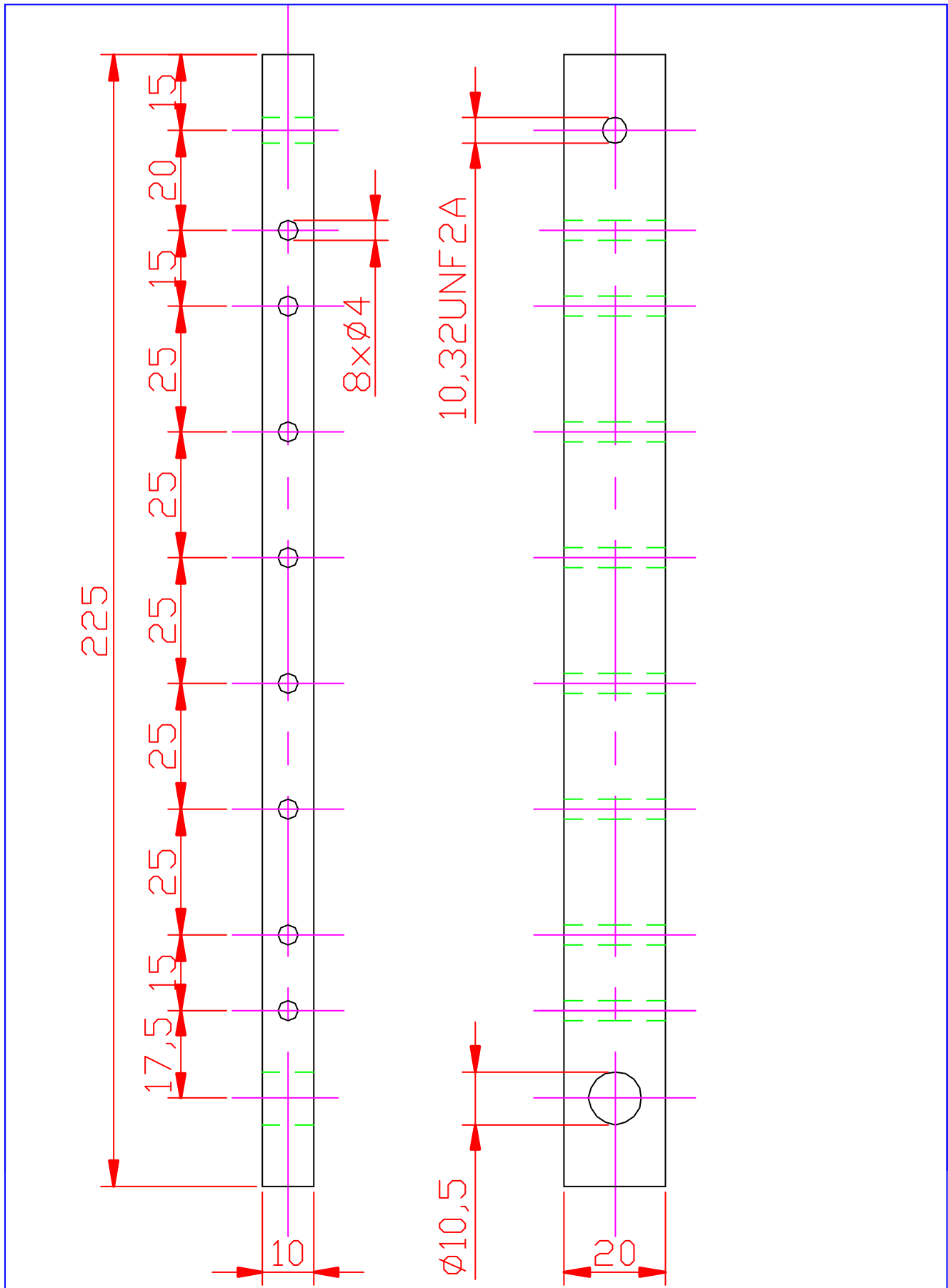
| | | | | | | | |
|---|-----------|------------|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | |
| 1 | Kylfläns | Bilaga 3:1 | | | | | |
| 2 | Isolering | Bilaga 3:2 | | | | | |
| 3 | ut. ansl. | Bilaga 3:3 | | | | | |
| 4 | Klämma | Bilaga 3:4 | | | | | |

översikt kylfläns

Bilaga 3

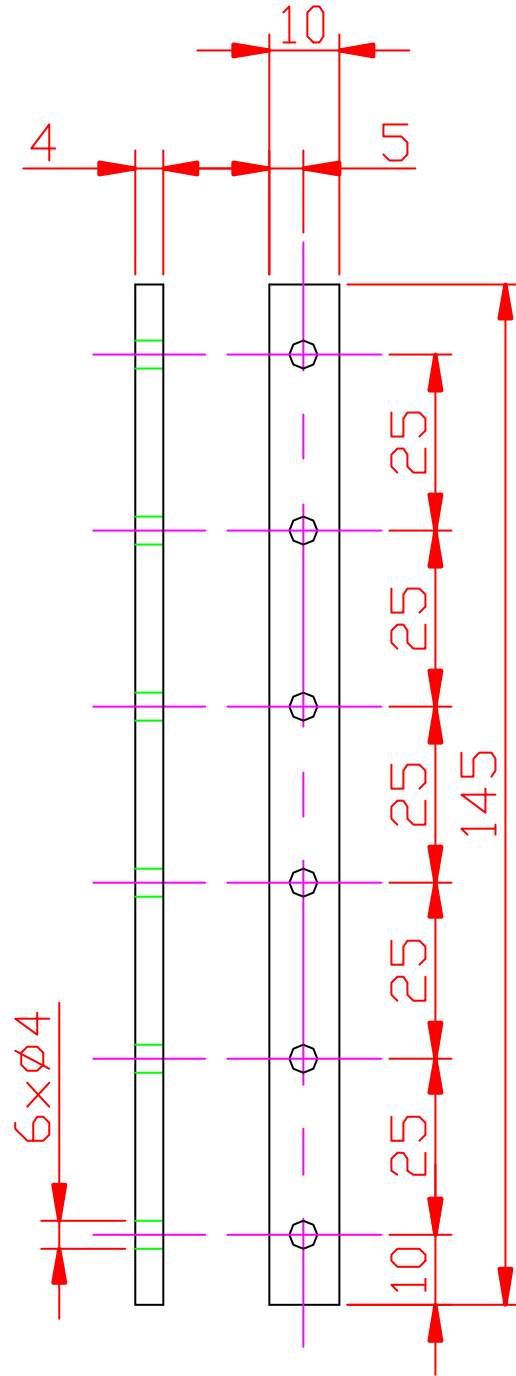


| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|------------------------------|--|
| | | | | | Transistorfäste, Kylfläns | |
| | | | | | Material: Aluminium 14-12 | |
| | | | | | BILAGA3:1 | |



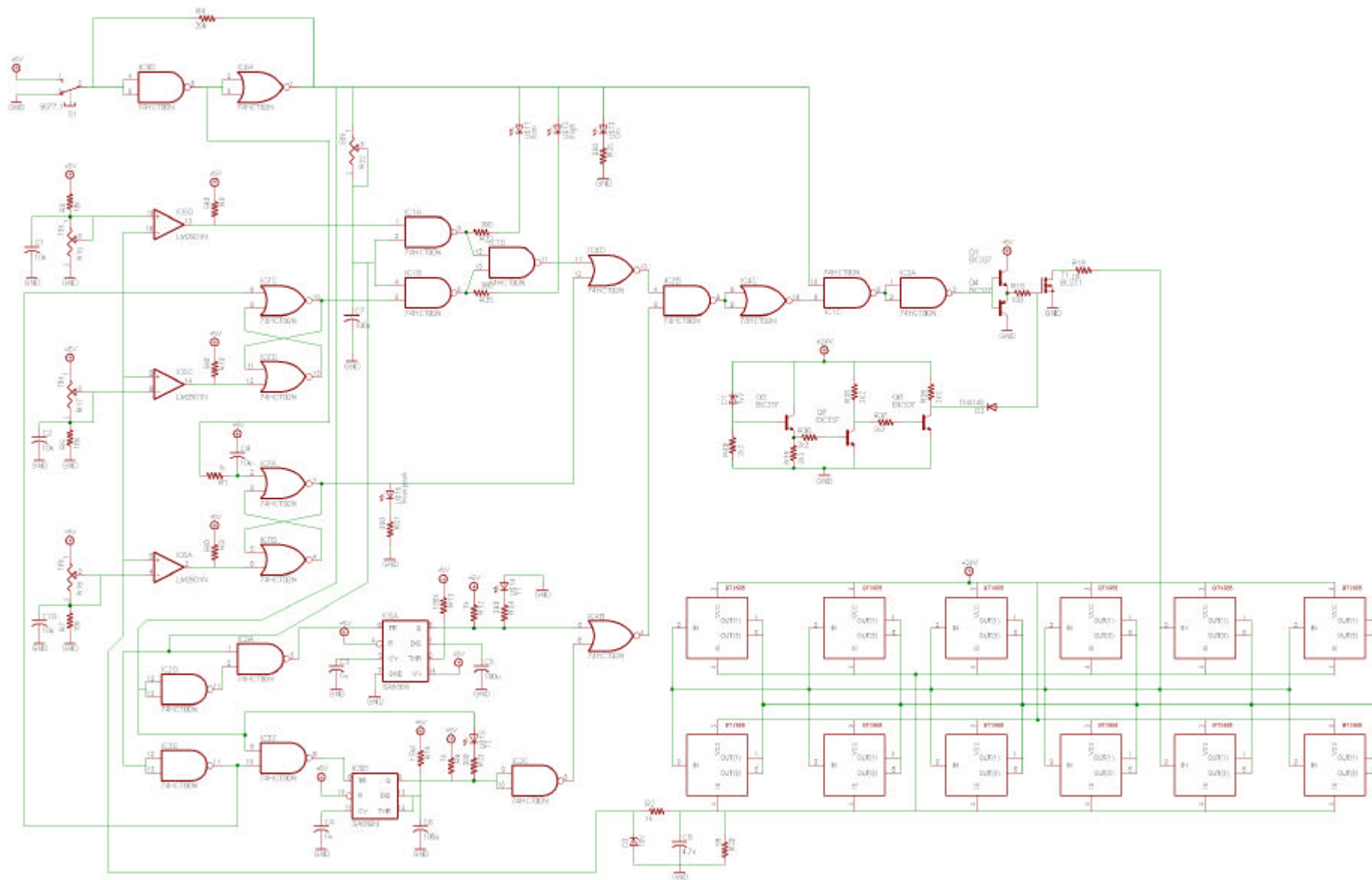
| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------|
| | | | | | | | | Anslutning transistorben |
| | | | | | | | | BILAGA3:3 |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Materiali
 Aluminium 14-12



| | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------------------------|----------------------------|
| | | | | | | | | | Klämmor till transistorben |
| | | | | | | | | | BILAGA3:4 |
| | | | | | | | | Materiali Aluminium 14-12 2 st | |

Kretsschema startmotorstyrning



Komponentlista till förvärmstyrning

| Komponent | Värde |
|-----------|----------|
| C1 | 4,7n |
| C2 | 10u |
| C3 | 4,7n |
| IC1 | LM2901N |
| IC2 | 74HCT02N |
| IC3 | MCT6 |
| R1 | 10k |
| R2 | 680 |
| R3 | 390 |
| R4 | 390 |
| R5 | 3,3k |
| R6 | 680 |
| R7 | 390 |
| R8 | 1k |
| R9 | 680 |
| R10 | 1,5k |
| R14 | 1k |
| U\$1 | BTS555 |
| U\$2 | BTS555 |
| U\$3 | LED 5 mm |
| U\$4 | LED 5 mm |

Komponentlista till Startmotorstyrning

| Komponent | Värde | Komponent | Värde |
|-----------|-------------|-----------|-----------|
| C1 | 10u | R15 | 100 |
| C2 | 10u | R16 | 10k |
| C3 | 1n | R17 | 10k |
| C4 | 1n | R18 | 10k |
| C5 | 100u | R19 | 10 |
| C6 | 100u | R20 | 68 |
| C7 | 100u | R22 | 390 |
| C8 | 4,7n | R23 | 390 |
| C9 | 10u | R24 | 390 |
| C10 | 10u | R25 | 390 |
| D1 | 7,2 V Zener | R26 | 390 |
| D2 | 1N4148 | R31 | 390 |
| D3 | 10 V Zener | R32 | 50k |
| IC1 | 74HCT00N | R36 | 2,2k |
| IC2 | 74HCT00N | R37 | 2,2k |
| IC3 | 74HCT00N | R38 | 2,2k |
| IC4 | 74HCT02N | R39 | 2,2k |
| IC5 | SA556N | R40 | 2,2k |
| IC6 | LM2901N | S1 | Switch |
| IC7 | 74HCT02N | T1 | BUZ11 |
| Q1 | BC337 | U\$1 | BTS555 |
| Q3 | BC337 | U\$2 | BTS555 |
| Q4 | BC337 | U\$3 | BTS555 |
| Q7 | BC337 | U\$4 | BTS555 |
| Q8 | BC337 | U\$5 | BTS555 |
| R1 | 1k | U\$6 | BTS555 |
| R2 | 1k | U\$7 | BTS555 |
| R3 | 680 | U\$8 | BTS555 |
| R4 | 20k | U\$9 | BTS555 |
| R5 | 10k | U\$10 | BTS555 |
| R6 | 10k | U\$11 | LED, 5 mm |
| R7 | 10k | U\$12 | LED, 5 mm |
| R8 | 1k | U\$13 | LED, 5 mm |
| R9 | 680 | U\$14 | LED, 5 mm |
| R10 | 680 | U\$15 | LED, 5 mm |
| R12 | 1k | U\$16 | LED, 5 mm |
| R13 | 100k | U\$17 | BTS555 |
| R14 | 1,5M | U\$18 | BTS555 |

| | | |
|------------------|--|-----------|
| <u>1.</u> | <u>Inledning</u> | 7 |
| 1.1. | <u>Bakgrund</u> | 7 |
| 1.2. | <u>Problemdefinition</u> | 7 |
| 1.2.1. | <u>Specifikationer</u> | 8 |
| 1.2.2. | <u>Begränsningar</u> | 8 |
| 1.3. | <u>Syfte</u> | 8 |
| <u>2.</u> | <u>Komponenterna</u> | 9 |
| 2.1. | <u>Möjliga transistorer</u> | 9 |
| 2.2. | <u>Funktion av BTS555</u> | 10 |
| 2.3. | <u>Strömmätning med BTS555</u> | 11 |
| 2.3.1. | <u>Mätning av höga strömmar</u> | 12 |
| 2.3.2. | <u>Strömmätning av parallella transistorer</u> | 13 |
| 2.3.3. | <u>Strömmätningstoleranser</u> | 13 |
| 2.4. | <u>Test av de inbyggda skydden i BTS555</u> | 14 |
| 2.4.1. | <u>Kortslutningsskydd</u> | 14 |
| 2.4.2. | <u>Temperaturskydd</u> | 16 |
| 2.4.3. | <u>Överspänningsskydd</u> | 17 |
| 2.4.4. | <u>Skydd mot polvändning.</u> | 17 |
| <u>3.</u> | <u>Småskaliga prover</u> | 19 |
| 3.1. | <u>Styrkrets</u> | 19 |
| 3.2. | <u>Två stycken parallella transistorer</u> | 20 |
| 3.2.1. | <u>Resultat</u> | 20 |
| 3.3. | <u>Tio stycken parallella transistorer</u> | 21 |
| 3.3.1. | <u>Värmeutveckling</u> | 23 |
| 3.3.2. | <u>Resultat och förbättringar</u> | 24 |
| <u>4.</u> | <u>Förvärmningselementet</u> | 25 |
| 4.1. | <u>Drivkretsen</u> | 25 |
| 4.2. | <u>Resultat</u> | 26 |
| <u>5.</u> | <u>Styrkrets för startmotor</u> | 28 |
| 5.1. | <u>Överströmskydd</u> | 28 |
| 5.1.1. | <u>Skydd mot långvarig överström</u> | 29 |
| 5.1.2. | <u>Skydd mot kortslutning</u> | 30 |
| 5.2. | <u>Skydd mot underström</u> | 30 |
| 5.2.1. | <u>Test av underströmsskydd</u> | 30 |
| 5.3. | <u>Tidskydd</u> | 31 |
| 5.3.1. | <u>Skydd mot för lång kranktid</u> | 31 |
| 5.3.2. | <u>Skydd mot för kort avsvälningstid</u> | 31 |
| 5.4. | <u>Tillslag</u> | 31 |
| 5.5. | <u>Underspänningsskydd</u> | 32 |
| <u>6.</u> | <u>Inledande test på startmotor</u> | 34 |

| | | |
|--------------------|--|-----------|
| <u>6.1.</u> | <u>Montering av transistorerna</u> | 34 |
| 6.1.1. | Förbättringar | 35 |
| <u>6.2.</u> | <u>Mätningar på startmotor</u> | 35 |
| 6.2.1. | Tillslag | 35 |
| 6.2.2. | Frånslag | 36 |
| <u>6.3.</u> | <u>Frihjulsdiod</u> | 37 |
| 6.3.1. | Diodström | 37 |
| 6.3.2. | Dimensionering | 39 |
| <u>6.4.</u> | <u>Spänningar</u> | 39 |
| <u>6.5.</u> | <u>Resultat</u> | 43 |
| <u>7.</u> | <u>Avslutande prover</u> | 44 |
| 7.1. | Start av lastbil | 44 |
| 7.1.1. | Start av kall motor | 44 |
| 7.2. | Miljöprover | 45 |
| 7.3. | Matningsspänningsprov | 45 |
| <u>8.</u> | <u>Alternativ lösning</u> | 46 |
| 8.1. | Slutsatser | 47 |
| <u>9.</u> | <u>Ekonomi och kostnader</u> | 48 |
| 9.1. | Huvudsakliga materialkostnader | 48 |
| 9.2. | Tillverkningskostnader | 48 |
| 9.3. | Totalkostnad | 48 |
| <u>10.</u> | <u>Diskussioner och slutsatser</u> | 50 |
| 10.1. | Diskussion | 50 |
| 10.1.1. | Startmotor | 50 |
| 10.1.2. | Övriga laster | 50 |
| 10.2. | Slutsatser | 50 |
| <u>11.</u> | <u>Fortsatt arbete</u> | 51 |
| <u>12.</u> | <u>Referenser</u> | 52 |
| <u>13.</u> | <u>Instrumentreferenser</u> | 53 |
| 13.1. | Instrument som används men ej refererat till | 53 |

Bilaga 1 : Specifikationer

Bilaga 2: Datablad BTS555

Bilaga 3 : Ritning på kylfläns och transistor montage för startmotorn

Bilaga 4 : Kretsschema för styrkretsen åt startmotorn

Bilaga 5 : Komponentlista till förvärmstyrning

Bilaga 6 : Komponentlista till startmotorstyrning

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Dagens lastbilar har stora strömförbrukare. Startmotorn är den största av dessa och matas idag direkt från batteriet utan någon form av skydd och är alltid spänningssatt. Som bäst är den utrustad med ett värmeskydd mot för lång kranktid. Uppstår det fel vid till exempel kollision kan anslutningen kortslutas och en hög kortslutningsström dras från batteriet. Värmeutvecklingen blir hög och det föreligger brandrisk.

Eftersom fler och fler reläer redan idag ersätts av halvledareteknik är bakgrunden att undersöka och prova om halvledare även kan användas för att driva de större lasterna, till exempel startmotorn. Kortslutningsfaran skulle kunna minskas och startmotorn skulle kunna skyddas betydligt bättre än idag.

I samband med halvledartekniken skulle även strömmen kunna mätas för att studera konditionen på startmotorn, mer om detta i avsnitt 11.

1.2. Problemdefinition

Av de stora lasterna som finns på lastbilen har i detta arbete främst två laster studerats, det är startmotorn och ett förvärmingsselement åt luften i insugningsröret. Startmotorn är den största lasten och kännetecknas av att den har en hög initialström, låg resistans och ett induktivt beteende. Förvärmaren är en ren värmare och uppvisar resistiva egenskaper och dess lastström är cirka 200 A. Startmotorn kan dra uppemot 1 000 A i drift och 2 000 A i initialström. Förvärmaren används för att värma insugningsluften till motorn och minskar problemet med vitrök vid kallstart.

För att utveckla strömförsörjningen till större laster ska halvledarkomponenter som ersättare för reläer utvärderas, för att se om det går att använda den tekniken även för de större lasterna. Fördelarna som kan erhållas är framför allt kontrollmöjligheter och skyddsfunktioner. Eftersom startmotorn är den svåraste lasten, utgår mycket av arbetet från den. Kan den svåraste lasten drivas och kontrolleras kan även de enklare och mindre lasterna det.

Kretsen som konstrueras ska klara av att mata startmotorn med dess behövliga ström, se tabell 1, Bilaga 1. För att dra nytta av fördelarna med elektriskt styrda komponenter ska startmotorn skyddas mot:

- Överström
- Underström
- Indirekt överhettning

Överströmskyddet ska förhindra att startmotorn körs med för hög last, till exempel vid startförsök med ilagd växel. Underströmskyddet skyddar startmotorn mot övervarv vid för låg last. Typiskt fel vid för låg last är om startdrevet inte kuggar i kuggkransen på svänghjulet. Körs startmotorn för länge kan den skadas av värmeutvecklingen i den, därför implementeras en tids-

begränsning för maximal kranktid och en minsta tid för väntan innan nästa startförsök kan ske. Detta för att förhindra indirekt överhettning. När dieselmotorn startat ska startmotorn stängas av, även om föraren inte släppt startnyckeln. Skydden kan implementeras på de övriga lasterna men eftersom startmotorn är den svåraste lasten utgås det alltid från den.

1.2.1. Specifikationer

I tabell 1 till och med 3 i Bilaga 1 finns specifikationer för startmotor, övriga laster samt miljöspecifikationer.

För styrkretsen gäller följande specifikationer. Matande spänningen kan sjunka till cirka 13 V när startmotorn körs [2]. Den måste även klara av de spänningsspikar som de utsätts för från generator. Lasten ska skyddas även vid fel i styrkretsen.

1.2.2. Begränsningar

Arbetet syftar huvudsakligen till att undersöka och styra transistorer för reläuppgiften. Startmotorskydd har konstruerats men övervakningen har lagts åt sidan för tillfället, se avsnitt 11.

I och med att den maximala startströmmen begränsas kan det bli omöjligt att starta med växel i. Att krankköra sliter hårt på startmotorn, men att krankköra kan vara det enda alternativet i en nödsituation. Kretsarna är konstruerade så att det är förhållandevis enkelt att ändra nivåerna för strömskydden. Viktigt att komma ihåg är att i detta arbete har fokus varit på startmotorns bästa.

1.3. Syfte

För att utveckla moderna lastbilar behövs modernare lösningar utvecklas och jämföras. Redan i dagsläget ersätts säkringar och reläer med halvledartechnik. Arbetet syftar till att konstruera ett halvledarrelä som även klarar de stora induktiva lasterna och är ekonomiskt försvarbar. Syftet är att få en krets som klarar av att driva sin avsedda last och även skydda den från fel som kan uppstå.

2. Komponenterna

Halvledare som klarar strömmar i området 1 000A för lågspänningsapplikationer finns inte hos någon av de större tillverkarna. Genom att parallellkoppla flera stycken mindre transistorer kan en hög ström hanteras. Alla komponenter som används ska klara temperaturkraven från tabell 3, Bilaga 1.

2.1. Möjliga transistorer

Spänningsfallet över transistorn under drift är av största vikt. Vid cirka 1000 A och tio parallellkopplade transistorer är spänningsfallet 0,1 V / mΩ. Det har gjort att många transistorer har sorterats bort eftersom spänningsfall över 1 V inte kan accepteras. En sammanställning över de mest intressanta presenteras i Tabell 1. Det är ett urval där modeller som är alltför dyra, utgående eller har oönskade parametrar, som till exempel för låg driftspänning eller för hög ledningsresistans, har sorterats bort. Utbudet av p-mos komponenter är däremot litet och istället måste n-mos tas i beaktande. Dessutom har n-mos kretsarna bättre mobilitet och är att föredra. Nackdelen är att styrkretsen ska konstrueras så att spänningen på gaten måste vara högre än på drain för att transistorn ska bryta helt, se mer i avsnitt 8.

Tabell 1 Alternativa användbara transistorer

| Leverantör | Komponent | Data | | | Antal | Pris ¹ |
|-------------|------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------|-------|-------------------|
| | | kont. Ström | V _{ds} / V _{ce} | R _{DS(on)} mΩ | | |
| 1. Elfa | IGBT: IXSH24N60A | 48 | 600 | 2,7V ² | 24 | 1 764 |
| 2. Elfa | IGBT: IXGH31N60 | 40 | 600 | 1,8V ² | 29 | 2 050 |
| 3. Farnell | SUP75P05-08 | 75 | 50 | 8 | 16 | 1061 |
| 4. Elfa | STE180NE10/STM | 180 | 100 | 4,5 | 7 | 4 949 |
| 5. Elfa | STP80NE06-10/STM | 80 | 100 | 8,5 | 15 | 735 |
| 6. Farnell | IRL2505S | 104 | 55 | 8 | 11 | 1 153 |
| 7. Farnell | SPB80N06S2L-07 | 80 | 55 | 7 | 15 | 424 |
| 8. Farnell | IRL1004 | 130 | 40 | 6,5 | 9 | 603 |
| 9. Farnell | IRF1404 | 162 | 40 | 4 | 7 | 432 |
| 10. Farnell | IRF1405 | 169 | 55 | 5,3 | 7 | 432 |
| 11. Farnell | BTS555 | 158 | 42 | 3 | 8 | 790,96 |

Den enda transistorn med p-mos teknologi är nummer 3, men priset och den lägre strömtåligheten gör att den väljs bort. Varje transistor tar upp ungefär lika mycket plats – att ha färre transistorer ger mindre platsbehov. De två IGBT-erna har ungefär diodframspänningsfall, är dyra och väljs därför bort. Kvar återstår det en del likvärdiga transistorer nummer 4-10 samt nummer 11. Bland de likvärdiga kan den billigaste och med minst R_{DS(on)} väljas –

¹ Räknat på det behövda antalet (1150 / I_{kon}) gånger styckpriset per transistor.

² 2,7 respektive 1,8 V V_{ce} saturated

nämligen nummer 9, IRF1404 som ska jämföras mot BTS555. Valet hamnade på BTS555.

Den valdes bland de möjliga komponenterna och dess egenskaper undersöktes noggrannare. I Bilaga 2 finns närmare data över BTS555.

Kretsen har valts att användas i denna applikation på grund av:

- Låg ledningsresistans
- Förmåga att tåla en hög kontinuerlig ström
- Integrerad strömmätning
- Integrerade skyddskretsar för till exempel över- och underspänning.
- Felaktigt lågt inköpspris

Från början kostade BTS555 14,47 kronor från Farnell. Ett mycket lågt pris och den började användas direkt. Efter närmare undersökning och kontakt med Farnell höjde de sedan priset till cirka 98 kronor per styck för transistorerna. Det mycket låga katalogpriset bidrog till att transistorn valdes från början, trots allt levererade Farnell totalt 75 stycken transistorer till det låga priset. Arrow, Infineons största svenska återförsäljare kan sälja transistorerna för 28 kronor per styck vid köp av 100 000 stycken per år. Det är det pris som kommer att användas vid kostnadsberäkningar.

När sanningarna om priserna har uppdagats hamnar i IRF1404 i bättre position, mer om denna komponent som alternativ lösning finns i avsnitt 8.

BTS555 har stora likheter med transistorn BTS650P. Enligt databladet verkar BTS555 vara två parallellkopplade BTS650P med hållkrets på temperaturskyddet. Om temperaturskyddet stänger av så måste BTS555 slås av innan återstart tillskillnad från BTS650P.

2.2. Funktion av BTS555

BTS555 [3] bygger på n-mos teknologi men tack vare en integrerad ”charge pump” kan den användas för att bryta matande spänning utan speciella krav på styrkretsen. Kretsen har kapsling TO-218 AB /5 och har fem ben. Ben nummer 1 och 5 är utgång från kretsen, ben nummer 3 samt höljet är ingång, ben nummer 2 är styrsignal och ben nummer 4 är strömmätningen.

Kretsen är utrustad med en del skyddsfunktioner för att skydda sig själv. Kortslutningsskydd, överspänningsskydd, maximal temperatur samt ESD-skydd finns. Dessutom har den integrerad strömmätning vilket gör att startströmmen hos startmotorn kan mätas enkelt.

Tillslag sker genom att jorda gate-ingången. Att jorda är smidigt konstruktionsmässigt eftersom gate-spänningen inte påverkas av variationer i styrkretsspänningen och liknande. Nackdelen visade sig vara att vid oansluten jordningen gick transistorn i det resistiva läget och förstördes.

Nackdelar med kretsen är dels den klena kapslingen, dels att transistorn har mycket vida toleranser. De stora toleranserna kan göra att dess egenskaper varierar mellan varje transistor.

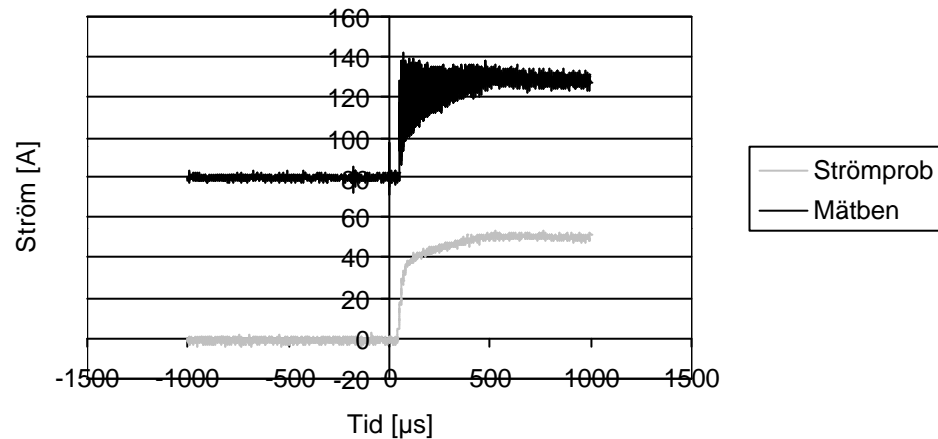
Övriga komponenter är standardkomponenter som återfinns hos varje väl-sorterad elektronikhandlare och är närmare beskrivna där de används.

2.3. Strömmätning med BTS555

Transistorn BTS555 är utrustade med en strömmätningsskrets, där den utgående mätströmmen är ca 30 000 gånger lägre än den verkliga strömmen. Strömmätningen kontrollerades genom att driva en last på cirka 50 A och mäta strömmen genom transistorn med hjälp av mätbenet. Mätströmmen kopplades till ett motstånd på 1.2 k Ω . Genom att mäta spänningen över motståndet kan strömmen i transistorn räknas ut genom sambandet:

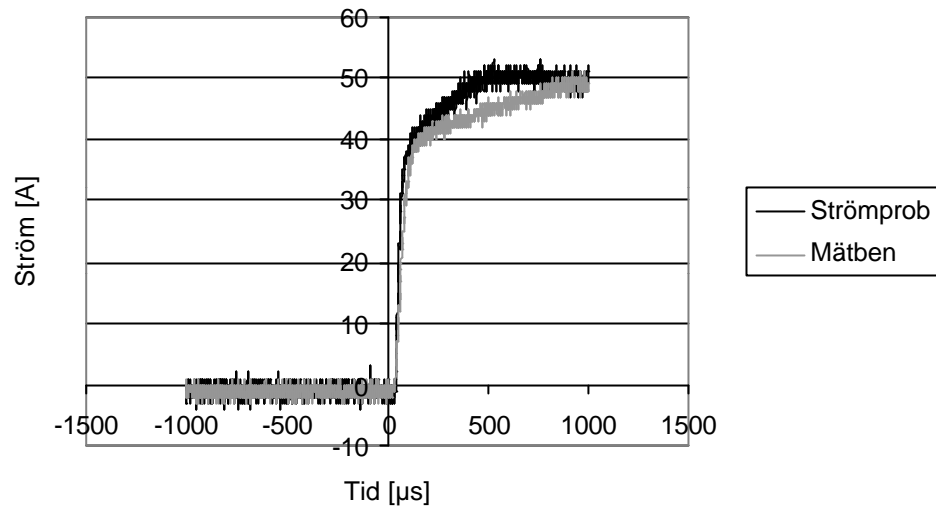
$$\text{Ekvation 1 } I_T = \frac{U_{\text{uppmätt}}}{R_{\text{mät}}} \cdot 30000$$

En tångampereprob {1} användes för att verifiera mätningen, se Figur 1.



Figur 1 Strömmätning med BTS555

Observera att den övre kurvan är förskjuten 80 A i vertikalled för att öka tydligheten. Mätningarna på mätbenet ripplar mycket varvid en kondensator på 4.7 nF parallellkopplas över mätmotståndet och mätningarna med strömbenet kan verifieras med hjälp av strömproben, se Figur 2.

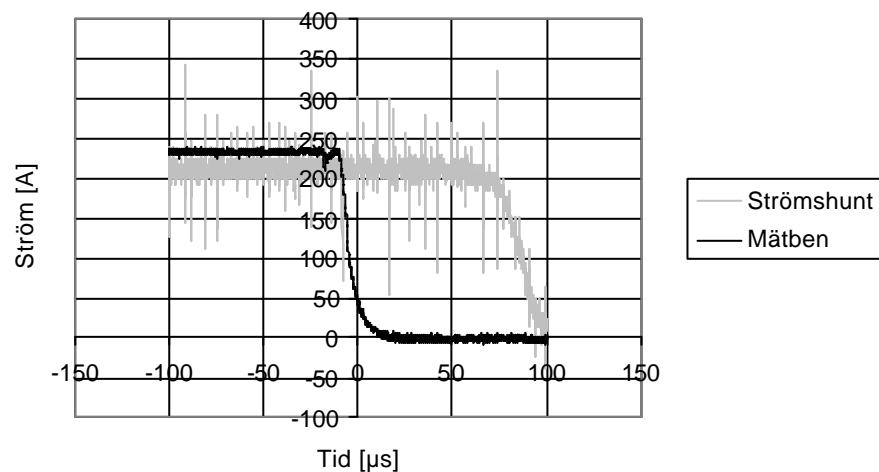


Figur 2 Mätning med filterkondensator inkopplad

Transistorns mätben fungerar för att mäta lastströmmen genom den och en filtrering av signalen underlättare avläsandet avsevärt. I fortsättningen görs alla mätningar med en filterkondensator inkopplad för att erhålla avläsbara signaler.

2.3.1. Mätning av höga strömmar

Vid strömmar över cirka 150 A riskerar strömmätningen att vara olinjär [3]. Därför mäts även strömmar runt 200 A med mätbenet och kontrolleras med en strömshunt [2]. Enligt strömshunten var lastströmmen 216 A och enligt mätbenet 235 A, se Figur 3, en skillnad på ungefär 9 %. Denna skillnad kan accepteras under de korta förlopp som lastströmmen genom transistorerna är så stora. Enligt databladet ska det bero på strömbegränsning som transistor utför, dess funktion har ej verifierats experimentellt.



Figur 3 Strömmätning vid strömmar runt 200 A

Förklaringen till grafens något konstiga utseende vid frånslag är att ströms-hunten är långsammare än transistorns mätben och det är därför den indikerar strömförändringen senare i tiden.

2.3.2. Strömmätning av parallella transistorer

Vid parallellkoppling av transistorer mättes strömmen genom att transistorernas strömben parallellkopplades och anslöts till ett mätmotstånd av lämplig storlek. Genom att mäta inkommande ström med prob och mätbenen kunde det verifieras att strömmätningen fungerar. I testkretsen kunde varje enskild transistorström mätas samt även den totala strömmen. Mätmotståndet för den totala strömmen sitter i serie med de parallella individuella mätmotstånden. Metoden valdes för att kunna mäta de specifika strömmarna för varje transistor såväl som den totala strömmen.

2.3.3. Strömmätningstoleranser

Strömmätningen med BTS555 är naturligtvis inte exakt. Omsättningen mellan mätströmmen och ledningsströmmen varierar, det finns ett mätmotstånd och andra källor till fel. Följande överslagsberäkningar har gjorts för att försöka uppskatta storleken på mätfelet. Transistorernas strömsomsättning är angiven vid olika strömmar, olika temperaturer samt för minsta, största och typiska värdet [3]. De strömmar som finns angivna är 8, 16, 30 och 180 A, vid -40°C , 25°C och 150°C . Omsättningen för strömmar däremellan är enligt databladet [3] linjär. Varken 30 A eller 180 A är särskilt intressanta att studera, istället ska strömmarna vid 16, 60 och 100 A studeras. 100 A per transistor motsvarar full last både för förvärmningselementet och startmotorn. 60 A motsvarar en start av dieselmotor utan extrema förhållande. 16 A motsvarar när startmotorn går lätt. Omsättningen varierar ganska mycket, se Tabell 2.

Tabell 2 Omsättning, temperatur och strömmar

| Ström [A] | Temp. $^{\circ}\text{C}$ | Omsättning | | | I_L / I_S |
|-----------|-----------------------------|------------|--------|--------|-----------------------------|
| | | Min | Max | Typ | |
| 100 | -40 | 26 300 | 33 640 | 30 000 | $30000 \pm 12\%$ |
| 100 | 25 | 26 250 | 33 150 | 29 375 | $30000^{+10,5\%}_{-12,5\%}$ |
| 100 | 150 | 25 000 | 29 300 | 26 600 | $30000^{-2,3\%}_{-17\%}$ |
| 60 | -40 | 25 800 | 35 000 | 30 000 | $30000^{+17\%}_{-14\%}$ |
| 60 | 25 | 25 900 | 33 750 | 30 000 | $30000^{+13,7\%}_{-12,5\%}$ |
| 60 | 150 | 25 000 | 29 300 | 26 600 | $30000^{-2,3\%}_{-17\%}$ |
| 16 | -40 | 24 000 | 45 000 | 35 000 | $30000^{+50\%}_{-20\%}$ |
| 16 | 25 | 24 000 | 40 000 | 31 500 | $30000^{+33\%}_{-20\%}$ |
| 16 | 150 | 24 000 | 27 700 | 31 000 | $30000^{+3,3\%}_{-20\%}$ |

Toleranserna är ofta ganska vida. Viktigt att komma ihåg är att typiska värden inte varierar särskilt mycket från 30 000. I alla praktiska mätningar som har gjorts har skillnaden mellan transistorernas strömmätning och andra mätton har inte överstigit 5 %. En rimlig uppskattning av mätonoggranheten kan vara $\pm 15 \%$.

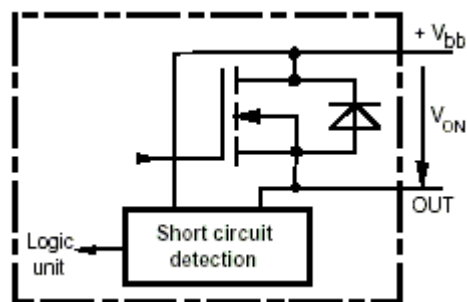
Slutsatserna om strömmätningen är att mätfelet kan vara ganska stort, mycket beroende på var i toleransområdet transistorernas omsättning hamnar. I testerna har strömmätningen visat sig fungera klanderfritt och ett visst fel i mätningen är acceptabelt. I testerna har felet inte överstigit $\pm 5 \%$.

2.4. Test av de inbyggda skydden i BTS555

I transistron BTS555 finns ett antal inbyggda skydd. För att lättare kunna förutsäga transistorernas och de olika kringkretsars beteende vid eventuell felbelastning har dessa skydd undersökts närmare.

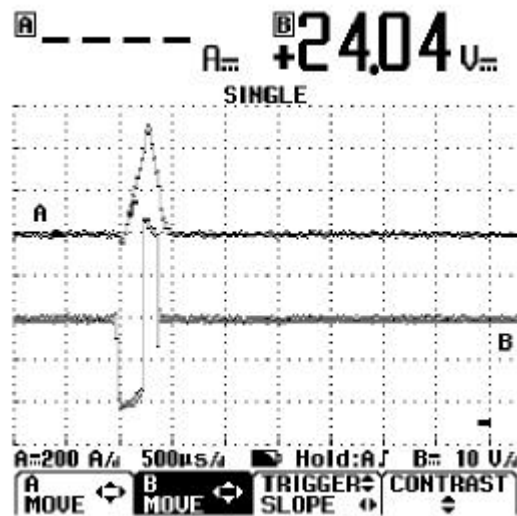
2.4.1. Kortslutningsskydd

Transistorn är skyddad mot direkta kortslutningar. För att transistorn ska kunna detektera en kortslutning mäts spänningsfallet V_{ON} . Om lastströmmen stiger, stiger även spänningsfallet. Då spänningsfallet överstiger ett förutbestämt värde $V_{ON(SC)}$ (typiskt 6 V), slår transistorn av på grund av kortslutning. Det krävs en kortslutning i minst 80-300 μs för att skyddet ska hinna lösa ut. Figur 4 visar en principskiss över kortslutningsskyddet.



Figur 4 Kortslutningsskydd i BTS555

För att testa kortslutningsskyddet anslöts en transistor direkt till batterierna, och en kortslutning ersatte lasten. Då transistorn slogs till rusade därför strömmen tills kortslutningsskyddet slog från transistorn. Figur 5 visar hur transistorn slår från när V_{ON} överstiger $V_{ON(SC)}$ {3}.

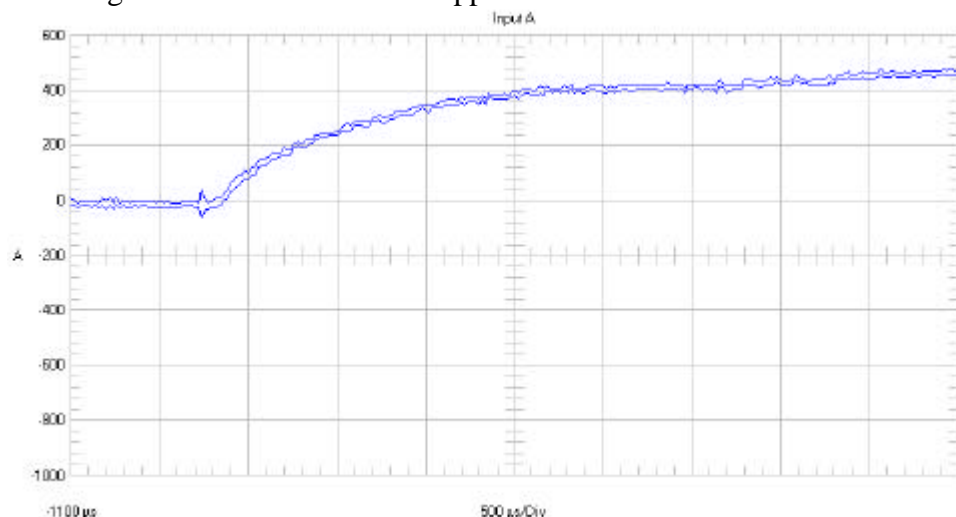


Figur 5 Strömkaraktäristik vid aktivering av kortslutningsskydd.

Tabell 3 Förklaring av kurvor till Figur 5

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|-----------------------|-------------|
| A | Ström, 200 A / ruta | 500 μ s |
| B | Spänning, 10 V / ruta | 500 μ s |

Om en kortslutningsbrytare monteras parallellt med en last och kortslutningen slås till när transistorn driver lasten uppvisar den ett annat beteende. Transistorn hinner inte slå av tillräckligt snabbt, och kommer därför gå sönder. I Figur 6 ser vi ett sådant förlopp.



Figur 6 Strömkaraktäristik vid kortslutning av tillslagen transistor

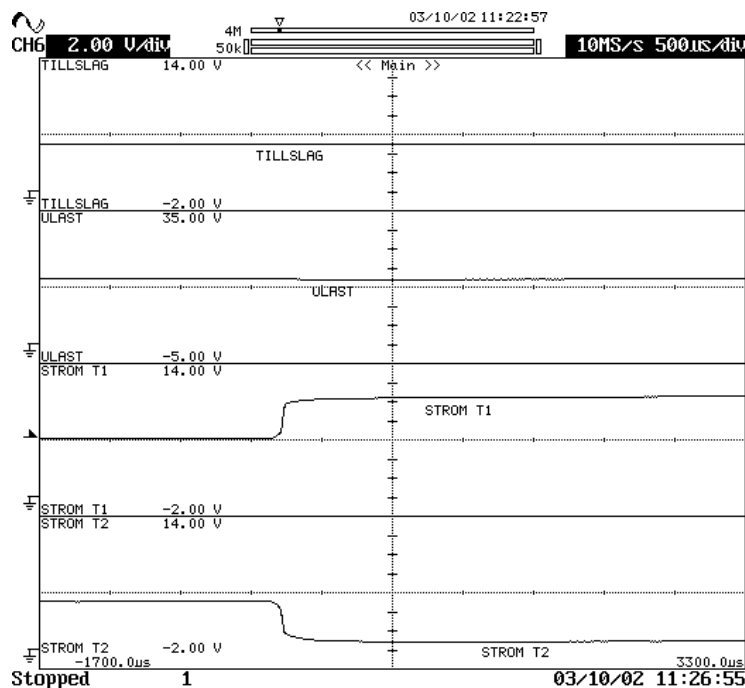
Försöket visar att transistorn inte klarar en kortslutning under drift, då måste externa skydd vara snabba nog för att detektera kortslutning och genast slå av transistorn. Någon förklaring till varför transistorn går sönder har inte hittats i databladerna, en förklaring kan vara att eftersom transistorn leder fullt ut så kommer kortslutningen för snabbt och transistorn hinner inte slå av. Genom att studera stigtiden hos strömmen vid en kortslutning och jämföra

med de externa skyddens snabbhet kan man avgöra om systemet i sin helhet kommer att klara av att hantera en kortslutning under drift.

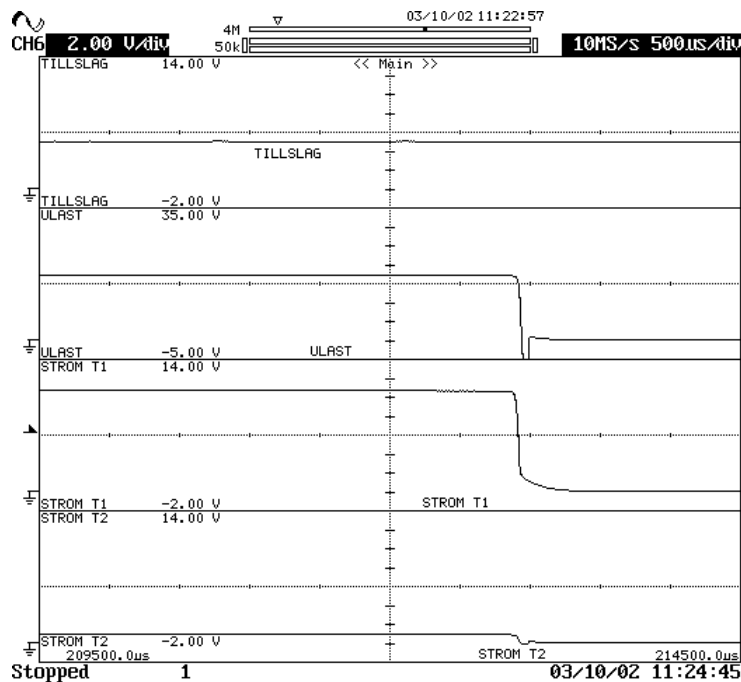
2.4.2. Temperaturskydd

Transistorn har ett inbyggt temperaturskydd. Skyddet ska stänga av transistorn vid en temperatur av minst 150°C. Försök gjordes på en transistor genom att låta den driva en last och sedan värma den med varmluftspistol. Resultatet blev att den i enlighet med databladet [3] stängde av.

Försök gjordes för att bekräfta att temperaturskydden fungerar när två transistorer arbetar parallellt. Två transistorer monterades parallellt och lastades med cirka 220 A. För att kontrollera temperaturskyddet och hur två parallellkopplade transistorer beter sig om den ena slår av värmdes en transistor med hjälp av varmluftspistol. Temperaturskyddet i transistorn som värmdes slog av, den ledande tog över belastningen helt för en tid innan även den slog av på grund av temperaturen eftersom den fick leda mer ström än vad den är avsedd för. Figur 7 och Figur 8 visar detta. Temperaturskyddet är mycket användbart i tillämpningen eftersom transistorerna skyddar sig själv mot för hög temperatur.



Figur 7 Transistor två slår från på grund av övertemperatur



Figur 8 Transistor ett slår från på grund av övertemperatur

Tabell 4 Förklaring till kurvorna för Figur 7 och Figur 8

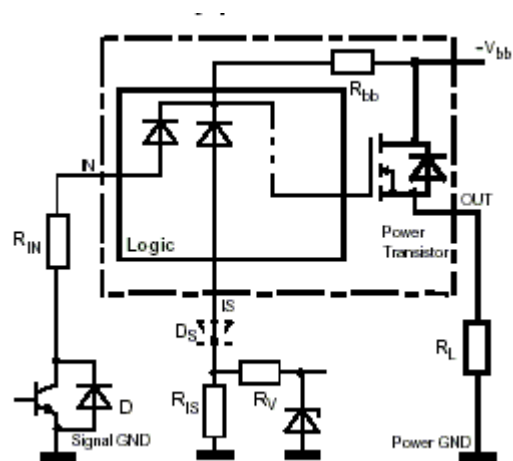
| Kurva: | Måter: | Tidssteg: |
|------------|-------------------------------------|-----------|
| Tillslag | Tillslaget, 2 V / ruta | 500 µs |
| U_{last} | Spänningen över lasten, 5 V / ruta | 500 µs |
| Strom T1 | Ström, transistor 1, ca 44 A / ruta | 500 µs |
| Strom T2 | Ström, transistor 2, ca 44 A / ruta | 500 µs |

2.4.3. Överspänningsskydd

BTS555 är även utrustad med ett överspänningsskydd. Funktionen av detta har ej kontrollerats. Detta beror på att adekvat laborationsutrustning ej har funnits tillgänglig. Nivån på skyddet är 62 V och är dessutom högre än vad som kan förväntas i 24 V systemet.

2.4.4. Skydd mot polvändning.

För att skydda mot polvändning måste även styrkretsen konstrueras korrekt, Figur 9 visar bland annat hur dioder bör implementeras. Vid växlade batteripoler kommer dioden D orsaka att transistorns ingång blir hög, vilket gör att transistorn hålls frånslagen. R_N skyddar i sin tur D mot överström. Den interna dioden i transistoren är kopplad antiparallellt med transistoren och tål lika mycket ström som den [3]. Lastströmmen kommer att flyta genom dioden. Syftet med skyddet är att skydda transistoren.



Figur 9 Skydd mot batteripolvändning

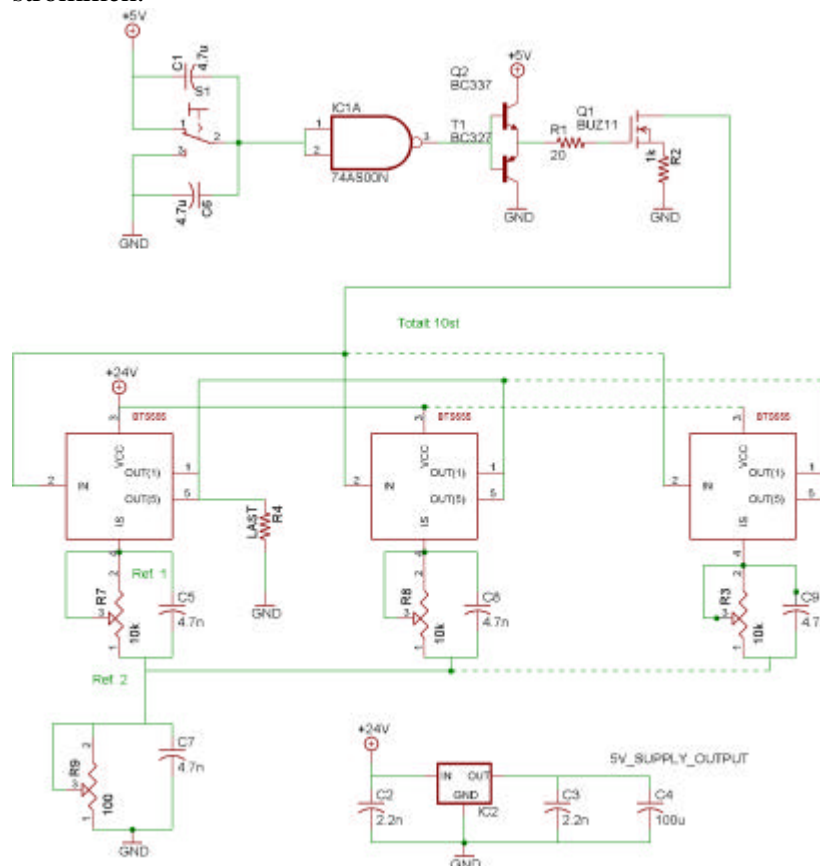
Enligt databladet [3] och praktiska försök fungerar detta, se även Bilaga 4.

3. Småskaliga prover

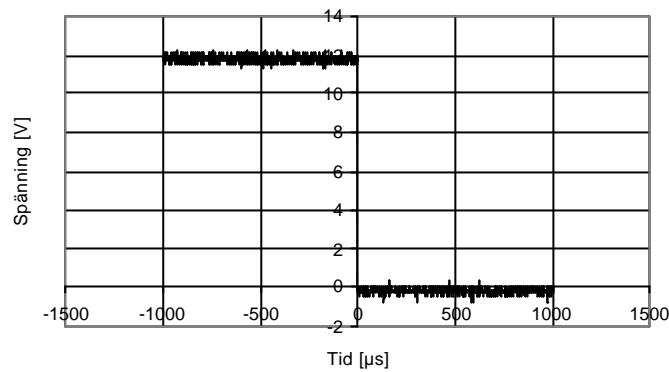
Innan arbetet med startmotorn påbörjades gjordes ett antal prover i mindre skala för att utröna om transistorerna var användbara. Parallellkopplingar av transistorer som fick driva mindre laster för att kunna mäta strömdelning och temperatur.

3.1. Styrkrets

En enkel styrkrets för att kontrollera transistorerna konstruerades, se Figur 10. Kretsen fungerar enligt följande. Överst finns en 5 V matning bestående av en 7805 och kondensatorer för att stabilisera in och utspänning. Längst till vänster finns en tillslagsbrytare. Kondensatorerna är till för att erhålla studs fria tillslag. Inverteraren är till för att erhålla diskreta lägen men även för att övergå till logiknivå. Transistorparet T1 bildar ett drivsteg som driver en MOSFET, BUZ11, som i sin tur driver BTS555:orna. När tillslag ges öppnar MOSFETen och jordar BTS555:orna via motståndet R2. Via R7, ett R7 för varje transistor, kan de individuella strömmarna mätas och via R8 kan den totala strömmen mätas. Kretslösningen är gjord för att erhålla snabba och studs fria stegfunktioner när manöverkontrollen slås till respektive från, vilket mätningar presenterade i Figur 11 verifierar. Ett bra insteg gör det lättare att studera tillslaget av transistorerna. Till styrkretsen kopplades även mätmotstånd för tio transistorer i serie med ett mätmotstånd för totala strömmen.



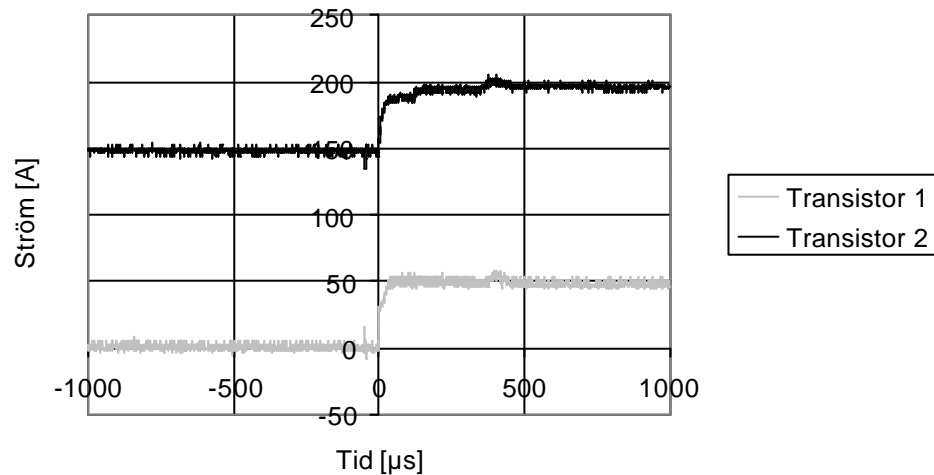
Figur 10 Kontrollkrets för BTS555or



Figur 11 Tillslaget från kontrollkretsen

3.2. Två stycken parallella transistorer

För att kunna driva större laster parallellkopplas flera transistorer för att dela på strömmen. Tester gjordes för att studera hur tillslag och strömdelning ser ut mellan de olika transistorerna. I ett inledande skede provades två parallella, för att utökas till fyra och slutligen tio. Tio behövs för att kunna driva startmotorn. De två transistorerna kopplades till en last av ungefär 100 A och tillslaget mättes med mätbenen. Resultatet visas i Figur 12.

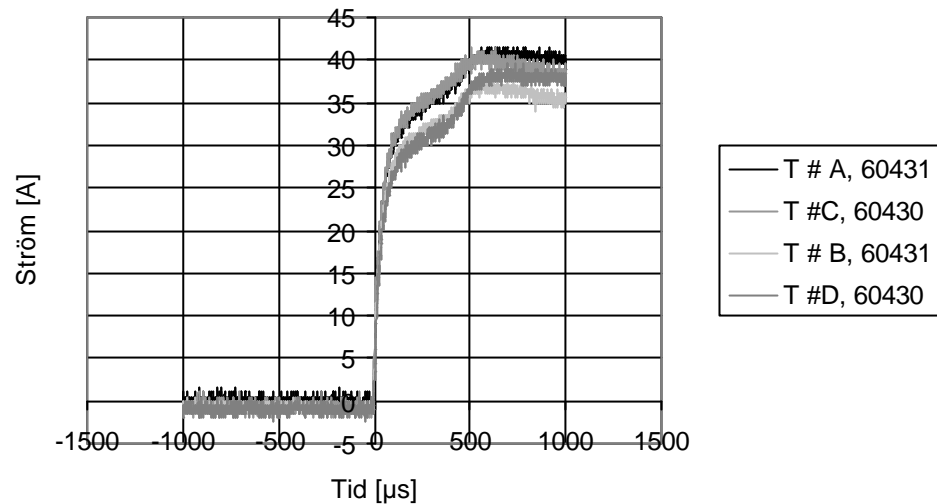


Figur 12 Tillslag för två parallella transistorer

3.2.1. Resultat

Variationerna mellan strömmarna är små och resultatet har funnits vara tillräckligt bra för att arbeta vidare med. Om en transistor är mycket snabbare vid tillslag än den andra skulle den snabbare initialt leda en mycket större ström. Ett sådant förlopp skulle bidra till ökat slitage, eller till och med direkt haveri, på den snabbare transistoren. En fördel med transistorer av mosfet typ är att de har en positiv temperaturkoefficient. Drar en transistor mer ström, blir den varmare och resistansen i den ökar. Den ökade resistansen gör att mindre ström flyter genom transistoren och den andra transistoren leder mer ström till dess att skillnaderna mellan dem är utjämnade. Värmeutvecklingen mellan transistorerna är jämnt uppdelade mellan dem och studeras

närmare i 3.3.1. Proverna upprepades för fyra transistorer och liknande resultat nåddes där, se Figur 13. Skillnaden i ström mellan dem är inte så stor och kan bero på olika resistans i ledaren till transistorerna, varierande inre resistans och varierande strömmätning.

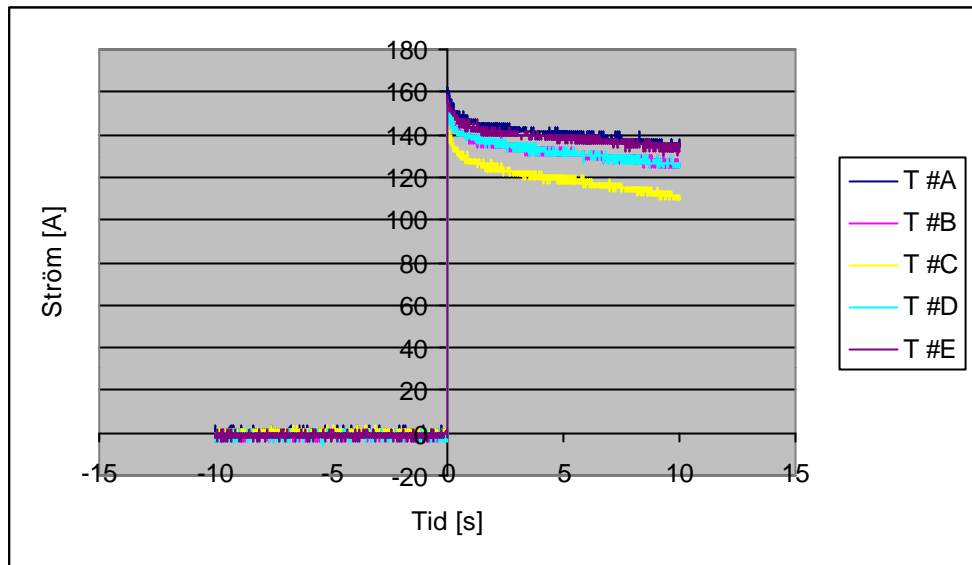


Figur 13 Tillslag för fyra parallella transistorer

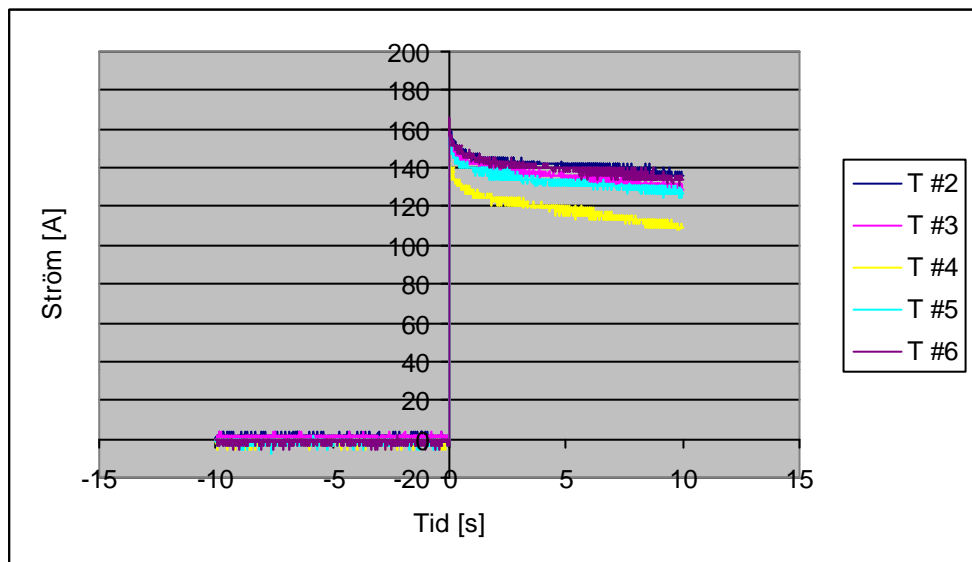
3.3. Tio stycken parallella transistorer

Provet utökades till mätningar på tio stycken parallella transistorer. Till transistorerna anslöts en last på 1150 A vid 12 V. Anledningen att 12 V användes och inte 24 V var att lasten klarade maximalt $1500 \times 12 = 18 \text{ kW}$ (eller 750 A vid 24 V). Eftersom det är de höga strömmarna som orsakar värmeutvecklingen kunde 12 V användas. Lasten, {4} är förhållandevis långsam i sitt förlopp varvid själva tillslaget är svårt att mäta på ett korrekt sätt. Istället är den kontinuerliga strömmen som varje transistor leder av intresse, för att kontrollera att ström- och temperaturlagningen mellan transistorerna är jämn.

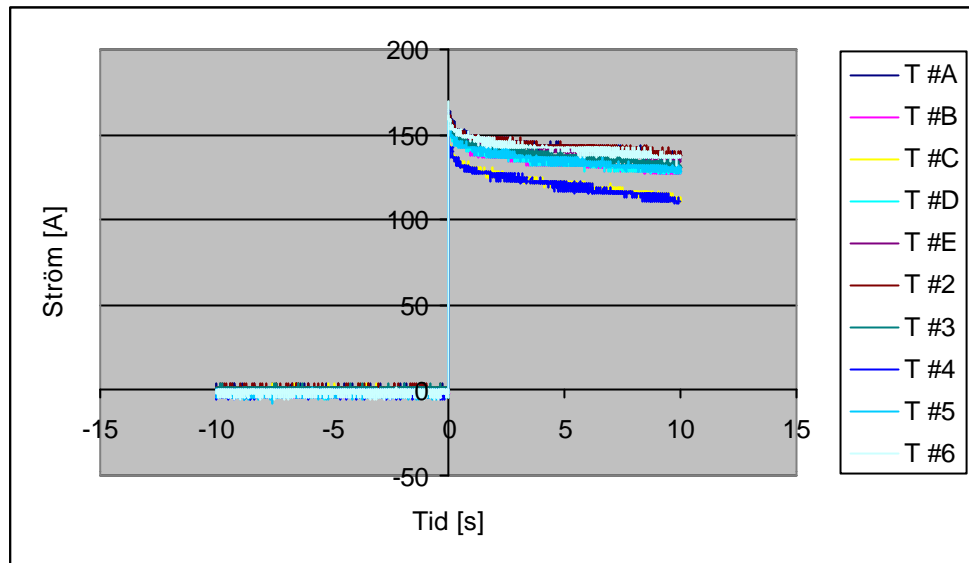
Det har inte funnits tillgång till något tiokanals oscilloskop, istället har strömmen genom fyra transistorer mätts, med två olika oscilloskop {5}, {6} och sedan flyttas till fyra nya och på det viset fått fram alla strömmar. En nackdel är att alla strömmar inte mäts vid samma tillfälle. Lastströmmarna är förhållandevis konstanta och därför valdes metoden istället för att mäta med fem olika oscilloskop som även det ger upphov till onoggrannheter. Transistorerna är monterade i rad på en platt aluminiumprofil. Inkommande ström är placerad i mitten och transistorerna i graferna nedan som är döpta A till E sitter till vänster om ingången och de som är döpta 2-6 sitter till höger om ingången. Strömmarna mättes med transistorernas egna mätben, med samma testkrets som i Figur 10. Resultatet av mätningarna finns i figureerna nedan.



Figur 14 Strömmen genom transistorerna A till och med E



Figur 15 Strömmen genom transistorerna 2 till och med 6



Figur 16 Strömmen genom alla transistorerna

Variationer i strömmarna kan bero på monteringen vid plattprofilen. Ledningsresistansen till transistorerna längst ut på profilen är högre än för de som är monterade närmast anslutningen, det kan påverka strömdelningen. Små variationer i lastströmmen och att batterispänningen kan ha sjunkit mellan testerna. Den linjära minskningen mellan två och tio sekunder beror på variationer i strömmätningen på grund av temperaturen. Under den första sekunden påverkar lasten och batterier.

Efter en period om 10 sekunder ökade temperaturen med cirka 25 °C. Det kan även påverka hur mycket ström som flyter genom varje transistor. Mätningarna är gjorda genom att mäta E och A samtidigt, de med störst inbördes avstånd, för att sedan mäta D och B och så vidare.

3.3.1. Värmeutveckling

Transistorerna belastades med 1150 A under 3 stycken 15 s långa intervall med en avsvälningstid på 2.5 minuter. Transistorerna hinner inte svalna helt under denna tid, men tillräckligt mycket för att den totala temperaturdifferensen inte ska bli för hög. I försöket var initialtemperaturen ca 30°C. Temperaturskillnaden mellan varje cykel är cirka 15°C. En lite högre temperatur uppnås först, sedan kyls transistorerna av under vilocykeln.

Värmeutvecklingen i transistorerna är av högsta vikt för att kunna dimensionera kylningen. Då tiderna är korta kommer det att vara svårt att kyla transistorerna, istället måste värmen ledas bort och fördelas i en kylfläns som får absorbera värmen. För att få en uppfattning om kylflänsens storlek kan följande beräkningar och antagande göras:

$$\text{Specifik värmekapacitet: } c_{aluminium} = 903 \frac{J}{Kg \cdot K} \quad [4]$$

$$\text{Densitet: } d_{aluminium} = 2,7 \cdot 10^3 \frac{Kg}{m^3} \quad [4]$$

Ett värsta fall antas, nämligen maximal resistans, hög initialvärme på kretsarna och maximal startström. Antagandet är osannolikt eftersom transistorerna sällan har en temperatur av 85°C och motorn ska kallstartas. Scenariot är ändå intressant eftersom det ger en god fingervisning av vad transistorerna ska kunna tåla. Startmotorn ska gå att köra i tio sekunder och vi räknar med att sex stycken startförsök kan göras.

$$R_{max}=5,0 \text{ m}\Omega \text{ vid } 85^\circ\text{C}$$

$$n=10 \text{ st, antalet parallella transistorer som används.}$$

$$I_L=1150 \text{ A}$$

$$T_{start}=85^\circ\text{C}$$

$$t=10 \text{ s} \times 6 \text{ försök} = 60 \text{ s.}$$

$$T_{slut} \quad 150^\circ\text{C}$$

Ekvation 2 Beräkning av erforderlig volym hos kylflänsen

$$V = \frac{W}{C \cdot d \cdot \Delta T} = \frac{R_{inre} \cdot I_L^2 \cdot t}{C \cdot d \cdot \Delta T \cdot n} = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1150^2 \cdot 60}{903 \cdot 2,7 \cdot 10^3 \cdot 65 \cdot 10} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 0,25 \text{ dm}^3$$

Resultaten visar att värmeutvecklingen är ett fullt lösbart problem. Temperaturerna är uppmätta med ett termoelement fäst mot kylflänsen så temperaturen i transistorerna kan vara högre. Vid en hög startström är det troligtvis kallt ute vilket även sänker arbetstemperaturen.

3.3.2. Resultat och förbättringar

Tio stycken parallellkopplade transistorer fungerar bra att använda för att driva en last. Inga större temperaturvariationer mellan transistorerna har kunnats kännas med fingrarna på transistorerna och strömdelningen är acceptabel. En kylfläns kan monteras för att påskynda avkylningen vid pausen mellan startförsöken.

4. Förvärmningselementet

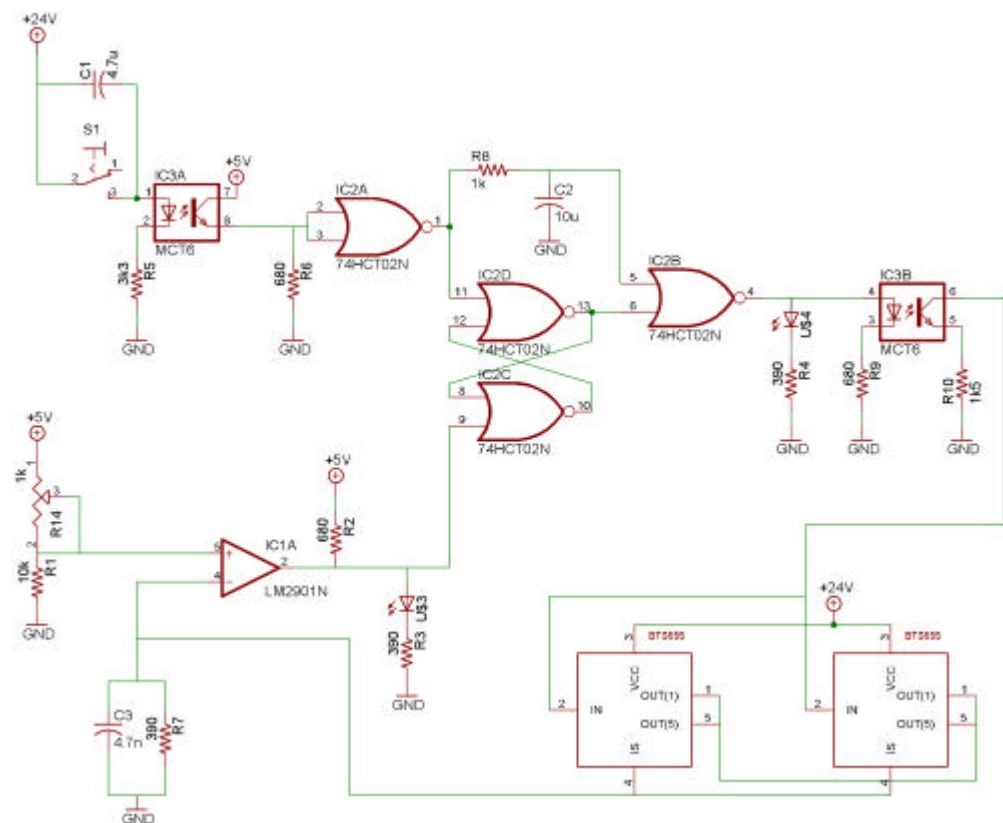
Utifrån de inledande proverna konstruerades en prototyp för hur reläet som sköter värmeelementet till insugningsluften kan ersättas med transistorer. Enligt specifikationerna i tabell 2, Bilaga 1 drar värmaren maximalt 225 A – vilket ger att 2 transistorer räcker för att klara lasten.

4.1. Drivkretsen

Drivkretsen till transistorerna är uppbyggd enligt Figur 17. En kontinuerlig signal på 24 V ges som startsignal och aktiverar en optokopplare som ger signalen tillslag. Ytterligare en optokopplare används för att aktivera transistorerna om inte överströmsskyddet som finns i kretsen är aktiverat. Optokopplare används för att få galvanisk åtskiljning samt att de är lätta att handha. Totala strömmen genom transistorerna mäts genom att benen parallellkopplas och ansluts till ett mätmotstånd. Överströmsskyddet mäter spänningen över mätmotståndet och jämför den med en referensspänning. Flyter det en ström större än 225 A aktiveras en SR-latch av NOR-grindar och styrsignalen avbryts. Latchen används för att överströmsskyddet ska ligga kvar även sedan strömmen minskas. Latchen bryter skyddet tills dess att en resetsignal ges. Resetsignalen erhålles när styrsignalen slås av. Tillslaget är fördröjt cirka 50 μ s för att säkerställa att latchen inte är i något förbjudet läge.

Transistorerna monteras på en aluminiumprofil med en kylfläns på toppen. Kretskort och transistorer monteras och försluts i en låda med en inkommande anslutning och en utgående. En fyrledad styrkabel finns även till lådan, där kablarna har följande funktioner:

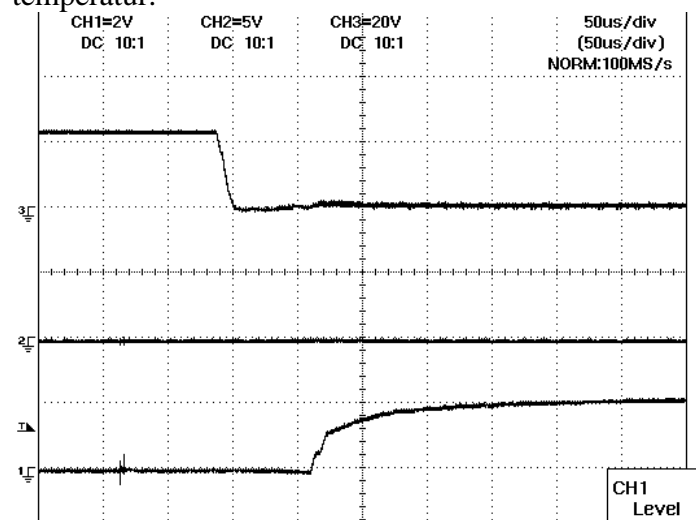
| | |
|--------|--|
| Svart: | Inkommande jordningen. Observera att den måste vara ansluten annars föreligger skaderisk på transistorerna |
| Röd: | Strömmätning ut. Mäter spänningen över mätmotståndet om strömmen till värmaren vill mätas externt. |
| Grå: | Tillslag, +24 V |
| Gul: | Indikation överström |



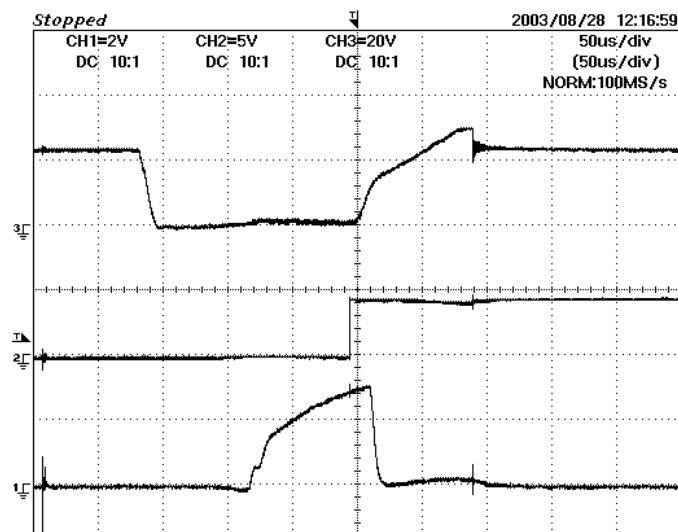
Figur 17 Drivkretsen till värmaren

4.2. Resultat

Prover gjordes på kretsen av tillslag, frånslag, frånslag vid överström och temperatur.



Figur 18 Tillslag av förvärmare, för förklaringar, se Tabell 5



Figur 19 Frånslag vid överström

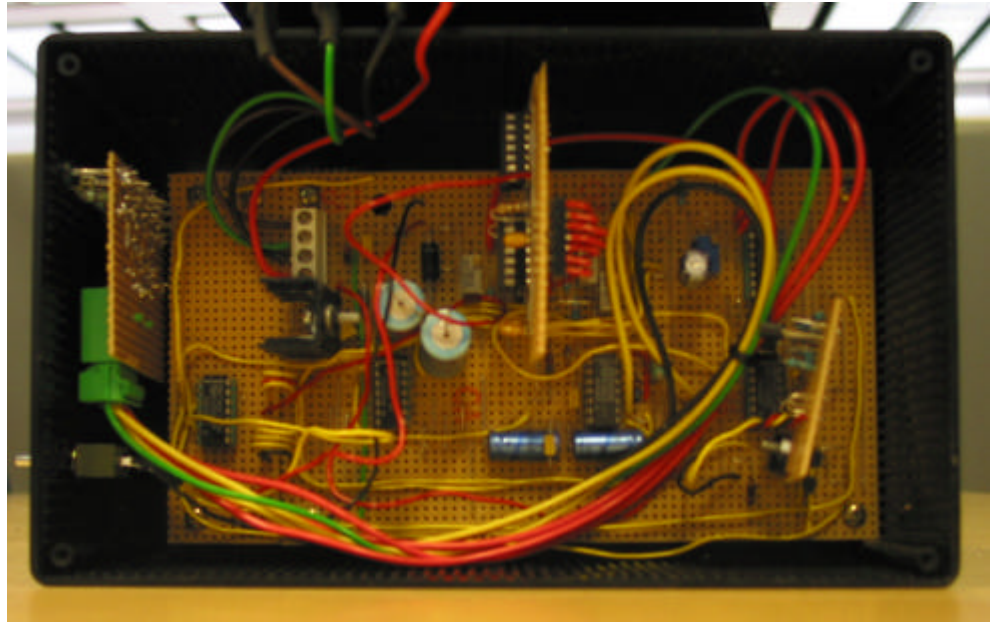
Tabell 5 Förklaringar till Figur 19 och Figur 18

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|-----------------------------------|-------------------|
| 1 | Ström, mätben cirka 150 A / ruta | 50 μ s / ruta |
| 2 | Överström, hög signal = aktiverat | 50 μ s / ruta |
| 3 | Tillslag, låg signal = Tillslag | 50 μ s / ruta |

När överströmskyddet indikerar överström vid exempel en kortslutning slås transistorn ifrån och strömmen återgår till noll på mindre än 50 μ s. Brytningen av strömmen är mycket snabb och förhindrar att för stora strömmar flyter i kretsen för länge.

5. Styrkrets för startmotor

Utifrån värmaren och testerna på transistorerna har en styrkrets för startmotorn konstrueras. För komplett kretsschema se Bilaga 4. Hur den färdiga kretsen ser ut visas i Figur 20.



Figur 20 Styrkrets för startmotor

Kretsen består av skyddskretsar och tillslagskomponenter. Startmotorn kan främst ta skada av höga temperaturer, men även överström eller för lågt bromsmoment – det vill säga underström så att övervarv detekteras genom underström. Fem olika skyddfunktioner implementeras, och varje enskild funktion bryter startströmmen om ett fel uppstår. Skydden som implementerats är överström, strömspikar, underström samt drift- och avsvälningstid. Överström och strömspikskyddet skyddar även mot kortslutning. Inget externt temperaturskydd finns mer än att drifttiden begränsas och att startmotor får tid att svalna mellan startförsöken. Ett ytterligare skydd har konstrueras för att skydda transistorerna mot underspänningar, eftersom de lätt tar skada av att arbeta i det linjära området.

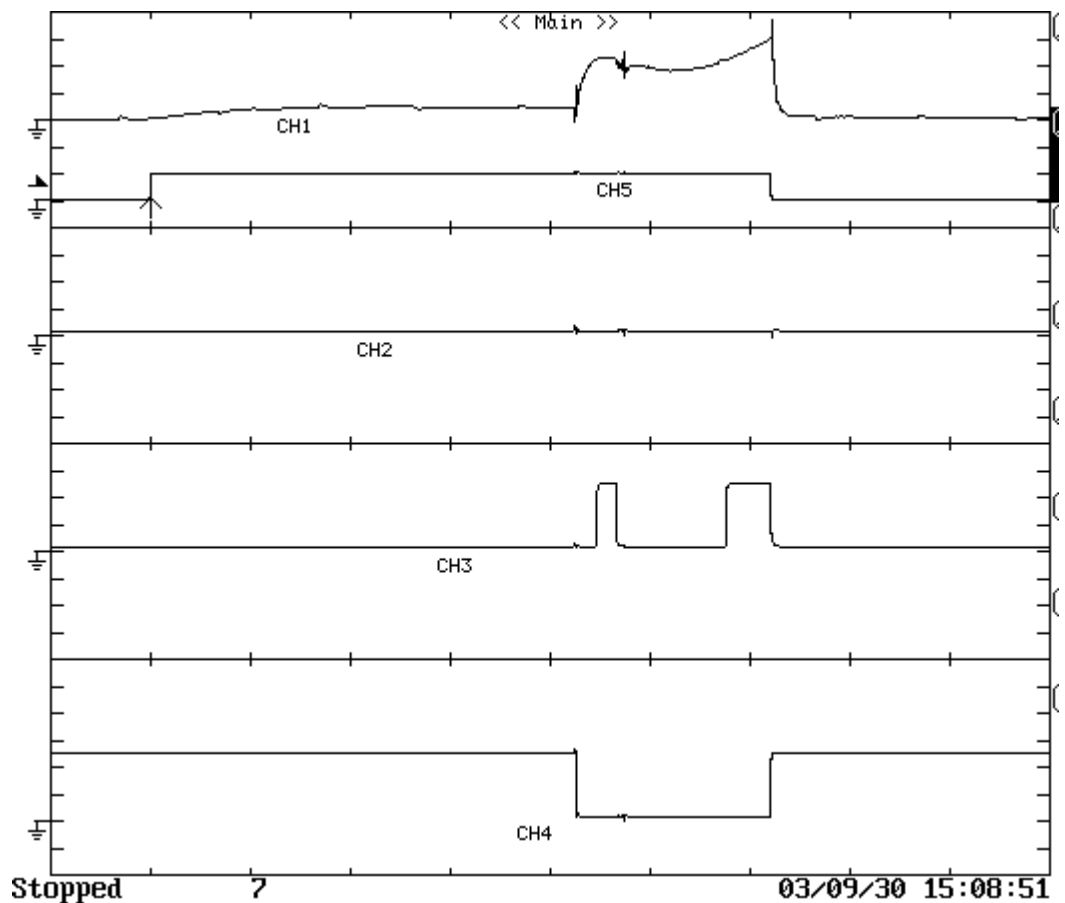
5.1. Överströmskydd

Till båda överströmskydden används komparatorn LM2901N [5]. Valet av komparator är baserat främst på dess temperaturlåghet och dess enkla handhavande. En referensspänning skapas genom spänningsdelning och stabiliseras med kondensatorer. Logisk etta på komparatorns utgång indikerar fel. För att inte få ett oscillerande förlopp vid överström används en hållkrets, precis som för förvärmningselementet, bestående av en SR-latch. Detekterar komparatorn en överström kommer latchens set-ingång att gå hög. Resultatet blir att latches låser detta värde på sin utgång och grindlogiken bryter tillslaget då ett fel föreligger. När tillslagsbrytaren ändras till frånslag erhålls en resetsignal. Resetsignalen är fördröjd för att förhindra att latches hamnar i det förbjudna läget. Förbjudet läge är när reset- och setsignal är

höga samtidigt. Låskretsen säkerställer att startnyckeln måste släppas efter en överström för att ett nytt startförsök ska kunna göras.

5.1.1. Skydd mot långvarig överström

För att skydda mot långvarig överström implementeras ett överströmskydd med tidsfördröjning. Enligt specifikation angiven i tabell 1, Bilaga 1 kan en strömspik på maximalt 10 ms tolereras. En överström kan vara orsakad av direkta kortslutningar som uppkommit till följd av felmontage, slitage, fabriktionsfel eller liknande. En sådan kortslutning orsakar inte startmotorn någon direkt skada, och är därför ovidkommande i sammanhanget bortsett från att den orsakar kraftig värme. Transistorn har inbyggda skydd mot bland annat överström och det är enbart startmotorn som behöver skyddas med ytterligare kretsar. Överström kan även orsakas av att en växel är ilagd, vilket i sin tur kräver ett mycket stort vridmoment för att dra runt förbränningsmotorn. Den sista viktiga orsaken till överström är interna fel i startmotorn, till exempel skadade lindningar eller lager. Vid ett sådant fel är det stor risk för ytterligare skador på startmotorn. I Figur 21 ser man tydligt hur överströmskyddet, kanal 3, slår från transistorerna först efter att den maximala tiden för startströmspik uppnåtts. Tillslag och ström visas i kanal 5 respektive kanal 1. Strömmen visar ca 500 A / ruta {7}. Då det mekaniska reläet är relativt långsamt, har tiden trimmats in till att motsvara ca 10ms plus reläets tillslagstid. Det syns även tydligt hur underströmskyddet, kanal 4, löser ut då strömmen minskat tillräckligt mycket. Kanal 2 visar strömspikskyddet, vilket ej löser ut. Tidsskalan är 10 ms / ruta.



Figur 21 Överströmskyddet aktiveras

5.1.2. Skydd mot kortslutning

En kraftig strömspik tyder på ett abnormt beteende hos startmotorn och den bör skyddas från dessa. Den maximala strömstyrka som tolereras kortvarigt är enligt specifikation 2 000 A, under en tid av max 10 ms. Eftersom det aldrig ska tolereras strömmar över 2000 A, impliceras ett enkelt överströmskydd som bryter direkt vid denna ström.

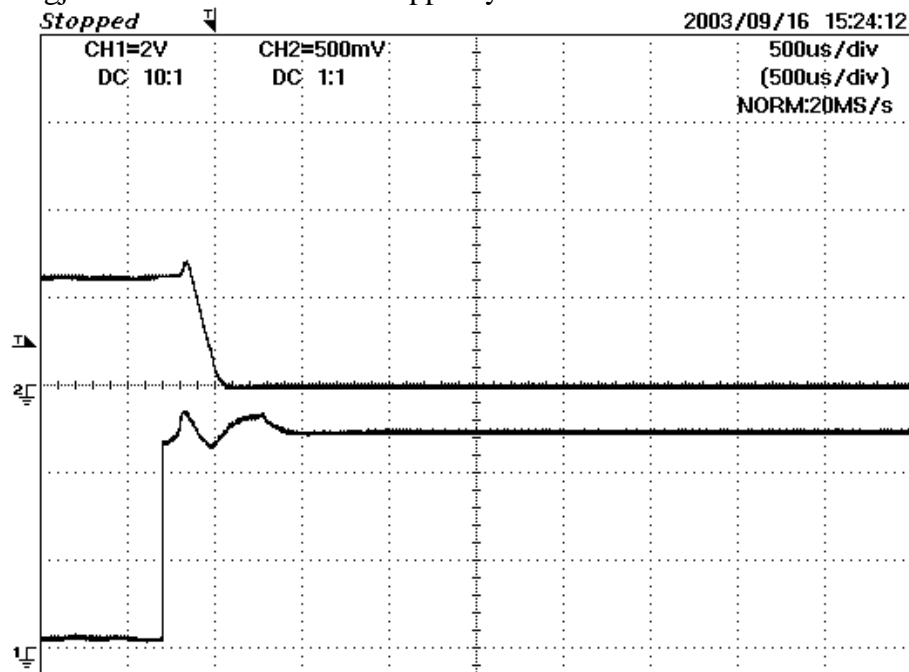
5.2. Skydd mot underström

En låg ström genom startmotorn kan betyda olika saker. I ett initialt läge måste startströmmen först stiga, eftersom den före tillslaget är noll. För att inte underströmskyddet ska lösa ut i detta skede fördröjs aktiveringen av detta skydd med 10ms. Om startströmmen inte stiger till ett tillräckligt högt värde tyder detta på att startmotorns drev inte kuggat i kuggkransen på svänghjulet korrekt. Detta är ett fel, och underströmskyddet ska bryta strömmen.

5.2.1. Test av underströmsskydd

För att verifiera att strömskyddet fungerar kopplades kretsen upp och motorn startades. Lasten minskades sedan till dess att underströmsskyddet löste

ut, se Figur 22. Skalorna är för stora för att se minskningen tydligt och hade de gjorts mindre hade inte förloppet syns.



Figur 22 Frånslag från underströmskyddet

Tabell 6 Förklaringar till Figur 22

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|------------------------------------|---------------|
| 1 | Underströmskydd, 2 V / ruta | 500 µs / ruta |
| 2 | Ström, med strömprob, 500 A / ruta | 500 µs / ruta |

5.3. Tidskydd

5.3.1. Skydd mot för lång kranktid

För att skydda transistorer och startmotor mot överhettning tillåts bara en begränsad kranktid. Enligt specifikation är denna 10 s. Skyddet implementeras med hjälp av en timerkrets, SA555N [6]. Timerkretsen tillåter inte start så länge som startnyckeln inte vridits om till startläge. Vid startförsök genereras en puls som aktiverar timerkretsen och varefter den i maximalt 10 s tillåter start. När de tio sekunderna säkerställer kretsen att ingen start tillåts.

5.3.2. Skydd mot för kort avsvälningstid

För att transistorerna och startmotorn ska hinna svalna mellan startförsöken används en timerkrets som tillser att tillslag inte kan ske innan en förutbestämd tid gått. Vid frånslag, antingen manuellt eller orsakat av något fel, aktiveras timerkretsen och ingen start tillåts förrän efter två och en halv minut.

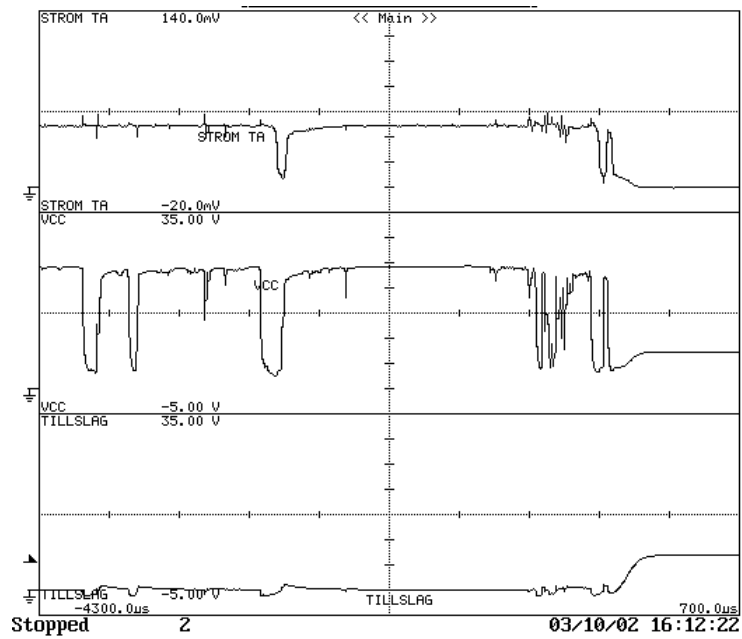
5.4. Tillslag

Tillslaget ges genom en brytare som är konstruerad för att erhålla studsritt tillslag. Istället för kondensatorer som för värmaren har en annan modell valts för att minska slitaget på brytarkontakterna när kondensatorerna laddas

upp. När tillslaget är aktiverat och inget fel föreligger i kretsen aktiveras ett drivsteg till en MOSFET, T1 som jordar ingångarna. Drivsteget är till för att göra ett snabbt tillslag och inte belasta grindlogiken med strömmar. Då tillslaget för BTS555 är relativt långsamt, finns inget behov av att transistorn som styr den slås till särskilt fort. Drivsteget i form av två bipolära transistorer skulle därför kunna uteslutas ur kretsen om motståndet R15 ersätts med ett 10 k Ω motstånd istället. Drivsteget orsakar dock ingen skada och har därför fått vara kvar för att försäkra sig om att styrkretsen klarar av att driva transistorn. MOSFETen som sköter jordningen är av modellen BUZ11, tål cirka 26 A och är kraftigt överdimensionerad men fanns tillgänglig. BUZ11 har dessutom ett lågt pris.

5.5. Underspänningsskydd

I anslutningen till MOSFETen sitter ett underspänningsskydd som ska se till att skydda transistorerna. För att skydda transistorerna mot underspänning har ett underspänningsskydd implementerats i startmotorstyrningen. Detta skydd är avsett att skydda transistorerna från att arbeta i det linjära området. Ett typiskt tillfälle då man riskerar att skada transistorn är om jordanslutningen inte är korrekt anluten. Ett sådant fel kan lätt uppstå vid slitage av kablar eller glapp i kontakter. Skyddet kommer att ge transistorn T1 en låg ingång om matningsspänningen sjunker under en viss nivå. Eftersom skyddet är kopplat direkt till matningsspänningen kommer fel att detekteras en stund innan de övriga kretsarna tappar sin matningsspänning, detta tack vare de två stora kondensatorerna i 5 V matningen. För att verifiera att skyddet fungerar, lastades 2 stycken BTS555 med ca 200 A, varvid jordanslutningen till skyddskretsarna kopplades bort. Skyddet fungerade som väntat och slog ifrån innan någon skada på transistorerna hunnit uppstå, se Figur 23. Ett flertal identiska försök gjordes och transistorn klarade alla testerna. Vid tidigare försök när jordanslutningen glappat eller glömts bort har transistorerna gått sönder.



Figur 23 Frånslag vid bruten jordning

Tabell 7 Förklaringar till Figur 23

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|---------------|
| 1 | Ström, transistorerna, ca 440 A / ruta | 500 µs / ruta |
| 2 | Matningsspänning 5 V / ruta | 500 µs / ruta |
| 3 | Tillslag (Hög signal = frånslag), 5 V / ruta | 500 µs / ruta |

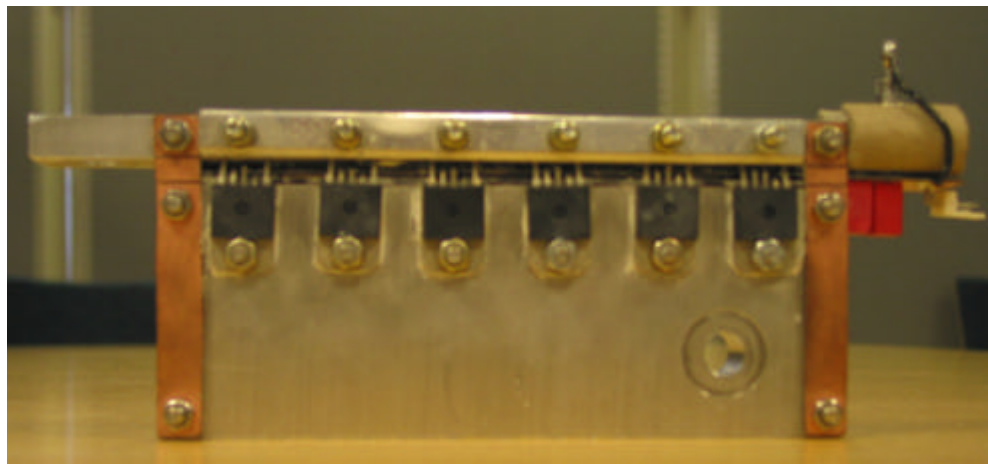
6. Inledande test på startmotor

De inledande testerna på startmotor genomfördes i en testrigg för startmotorer. Riggen bromsar motorn med hjälp av en bromstrumma, och uppvisar därför ett beteende som inte är riktigt likt en förbränningsmotor. De slutsatser som kan dras av dessa tester kan därför väntas vara av betydelse huvudsakligen för valet av frihjulsdiod. Syftet med mätningar i rigg var att kontrollera att transistorerna tål den höga startström som startmotorn drar initialt, dess kontinuerliga ström och brytning av strömmen vid avslag. Belastningen av startmotorn kan varieras för att prova över- och underström.

6.1. Montering av transistorerna

Transistorerna monterades på en fläns av aluminium. Anledningen till att aluminium istället för koppar valdes är dess lägre pris, att materialet är enklare att bearbeta och det fanns tillgängligt. Aluminiums höga energilagringsskapacitet och låga vikt är andra fördelar gentemot koppar. Tolv transistorer monteras i två rader på en 165 mm lång, 20 mm tjock och 60 mm bred platta, se Bilaga 3.

Transistorerna monteras i två rader, på ovan- och undersidan och benen ansluts genom att trycka fast dem emot en aluminiumprofil. Genom att ha anslutning och uttag i olika ändar av konstruktionen uppnås en ganska symmetrisk elektrisk delning. Styrbenen och strömmätbenen böjs ner mellan aluminiumprofilerna och lödes fast på ett dubbelsidigt kretskort där de även anslutes sinsemellan.



Figur 24 Transistorer, frihjulsdiod och kondensatorer monterade på kylblock

Volymen på profilen blir $1,65 \cdot 0,20 \cdot 0,60 \approx 0,2 \text{ dm}^3$ och den behövda volymen för tolv transistorer för att klara värmekraven är enligt Ekvation 2, avsnitt 3.3.1, $0,208 \text{ dm}^3$. Flänsen har ungefär rätt volym, den är lite mindre men skillnaden är liten och kraven vid volymberäkningen var höga.

Vid fel i någon transistor kommer den felande att tvingas leda en onormalt hög ström, vilket resulterar i att den går sönder och på det viset bryter

strömmen. Metoden kan uppfattas som brutal och osäker men det finns inget annat sätt att bryta en trasig transistor såvida inte en säkring eller liknande installeras på matningen. Att säkra varje transistor för sig resulterar i mer spänningsfall samt ökade kostnader. Eftersom transistorn ska fungera som säkring skulle det dessutom bli en ganska överdriven lösning med ytterligare säkringar, idag finns det ingen redundans över huvud taget ifall till exempel reläet fastnar. I denna applikation är det den felande transistorn som är svagaste länken och går sönder först. Att vi känner till vilken del som kommer att överbelastas är bra, eftersom vi då lättare kan förutspå hur systemet i sin helhet kommer att reagera. Lösningen ger dessutom en felindikering eftersom ben och eventuellt även kapslingen är trasiga.

6.1.1. Förbättringar

Ett problem med monteringen är att om en transistor går sönder, så kan de förkolnade resterna av transistorn kortsluta styrben och mätben. Detta gör att tillslag inte kan ske för att styrbenet matas med 24 V och kan inte jordas och strömskydden mäter 24 V och indikerar överström. För att förhindra detta problem kan säkringar monteras på det dubbelsidiga kretskortet. Förstör en transistor, går det för hög ström i styr och mätben och säkringarna bryter. Den trasiga transistorn blir elektriskt åtskild från övriga och tillslag kan återigen ske med de resterande transistorerna. Istället för säkringar kan även smala ledningsbanor användas.

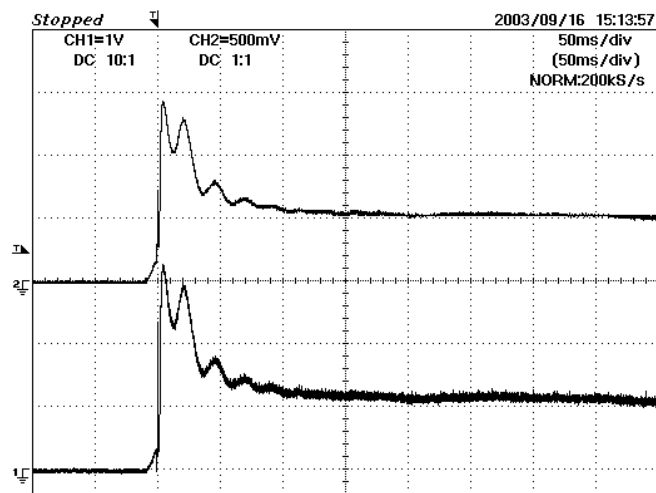
Nackdelen är att trasiga transistorer bör indikeras vilket utökar antalet utgående kablar med minst 12 stycken.

6.2. Mätningar på startmotor

Strömmen till startmotorn mättes med flera olika mätdon. Anledningen är att få en uppfattning om mätdonens tillförlitlighet i förhållande till varandra. Mätdonen som används är dels den inbyggda i BTS555, tångamperepob {8} (1 mV / A), två stycken 500 Amperes LEM-moduler {9}, en 500 Amperes LEM-modul {10} och en strömshunt {10}. Mätningarna visade att strömshuntens och probens visade väldigt likvärdiga kurvor dock var strömshuntens signal förhållandevis brusig.

6.2.1. Tillslag

Tillslaget provades vid en last motsvarande cirka 500 A. Tillslaget visas i Figur 25.



Figur 25 Tillslag av startmotorn i riggen

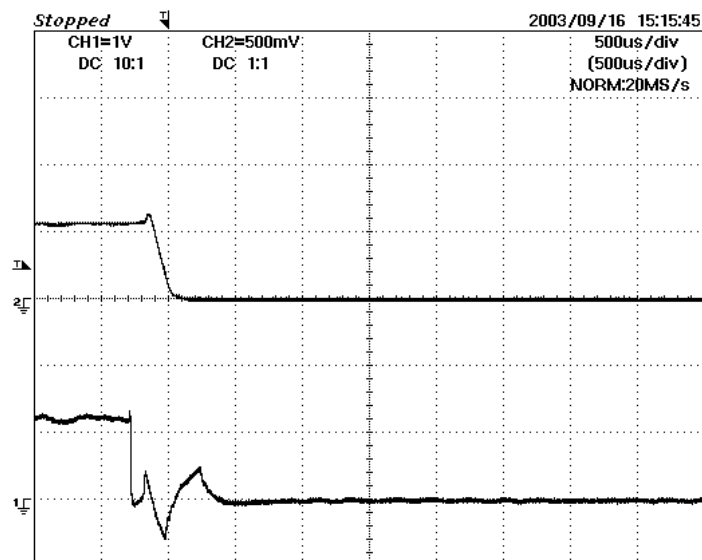
Tabell 8 Förklaringar till Figur 25

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|---|--------------|
| 1 | Inkommande ström, med mätben, ca 440 A / ruta | 50 ms / ruta |
| 2 | Inkommande ström, med strömprob, 500 A / ruta | 50 ms / ruta |

Den första lilla strömökningen vid cirka 80 ms är när solenoiden till startdrevet slår till. Efter den första strömökningen kommer spikar när startmotor ska magnetiseras och börjar driva lasten.

6.2.2. Frånslag

Frånslaget med hjälp av transistorerna uppvisar ett något oväntat beteende vilket visas i Figur 26.



Figur 26 Frånslag av startmotorn

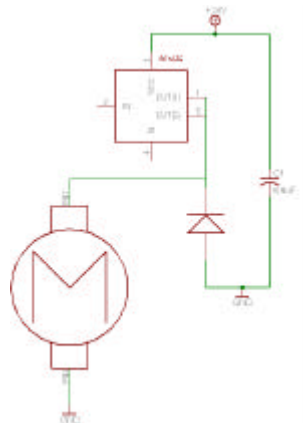
Tabell 9 Förklaringar till Figur 26

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|---|--------------------|
| 1 | Inkommande ström, mätben, ca 440 A / ruta | 500 μ s / ruta |
| 2 | Inkommande ström, med strömprob, 500 A / ruta | 500 μ s / ruta |

Det oönskade i beteendet är hur avslaget från mätbenet ser ut. Hur det snabbt minskar till noll och sedan har ett oscillerande förlopp i cirka 750 μ s. Medan strömproben däremot visar en avtagande ström. Förklaringen återfinns i databladet [3] att vid avslag av induktiva laster dröjer det cirka 500 μ s (teoretiskt värde) innan strömmätningen fungerar som den ska och visa det korrekta värdet noll. Tiden som erhöles i denna mätning är lite längre. Att strömmätningen är inkorrekt vid avslaget påverkar inte kretsarna eftersom avslaget redan är gjort.

6.3. Frihjulsdiod

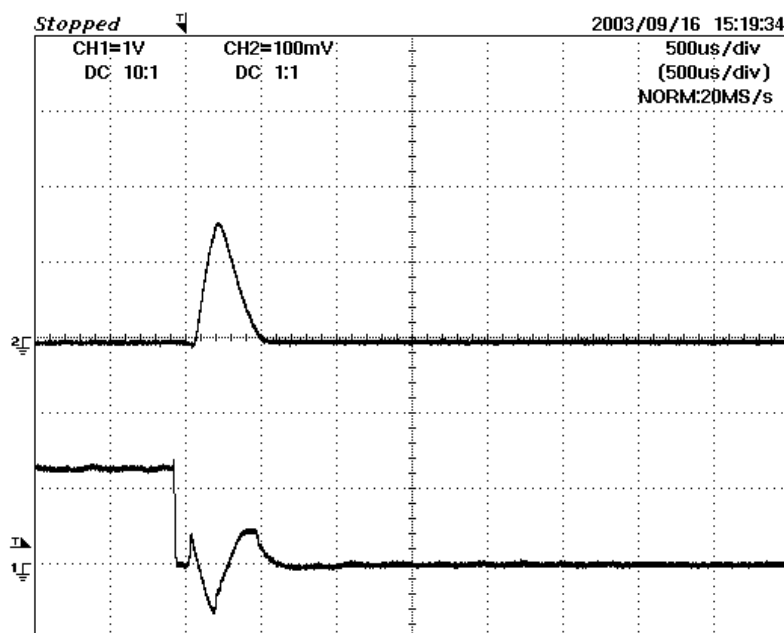
Eftersom startmotorn är en induktiv last, behövs det en frihjulsdiod som vid frånslag tar hand om den energi som finns lagrad i motorn. Dioden monteras antiparallellt med motorn och med minimalt avstånd från transistorerna, se Figur 27. Beroende på motorns inre resistans och induktans får strömmen genom frihjulsdioden olika amplitud och tidsomfattning. Diodströmmen bör bli lika stor som driftströmmen i ett initialt skede.



Figur 27 Frihjulsdiodens montering

6.3.1. Diodström

Diodströmmen mäts med strömproben och resultatet av mätningen redovisas i Figur 28.



Figur 28 Diodströmmen

Tabell 10 Förklaringar till Figur 28

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|---|---------------|
| 1 | Inkommande ström, mätben, ca 440 A / ruta | 500 µs / ruta |
| 2 | Diodström, 100 A / ruta | 500 µs / ruta |

Strömproben ger 1 mV / A vilket gör att toppströmmen på dioden uppnår till cirka 150 A. Mätmotståndet som mätbenen är kopplade till är på 68 Ω och strömmen före avslaget kan mätas till cirka $I_m = \frac{1,2}{68} \cdot 30000 \approx 530 A$. Påståendet i 6.3 stämmer således inte. Diodströmmen är inte lika stor som driftströmmen – vilket den borde vara.

En frågeställning som ställs är om dioden inte börjar leda tillräckligt snabbt nog. För att evaluera detta anslöts en signalgenerator {12} till dioden seriekopplad med ett 56 Ω motstånd. En fyrkantvåg på 1 kHz användes. Mätningarna visade att dioden var mer än tillräckligt snabb, och att denna faktor skulle påverka kunde därför uteslutas.

Förklaringar till varför inte diodströmmen är lika stor som lastströmmen är följande:

- Delar av strömmen kan flyta genom transistorerna eftersom de slår av relativt långsamt.
- Solenoiden – Startmotorn klarar normalt att bryta strömmen genom att slå ifrån dess relä. Inga frihjulsdioder finns utan det är ett mekaniskt relä som sköter avslaget. Detta relä har inte kunnat monteras bort och finns fortfarande med och börjar även det slå av och därmed störa strömmen.

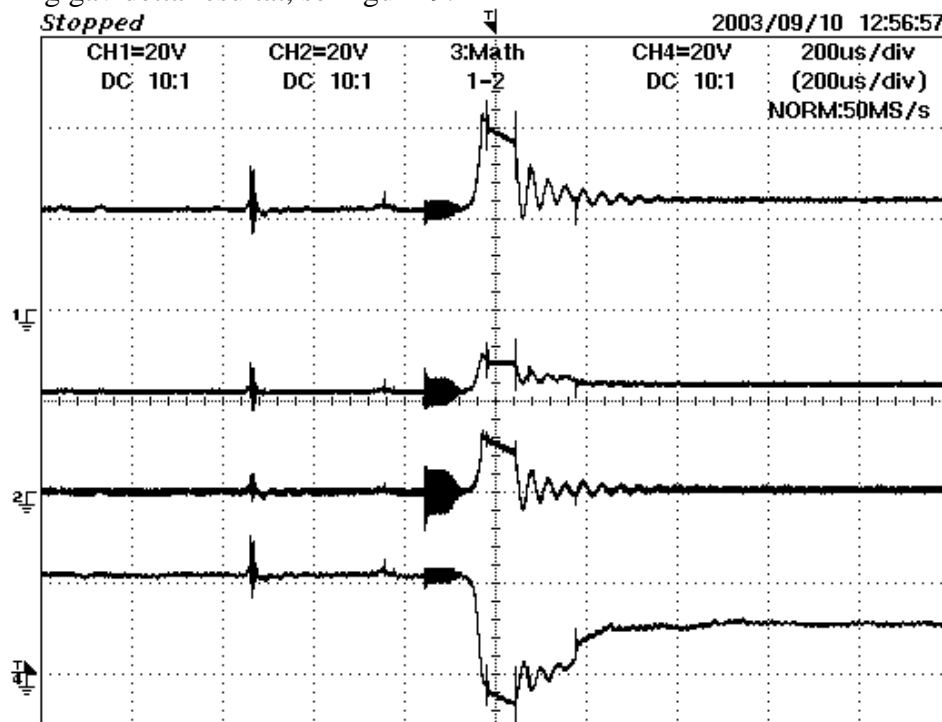
Kombinationer härutav följer. En del av strömmen tar vägen genom frihjulsdioden, en annan del går genom transistorn och sen finns även reläet som bryter och urladdar induktanserna i startmotor och kablar.

6.3.2. Dimensionering

Utifrån dessa mätningar kan frihjulsdioden dimensioneras. En diod som fanns att tillgå användes först för att mäta strömmarna och sedan använda resultaten för dimensionera bättre då den första var onödigt stor. Vid dimensionering av en frihjulsdiod är diodens maximala driftström inte relevant. Dioder tål ofta många gånger sin maximala driftström om det bara sker under korta perioder. I fallet med en frihjulsdiod är förloppen korta. I mätningen ovan är tiden cirka 500 μ s. De faktorer som är viktiga att titta på är I^2t samt att dioden enkelt ska kunna monteras. Strömmen mättes till cirka 150 A i toppvärde och varade i ungefär 500 μ s. Det ger en I^2t faktor på $I^2t = 100^2 \cdot 500 \mu\text{s} = 5 \text{ A}^2\text{s}$. Utifrån kriteriet att den skulle vara lätt att montera valdes sedan en diod 12F10 från IR [7]. Dioden klarar av 100 V kontinuerligt och en I^2t faktor på cirka 350. Det gör att vi klarar en diodström på över 800 A i 500 μ s eller en ström på 600 A i 1 ms, vilket i praktiska prover visat sig vara fullt tillräckligt. Anodanslutningen är en skruv och monteras i ett gängat hål i aluminiumen och katoden jordas så nära kondensatorn C_1 i Figur 27 som möjligt.

6.4. Spänningar

Spänningsnivåerna i systemet är även av intresse eftersom det är stora strömmar och allt kablage och anslutningar har induktanser. En första mätning gav detta resultat, se Figur 29.

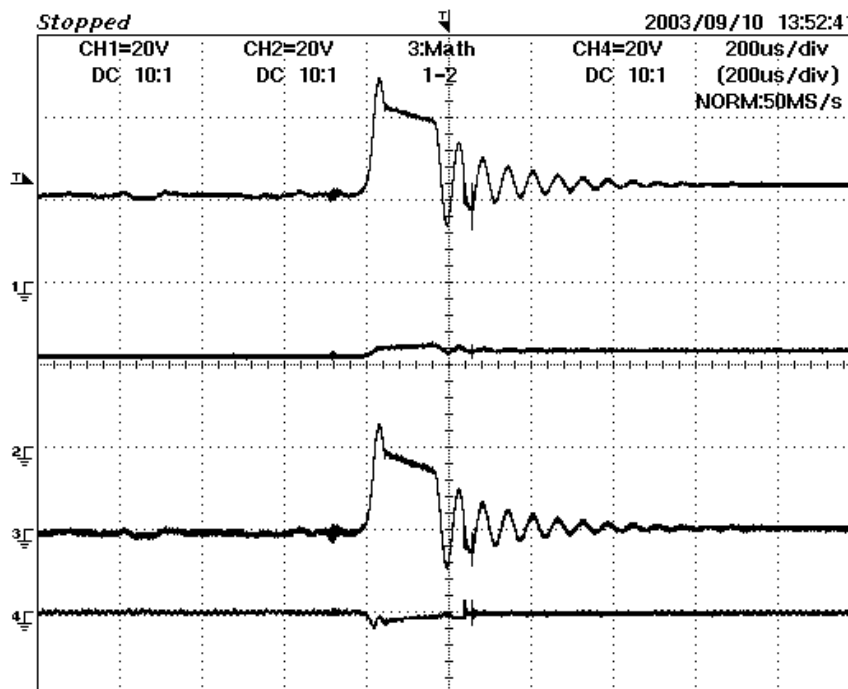


Figur 29 Spänningar vid fränslag av startmotorn

Tabell 11 Förklaringar till Figur 29

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|--------------------|
| 1 | Spänning, transistorringång, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |
| 2 | Batterispänning, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |
| 3 | Kanal 1 – Kanal 2 – spänningsfall i kablarna | 200 μ s / ruta |
| 4 | Spänning, Transistorutgång, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |

Spänningsspikar på upp mot 40 V förekommer på transistorringången för vid fränslag. Detta är viktigt att komma ihåg vid dimensionering av transistorerna. Transistorerna BTS555 tål att arbeta vid 34 V kontinuerligt och har överspänningsskydd vid 62 V. De existerande spänningsnivåerna borde inte vara skadliga för transistorn. För att vidare undersöka var dessa spänningstransienter uppstår anslöts en 3 meter lång, 25mm² kopparkabel i serie med ordinarie kablar på 70mm², resistansen och induktansen ökar. Den lilla kabeln lades i spolforn för att ytterligare öka induktansen. Försöket upprepadet och resultat återfinns i Figur 30.



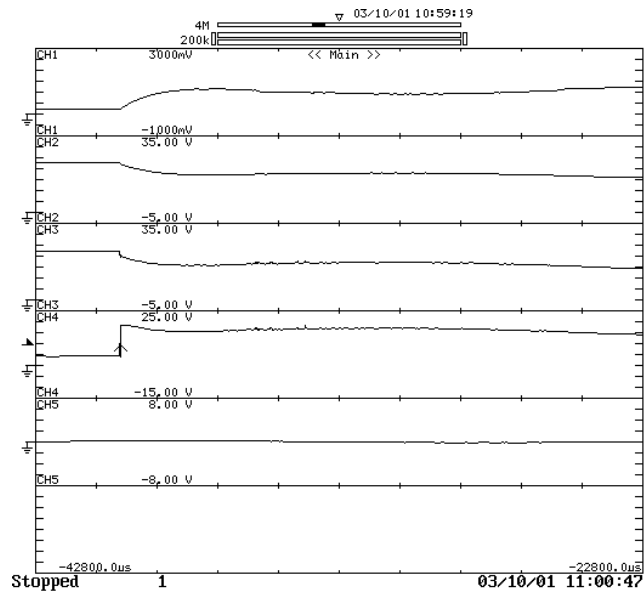
Figur 30 Spänningar vid fränslag av motorn med långa anslutningar

Tabell 12 Förklaringar till Figur 30

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|--------------------|
| 1 | Spänning, transistorringång, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |
| 2 | Batterispänning, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |
| 3 | Kanal 1 – Kanal 2 – spänningsfall i kablarna | 200 μ s / ruta |
| 4 | Spänning, motorutgång, 20 V / ruta | 200 μ s / ruta |

Nivån på spänningarna ändras inte med den ökande kabellängden men däremot ökar varaktigheterna av störningarna från 100 μ s till 200 μ s.

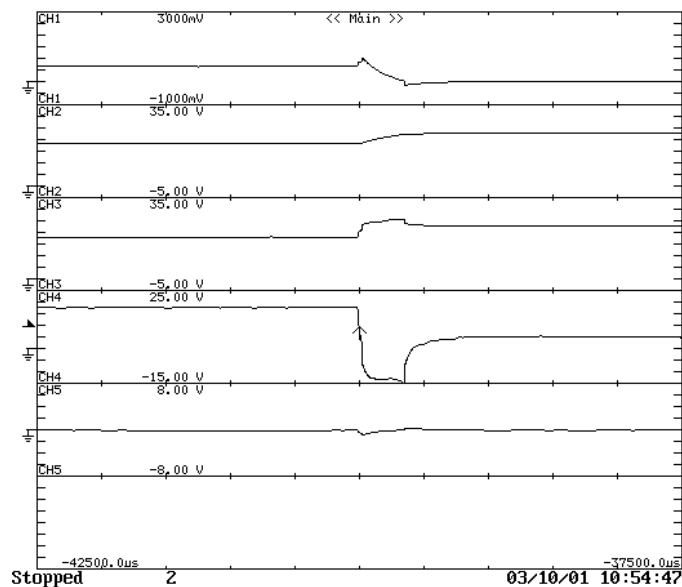
För att se hur mycket av spänningsvariationerna som orsakas av halvledarreläets konstruktion och egenskaper jämfördes till- och frånslag med och utan transistorer monterade.



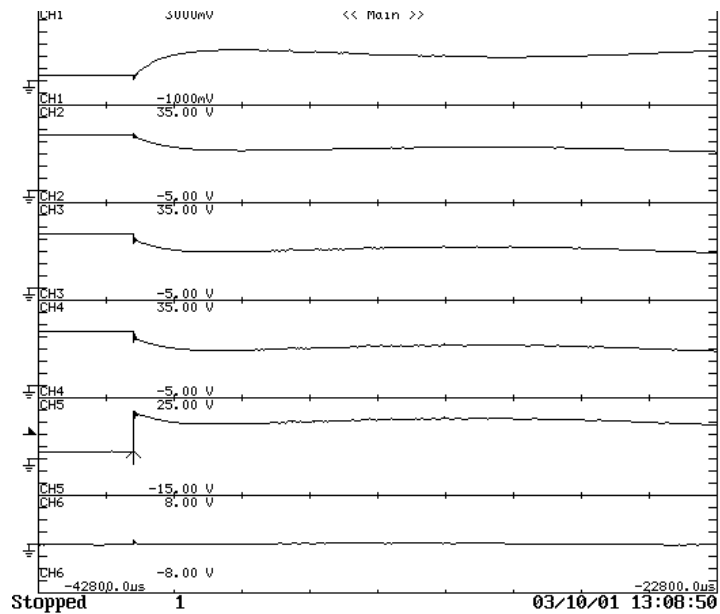
Figur 31 Tillslag av startmotor med konventionell utrustning

Tabell 13 Förklaringar till Figur 31 och Figur 32

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|-------------|
| 1 | Lastström med strömprob, 500 A / ruta | 2 ms / ruta |
| 2 | Batterispänning, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 3 | Matning vid solenoid, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 4 | Spänning mellan solenoid och motor, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 5 | Utgående anslutning vid motor, 2 V / ruta | 2 ms / ruta |



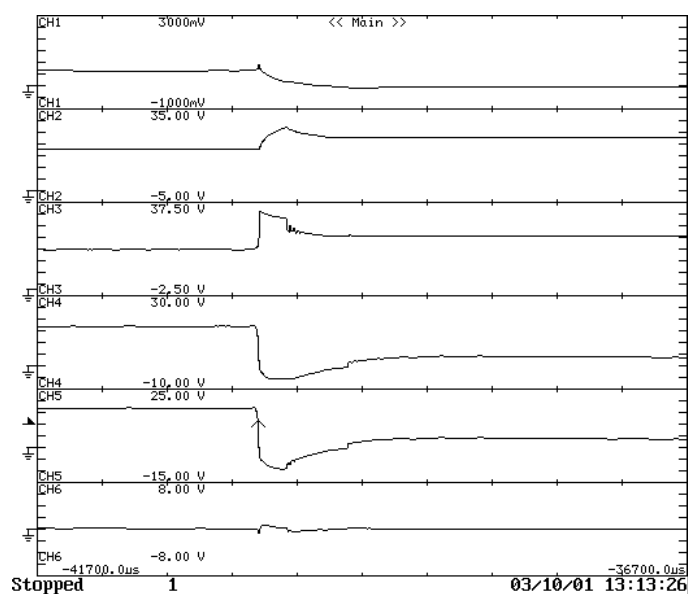
Figur 32 Frånslag av startmotor med konventionell utrustning, för förklaringar se Tabell 13



Figur 33 Tillslag av startmotor med transistorer

Tabell 14 Förklaringar till Figur 33 och Figur 34

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|---|-------------|
| 1 | Lastström med strömprob, 500 A / ruta | 2 ms / ruta |
| 2 | Batterispänning, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 3 | Matning till transistorer, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 4 | Spänning mellan transistorer och solenoid 5V / ruta | 2 ms / ruta |
| 5 | Anslutning mellan solenoid och motor, 5 V / ruta | 2 ms / ruta |
| 6 | Utgående anslutning från motor, 2V / ruta | 2 ms / ruta |



Figur 34 Frånslag av startmotor med transistorer, förklaringar se Tabell 14

6.5. Resultat

Resultaten av försöken har blivit att startmotorn kan köras med hjälp av transistorer och att de även klarar av frånslag. Vid frånslaget uppstår det en del spänningstransienter oberoende om transistorerna är inkopplade eller ej. Istället beror de på kablarnas resistans och induktans. Amplituden av transienterna är dock inte skadliga för transistorerna.

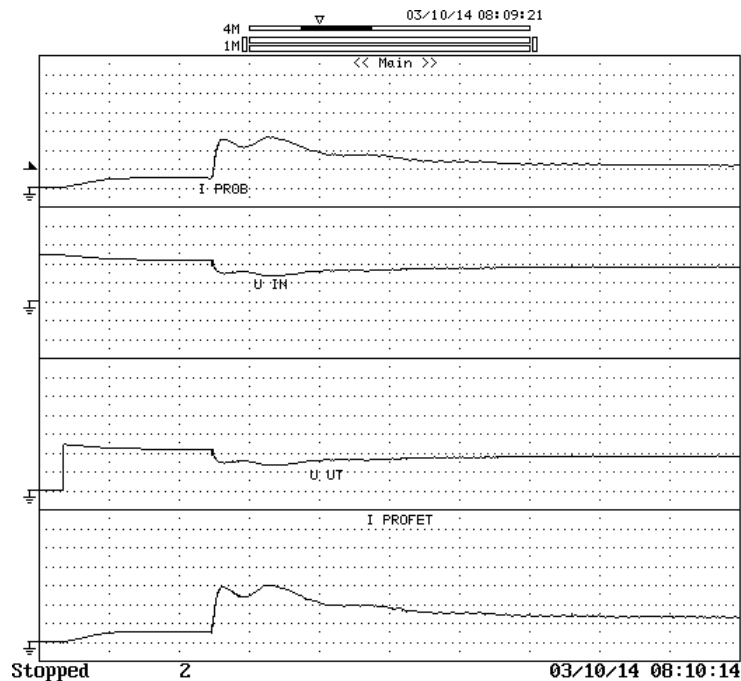
7. Avslutande prover

7.1. Start av lastbil

Provbilen som användes har en 16 liters, 610 Hks motor och således en av de största motorerna i sortimentet. De enda kopplingar som gjordes i lastbilen var att koppla in transistorerna mellan batteriet och startmotorn. Nyckeln behövdes således fortfarande vridas till läge start för att startmotorns reläer skulle slå till. Metoden valdes för att inte behöva göra modifikationer i lastbilen som skulle kunna påverka driften efter provena.

7.1.1. Start av kall motor

På morgonen utfördes starter av kall motor. Lastbilsstarten genomfördes vid en yttre temperatur av ca 3°C [8]. Resultatet av mätningen visas i Figur 35.



Figur 35 Start av lastbil

Tabell 15 Förklaringar till Figur 35

| Kanal: | Mäter: | Tidssteg: |
|--------|--|--------------|
| 1 | Startström enligt strömtång, 500 A / ruta | 20 ms / ruta |
| 2 | Spänning transistoringång, 10 V / ruta | 20 ms / ruta |
| 3 | Spänning transistorutgång, 10 V / ruta | 20 ms / ruta |
| 4 | Startström enligt transistor, 440 A / ruta | 20 ms / ruta |

Transistorerna blev inte kännbart uppvärmda, och inga transistorrelaterade problem inträffade. Vid start av aningen varmare motor, uppskattningsvis 10-15°C, drog startmotorn inte mer än cirka 150 A.

En önskad effekt var att laddströmmen från generatoren flöt genom transistorernas backriktning för att ladda batteriet. Förslag för att återgå detta är

att dra en separat kabel till generatorm. Det ger även fördelar för generatorm eftersom den kan kontrolleras för sig utan att påverkas av startmotorm.

Vill man trots det använda sig av samma kabel får strömmen ledas genom transistorerna inbyggda diod eller en separat diod, monterad antiparallellt med transistorerna. Givaren för batterispänningen till generatorm får flyttas till batteriet så att generatorm genererar tillräckligt hög spänning. Spänningsfall över dioderna bör hållas så lågt som möjligt. Laddströmmen är cirka 80 A vid 24 V. Används transistorernas dioder bör man ta hänsyn till att kylningen av transistorerna måste förbättras eftersom förutsättningarna ändrats.

7.2. Miljöprover

Innan en produkt börjar användas i serieproduktion, måste den genomgå ett antal miljöprover. Dessa prover omfattar främst prover på värme- och vibrationstålighet. Då detta examensarbete inte handlar om att ta fram en färdig produkt, är sådana prover inte relevanta att göra. I produktion kommer antagligen mycket av skyddskretsarna ersättas av en processor, och all montering kommer att ske på mönsterkort.

7.3. Matningsspänningsprov

Vid bortfall eller spikar i matningsspänningen, måste kretsarna bete sig förutsägbart och inte ta skada. Vid spänningsbortfall från styrkretsen ska transistorerna bryta, eftersom stora skador annars kan uppstå på till exempel startmotorm. Det ska ej heller finnas möjlighet för styrkretsen att få transistorerna att operera i deras linjära område, eftersom det kan skada dem vid höga laster. För att skydda dem mot att arbeta i det linjära området har ett underspänningsskydd implementerats.

8. Alternativ lösning

Ett alternativ till att använda enbart transistorer av modellen BTS555, vore att kombinera ett antal diskreta transistorer med en BTS555. Materialkostnaden kan minskas men fortfarande kan strömmen mätas. Att bara mäta en delström kommer att ge ökade mätosäkerheter, eftersom komponenternas $R_{DS(on)}$ blir en viktig parameter för hur strömmen ska beräknas. Frånslaget till de diskreta komponenterna måste fördröjas lämplig tid eftersom BTS555 är långsammare. Så långsam att den riskerar skadas om den ensam tvingas leda stor ström vid frånslag.

Ett bra val av diskret transistor är IRF1404 [9], eftersom den har relativt lågt $R_{DS(on)}$, tål hög ström, och har ett lågt pris. Om en diskret NMOS-transistor används måste den ha en passande drivkrets. Drivkretsen behövs för att kunna bryta matningen till lasten och då måste spänningen på gaten vara högre än spänningen på drain för att transistorn ska slå ifrån helt. Det finns färdiga drivkretsar att köpa, en av dem är IR2125 [10]. IR2125 har till skillnad från många andra drivkretsar en minsta matningsspänning som tillåter att tidigare konstruerade 5 V-system används.

Följande beräkningar kan göras för att få en uppfattning om antalet transistorer.

Typiskt värde på $R_{DS(on)}$ är för BTS555 - 2.4 m Ω och för IRF1404 – 4 m Ω . Eftersom BTS555 har lägre resistans vill det gå en större ström genom den. Det kan förhindras antingen genom att parallellkoppla flera IRF1404 eller montera en lågohmig resistor i serie med BTS555an. Lösningen med resistor valdes bort eftersom det ger svårare montering samt att i en tillämpning där spänningsfallet ska vara så lågt som möjligt känns det fel att montera resistorer. Toleranserna för strömmätningen blir ytterligare sämre än tidigare eftersom även strömdelningen och $R_{DS(on)}$ påverkar.

Tabell 16 visar hur många IRF1404 som behövs vid ett visst antal BTS555or. Kostanden som visas är inklusive drivkretsen och baseras på uppgifterna ur Tabell 18. Kostanden för 10 stycken BTS555or är 288 kronor.

Tabell 16 Antal IRF1404 som behövs vid ett visst antal BTS555

| Antal BTSer | Antal IRFer | Kostnad |
|-------------|-------------|---------|
| 1 | 16 | 187,9 |
| 2 | 14 | 198,1 |
| 3 | 13 | 217,2 |
| 4 | 11 | 227,4 |
| 5 | 9 | 237,6 |
| 6 | 8 | 256,7 |
| 7 | 6 | 266,9 |
| 8 | 4 | 277,1 |
| 9 | 3 | 296,2 |

Lösningen med en BTS555 blir billigast. Det krävs i så fall 16 stycken IRF1404 och kostnaden blir cirka 188 kronor, alltså 65 % av det ursprungliga priset.

Ett annat alternativ är att montera en BTS555 och sedan räkna hur många diskreta transistorer av okänd typ det behövs vid bestämda $R_{DS(on)}$. Den diskreta transistorens strömtålighet måste också beräknas. Kolumnen maximalt pris anger hur mycket transistoren får kosta per styck för att kosta lika mycket som lösningen med bara BTS555or.

Tabell 17 Okänd modell av diskret transistor

| $R_{DS(on)}$ m Ω | I | Antal | Maximalt pris |
|-------------------------|-----|-------|---------------|
| 1 | 267 | 4 | 58 |
| 2 | 133 | 8 | 29 |
| 3 | 89 | 12 | 20 |
| 4 | 67 | 16 | 15 |
| 5 | 53 | 20 | 12 |
| 6 | 45 | 24 | 10 |
| 7 | 38 | 28 | 90 |
| 8 | 33 | 32 | 7 |
| 9 | 30 | 36 | 7 |
| 10 | 27 | 40 | 6 |

Vid 4 m Ω återfinns lösningen för IRF1404. Ur Tabell 1 är SPB80N06S2L-07 ett tänkbart alternativ ur tekniskt perspektiv. Eftersom det skulle kosta mer att använda SPB80N06S2L-07 än att använda IRF1404, finns det ingen anledning att undersöka den vidare.

Ytterligare ett alternativ är att enbart använda diskreta transistorer, av till exempel modellen IRF1404. Det skulle ge en kostnad på $89 + 17,5 = 106,5$ att jämföra med för BTS555 på 288 kronor. Nackdelen är att ingen strömmätning görs och alltså finns inga skydd för kortslutningar, överström eller underström.

8.1. Slutsatser

Materialkostnaden skulle minska relativt lite om man använde IRF1404 istället för BTS555, samtidigt som kostnaden för bearbetning av kylfläns och montering av transistorer skulle öka på grund av att det totala antalet transistorer ökar. Exakt hur mycket kostnaden minskar är därför svårt att avgöra, men sannolikt kommer den inte sjunka under 70 % av kostnaden vid användande av enbart BTS555. Värdet av de i BTS555 inbyggda skydden behöver med andra ord inte betraktas som särskilt högt för att kunna försvära dess högre pris i jämförelse med diskreta transistorer.

9. Ekonomi och kostnader

9.1. Huvudsakliga materialkostnader

Effekttransistorerna utgör en stor del av den totala materialkostnaden. Det är också viktigt att dimensionerna på kylflänsen hålls så små som möjligt, och att dess utformning ger så lite bearbetningsspill som möjligt. Genom att använda sig av en konstruktion bestående av släta aluminiumstycken som enbart bearbetats minimalt för transistorinfästningarna, kan ett sådant resultat uppnås. Förhållandet mellan antal transistorer och kylflänsens storlek bör beaktas, eftersom ett ökat antal transistorer tillåter en minskad kylfläns. Flera parallella transistorer minskar resistansen vilket leder till en minskad värmeutveckling och därför kan kylflänsen minskas. Detta förhållande kan naturligtvis inte betraktas enbart ur ekonomisk synvinkel, utan hänsyn måste även tas till pålitlighet, utrymmesbehov och värmeutveckling. Till applikationen har vi valt 12 transistorer och en kylfläns enligt Bilaga 4.

Tabell 18 visar priser från Arrow [11] på effekttransistorer samt drivkrets.

Tabell 18 Kostnader för komponenter

| Produkt | Pris | Vid köp av |
|-----------------------------------|-------|------------|
| BTS555, strömmätande | 28 | 500 000 |
| IRF1404, diskret n-mos transistor | 8,90 | 500 000 |
| IR2125, drivkrets | 17,50 | 50 000 |

9.2. Tillverkningskostnader

Kostnaderna för mekanisk bearbetning beror främst på kylflänsens utförande. Hålls denna enkel, kommer kostnaden för mekanisk bearbetning att hållas låg. Kostnaden för etsning av mönsterkort är så gott som oberoende av hur huvudkretsarna utformas. Det som främst påverkar är hur stor plats man har att disponera, eftersom ett kompakt mönsterkort ofta kräver en flerlagars teknik, vilket kostar mera.

Monteringskostnaderna beror till stor del på vilken utrustning som redan finns i den befintliga produktionen. Det är möjligt att använda ytmonterade komponenter till fullo, men i praktiken kan fallet bli annorlunda. Elektrolytkondensatorer är till exempel svåra att ytmontera och bör eventuellt bytas ut mot hålmonterade. Ska man hålmontera ett mycket litet antal komponenter kan det vara aktuellt att montera dem helt för hand, medan en mer krävande ytmontering i kombination med våglödning troligen blir lösningen om man har flera hålmonterade komponenter ihop med ytmonterade.

9.3. Totalkostnad

Det är svårt att avgöra exakt hur mycket en prototyp kommer att kosta, eftersom det delvis beror på kostnad för mönsterkort och montering. Istället för att utföra en fullständig analys av kostnaden, antas det att priset för kringkomponenter vid köp av 1000 enheter motsvarar priset för kringkomponenter, mönsterkort och montering vid köp av 50 000 enheter. Tabell 19 visar kostnaden för de olika delarna. Prisuppgifter för aluminium kommer

från Metallvaruhuset. Viktigt att notera är att metallpriser varierar och detta är dagspriset när uppgiften hämtades [12].

Tabell 19 Priser vid köp av 50 000 enheter

| Produkt | Pris³ |
|----------------------------|-------------------------|
| Kringkomponenter, mm | 30 |
| BTS555 | 336 |
| Aluminium, kylblock | 15 |
| Aluminium, motoranslutning | 2 |
| Summa | 383 |

Kylflänsen ska dock bearbetas och borras med ett antal hål, transistorerna ska monteras på kylfläns, styrben lödas på kretskort och utgående ben klämmas fast mot utgående fläns. En rimlig uppskattning är att det tar cirka en timme att göra det, ifall kretskortet är etsat och klart, vilket är inräknat i kostnaden för kringkomponenter. Det är inte räknat med några avancerade maskiner och kostnaden för en timme är svår att uppskatta huruvida det ska betraktas som Volvo internt eller rena kostnaden för tiden. Därför anges istället en timme.

Sammanfattningsvis kan alltså sägas att en startmotorstyrning kostar knappt 400 kronor i material och ungefär en timmes tid i montering.

³ Vid köp av ett antal motsvarande 50 000 enheter/år

10. Diskussioner och slutsatser

10.1. *Diskussion*

10.1.1. Startmotor

Skydden som implementerats är för startmotorn och för med sig en del nackdelar som bör invägas i beslutet för hur en färdig produkt ska konstrueras. I och med att startström och tid begränsas, försvinner troligtvis möjligheten att kunna krankköra. Skydden har implementerats för att skydda transistorer och startmotor vid normala förlopp och det är därför viktigt att vara medveten om att möjlighet till start med växel i kan försvinna. Ytterligare en nackdel med användandet av halvledare istället för konventionella reläer är erfarenhet och utprovning. Konventionella reläer är väl utprovade och lider inte av barnsjukdomar längre. Halvledarreläer för stora strömmar är inte lika väl beprövade och kompetensen inom området är mindre.

10.1.2. Övriga laster

Reläer till andra tunga laster, till exempel förvärmaren, kan däremot bytas ut i sin helhet. Eftersom även säkring och säkringshållare ersätts av halvledarreläet, blir den ekonomiska merkostnaden mindre. I jämförelse med konventionella reläer är halvledarreläer till sådana applikationer ett alternativ som är värt att undersökas vidare ekonomiskt sett.

10.2. *Slutsatser*

Att byta ut konventionella reläer mot halvledarreläer har ett antal fördelar. En större möjlighet till övervakning och reläer kombineras med säkringar. Att använda ett halvledarrelä som huvudrelä till startmotorn eliminerar däremot inte behovet av en solenoid som slår till drevet. Att byta huvudreläet på startmotorn skulle därför innebära en ganska stor merkostnad, som kan vara svår att försvara ekonomiskt. Att införa halvledarrelä som huvudrelä till startmotorn måste troligen motiveras med ökade krav på diagnos och skydd för att bli aktuellt med dagens teknik och prisbild. För övriga kraftapplikationer i lastbilar kan halvledarreläer betraktas som ett potentiellt konkurrenskraftigt alternativ till konventionella reläer.

11. Fortsatt arbete

Strömmätningen som gjorts med BTS555 är inte alltid korrekt, till exempel vid frånslag, vilket syns i Figur 28. Detta påverkar inte styrkretsarna i denna applikation, men vid analyseringsarbete av kurvformer bör strömmätningen undersökas noggrannare. Genom att analysera utseendet på strömmen kan man avgöra vilken typ av fel som sannolikt har uppkommit eller kommer att uppkomma. Man kan till exempel avgöra om kuggarna på drevet är intakta eller ej. Vid analys av kurvformen kan det vara av intresse att korrigera för strömmätningens olinjäriteter vilket inte gjorts i detta arbete eftersom det endast är väl bestämda punkter som är relevanta.

Om man skall uppnå god precision bör man implementera korrigering för temperatur och vilken ström som går – för att bättre uppskatta strömomsättningen. Det innebär en ökande merkostnad och har inte varit försvarbart eftersom strömmätningen bara har en skyddande funktion.

Konstruktionen på styrkretsarna är lösta med hjälp av hårdvara. Detta har både för och nackdelar. En fördel är att inga buggar i ”programmet” finns och nackdelarna är att komponenter tar plats, åldras och har svårare att kommunicera med andra delar i systemet. Uppgiften lämpar sig bra för att implementeras med hjälp av en mikroprocessor. Vilket troligtvis är en bra lösning om kurvformer ska analyseras.

12. Referenser

- [1] Teknisk rapportering för teknologer, Gerd Eng och Ingemar Johansson, Chalmers, Göteborg
- [2] Results from winter test, engineering Report, Anders Gustavsson, 2001-04-17, ER-217328
- [3] Farnell, Datasheet BTS555,
<http://www.farnell.com/datasheets/33632.pdf>, 2003-06-13.
- [4] Physics Handbook, Carl Nordling, Jonny Österman, studentlitteratur, 1996, 5e upplagan, ISBN: 91-44-16575-7
- [5] Elfa, Produktinformation LM339N LM339M LM2901M LM2901N,
<http://www.elfa.se/pdf/73/730/07301500.pdf>, 2002-06-18.
- [6] Elfa, Produktinformation SA555N NE555D NA555N SA555D,
<http://www.elfa.se/pdf/73/730/07304116.pdf>, 2002-06-07.
- [7] Elfa, produktinformation, diod 12F10
<http://www.elfa.se/pdf/70/070/07014558.pdf>
- [8] Säve Flygplats, ESGP, MET-reports tisdagen den 14:e oktober 2003, via Svenska Ballong Federationen, <http://www.ballong.org>
- [9] Farnell, Datasheet IRF1404,
<http://www.farnell.com/datasheets/34020.pdf>, 2003-11-05.
- [10] Farnell, Datasheet IR2125,
<http://www.farnell.com/datasheets/13017.pdf>, 2003-11-05
- [11] Arrow Electronics, Janne Tägt 08-56265640, 2003-11-10
- [12] Metallvaruhuset, Göteborg, 031-742 10 70, 2003-11-12

13. Instrumentreferenser

- {1} Tångampereprob, Fluke, TAM0007
- {2} Strömshunt, 200 A, nr: VLAB 26342,A3 CSS60165
- {3} Oscilloskop, Fluke, Avd 26323, KOS60468
- {4} Last, DIGATRON Model no: BTR 1500/100-15/36, Serial no: 0281196, VLAB 26342,A3 PRA60422
- {5} Oscilloskop, Textronix THS 720A
- {6} Oscilloskop, Textronix THS 720A
- {7} Oscilloskop, Yokogawa 708E, KOS00405
- {8} Tångampereprob, Fluke, Avd 26323, TAM60467
- {9} LEM LT 500-S
- {10} LEM LT 505-S
- {11} Strömshunt, 100mV / 1000 A
- {12} Signalgenerator, Thurlby Thandar Instruments, TG 1010, AVD 26793,A3 TGF00012

13.1. *Instrument som används men ej refererat till*

- {13} Oscilloskop, Fluke, AVD 26390,A3
- {14} Nätaggregat, Powerbox 3 000, VLAB 26342,A3 LAG60101
- {15} Nätaggregat, Power Ten inc. Model no: 163D-30220, Serial no: 1006078
- {16} Oscilloskop, Yokogawa, Avd 26793, A3
- {17} Testofon 3000

Tabell 1 Specifikationer startmotor

| | |
|-------------------------------|--------------------|
| Maximal krankström | 1150 A |
| Maximal initialström | 2000 A |
| Max tid för initialström | 10 ms |
| Maximal kranktid | 10 s |
| Lägsta startström | 600 A ¹ |
| Minsta tid mellan startförsök | 2.5 min |
| Resistans startmotor D12 | 5.69mΩ |
| Induktans startmotor D12 | 17.9μH |
| Resistans startmotor D16 | 3.5mΩ |
| Induktans startmotor D16 | 16.4μH |

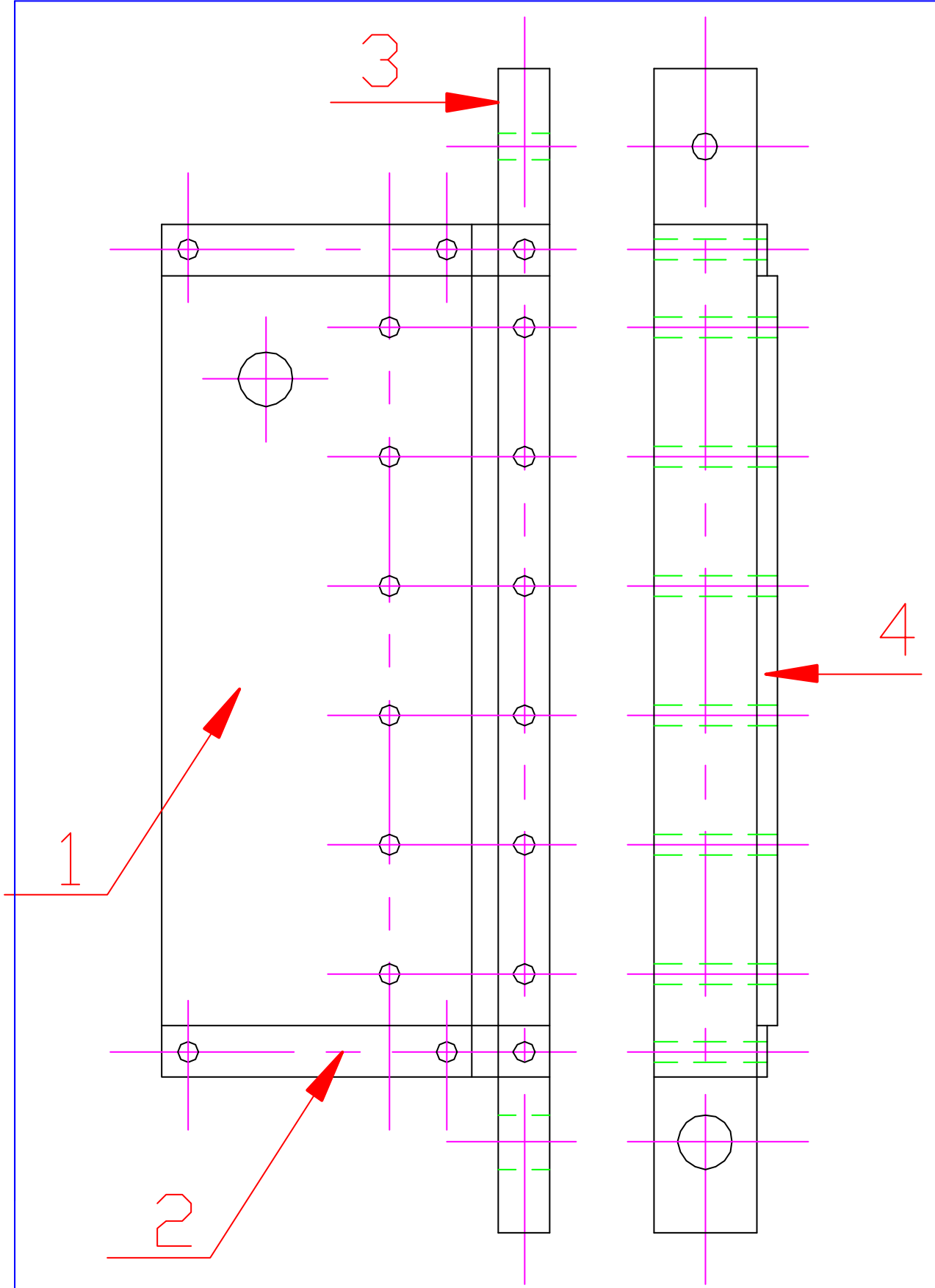
Tabell 2 Specifikationer övriga laster.

| Last | Strömspik [A] | | | Kontinuerlig ström [A] | | |
|----------------|---------------|-------|-------------|------------------------|------|-------------------------|
| | Nom | Max.. | Anm. | Nom. | Max. | Anm. |
| Hytt | 100 | 200 | Max 2 min | 10 | 50 | Min 5 A |
| Fronten, LCM | 30 | 125 | Max 1s | 5 | 25 | |
| Chassi, bakdel | 40 | 125 | Max 1s | 5 | 25 | |
| 12 V uttag | | 40 | Max 5 min | 5 | 20 | |
| Påbyggare | | 220 | | | 200 | 15 s till, 15 s från |
| Förvärmare | | 225 | Max 2x1 min | 150 | 170 | icke upprepande |

Tabell 3 Miljöspecifikationer

| | |
|--------------------|------|
| Min. temperatur °C | - 40 |
| Max. temperatur °C | 85 |
| Vibrationer | 4G |

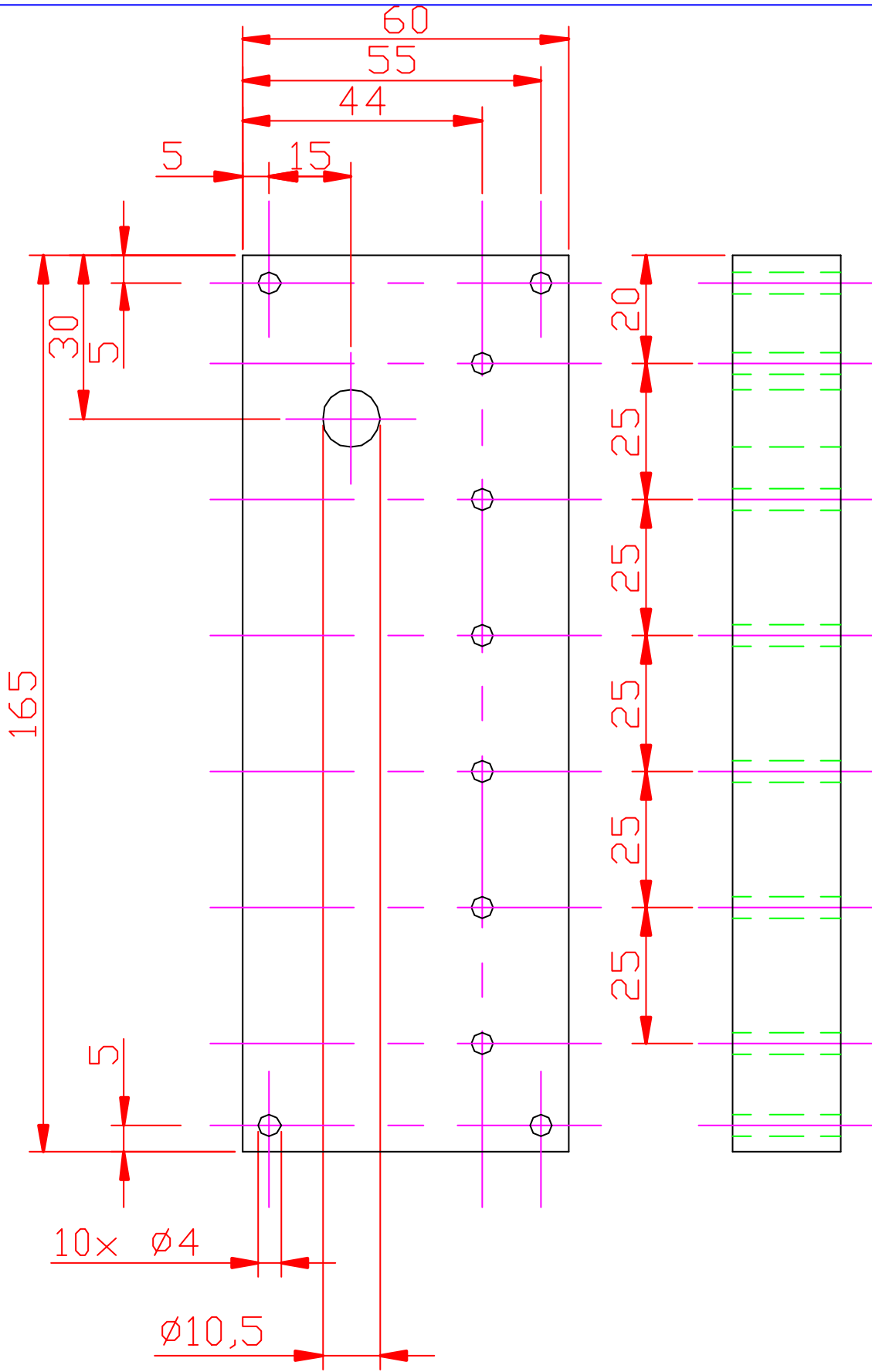
¹ Gissat värde, som visade sig inte stämma



| | | | | | | | |
|---|-----------|------------|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | |
| 1 | Kylfläns | Bilaga 3:1 | | | | | |
| 2 | Isolering | Bilaga 3:2 | | | | | |
| 3 | ut. ansl. | Bilaga 3:3 | | | | | |
| 4 | Klämma | Bilaga 3:4 | | | | | |

översikt kylfläns

Bilaga 3

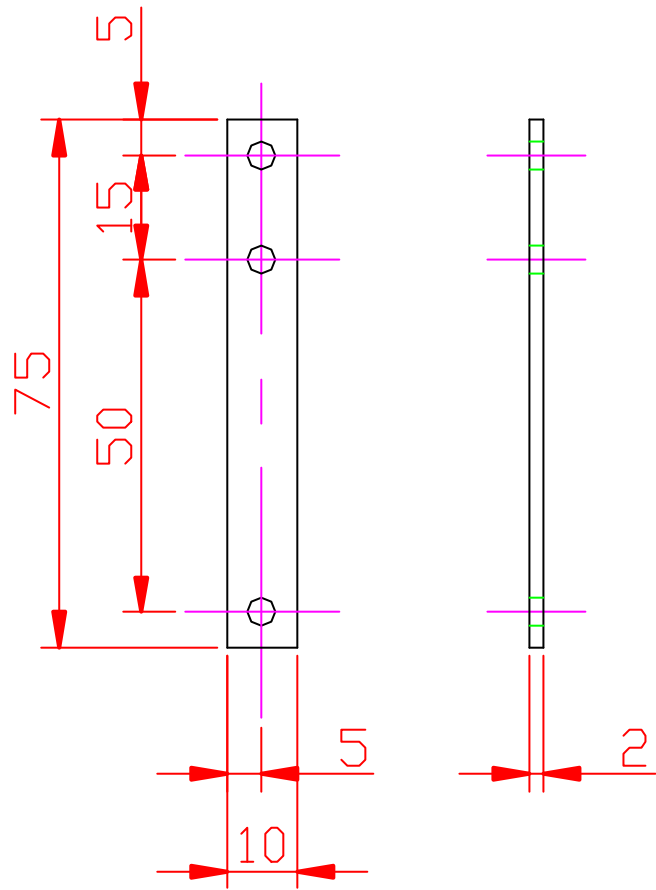


| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Transistorfäste, Kylfläns

Material:
Aluminium 14-12

BILAGA3:1

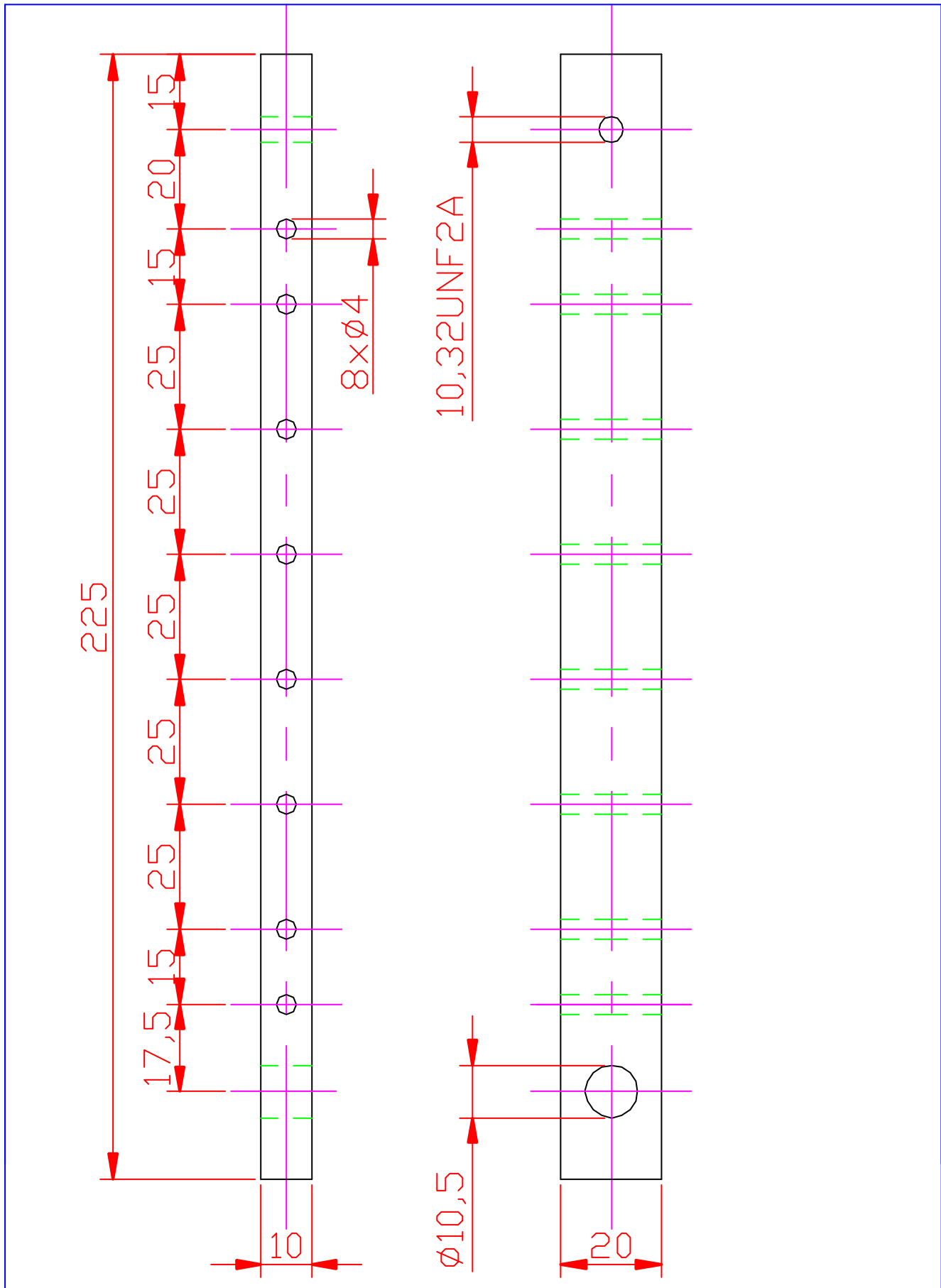


| | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

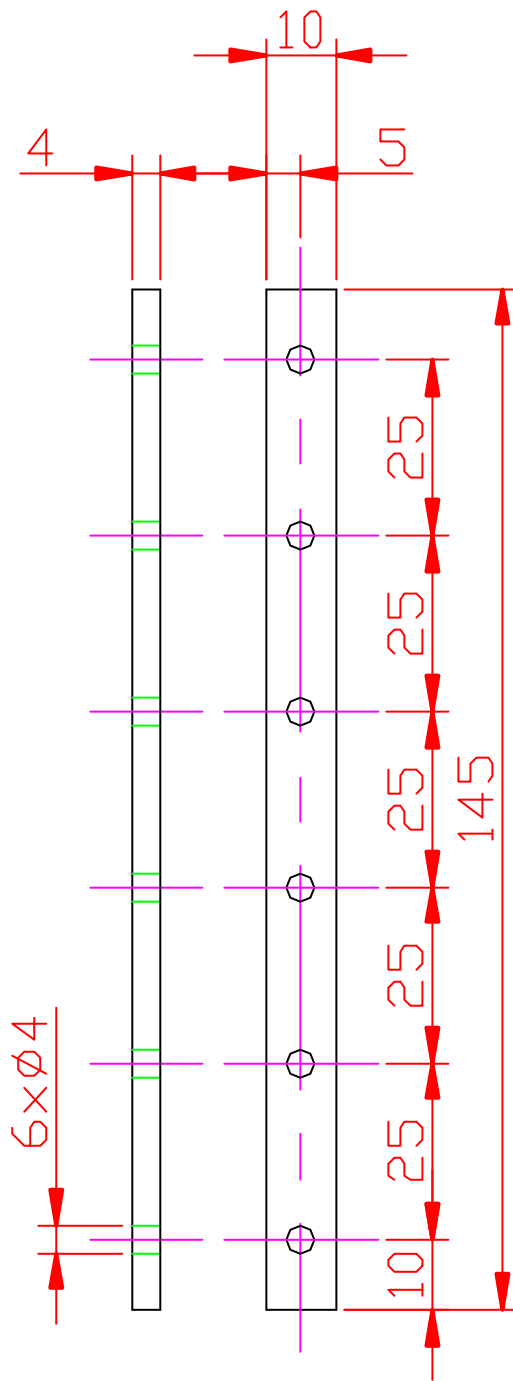
Isolerade fästen

Material:
Armerat kretskort
2 st

BILAGA3:2



| | | | | | |
|------------------------------|--|--|--------------------------|--|--|
| | | | Anslutning transistorben | | |
| | | | BILAGA 3:3 | | |
| Materiali Aluminium 14-12 | | | | | |



| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

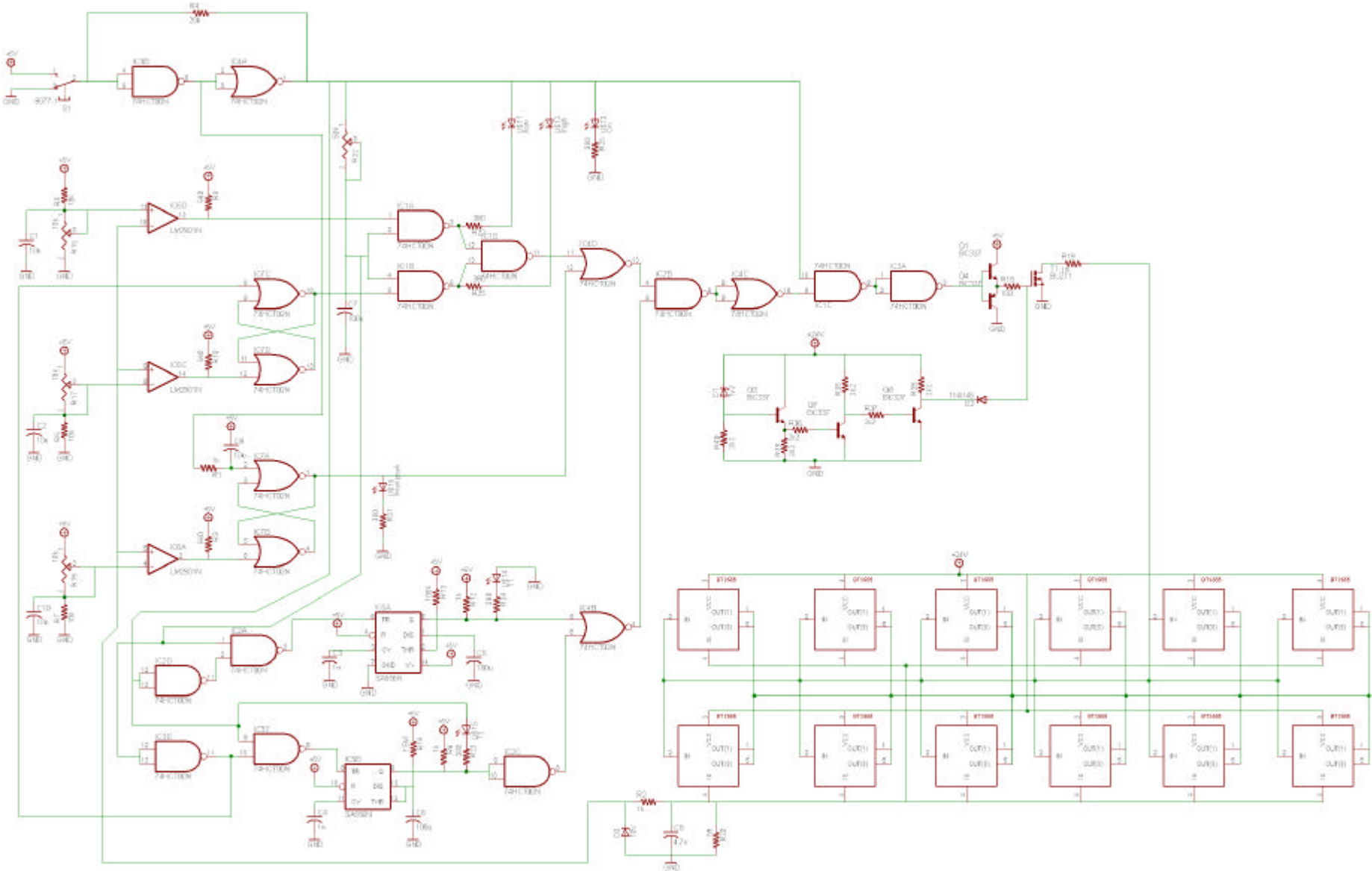
Klämmor till transistorben

Materiali
Aluminium 14-12
2 st

BILAGA3:4

| |
|--|
| |
| |

Kretsschema startmotorstyrning



Komponentlista till förvärmstyrning

| Komponent | Värde |
|-----------|----------|
| C1 | 4,7n |
| C2 | 10u |
| C3 | 4,7n |
| IC1 | LM2901N |
| IC2 | 74HCT02N |
| IC3 | MCT6 |
| R1 | 10k |
| R2 | 680 |
| R3 | 390 |
| R4 | 390 |
| R5 | 3,3k |
| R6 | 680 |
| R7 | 390 |
| R8 | 1k |
| R9 | 680 |
| R10 | 1,5k |
| R14 | 1k |
| U\$1 | BTS555 |
| U\$2 | BTS555 |
| U\$3 | LED 5 mm |
| U\$4 | LED 5 mm |

Komponentlista till Startmotorstyrning

| Komponent | Värde | Komponent | Värde |
|-----------|-------------|-----------|-----------|
| C1 | 10u | R15 | 100 |
| C2 | 10u | R16 | 10k |
| C3 | 1n | R17 | 10k |
| C4 | 1n | R18 | 10k |
| C5 | 100u | R19 | 10 |
| C6 | 100u | R20 | 68 |
| C7 | 100u | R22 | 390 |
| C8 | 4,7n | R23 | 390 |
| C9 | 10u | R24 | 390 |
| C10 | 10u | R25 | 390 |
| D1 | 7,2 V Zener | R26 | 390 |
| D2 | 1N4148 | R31 | 390 |
| D3 | 10 V Zener | R32 | 50k |
| IC1 | 74HCT00N | R36 | 2,2k |
| IC2 | 74HCT00N | R37 | 2,2k |
| IC3 | 74HCT00N | R38 | 2,2k |
| IC4 | 74HCT02N | R39 | 2,2k |
| IC5 | SA556N | R40 | 2,2k |
| IC6 | LM2901N | S1 | Switch |
| IC7 | 74HCT02N | T1 | BUZ11 |
| Q1 | BC337 | U\$1 | BTS555 |
| Q3 | BC337 | U\$2 | BTS555 |
| Q4 | BC337 | U\$3 | BTS555 |
| Q7 | BC337 | U\$4 | BTS555 |
| Q8 | BC337 | U\$5 | BTS555 |
| R1 | 1k | U\$6 | BTS555 |
| R2 | 1k | U\$7 | BTS555 |
| R3 | 680 | U\$8 | BTS555 |
| R4 | 20k | U\$9 | BTS555 |
| R5 | 10k | U\$10 | BTS555 |
| R6 | 10k | U\$11 | LED, 5 mm |
| R7 | 10k | U\$12 | LED, 5 mm |
| R8 | 1k | U\$13 | LED, 5 mm |
| R9 | 680 | U\$14 | LED, 5 mm |
| R10 | 680 | U\$15 | LED, 5 mm |
| R12 | 1k | U\$16 | LED, 5 mm |
| R13 | 100k | U\$17 | BTS555 |
| R14 | 1,5M | U\$18 | BTS555 |