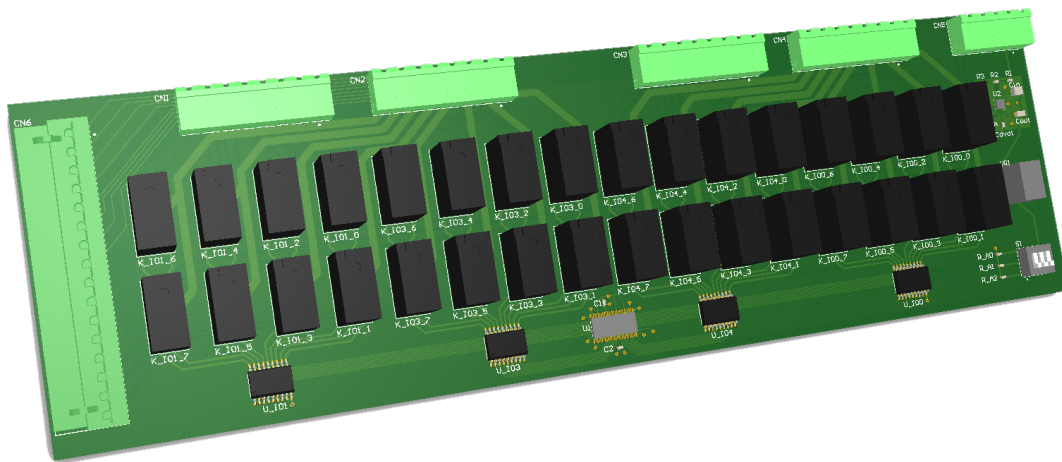




Design av prototyp för simulering av elfel i HIL-rigg

Framtagning av testenheter för injicering av elektriska fel

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroingenjör

MATTIAS LARSSON

EXAMENSARBETE 2019

Design av prototyp för simulering av elfel i HIL-rigg

Framtagning av testenheter för injicering av elektriska fel

MATTIAS LARSSON



CHALMERS

Institutionen för Elektroteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2019

Design av prototyp för simulering av elfel i HIL-rigg
Framtagning av testenhets för injicering av elektriska fel
MATTIAS LARSSON

© MATTIAS LARSSON, 2019.

Handledare: Magnus Lilliehöök, Imran Yousaf, Volvo Penta AB
Examinator: Tomas McKelvey, Institutionen för Elektroteknik

Examensarbete 2019
Institutionen för Elektroteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Förstasida: 3D-modell av det färdiga kretskortet.

Typeset in L^AT_EX
Göteborg, Sverige 2019

Design av prototyp för
simulering av elfel i HIL-rigg
Framtagning av testenheter för injicering av elektriska fel
MATTIAS LARSSON
Institutionen för Elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

En viktig del av utvecklingsarbeten är noggrann testning. Vid utveckling av ny programvara till styrenheter för båtmotorer, använder företaget Volvo Penta AB (i fortsättningen Volvo Penta) en testutrustning kallad Automated Breakout Box (ABOB). Utrustningen kan användas för att undersöka hur styrenheten reagerar vid fall av kabelbrott eller kortslutning på de kablar som den använder vid informationssamling och styrning. På senare tid har Volvo Penta haft problem med att simuleringen av kabelbrott inte har varit helt tillförlitlig, vilket har lett till ett beslut att den nuvarande ABOB:en ska bytas ut. Under projektet har en ny design tagits fram för att lösa problemet och en prototyp har tillverkats. Styrningen av enheten sker via en dator och denna funktion är verifierad att fungera. Prototypen är inte testad i den miljö som den är tänkt att användas i.

Nyckelord: kretskort, prototyp, injicering av elektriska fel.

Design of prototype for
simulation of electric faults in HIL-rig
Development of test device for the injection of electrical faults
MATTIAS LARSSON
Department of Electrical Engineering
Chalmers University of Technology

Abstract

An important part of development work is careful testing. In the development of new software for control units for boat engines, the company Volvo Penta AB (henceforth Volvo Penta) uses a test equipment called Automated Breakout Box (ABOB). This equipment can be used to investigate how the control unit reacts in the event of an open- or short circuit on the cables it uses during information collection and control. Recently, Volvo Penta has experienced problems with that the open circuit simulation hasn't been completely reliable, which has led to a decision that the current ABOB should be replaced. During the project, a new design has been developed to solve the problem and a prototype has been manufactured. The unit is controlled via a computer and this function is verified to work. The prototype has not been tested in the environment it is intended to be used in.

Keywords: Circuit boards, prototype, injection of electrical faults.

Förord

Denna rapport ingår som en del av det examensarbete som utförs på programmet Elektroteknik högskoleingenjör vid Chalmers tekniska högskola. Arbetet motsvarar 15 högskolepoäng av de totalt 180 högskolepoäng som utbildningen omfattar. Projektet har utförts vid Volvo Penta AB i Göteborg, där även en stor del av arbetet har utträttats.

Jag vill tacka medarbetarna på Volvo Penta för råden de har givit under arbetets gång, men framför allt vill jag rikta ett stort tack till mina handledare Magnus Lilliehöök och Imran Yousaf som har varit ett stort stöd under arbetet. Slutligen så vill jag tacka min examinator Tomas McKelvey som har hjälpt till med att föra arbetet vidare.

Mattias Larsson, Göteborg, Juni 2019

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Precisering av frågeställningen	2
2	Teknisk bakgrund	3
2.1	I ² C	3
2.2	I/O expander - PCA9506DGG,518	5
2.3	Strömbrytare	6
2.3.1	Elektromagnetiskt relä	6
2.3.2	Power MOSFET	7
2.3.3	Halvledarrelä	8
2.4	Relä - G5Q-14-EU 24VDC	9
2.5	Darlingtontransistor array - ULN2803ADWR	10
2.6	Elektronisk säkring - TPS26625DRCR	11
2.7	DIP-switch - A6E-3101-N	12
3	Metod	13
4	Grundläggande design	14
5	Val av strömbrytare	16
5.1	Val av strömbrytartyyp	16
5.2	Val av elektromagnetiskt relä	17
6	Kretskort	18
6.1	Uppbyggnad av mönsterkort	18
6.2	Kontakter	19
6.3	Reläer	19
6.4	Styrning av reläer	20
6.5	Konfigurering av eFuse	21
7	Prototyp	23
7.1	Test av styrning	23
7.2	Test av eFuse	24

8	Resultat	25
9	Slutsats och diskussion	27
9.1	Val av strömbrytare	27
9.2	Tillverkning	27
9.3	Miljömässiga och etiska aspekter	27
9.4	Förslag på vidareutveckling	28
	Referenser	29
A	Bilagor	
A.1	Kretskortets framsida renderad i 3D	
A.2	Kretskortets baksida renderad i 3D	
A.3	Kretskortets övre kopparlager renderad i 3D	
A.4	Kretskortets undre kopparlager renderad i 3D	
A.5	Kretskortets kopparlager renderade i 2D	
A.6	Arduino kod	

Förkortningar

ABOB	—	Automated Breakout Box
ECU	—	Electronic Control Unit
HIL	—	Hardware-in-the-loop
I ² C	—	Inter-Integrated Circuit
NO	—	Normaly Open
NC	—	Normaly Closed
CO	—	Change Over Contact
COM	—	Common

1

Inledning

1.1 Bakgrund

Moderna inombordsmotorer för båtar kontrolleras av en sorts datorenhet kallad styrenhet eller ECU (electrical control unit). ECU:n har många in/ut- (I/O) portar varav en del används för att hämta data från olika givare, till exempel varvtal, tryck och temperatur. Enheten använder sedan algoritmer för att tolka datan och utnyttjar därefter resultatet till att reglera motorns olika delar, exempelvis bränsleinjektorer. Enhetens kritiska roll för motorns funktion gör att utförlig testning av dess hårdvara och mjukvara måste utföras.

Vid testning av mjukvara till sina nya ECU:er använder Volvo Penta sig av en typ av simulering som kallas för Hardware-in-the-loop (HIL). Metoden går ut på att ECU:ns I/O-portar först kopplas samman med en enhet som kallas för HIL-rigg. Denna enhet tar sedan emot och svarar ECU:ns signaler, på ett sådant sätt att den upplever det som att den är kopplad till den riktiga hårdvaran (last). Att använda simuleringar är billigare än att använda prototyper och testning kan utföras tidigare i utvecklingen. Vissa laster kan vara svåra att simulera och då får de riktiga lasterna istället kopplas in genom riggen.

Som en mellanhand för kopplingen mellan ECU:ns I/O-portar och HIL-riggen, sitter en så kallad automated breakout box (ABOB). Denna enhet har ledningar med strömbrytare, som kan brytas för att simulera kabelbrott mellan ECU:n och HIL-riggen, samt kopplas samman för att simulera kortslutningar. På senare tid har man vid användandet av den nuvarande ABOB:en kunnat mäta signaler trots att det ska vara kabelbrott. Orsaken är inte bekräftad, men det finns misstankar bland de som utför tester med ABOB:en att det kan gå läckströmmar genom dess strömbrytare.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att utveckla en design för en ABOB med strömbrytare som har mycket små eller inga läckströmmar, samt att ta fram en prototyp.

1.3 Avgränsningar

Nedanstående punkter beskriver de avgränsningar som har gjorts för projektet:

- Kostnad kommer att ingå som en faktor i designen, men det finns ingen given budget att hålla sig till.
- Det ingår inte i uppgiften att undersöka den nuvarande ABOB:en.
- Testkod kommer att skrivas för att verifiera att enhetens styrning fungerar, men den kompletta programmeringen av dess styrning kommer inte att ingå i projektet.

1.4 Precisering av frågeställningen

Följande punkter presenterar de krav som sattes på prototypen.

Kravspecifikation:

- Inga eller mycket små läckströmmar igenom strömbrytarna som sammanbinder ECU och HIL-rigg.
- Ett gränssnitt som möjliggör styrning via dator.
- Varje ECU–HIL-rigg koppling ska kunna brytas oberoende av de andra kopplingarna.
- Två valfria ECU–HIL-rigg kopplingar ska kunna kopplas samman, för att skapa kortslutning mellan motsvarande I/O-portar på ECU:n.
- Matningsspänningen ska vara +24 VDC.
- Säkrad mot inmatning av fel matningsspänning.
- Varje kopplingspunkt för kablar från ECU:ns I/O-portar, ska vara försedd med en utgång för extern mätning av signal.
- Flexibel design för expansion eller minskning av antalet ECU–HIL-rigg kopplingar som kan hanteras.
- Ska enkelt kunna skalas upp till att hantera 124 ECU–HIL-rigg kopplingar, inom ett chassi med höjden 12 cm och bredden 40 cm.
- Får maximalt ta upp 35 cm av chassits längd.
- Klara strömspikar upp till 10 A vid 24 VDC.

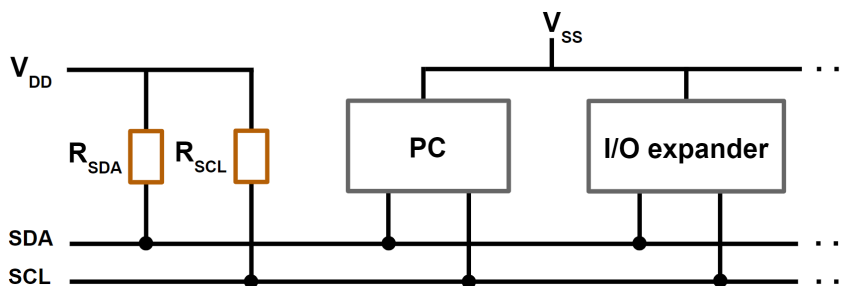
2

Teknisk bakgrund

Detta avsnitt beskriver den buss och de huvudkomponenter som har legat till grund för projektet. Det beskriver också funktionsprincipen av de tre olika strömbrytartyper som har övervägts.

2.1 I²C

Inter-Integrated Circuit (I²C) är en typ av dubbelriktad seriell buss. En stor fördel med I²C-bussen är att den bara kräver två ledningar för att upprättas, serial data line (SDA) och serial clock line (SCL). Kommunikationen via bussen ska utföras med hjälp utav en öppen kollektor eller drain, vilket innebär att enheterna som kommunicerar över bussen kan sätta dess nivå låg men inte hög [1]. Bussen sätts därför som normaltillstånd till en logisk hög nivå, vilket kan åstadkommas med hjälp utav pull-up motstånd kopplade till en spänningskälla. Detta illustreras i Figur 2.1.



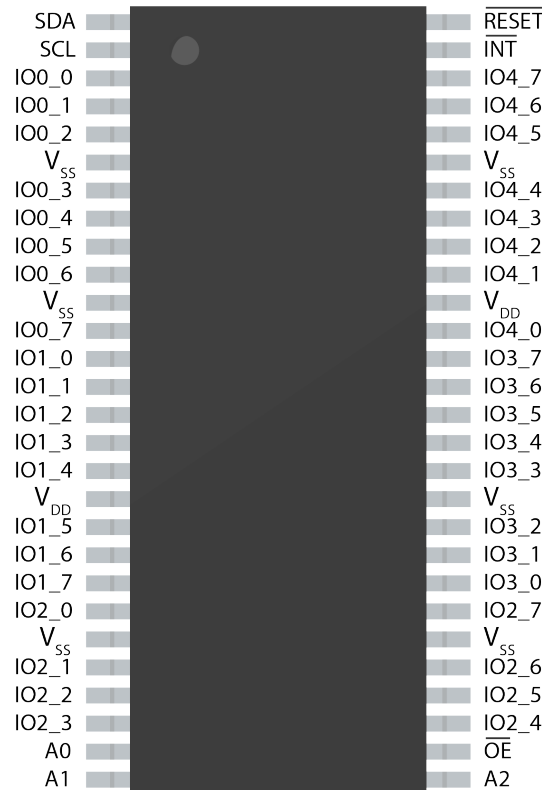
Figur 2.1: Pull-up motstånden R_{SDA} och R_{SCL} sätter I²C-bussen till en logisk hög nivå som normaltillstånd.

Uppbyggnaden av I²C protokollet är av typen sändare/mottagare samt master/slave [1]. Enheten som agerar master väljer när en dataöverföring ska utföras och styr även klockan som är kopplad till SCL. En masterenhet kan agera både som sändare och mottagare, vid vilket fall slaveenheten/enheterna agerar det motsatta. Efter varje byte (8 bitar) som skickas via bussen måste mottagaren svara med en acknowledgement (ACK) bit [1]. Detta utförs genom att sändaren först släpper kontrollen över SDA och mottagaren sedan sätter bussen låg. Bitens uppgift är att visa sändaren att mottagaren har tagit emot byte:n, samt att en ny byte kan skickas.

För att en enhet ska kunna adresseras via I²C-bussen måste den ha en unik sju eller tio bitars adress [1]. Denna adress kan bestå av två delar, där en del är förprogrammerad av tillverkaren och den andra programmeras av användaren. Detta medför att antalet enheter av samma modell som kan anslutas till samma buss, begränsas av antalet programmerbara bitar som finns tillgängliga efter enhetens produktion.

2.2 I/O expander - PCA9506DGG,518

Kretsen PCA9506DGG,518 är en I/O expander, som via en I²C-buss kan öka antalet in-/utportar för enheten som kommunicerar med den. En illustration av kretsen visas i Figur 2.2. Den har totalt 56 ben, varav två används för I²C-bussens ledningar SDA och SCL. Kretsen har 40 ben dedikerade som I/O-portar, vilka var för sig kan programmeras till antingen in- eller utport via I²C-bussen. Dessa är uppdelade i grupper (banker) om åtta.



Figur 2.2: I/O expander PCA9506DGG,518 använder ytmonterade TSSOP56 kapseln.

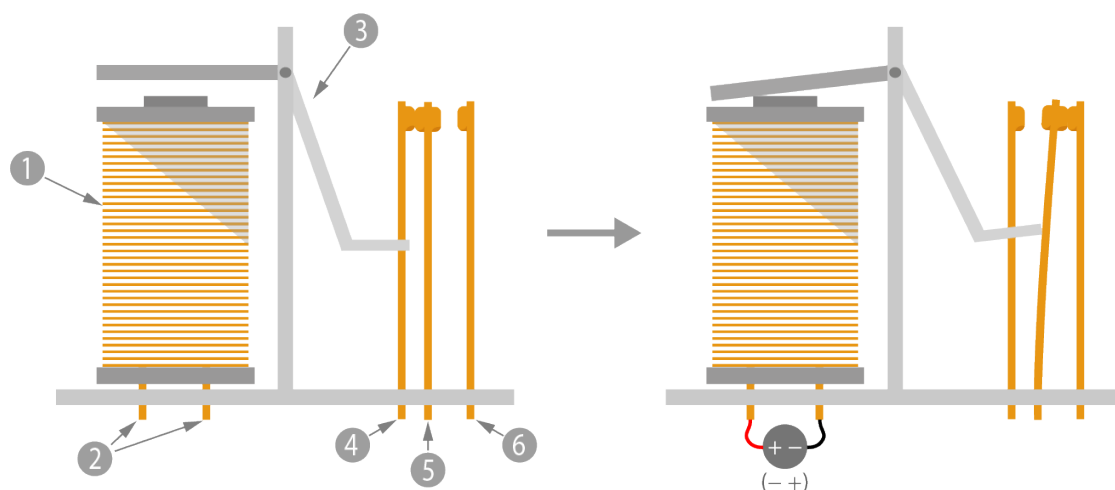
Benen A0, A1, A2 används för att ställa in de programmerbara bitarna av kretsens I²C-adress, vilket medför att åtta unika adresser kan åstadkommas. Ytterligare tre ben $\overline{Reset}$, $\overline{INT}$, $\overline{OE}$ har följande funktioner och är aktivt låga. $\overline{Reset}$ återställer kretsen till dess start tillstånd. $\overline{INT}$ (Interrupt) kan användas för att indikera förändringar på de inportar som inte är maskerade [2]. $\overline{OE}$ (output enable) har funktionen att antingen aktivera alla I/O-portar som är programmerade som utportar, eller inaktivera dem i så kallad 3-state. De resterande benen ockuperas av V_{DD} och V_{SS} .

2.3 Strömbrytare

Här beskrivs tre olika typer av strömbrytare som kontrolleras av en låg styrspänning, vilka därigenom bryter eller sluter en separat krets. Dessa kan användas till att möjliggöra för enheter att kontrollera strömmar/spänningar som de själva inte klarar av att hantera.

2.3.1 Elektromagnetiskt relä

Elektromagnetiska reläer är uppdelade i två delar, styrkrets och huvudkrets, vilka är galvaniskt isolerade från varandra [3]. I huvudkretsen sitter själva strömbrytaren vilken kan bestå utav olika kontaktuppsättningar. I Figur 2.3 visas en variant som kallas för Change Over Contact (CO). Denna använder två statiska kontakter "NC" och "NO" vilka visas vid 4:an och 6:an i figuren, samt en böjbar kontakt "COM" som visas vid 5:an. Namnet COM står för "common" vilket syftar till att denna kontakt är gemensam för NC och NO kontakten. NC är en förkortning av "normally closed" vilket innebär att det finns kontakt mellan denna kontakt och COM, så länge som COM inte böjs. NO står för "normally open" och fungerar på omvänt sätt som NC.



Figur 2.3: 1) Elektromagnet, 2) Kontakter för elektromagnet, 3) Ankare, 4) NC kontakt, 5) COM kontakt, 6) NO kontakt.

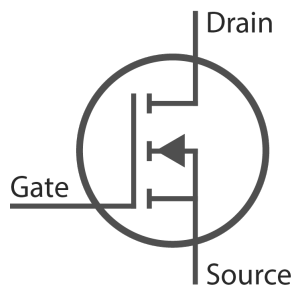
Styrningen av den rörliga kontakten COM utförs med hjälp utav en elektromagnet som sitter i styrkretsen, vilken är uppbyggd av en järnkärna med en kring lindad spole av koppartråd. Genom att lägga en styrspänning över kontakterna på elektromagneten börjar en ström gå igenom spolen, vilket alstrar ett magnetfält som drar åt sig en hävarm kallad "ankare" [4]. Ankaret kommer då att rotera runt den punkt som den är fäst vid och trycka till COM, vilket illustreras till höger i Figur 2.3. Detta medför att kontakten ger efter och böjer sig, vilket leder till att den kontakt som fanns mellan NC och COM bryts och det i stället skapas kontakt mellan COM och NO.

När styrspänningen stängs av återgår ankaret till sin neutrala position och kontakten blir rak igen. Eftersom strömmen genom en spole inte kan förändras ögonblickligen kommer en hög spänning (flyback) att bildas, vilken kan skada den krets som driver den [5]. En diod brukar därför sättas mellan spolens kontakter, med dess katod vänd mot pluspolen. Detta skapar en väg för strömmen att ta vägen och flyback spänningen undviks.

2.3.2 Power MOSFET

En metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) är en typ av transistor som styrs av spänning (fälteffekttransistor). Den har tre elektroder, gate, drain och source, vilka är separerade av ett halvledarsubstrat. En Power MOSFET är en variant av MOSFET som är konstruerad för att hantera höga effekter [6].

MOSFET:s finns i fyra olika varianter, varav en av de vanligaste är med N-kanal och av anrikningstyp [7]. Symbolen för denna typ visas i Figur 2.4. När en positiv spänning som är större än tröskelspänningen $V_{GS(th)}$ läggs mellan dess gate och source, formas en ledande kanal genom substratet mellan drain och source. Storleken på denna kanal ökar därefter med spänningen upp till en viss gräns. Denna typ av MOSFET sägs vara normally open [7]. En skillnad mot en normally open brytare hos ett relä, är att då trots transistorn tekniskt sett är av vid $V_{GS} < V_{GS(th)}$, leder en mycket liten ström kallad subthreshold conduction [8]. Vid $V_{GS} = 0\text{ V}$ kallas detta läckaget Zero Gate Voltage Drain Current (I_{DSS}) [9].

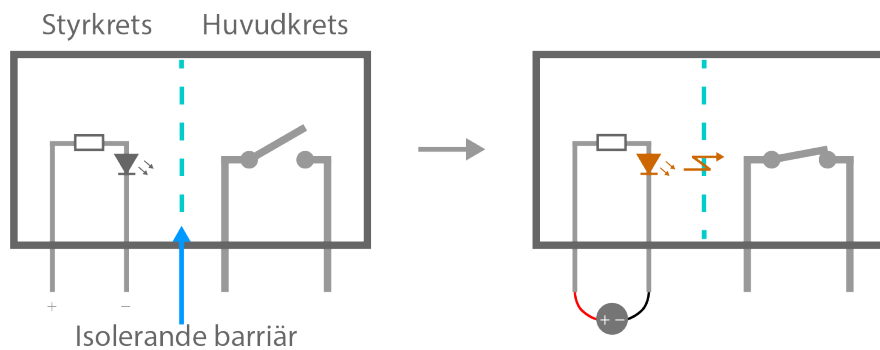


Figur 2.4: Symbol för en N-kanal MOSFET av anrikningstyp.

2.3.3 Halvledarrelä

Ett halvledarrelä använder som namnet antyder någon form av halvledare som strömbrytare. De går även under namnet solid state relä (SSR), vilket syftar till dess avsaknad av rörliga delar. Varianterna av denna typ av relä som är konstruerade för att hantera likström använder ofta MOSFET:s eller Darlington transistorer [10].

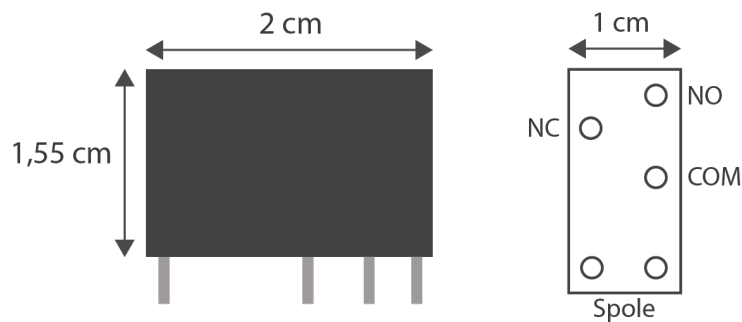
Liknande ett elektromagnetiskt relä så är halvledarrelä uppdelade i två delar, där styr- och huvudkretsen är galvaniskt isolerade från varandra. Isoleringen utgörs av en optokopplare, bestående av en lysdiod och en fototransistor som är skilda åt av en elektriskt isolerande barriär [11]. I Figur 2.5 visas en förenklad version av hur ett halvledar relä fungerar. Lysdioden är i serie med ett motstånd kopplad till kontaktarna på styrkretsen. När en styrspänning läggs på ingången till dioden börjar den att lysa och ljus passerar igenom barriären in till huvudkretsen. I huvudkretsen sitter fototransistorn ihopkopplad med halvledarreläets huvudströmbrytare. Ljuset som träffar transistoren gör att den börjar leda ström, vilket i sin tur aktiverar huvudströmbrytaren.



Figur 2.5: Funktionsprincipen för ett halvledarrelä. Huvudkretsen har blivit förenklad till en symbol för en strömbrytare.

2.4 Relä - G5Q-14-EU 24VDC

G5Q-14-EU 24VDC är ett elektromagnetiskt relä med mycket små dimensioner, vilka presenteras i Figur 2.6. Den har fem ben och dess kontaktkonfiguration är 1CO, vilket betyder att den har en brytare av typen CO inbyggd. Positioneringen av benen samt deras funktion visas i Figur 2.6. Reläets elektriska data presenteras i Tabell 2.1



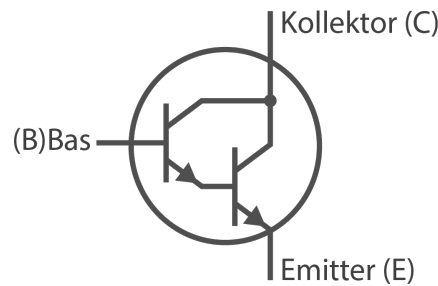
Figur 2.6: Till vänster visas en illustration av relät från sidan, tillsammans med mått på dess höjd och längd. Till höger visas reläets benuppsättning sett ovanifrån, tillsammans med mått på dess bredd.

Tabell 2.1: Elektrisk data hämtad från tillverkarens datablad [12].

Egenskap	Värde
Spolspänning (DC)	24 V
Spolmotstånd	1440 Ω
Maximal bärström/brytström	NO kontakt: AC 10 A, DC 5 A NC kontakt: AC 3 A, DC 3 A
Maximal brytspänning	277 V AC, 30 V DC
Maximal brytförmåga	NO kontakt: 2500 VA, 150 W NC kontakt 750 VA, 90 W

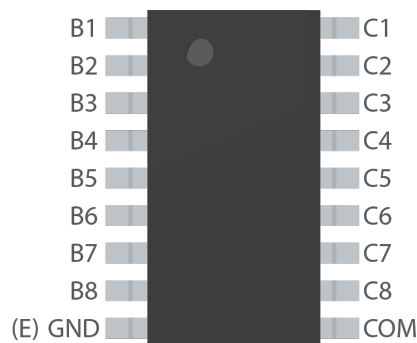
2.5 Darlingtontransistor array - ULN2803ADWR

ULN2803ADWR är en sammansättning av åtta stycken NPN darlingtontransistorer integrerade i en kapsel. En darlingtontransistor består av två bipolära transistorer som är ihopkopplade enligt Figur 2.7. Strömförstärkningen av denna koppling blir mycket högre än om transistorerna skulle användas separat, vilket betyder att de kan styra en mycket större ström [13].



Figur 2.7: Kretsschema för en darlingtontransistor uppbyggd av två NPN transistorer.

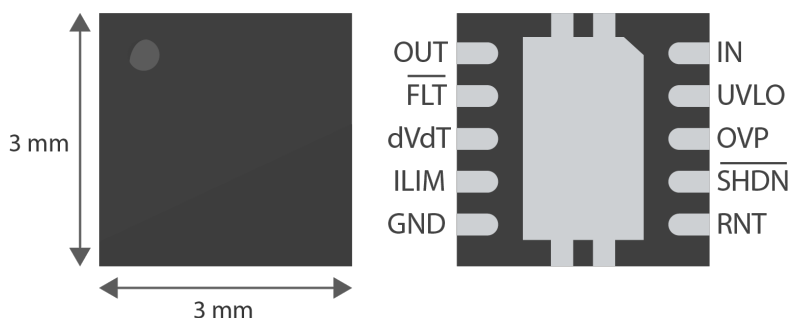
Transistor array:en har arton ben, vars beteckningar visas i Figur 2.8. De åtta benen B1-B8 används som ingångar för att styra basen på transistorerna. Dessa ingångar har inbyggda $2,7\text{ k}\Omega$ resistorer, vilket gör att de kan drivas direkt från 5 V eller 3.3 V logik [14]. Motsvarande åtta ben C1-C8 används som utgångar, vilka tål upp till 50 V och kan föra maximalt 500 mA till kretsens gemensamma emitter (GND). Varje utgång är även försedd med en flyback diod kopplad till en gemensam ledare COM. Dessa möjliggör att induktiva laster kan drivas av kretsen utan att den skadas.



Figur 2.8: Illustration av kretsen ULN2803ADWR.

2.6 Elektronisk säkring - TPS26625DRCR

Kretsen TPS26625 är en elektronisk säkring (eFuse) designad som ett skydd mot ett flertal elektriska feltillstånd. Den använder komparatorer för att bestämma om ett feltillstånd har inträffat och bryter i sådana fall kopplingen mellan dess ingång (IN) och utgång (OUT) med hjälp av två fälteffekttransistorer (FET:s) [15]. Kapseln är av typen VSON-10, vilket är mycket kompakt och visas i Figur 2.9.

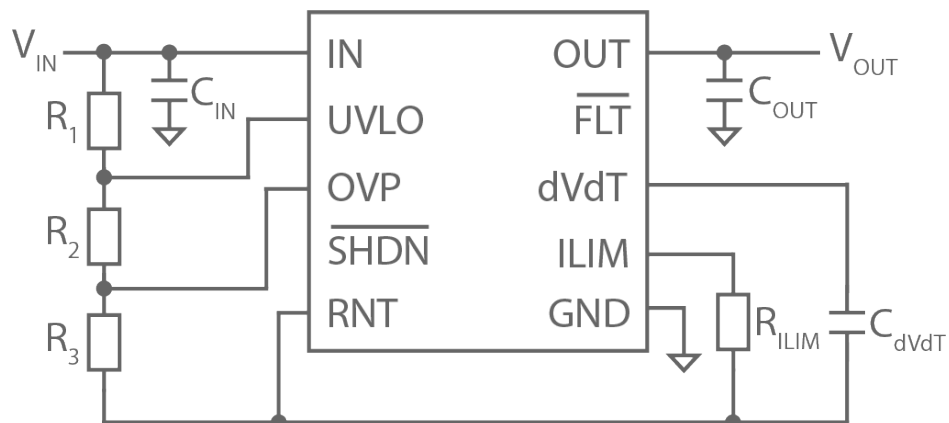


Figur 2.9: eFuse:n sedd ovanifrån och underifrån. Kretsen har totalt tio portar samt en platta för värmeledning.

eFuse:n inkluderar ett snabbt skydd mot kortslutning, med en genomsnittlig reaktionstid på 220 ns [15]. Både IN och OUT är skyddade mot omvänd polaritet, varav IN ner till -60 V och OUT till $-(60 - V_{IN})V$. Till dessa portar kopplas var sin kondensator för att stabilisera kretsens operation. Kretsen inkluderar även fyra konfigurerbara skydd, vilka är emot överspänning, underspänning, överström och inrusningsström.

Portarna UVLO och OPV kan användas för att ställa in gränsvärdena för vilken inspänning som ska räknas som över- och underspänning. Gränserna ställs in med hjälp av resistorerna R_1 , R_2 , R_3 , vilka är kopplade enligt exempel kretsschemat i Figur 2.10. Det tillgängliga intervallet är mellan 4,5 V och 57 V och kretsen kan skydda mot maximalt 60 V.

Genom att sätta kretsens $\overline{SHDN}$ port till en låg logisk nivå, går den in i ett avstängningsläge. Om den lämnas flytande så har den ingen påverkan på eFuse:n. RNT är kretsens gemensamma referensjord för interna spänningar, medans GND används för att koppla in extern jord till kretsen. Porten ILIM används för att ställa in överströmsskyddet, inom intervallet 25 mA till 880 mA. Skyddet mot inrusningsström utgörs av att slew rate:n på OUT begränsas. Porten dVdT kan användas för att med hjälp av en kondensator konfigurera slew rate:n, eller lämnas flytande för att använda ett förprogramerat standard värde på 24 V / 660 μs [15]. Signalen från porten $\overline{FLT}$ kan användas för att indikera ifall ett feltillstånd har inträffat. Ifall den informationen inte är nödvändig så kan den lämnas flytande.



Figur 2.10: Kretsschema för eFuse:n då den är sammankopplad med in- och utgångs kondensator, samt med de passiva komponenter som krävs för att ställa in dess konfigurerbara skydd.

2.7 DIP-switch - A6E-3101-N

A6E-3101-N består av tre manuellt opererade strömbrytare inpackade i ett standardformat, kallat dual in-line package (DIP). Strömbrytarna är skjutbara och kan bland annat användas för att konfigurera portar som tar binära värden som indata.

3

Metod

Projektet inleddes med en målbeskrivning som sedan utvecklades till en kravspecifikation under projektets gång. Som ett första steg inhämtades information från Volvo Penta om hur dagens ABOB fungerar, för idéer om design. Därefter togs grundläggande krav fram på den nya konstruktionen, såsom storleksbegränsningar och mängden ström som enheten ska kunna hantera. Utifrån designidén och kraven användes bland annat internetforum och tillverkares hemsidor för att hitta olika typer av komponenter som kunde ligga till grund för konstruktionen. Via försäljningssidor undersöktes priser och specifikationer på olika modeller av komponenterna, vilket därefter låg till grund för valet av specifik komponentmodell. För att säkerhetsställa komponenternas funktion köptes ett antal av dem in och testades separat i labbmiljö.

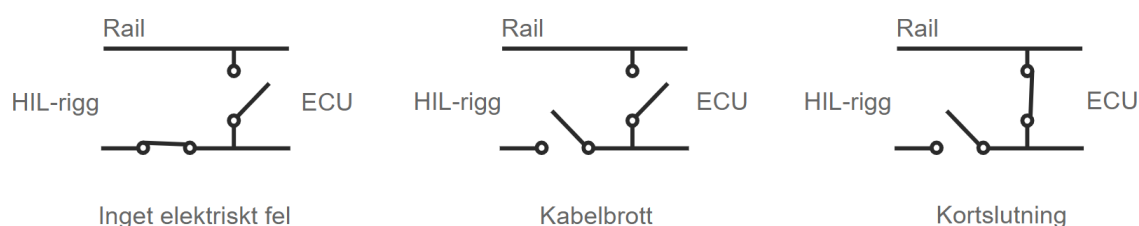
Utveckling av det mönsterkort som har tagits fram under projektet har gjorts i gratisprogramvaran Circuitmaker. För att minska kostnaden vid tillverkning av mönsterkortet, så tillverkarens fabrikationsspecifikationer tagits hänsyn till under utvecklingen.

4

Grundläggande design

Grundprincipen för ABOB:en är att agera som en mellanhand för en ECU och en HIL-rigg. Den kan därefter användas för att injicera två olika typer av elektriska fel (kabelbrott och kortslutning) på de kablar som är anslutna ifrån ECU:ns I/O-portar till enheten.

ABOB:en tar emot kablar från ECU:n och HIL-riggen via kontakter och delar upp dem på separata ledningar. Ledningarna från ECU:n kopplas sedan samman med ledningarna från HIL-riggen via strömbrytare som normalt sett är slutna. På ECU-sidan av strömbrytarna finns även ytterligare var sin strömbrytare, men som normalt sätt är öppen och kopplad till en gemensam ledning kallad "rail". Läget av alla strömbrytare kan därefter kontrolleras från en dator för att skapa kabelbrott och kortslutningar. I Figur 4.1 illustreras de tre stadier som brytarna tillsammans är tänkta att anta.

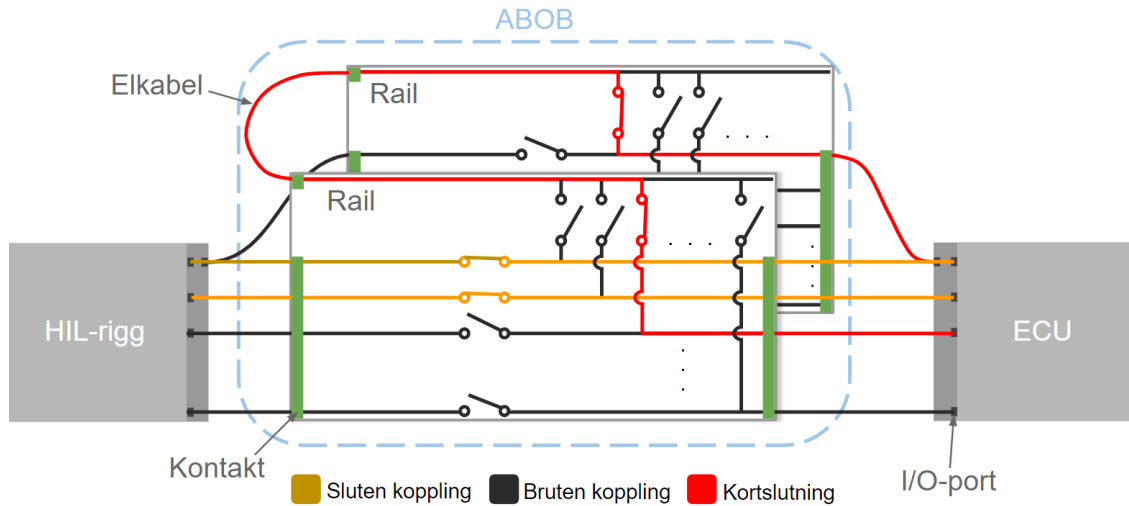


Figur 4.1: Positioner av strömbrytarna för en ECU–HIL-rigg koppling vid tre olika tillstånd.

Kabelbrott utförs på en ECU–HIL-rigg koppling genom att öppna dess strömbrytare som normalt sett är slutna, vilket visas i kabelbrottsexemplet i Figur 4.1. Kortslutningar sker genom att koppla samman två kablar från ECU:n, vilket utförs genom att ställa strömbrytarna för två ECU–HIL-rigg kopplingar enligt kortslutningsexemplet i Figur 4.1.

Eftersom den fullständiga ABOB:en ska kunna hantera 124 ECU–HIL-rigg kopplingar inom ett bestämt chassi, behövde enhetens design utformas efter chassits dimensioner. Då varje koppling använder två strömbrytare var, krävs det totalt 248 brytare. Om alla var monterade på samma kretskort så skulle det behöva vara mycket stort, och volymen i det avsedda chassit skulle inte utnyttjas på bästa sätt. Det skulle också vara svårt att underhålla kretskortet. Därför delas kopplingarna upp på flera kretskort, vilka sedan kan ställas på högkant i chassit. Genom att varje kort kopplas samman via rail:en med hjälp av en elkabel, blir de sedan en del av den större enheten. En illustration av detta, tillsammans med två elektriska fel, visas i

Figur 4.2. Genom att dela upp dem så möjliggörs också enkel omskalning av antalet ECU–HIL-rigg kopplingar som kan hanteras, samt förenklar produktionen av enheten.



Figur 4.2: Fem I/O-portar ansluts från en ECU till en HIL-rigg via ABOB:en. Kabeln längst ner utsätts för kabelbrott. I/O-portarna som är kopplade till den rödmarkerade ledningen blir kortslutna med varandra.

Som en avvägning mellan chassits dimensioner beslutades det att den fulländade ABOB:en skulle bestå av åtta kretskort, vilka var och en har kapacitet att hantera 16 ECU–HIL-rigg kopplingar. Detta ger en total kapacitet på 128 kopplingar, vilket med viss marginal uppnår kravspecifikationen.

5

Val av strömbrytare

Här presenteras de avvägningar och beslut som har legat till grund för valet av strömbrytare.

5.1 Val av strömbrytartyp

Den mest centrala komponenten vid konstruktionen av ABOB:en är strömbrytaren som möjliggör de elektriska fel som den är tänkt att injicera. Därför har tre potentiella kandidater övervägts.

Den typ av ABOB som företaget använder i dag använder Power MOSFET:s som strömbrytare, vilka på många sätt är ideala för dessa ändamål. De är billiga och tål höga strömmar för sin lilla storlek, samtidigt som de är energisnåla. Avsaknaden av rörliga delar leder också till att de är snabba, samt förväntas leva längre än elektromagnetiska reläer [3].

Eftersom problemet med Volvo Pentas nuvarande ABOB misstänks bero på läckströmmar igenom enhetens strömbrytare, var det av hög prioritet att dessa strömmar inte skulle förekomma i den nya enheten. MOSFET:s har off-state läckage, bland annat I_{DSS} om de är av anrikningstyp. Att denna ström skulle vara stor nog för att registreras som signal är dock inte troligt, eftersom dess storlek mäts i mikroampere [16]. Möjligheten att I_{DSS} ökar med åldring av komponenterna undersöktes med en kort litteraturstudie. Enligt en accelererat föråldringsprov utfört av NASA fanns det dock inget tydligt samband mellan åldring av Power MOSFET:s och en förändring av I_{DSS} [9]. Eftersom det inte ingick i projektet att ta reda på orsaken till läckaget, utfördes ingen djupare studie och användandet av diskreta Power MOSFET:s uteläts tidigt i projektet.

Den andra varianten av strömbrytare som övervägdes var halvledarreläer. Eftersom brytarna ska kunna hantera likström använder de vanligen MOSFET:s som strömbrytare. Därför delar dem många av sina egenskaper med Power MOSFET:s. Detta betyder också att möjligheten för läckaget som diskuterades tidigare inte helt kunde uteslutas, men detta valdes att inte i sig självt vara en uteslutande faktor. En fördel över Power MOSFET:s är att de galvaniskt isolerar den krets som styr dem, från lasten som är tänkt att drivas. Detta med nackdelen av en långsammare brytförmåga [3]. I nuläget är halvledarreläer ett mycket dyrt alternativ för sin brytförmåga.

Den tredje varianten som övervägdes var elektromagnetiska reläer. Denna typ av relä har fördelen att de på grund av sin mekaniska brytare isolerar kontakterna från varandra när kontakten ska vara bruten, vilket medför att ingen läckström kan förekomma. Dess mekaniska brytare gör också att de tål strömspikar bättre än halvledarreläer [3]. Nackdelen men den är att elektromagnetiska reläer är långsammare och förväntas att ha kortare livslängd än halvledarreläer [3]. Prismässigt är de relativt billiga för sin brytförmåga.

Då ABOB:en inte hade några stränga krav på hastighet, så var de flesta elektromagnetiska reläer fullt tillräckliga i detta avseende. På grund av den stora prisskillnaden mellan relätyperna och garantin att inga läckströmmar förekommer, föll därför valet på elektromagnetiska reläer.

5.2 Val av elektromagnetiskt relä

Eftersom varje kretskort ska kunna hantera 16 ECU–HIL-rigg kopplingar och det krävs två strömbrytare per koppling, så behövs totalt 32 strömbrytare per kretskort. För att åstadkomma konstruktionens tänkta brytarmekanism, krävs dels strömbrytare som normalt sätt hålls slutna och andra som normalt hålls öppna. Vid val av relä visade sig storleken, men framför allt höjden av ABOB:ens planerade chassi bli mycket begränsade. Storleken per relä fick bara vara runt 2 x 1 cm. Inget relä byggt för att monteras på kretskort i denna storlek hade en NC kontakt som var byggd att bryta i närheten av 10 A DC.

Om NO reläer skulle användas för de strömbrytare som kopplar samman ECU och HIL-rigg i ABOB:en, hade det lett till en hög aktiv strömförbrukning. För att motverka detta fick ett relä med NC kontakt i vilket fall väljas, men med mindre dimensionerad brytförmåga. I samråd med Volvo Penta beslutades det att reläet G5Q-14-EU 24VDC var tillräcklig för uppgiften. Reläets brytförmåga visas i Tabell 2.1.

6

Kretskort

Här beskrivs uppbyggnaden av ABOB:ens kretskort samt motiveringar för de designval som har utförts.

6.1 Uppbyggnad av mönsterkort

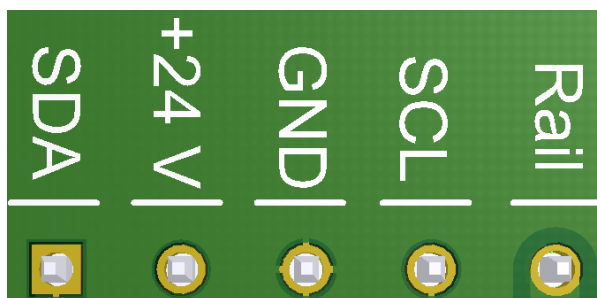
Mönsterkort eller PCB (printed circuit board) är en sorts platta som används för att elektriskt sammanbinda komponenter. När komponenter monteras på plattan kallas det för ett kretskort.

Den design av mönsterkort som har tagits fram i projektet gjordes i programvaran Circuitmaker och utgörs av totalt sju lager. Två av lagren är av koppar, och i dessa utformas elektriska ledningsbanor och övriga ledande element som kopplar samman komponenterna. Standardtjockleken för kopparlagren är $35\ \mu m$, men då ABOB:en är tänkt att hantera strömmar på flera ampere skulle ledningarna behöva vara mycket breda. För att motverka detta valdes istället $70\ \mu m$ kopparlager.

Mellan kopparlagren finns ett lager laminatmaterial av klassen FR-4, vilket är isolerande och flamresistent [17]. Ovanpå kopparlagren läggs varsitt grönt lager kallat lödmask, vilket skyddar mot oxidation och hjälper till att göra lödningen av komponenterna enklare. Yttersta lagren som används kallas för silkscreen och används för att trycka text och monteringsanvisningar på kortet.

6.2 Kontakter

Kontakterna för ECU och HIL-rigg på kretskorten utgörs av fyra kontakthållare med åtta kontaktpunkter var. I dem kan löstagbara kontaktblock fästas, vilka i sin tur kan hålla åtta kablar. För att förenkla processen att koppla in kablarna i kontaktblocken så har ECU och HIL-rigg blivit uppdelade på separata kontakthållare. Ytterligare en sådan typ av kontakthållare används fast med fem kontaktpunkter, för att koppla in matningsspänningen (+24 V), jord (0 V), I²C ledningarna (SDA och SCL) samt ledningen "rail". Ledningarna är ordnade enligt Figur 6.1, vilket (med bortseende från rail) är enligt de rekommendationer som finns i I²C-bussens officiella användarmanual [1]. Anledningen är att minska störningar mellan I²C ledningarna, så kallat crosstalk.

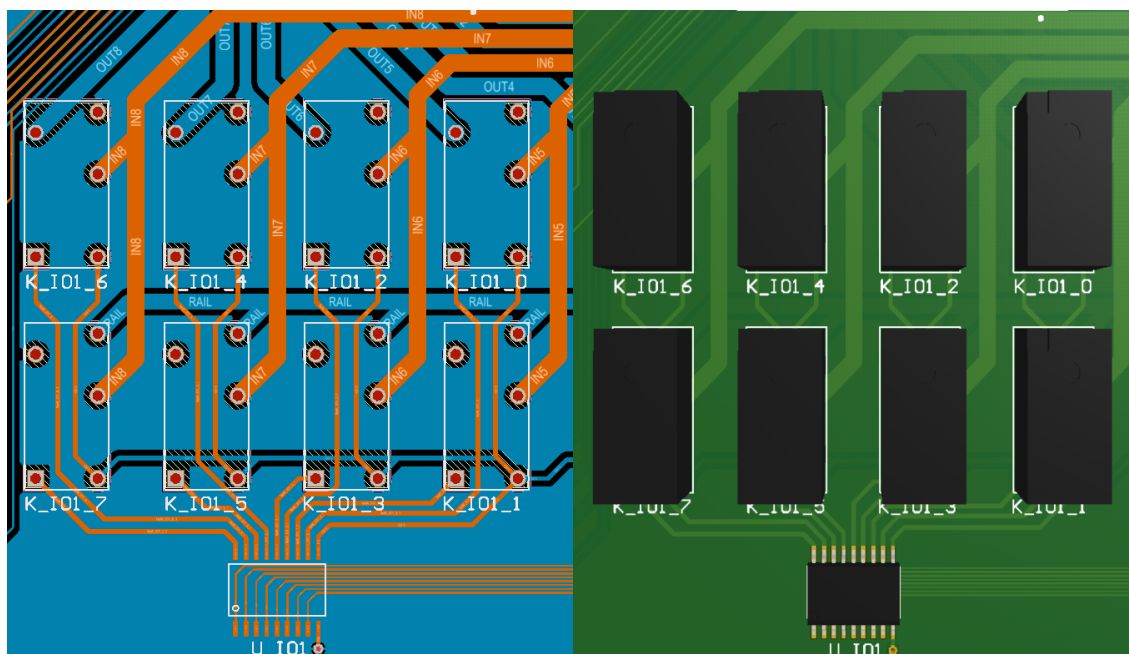


Figur 6.1: Silkscreen som visar ledningsordning på kretskortets baksida.

6.3 Reläer

Relät som används i projektet (G5Q-14-EU 24VDC) är av typen CO och har således både en NC-kontakt och NO-kontakt. Denna variant kan därför användas både som de strömbrytare som kopplar ECU-ledningarna till HIL-riggen och de som kopplar dem till rail. Det krävs dock fortfarande två separata reläer för de båda funktionerna, eftersom fler än ett elektriskt fel ska kunna genomföras samtidigt. Kabelbrottsfunktionen måste därav utföras utan att använda ledningen "rail", vilket inte är möjligt med bara ett relä.

På kretskortet är reläerna positionerade på två rader och ett segment av dem visas i Figur 6.2. På grund av den värme som reläerna utvecklar så krävs enligt tillverkaren Omron ett minsta avstånd på 5 mm mellan reläerna [18]. Som säkerhetsmarginal sattes avståndet till 7 mm. Kontaktpunkterna för ECU är kopplade till båda radernas COM-kontakter. Den övre radens reläer används som de strömbrytare som sammankopplar ECU med HIL-rigg. Eftersom dessa strömbrytare i sitt normaltillstånd ska vara slutna, så är kortets kontaktpunkter för HIL-rigg kopplade till NC-kontakten på reläerna. Deras NO-kontakt lämnas fri för att inte leda. Den undre radens reläer används för att koppla samman kontaktpunkterna för ECU med rail:en. Därför ska COM-kontakternas koppling till rail vara bruten i sitt normaltillstånd. Rail:en är därför kopplad till reläernas NO-kontakt, medans NC-kontakten lämnas fri för att det inte ska leda.



Figur 6.2: Ett segment av mönster-/kretskortet. Orange färg motsvarar kopparlagret på komponentsidan, blå motsvarar kopparlagret på baksidan, röd-vit motsvarar genomgående hål.

6.4 Styrning av reläer

Styrningen av kretskortets reläer sker via I/O expandern PCA9506DGG,518. Denna krets kan dock inte driva dem direkt från sina utportar, eftersom de inte har tillräckligt hög spänning och inte kan hantera tillräckligt mycket ström. Av denna orsak används darlingtontransistor array:en ULN2803ADWR som mellanhand. Eftersom denna krets har åtta utgångar, används fyra stycken för att kontrollera alla 32 reläer på kortet. Till utgångarna på dessa kretsar kopplas det ena av reläspolarnas ben, medan det andra benet kopplas till ledningen med +24 V. Darlingtontransistorerna som är kopplade till kretsarnas utgångar fungerar sedan som NO-brytare till jord (som går via kretsens ben GND), vilka sluts när det finns signal på motsvarande ingång. Kretsarnas COM-ben kopplas också till +24 V, för att använda flyback dioderna som förhindrar de skador som spolarnas urladdning kan åsamka.

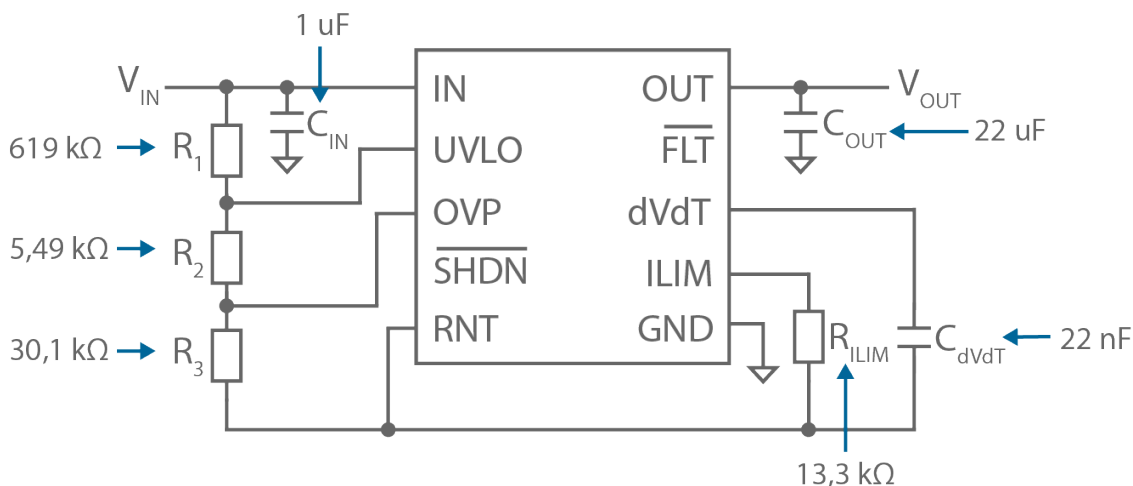
Eftersom I/O expandern inte kan drivas av +24 V så kopplas kretsens matningsspänningsben (V_{DD}) till en DC/DC-omvandlare som tar ner spänningen till +5 V. Denna spänning möjliggör också att kretsen direkt kan driva darlingtonkretsarnas ingångar. Från V_{DD} benen kopplas också varsin kondensator till jord. Anledningen är att då integrerade kretsar börjar switcha sina utgångar, krävs det snabbt mer ström. På grund av ledningsimpedansen mellan kretsen och strömkällan, uppstår det en fördröjning innan behovet kan bemötas [19]. Kondensatorerna kan därför agera som en närliggande energilagringseenhet, som snabbare kan reagera på korta förändringar i strömförbrukning, vilket leder till jämnare spänning [19]. En vanlig rekommendation är att placera 0,1 F kondensatorer så nära kretsen som möjligt

[20]. Därför har denna implementering genomförts.

För att I/O expandern ska kunna styras från en dator, kopplas kretsens SDA- och SCL-ben ut från kretskortet, via den kontakthållare som nämnts i sektion 6.2. Den programmerbara delen av kretsens I²C-adress sätts via dess ben A1, A2, A3, vilka kopplas till ena sidan av varsin strömbrytare på en DIP switch (A6E-3101-N). Den andra sidan av brytarna matas med +5 V, vilket medför att logiska ettor erhålls när brytarna är slutna. När de är öppna skulle dock kretsens adressben vara i ett flytande tillstånd och därav sakna ett definierat värde. Kretsens adress skulle därför variera av sig självt. Av denna anledning är var sin pull-down resistor också kopplad till varje ben, som sätter dem till 0 V i dessa fall. På detta sätt kan kretsens adress väljas direkt på kretskortet, samt sparas vid avstängning av kortet.

6.5 Konfigurering av eFuse

För att förhindra skador på kretskortets komponenter vid fall av fel matningsspänning eller för hög ström, används eFusen TPS26625DRCR som mellanhand. Ett kretsschema för dess implementering visas i Figur 6.3, tillsammans med värdena på de passiva komponenter som används.



Figur 6.3: Kretsschema för eFuse:ns koppling på kretskortet. De blå pilarna visar vilket värde som hör till de olika komponenterna.

Värdena på C_{IN} och C_{OUT} är hämtade ifrån exempelkretsen “Typical Application” i tillverkarens datablad [15]. De resterande komponenternas värden är framtagna med hjälp utav tillverkarens egna verktyg “TPS26620 Design Calculator” [21]. Verktöget har inlagda standardvärden, varav C_{OUT} och gränsvärdena för överspänning, underspänning samt överström har ändrats. I Tabell 6.1 presenteras dessa gränsvärden.

Tabell 6.1: Inställda värden på eFuse:ns justerbara skydd.

Skydd	Värde
Överspänning	26 V
Underspänning	22 V
Överström	0,5 A

De komponenter som drivs direkt från eFuse:ns utgång är reläerna och DC/DC-omvandlaren. Av dem så har DC/DC-omvandlaren det minsta operationsområdet (21,6 V – 26,4 V) [12][22]. Över- och underspänningsskyddens gränsvärden sätts därför till det första heltalet inom det intervallet.

Överströmsskyddet ställdes in för att kunna skydda darlingtonkretsarna från att leda för mycket ström. När kretsarnas utgångar driver de reläspolar som de är sammankopplade med, begränsas strömmen av spolens resistans. Ifall något ledande material av misstag skulle skapa kontakt mellan båda kontakterna till en spole, skulle denna resistans förbigås och en kortslutning skulle uppstå. För att motverka permanent skada, får en enskild darlingtontransistor i denna typ av krets högst leda 0,5 A. Gränsen sattes därför vid detta värde.

7

Prototyp

Den färdiga designen av mönsterkortet producerades av en mönsterkortstillverkare och komponenterna monterades av ett företag som jobbar med elektronikutveckling.

7.1 Test av styrning

För att testa styrningen av reläerna användes en Arduino UNO, vilket är ett litet kretskort med en microprocessor som kan programmeras från en dator. Kortet har bland annat utgångarna SDA och SCL som kan användas för att kommunicera via I²C. Dessa utgångar var kopplade till pull-up motstånd och sedan vidare till motsvarande ingångar på prototypen. Testerna som utfördes visade att alla reläer kunde kontrolleras via kommandon skickade från Arduino:n via I²C bussen. De visade också att det gick att välja alla åtta av I/O expanderns adresser via DIP switchen, samt att dess adress hölls stabil.

Om fyra eller fler reläer startades samtidigt utlöste eFuse:n sitt inrusningsströmskydd. Detta resulterade i att strömmen in till kortet begränsades i omgångar, vilket ledde till att reläernas böjbara kontakt började pendla mellan dess två positioner. För att en kortslutning ska kunna utföras mellan två ECU–HIL-rigg kopplingar på kortet, krävs det att fyra reläer kan aktiveras samtidigt. Enligt kravspecifikationerna skulle också alla ECU–HIL-rigg kopplingar på kortet kunna brytas samtidigt.

Värdet på den kondensator (C_{dVdT}) som konfigurerar inrusningsströmskyddet, togs som beskrivet i kapitel 6.5 fram med tillverkarens vektig. Detta värde begränsade dock strömmen för mycket för kortets specifika användning. Efter att ha undersökt eFuse:ns manual igen så visade det sig att den största tillåtna inrusningsströmen erhålls när denna kondensator inte används. Kondensatorn löddes därför bort och nya tester genomfördes. Testerna visade att det nu gick att aktivera alla 32 reläer på kretskortet samtidigt, utan att inrusningsströmskyddet begränsade strömmen. Styrningen av reläerna var därav bekräftad att fungera utan problem. En version av koden som användes vid testerna visas i Bilaga A.6.

7.2 Test av eFuse

eFuse:ns över- och underspänningsskydd testades med hjälp utav en reglerbar spänningskälla. Testet visade att överspänningsskyddet aktiveras vid ca 27 V och underspänningsskyddet vid ca 21 V. Detta avviker något från de planerade gränserna 26 V och 22 V. Vid mätning av de resistorer som används för att konfigurera dessa skydd, visades deras värden ha en viss felmarginal mot de teoretiskt framtagna. Detta är troligen anledningen till avvikelserna.

8

Resultat

Under arbetet har en design för en ABOB tagits fram. En prototyp är också tillverkad. Nedan har konstruktionens kravspecifikation ställts upp med en kommentar om och i sådana fall hur målet har uppfyllts.

Måluppfyllnad:

- **Krav:** Inga eller mycket små läckströmmar igenom strömbrytarna som sammanbinder ECU och HIL-rigg.
Kommentar: På grund av att den valda strömbrytartypen är ett elektromagnetiskt relä, kan dessa läckströmmar uteslutas.
- **Krav:** Ett gränssnitt som möjliggör styrning via dator.
Kommentar: Kretskortets strömbrytare styrs genom en I/O expander, vilken via I²C kan kontrolleras från en dator.
- **Krav:** Varje ECU–HIL-rigg koppling ska kunna brytas oberoende av de andra kopplingarna.
Kommentar: Varje ECU–HIL-rigg koppling har ett relä som kan öppnas för att bryta kopplingen. Alla reläer kan kontrolleras oberoende av de andra reläerna.
- **Krav:** Två valfria ECU–HIL-rigg kopplingar ska kunna kopplas samman, för att skapa kortslutning mellan motsvarande I/O-portar på ECU:n.
Kommentar: ECU–HIL-rigg kopplingarna kan kopplas samman genom att sluta deras reläer som är anslutna till den gemensamma ledningen “rail”.
- **Krav:** Matningsspänningen ska vara +24 VDC.
Kommentar: Reläerna, eFuse:en och DC/DC-omvandlaren drivs direkt från +24 V. Resterande komponenter drivs via +5 V från DC/DC-omvandlaren.
- **Krav:** Säkrad mot inmatning av fel matningsspänning.
Kommentar: eFuse:n skyddar mot spänningar över 27 V och under 21 V, inom intervallet ± 60 V.
- **Krav:** Varje kopplingspunkt för kablar från ECU:ns I/O-portar, ska vara försedd med en utgång för extern mätning av signal.
Kommentar: En kontakt är kopplad så att spänningen vid dessa koppling-

punkter går att mäta med ett externt mätinstrument.

- **Krav:** Flexibel design för expansion eller minskning av antalet ECU–HIL-rigg kopplingar som kan hanteras.
Kommentar: Designen är uppbyggd av det kretskort som utvecklats, vilket kan hantera 16 ECU–HIL-rigg kopplingar. Genom att koppla samman flera stycken via deras ledning “rail”, kan antalet kopplingar ökas i grupper om 16.
- **Krav:** Ska enkelt kunna skalas upp till att hantera 124 ECU–HIL-rigg kopplingar, inom ett chassi med höjden 12 cm och bredden 40 cm.
Kommentar: Med åtta sammankopplade kretskort blir antalet ECU–HIL-rigg kopplingar som kan hanteras 128. Höjden av korten är 9,7 cm och deras sammanlagda bredd blir ca 13 cm (utan medräknat mellanrum).
- **Krav:** Får maximalt ta upp 35 cm av chassits längd.
Kommentar: Kretskortets längd är 32,5 cm.
- **Krav:** Klara strömspikar upp till 10 A vid 24 VDC.
Kommentar: Reläet som används är inte konstruerat för att hantera 10 A vid 24 VDC, vilket visas i Tabell 2.1. Praktisk testning kommer att visa ifall det klarar den faktiska användningen.

9

Slutsats och diskussion

De speciella restriktioner som sattes på konstruktionens dimensioner, tillsammans med mängden ström som det var tänkt att hantera, var en svår kombination att hantera.

9.1 Val av strömbrytare

Fördelen med att reläer används är att det med säkerhet inte kan uppstå någon läckström mellan ECU och HIL-rigg. Den största nackdelen är att om de ska tåla höga strömmar så tar de upp relativt mycket plats. På grund av utrymmesbrist så fick inte tillräcklig stora reläer plats för att uppnå den önskade brytförmågan. Om en för stor ström körs igenom reläerna medan deras kontakter öppnas, finns risken att dess kontakter svetsas samman. Detta skulle resultera i att relät blir oanvändbart. För att underlätta reparationen ifall detta skulle ske, fanns önskan att reläerna skulle monteras i socklar som i sin tur monteras på kortet. Problemet var att de reläer som hade socklar också var för stora.

9.2 Tillverkning

Tillverkningen av prototypen tog längre tid än väntat. Det var först tanken att monteringen av komponenterna skulle ske i Volvo Pentas egna labbmiljö, men det visade sig inte vara möjligt. I/O expandern (PCA9506DGG,518) och eFusen (TPS26625DRCR) har mycket små ben/kontaktplattor, vilket gjorde att de inte kunde monteras med den tillgängliga utrustningen. Arbetet fick istället utföras av ett externt företag, vilket gav ett bra resultat men medförde fördröjningar.

9.3 Miljömässiga och etiska aspekter

Ur miljösynpunkt är simulering ett bra alternativ till att konstruera prototyper. Detta då samma utrustning kan användas till att testa ett stort antal enheter istället för en specifik, vilket leder till att förbrukningen av energi och material minskar.

För samhället så kan ABOB:s spela en viktig roll när det gäller säkerhet. Vid ett kabelbrott eller kortslutning behöver de ECU:er som styr våra fordon agera på ett förutsägbart sätt, så att motorerna hålls under kontroll. Genom att kunna testa

utförligt hur hårdvara och mjukvara reagerar vid kritiska fel, kan problem utredas som annars skulle kunna leda till farliga situationer.

9.4 Förslag på vidareutveckling

Prototypen bör först testas i den miljö som den är tänkt att användas i. Om reläerna tål de strömmar som de utsätts för, så kan kretskortet multipliceras och kopplas samman för att hantera alla 124 ECU–HIL-rigg kopplingar. Ifall reläerna inte klarar att hantera strömmarna så får korten göras om med en annan strömbrytare.

Om ett annat relä ska väljas som tål mer ström, så kommer kretskortet att behöva bli större. Ifall storleken inte kan tillåtas att öka så är rekommendationen att undersöka om Power MOSFET:s trots allt kan användas. Eftersom dessa uteslöts på grund av att de antas läcka signaler genom dem i Volvo Pentas nuvarande ABOB, bör tester utföras på enheten för att säkerställa orsaken.

Referenser

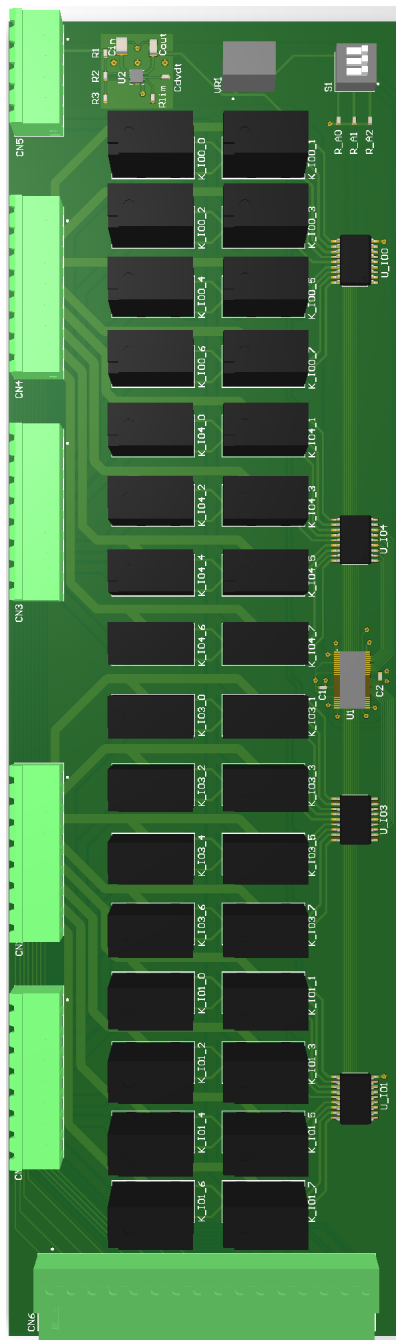
- [1] *UM10204 I2C - bus specification and user manual Rev. 6* [Internet]. Eindhoven, Nederländerna: NXP Semiconductors; 2014 [citerad 2019-05-29]. Tillgänglig från: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [2] *PCA9505/06 40-bit I2C-bus I/O port with RESET, OE and INT* [Internet]. Eindhoven, Nederländerna: NXP Semiconductors; 2010 [citerad 2019-05-29]. Tillgänglig från: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9505_9506.pdf?
- [3] *How to Choose the Right Relay* [Internet]. Texas, USA: National Instruments; 2019 [citerad 2019-05-29]. Tillgänglig från: <http://www.ni.com/sv-se/innovations/white-papers/06/how-to-choose-the-right-relay.html>
- [4] *HUR FUNGERAR ETT RELÄ?* [Internet]. Vällingby: Elkurs.se [citerad 2019-05-30]. Tillgänglig från: <https://elkurs.se/fakta-tips/hur-fungerar-ett-rela/>
- [5] *Why You Should Use a Flyback Diode in a Relay to Prevent Electrical Noise* [Internet]. CA, USA: Altium LLC; 2017 [citerad 2019-05-30]. Tillgänglig från: <https://resources.altium.com/bill-of-materials-blog/why-you-should-use-a-flyback-diode-in-a-relay-to-prevent-electrical-noise-in-y>
- [6] *Power MOSFET* [Internet]. Wikipedia; 2019 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Power_MOSFET&oldid=894425538
- [7] Storr, W. *MOSFET and Metal Oxide Semiconductor Tutorial* [Internet]. MA, USA: AspenCore, Inc; 2013 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: https://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_6.html
- [8] *Subthreshold conduction* [Internet]. Wikipedia; 2019 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Subthreshold_conduction&oldid=895987658
- [9] Sankalita, S., Jose Ramon, C., Vladislav, V., Shompa, M., Kai F, G. *Accelerated Aging with Electrical Overstress and Prognostics for Power MOSFETs* [Internet]. CA, USA: NASA Ames Research Center; 2011 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20110014343>

- [10] Storr, W. *Solid State Relay* [Internet]. MA, USA: AspenCore, Inc; 2016 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/solid-state-relay.html>
- [11] *Opto-isolator* [Internet]. Wikipedia; 2019 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Opto-isolator&oldid=880882791>
- [12] *PCB Power Relay – G5Q-EU* [Internet]. Kyoto, Japan: Omron; (u.d.) [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-g5q.pdf
- [13] *How A Darlington Pair Transistor Works* [Internet]. Nottingham, Storbritannien: Kitronik Ltd.; 2014 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://www.kitronik.co.uk/blog/how-a-darlington-pair-transistor-works/>
- [14] *ULN2803A Darlington Transistory Array datasheet (Rev. H)* [Internet]. TX, USA: Texas Instruments, Inc.; 2017 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2803a.pdf>
- [15] *TPS2662x 60-V 800mA Industrial eFuse with integrated reverse polarity protection datasheet (Rev. D)* [Internet]. TX, USA: Texas Instruments, Inc.; 2019 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2662.pdf>
- [16] *Power MOSFET Electrical Characteristics* [Internet]. Tokyo, Japan: Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation; 2018 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=13415>
- [17] Gong, L. *FR-4 PCB MATERIAL* [Internet]. Shenzhen, Kina: Seeed Technology Co., Ltd; 2018 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://www.seeedstudio.com/blog/2017/09/20/fr4-pcb-material/>
- [18] *PCB Power Relay - G2R* [Internet]. Kyoto, Japan: Omron; (u.d.) [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-g2r.pdf
- [19] Lathrop, O. *Decoupling caps* [Internet]. NY, USA: Stack Exchange Inc; 2011 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://electronics.stackexchange.com/questions/15135/decoupling-caps-pcb-layout/15143#15143>
- [20] *What is a decoupling capacitor and how do I know if I need one?* [Internet]. NY, USA: Stack Exchange Inc; 2011 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://electronics.stackexchange.com/a/2282>
- [21] *TPS2662 Design Calculator Tool* [Internet]. TX, USA: Texas Instruments, Inc.; 2017 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=slvc735&fileType=ziphttps://www.ti.com/product/TPS2662/toolssoftware>

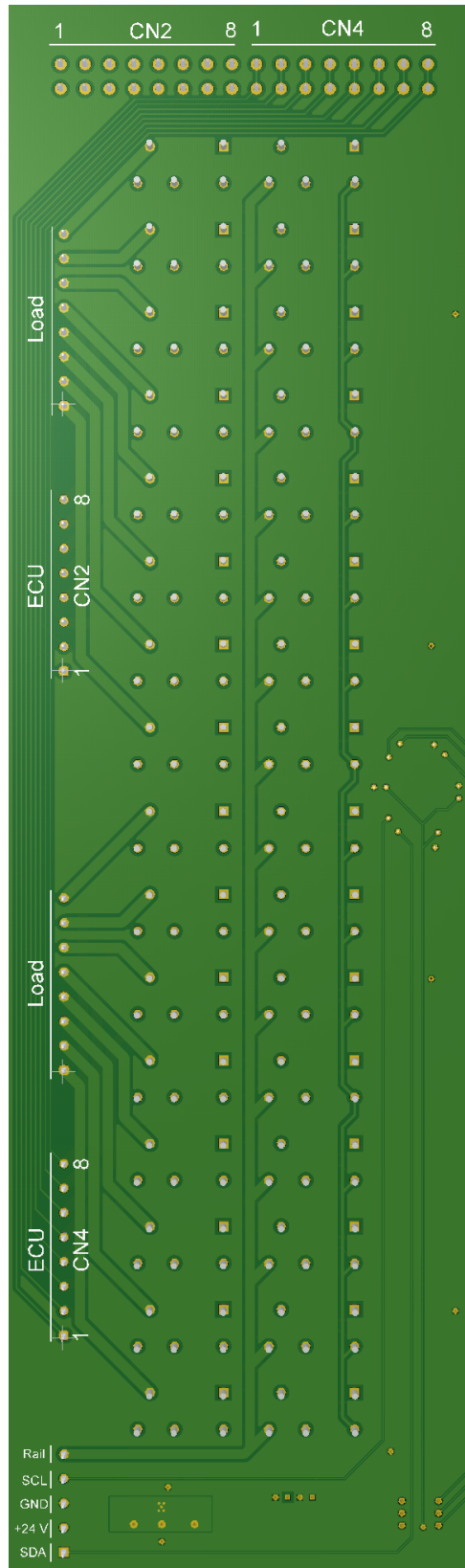
- [22] *DC/DC Converters* [Internet]. Baar, Switzerland: Traco Electronic AG; 2019 [citerad 2019-05-31]. Tillgänglig från: <https://www.tracopower.com/products/tme.pdf>

A Bilagor

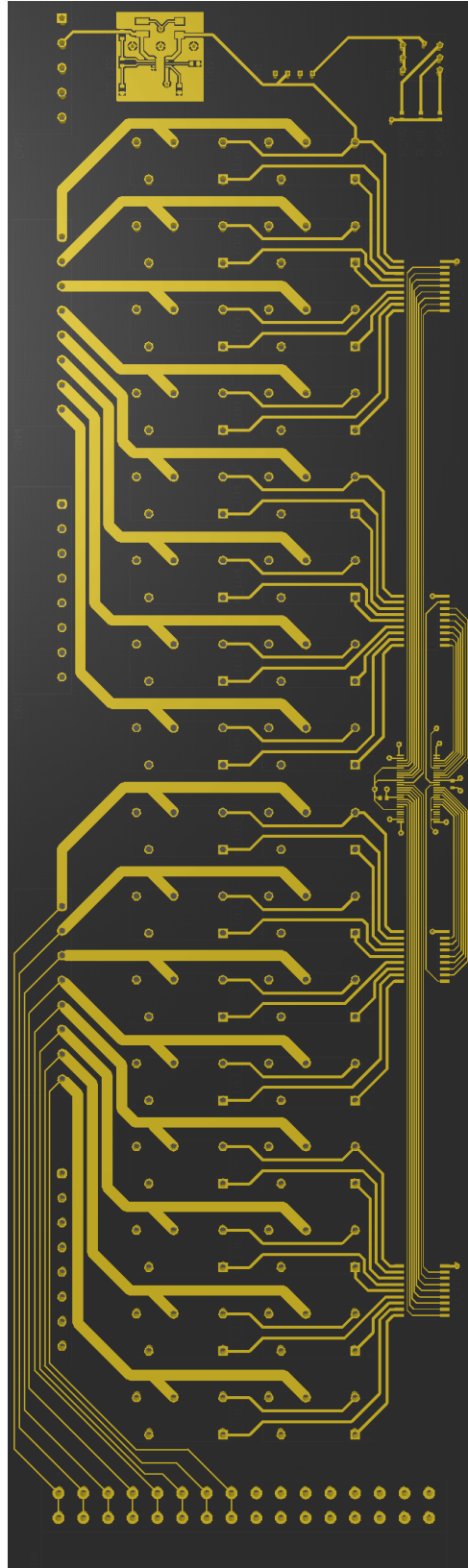
A.1 Kretskortets framsida renderad i 3D



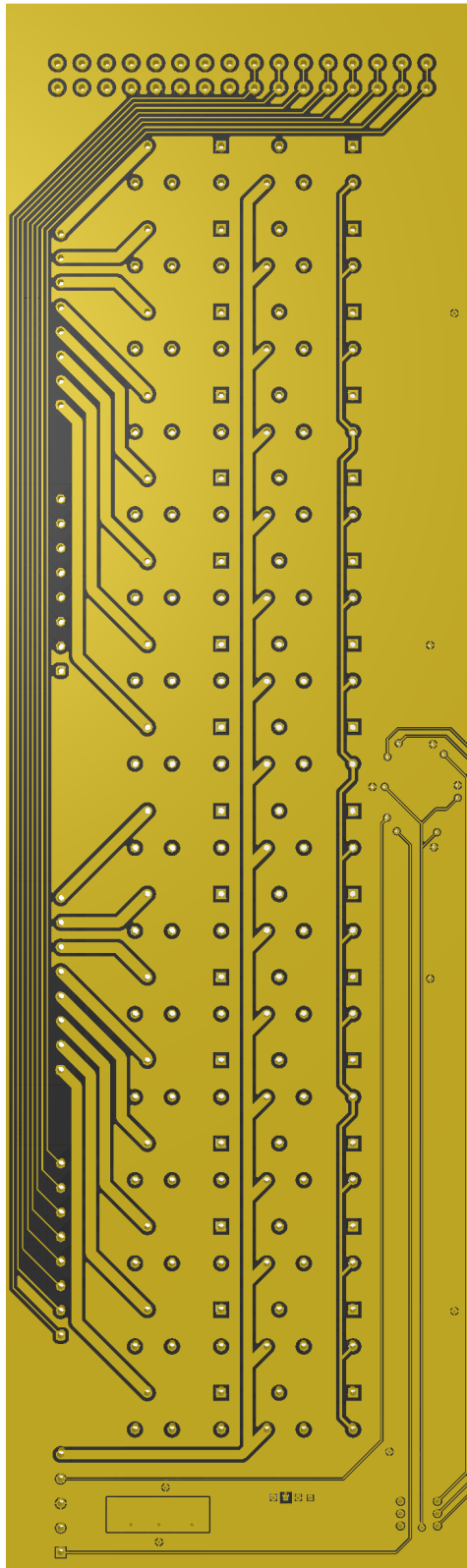
A.2 Kretskortets baksida renderad i 3D



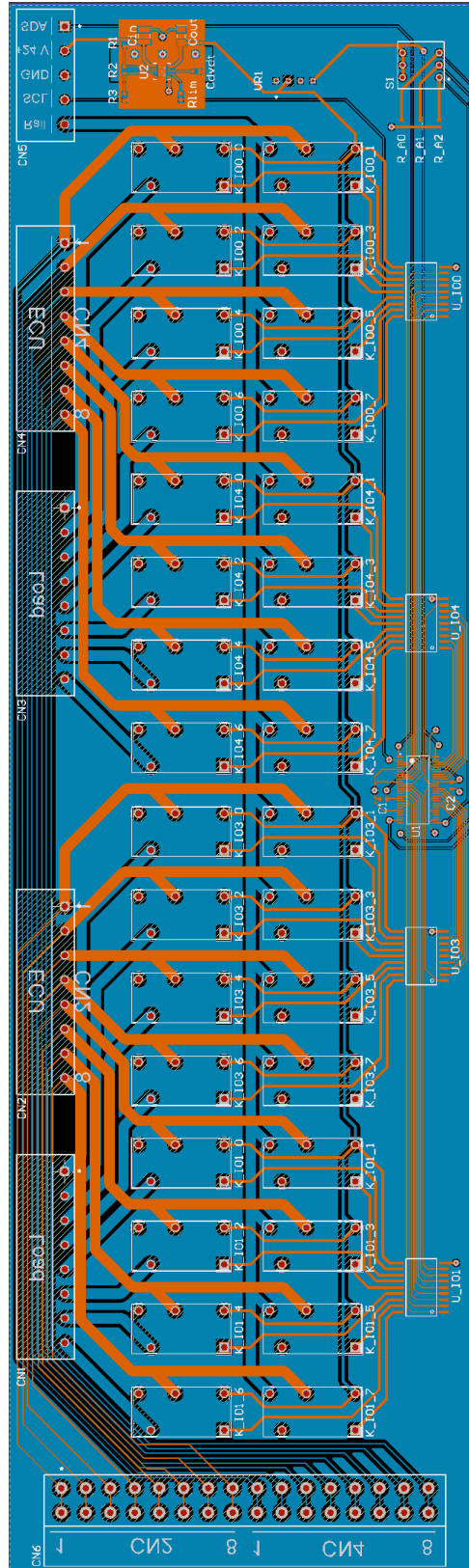
A.3 Kretskortets övre kopparlager renderad i 3D



A.4 Kretskortets undre kopparlager renderad i 3D



A.5 Kretskortets kopparlager renderade i 2D



A.6 Arduino kod

```
#include <Wire.h>

//-----I/O Configuration registers addresses-----

byte config_0 = 0x18; // I/O Configuration register bank 0 | 1 = input, 0 = output
byte config_1 = 0x19; // I/O Configuration register bank 1 | 1 = input, 0 = output
byte config_3 = 0x1B; // I/O Configuration register bank 3 | 1 = input, 0 = output
byte config_4 = 0x1C; // I/O Configuration register bank 4 | 1 = input, 0 = output

//-----Output Port registers addresses-----

byte OP0 = 0x8; // output register bank 0
byte OP1 = 0x9; // output register bank 1
byte OP3 = 0xB; // output register bank 3
byte OP4 = 0xC; // output register bank 4

//-----Start-----

void setup()
{
  Wire.begin(); // join I2C bus
}

void loop()
{

//-----Configure bank 1-----

  Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
  Wire.write(config_1);        // write to I/O configuration register
  Wire.write(0x0);             // set all ports to outputs
  Wire.endTransmission();      // stop transmitting

//-----Configure bank 3-----

  Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
  Wire.write(config_3);        // write to I/O configuration register
  Wire.write(0x0);             // set all ports to outputs
  Wire.endTransmission();      // stop transmitting
```

```
//-----Configure bank 4-----

Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
Wire.write(config_4);       // write to I/O configuration register
Wire.write(0x0);            // set all ports to outputs
Wire.endTransmission();     // stop transmitting

//-----Configure bank 0-----

Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
Wire.write(config_0);       // write to I/O configuration register
Wire.write(0x0);            // set all ports to outputs
Wire.endTransmission();     // stop transmitting

delay(500);                 // wait 0.5 s

//-----Transmit to bank 1-----

Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
Wire.write(OP1);             // write to register OP1
Wire.write(B11111111);      // data to write
Wire.endTransmission();     // stop transmitting

//-----Transmit to bank 3-----

Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
Wire.write(OP3);             // write to register OP3
Wire.write(B11111111);      // data to write
Wire.endTransmission();     // stop transmitting

//-----Transmit to bank 4-----

Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
Wire.write(OP4);             // write to register OP4
Wire.write(B11111111);      // data to write
Wire.endTransmission();     // stop transmitting
```

```
//-----Transmit to bank 0-----

Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
Wire.write(OP0);             // write to register OP0
Wire.write(B11111111);       // data to write
Wire.endTransmission();       // stop transmitting

delay(3000);                  // wait 3 s

Wire.beginTransaction(0x22); // transmit to device address 22 (hexadecimal)
Wire.write(OP0);             // write to register OP0
Wire.write(B00000000);       // data to write
Wire.endTransmission();       // stop transmitting

}
```