

## MD407 – En ARM baserad laborationsdator för utbildning

Examensarbete inom Högscoleingenjörsprogrammet i Elektroteknik

**Fredrik Östman**



# **MD407 - En ARM baserad laborationsdator för utbildning**

Fredrik Östman

© FREDRIK ÖSTMAN, 2014

Institutionen för data- och informationsteknik  
Chalmers tekniska högskola 412 96 Göteborg  
Tel: 031-772 1000  
Fax: 031-772 3663

Institutionen för data- och informationsteknik  
Göteborg, 2014

# Förord

Detta examensarbetet är genomfört på Chalmers och syftar till att utveckla en ny laborationsdator baserad på en 32-bitars ARM processor. Arbetet är en del av högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik på Chalmers och är påbörjat under 2013 och slutfört 2014 och skall totalt sett motsvara 15 högskolepoäng.

Jag vill tacka Roger Johansson för all hjälp som handledare för projektet.

Fredrik Östman

## **Sammanfattning**

Syftet med projektet är att ta fram en laborationsdator baserad på en 32-bitars ARM processor. Denna skall främst vara avsedd till att användas för undervisning kring maskinorienterad programmering. Ett nytt system behövs för att ersätta befintlig laborationsutrustning som i dag används i flertalet elektronik relaterade kurser på Chalmers. I dagsläget används olika plattformar i de kurser som hålls och förhoppningen är att en ny plattform skall kunna ersätta dessa med en gemensam lösning.

Roger Johansson påbörjade under 2013 arbetet med att ta fram en kravspecifikation för den nya utrustningen. Arbetet med att konstruera prototyper och montera dessa har pågått under 2013 och 2014, allt arbete är utfört på Chalmers under handledning av Roger.

Resultatet av arbetet är en färdig prototyp som är redo att funktionstestas. Om tester visar att allt fungerar som det ska så kommer plattformen med stor sannolikhet integreras i undervisningen och användas under laborationer.

Systemet kan kompletteras med expansionsmoduler vilket innebär att det kan kompletteras för att fungera nya laborationer samt som en grundenhet vid exjobb och projekt.

Utvecklingen av plattformen har skett framförallt med fokus på att ta fram stabil hårdvara som är både elektrisk och mekanisk lämpad för sitt syfte. Detta innebär att ingen mjukvara är inkluderad i arbetet. Kravspecifikation, elektriska scheman och översikt av prototyp är bifogade i slutet av rapporten.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	1
1.2	Syfte . . . . .	1
1.3	Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Metod</b>	<b>2</b>
2.1	Genomgång av kravspecifikation . . . . .	2
2.2	Schemaritning . . . . .	2
2.3	Kretskortskonstruktion . . . . .	2
2.4	Montering och test av prototyper . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Teknisk dokumentation av MD407</b>	<b>4</b>
3.1	Kravspecifikation . . . . .	4
3.2	Översikt av MD407 . . . . .	5
3.2.1	ARM processor . . . . .	5
3.2.2	CAN . . . . .	5
3.2.3	Ethernet . . . . .	5
3.2.4	OTG USB . . . . .	6
3.2.5	USB Debug . . . . .	6
3.2.6	Hörlursförstärkare . . . . .	6
3.2.7	SD minneskort . . . . .	6
3.2.8	Nät del . . . . .	7
3.2.9	Skyddskretsar . . . . .	8
3.3	Expansionsmoduler . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Uppföljning av kravspecifikation</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion och slutsatser</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Fortsatt utveckling</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Bilagor</b>	<b>14</b>
<b>A</b>	<b>Kretsschema</b>	<b>16</b>
<b>B</b>	<b>Komponentplacering</b>	<b>23</b>
<b>C</b>	<b>Komponentlista</b>	<b>24</b>
<b>D</b>	<b>Kravspecifikation</b>	<b>26</b>
<b>E</b>	<b>Tidsplanering</b>	<b>33</b>

**F Planering av gränsnitt ansluta till processor**

**34**

# Beteckningar

Lista över beteckningar som används i denna rapport.

- **CAN** - Controller Area Network
- **UART** - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter TA BORT
- **PCB** - Printed Circuit Board
- **CAD** - Computer Aided Design
- **ESD** - Electric Static Discharge
- **PWM** - Puls Width Modulation
- **RMII** - Reduced Media Independent Interface
- **SDIO** - Secure Digital Input Output
- **GPIO** - General-purpose input/output



# 1 Inledning

I detta kapitel ges en kort inledning till projektet vilket innefattar bakgrund, syfte och avgränsningar.

## 1.1 Bakgrund

Befintlig laborationsutrustning för flertalet elektronikrelaterade kurser där undervisning kring maskinorienterad programmering hålls på Chalmers börjar bli föråldrade och behöver ersättas. Behovet är stort av ett gemensamt system istället för unika lösningar för olika laborationer.

Det finns flertalet färdiga utvecklingsplattformar tillgängliga på marknaden men ingen av dessa är helt lämpade då de inte uppfyller de krav som ställs utan att ansluta flertalet lösa expansionsmoduler. Att utveckla mjukvara och dokumentation för en ny plattform är ett mycket omfattande arbete vilket innebär att det behöver användas under en längre period. Det är därför viktigt att garantera långsiktig tillgång av hårdvara vilket gör det olämpligt att använda färdiga lösningar som kan sluta tillverkas efter ett par år.

## 1.2 Syfte

Syftet med projektet är att utveckla en öppen utbildningsdator baserad på en 32-bitars ARM-processor som kan användas under kurser, laborationer och projekt på Chalmers.

Laborationsdatorn skall vara anpassad efter behoven som finns i olika kurser och dessutom vara pedagogiskt utformad. Hårdvaran måste vara konstruerad på ett sätt som gör den tålig mot ESD, felkopplingar och mekaniska påfrestningar.

Målet är att projektet ska leda till en plattform som täcker kravspecifikationen och vara tillräckligt välkonstruerad för att tillverka ett antal prototyper för att testa i mindre skala.

När prototyp finns färdig skall dokumentation sammanställas för att möjliggöra vidare utveckling och produktion av fler enheter.

Det långsiktiga målet är plattformen skall ersätta befintlig laborationshårdvara på Chalmers och få en enhetlig hårdvara i flertalet kurser. En stabil hårdvara med flera användningsområden kommer samtidigt minska behovet av flera olika lösningar vilket innebär en långsiktig lösning med mindre miljöpåverkan.

### 1.3 Avgränsningar

- Projektets fokus är främst utveckling av hårdvara och dokumentation av denna. I mån av tid kommer prototyp att testas med hjälp av programkodsexempel från tillverkaren av processorn men detta är inget som att behandlas i denna rapport.
- Inga färdiga expansionsmoduler kommer konstrueras men underlag för att underlätta konstruktion av dessa kommer att tas fram. Underlagen kommer bestå av mallar som kan användas i följande CAD program: Eagle PCB, Altium Designer samt KiCAD. Dessa mallar inkluderar mekaniska dimensioner över kortet och information om vart de olika stiften är anslutna in i ARM processorn.
- Den hårdvara som tillverkas för hand kommer endast vara prototyper och underlaget kommer ej vara anpassat för massproduktion.

## 2 Metod

I detta kapitel beskrivs de olika arbetsmomenten, genomgång av kravspecifikation.

### 2.1 Genomgång av kravspecifikation

Första delen av projektet bestod av att granska kravspecifikationen som sammanställts av Roger Johansson. Kravspecifikationen är ett resultat av en förstudie där behovet hos olika föreläsare på Chalmers har samlats in för att komma fram till vad som ny utrustning skall innehålla för att få ett så brett användningsområde som möjligt. Efter diskussioner under de första veckorna utvidgades kravspecifikationen att omfatta alla krav.

### 2.2 Schemaritning

Genom att utgå från några befintliga utvecklingsplattformar [1, 2] och studera dess uppbyggnad valdes olika delar ut som var lämpliga att implementera i den nya plattformen. Denna information användes tillsammans med referenskonstruktioner från fabrikanter datablad för att ta fram ett kretsschema.

Schemat ritades upp i mjukvaran Eagle PCB och granskades tillsammans med handledare under flertalet möten för att garantera att allt var korrekt och uppfyllde kraven. Eagle PCB användes för detta arbete på grund av att denna mjukvara har använts till andra delar av utbildningsutrustningen och enhetlig dokumentation efterfrågades.

### 2.3 Kretskortskonstruktion

Med färdigt schema påbörjades processen med att konstruera kretskortet.

Kontaktbågar placeras ut på lämpliga positioner och de yttre måtten för kretskortet ritas ut. Vid konstruktion lades stort fokus på att få en mekanisk stabil konstruktion där kontaktbågar placerades på ena sidan av kortet för att inte vara i vägen för expansionsmoduler som

monteras ovanpå kortet. Övriga komponenter placerades sedan ut och kopplades samman enligt schemat. Specifik information kring rekommendationer av kretskortskonstruktion för de olika komponenterna hämtades från fabrikanternas datablad för respektive kretsar.

## 2.4 Montering och test av prototyper

Då kretskortskonstruktionen var färdig beställdes mönsterkort och komponenter för två prototyper och monterades för hand med lödugn. Första versionen av kortet fungerade bra men saknade vissa komponenter som till exempel ESD skydd på expansionskontakter. Då dessa delar var uppdaterade beställdes version två av mönsterkortet och ytterligare tre prototyper monterades. Fortsatta tester visade att konstruktionen fortfarande hade vissa fel men dessa kunde korrigeras genom att kapa banor på mönsterkortet och löda in tunt kablage.

Korrigeringar av dessa fel fördes in i underlagen och gav den slutgiltiga versionen (Bilaga A). En maskinellt tillverkad upplaga av den sista versionen beställdes i 10 exemplar för utvärdering på Chalmers.

## 3 Teknisk dokumentation av MD407

Detta kapitel beskriver de olika delarna av plattformen fungerar samt motivering till varför de olika delarna finns med.

### 3.1 Kravspecifikation

Detta är en kort sammanfattning av kravspecifikationen och den fullständiga kravspecifikationen är bifogad som bilaga C.

- MD407 skall byggas kring en ARM processor.
- USB anslutning för programmering och Debug av ARM processor.
- Nätverksanslutning skall vara inkluderat
- Analog utgång med förstärkare för att kunna ansluta t.e.x hörlurar.
- Dubbla CAN anslutningar
- I/O kontakter som möjliggör anslutning av befintlig laborationsutrustning (4st 10 pols kontakter)
- Samtliga ben på processorn skall vara tillgängliga på stiftlistor för att kunna ansluta expansionsmoduler till plattformen.
- Kortet skall vara konstruerat på ett sätt som förhindrar att det på något sätt kan skadas vid felkoppling av ledare, kortslutning, ESD-stötar eller liknande.
- Systemet ska vara pedagogiskt utformat och väldokumenterat för att studenter och övriga användare skall kunna arbeta med kortet.
- Utvecklingen av hårdvaran skall ske i Eagle PCB
- Kortet skall innehålla en nätdel som kan drivas med spänning upp till 50V DC och vara skyddad mot polvändning på inspänningen.
- Anslutningar skall finnas för att kunna koppla in de moduler som används till Chalmers MC12 system.

## 3.2 Översikt av MD407

Följande kapitel beskriver de olika delarna av utvecklingsplattformen. Referenser till kretsar (Ux) är till kretschemat i Bilaga A.

### 3.2.1 ARM processor

ARM processorn som valdes till projektet för att uppfylla kravspecifikationen är SMT32F407.

Genom att konfigurera processorn är det möjligt att välja vilka ben som de olika gränssnitten SPI, UART, CAN osv. skall kopplas till. Konfigurering kan ej ske helt fritt eftersom att de flesta gränssnitt har två till tre möjliga ben de kan anslutas till. Genom att studera datablad och ansluta kretsar på rätt sätt kan samtliga gränssnitt användas samtidigt utan konflikt.

Bilaga F visar hur de olika gränssnitten är anslutna till processorn och verifierar samtidigt att varje gränssnitt har en dedikerad port som kan knytas direkt till den interna logiken för respektive gränssnitt.[3]

Dessutom har dessa anslutits utan att använda port D och E på processorn vilket innebär att 32 parallella digitala kanaler är tillgängliga som portar X3, X4, X5 och X7.

### 3.2.2 CAN

Portarna K4 och K5 används för CAN kommunikation. Till dessa portar ansluts RJ11 kablage med 4 eller 6 ledare av den typ av kabel som normalt används till fasta telefoner.

De två kretsarna MAX13054ASA+ (U24 och U25) användas då CAN kommunikation sker med hjälp av differentiell kommunikation och signalerna från ARM sker med 0-5V logiknivåer. Dessutom har kretsarna inbyggt kortslutning och överspänningsskydd på utgående signal ledare vilket skyddar plattformen. [4]

Då kortet är bestyckat med dubbla CAN portar är det möjligt att koppla kabel mellan dessa och på så sätt laborera med att sända och ta emot CAN data.

### 3.2.3 Ethernet

Ethernet kontroller DP83848 (U23) hanterar all nätverkskommunikation. Kretsen är ansluten till ARM processorn via ett RMII interface vilket reducerar antalet ledare som krävs för att ansluta kretsen till processorn. [5]

Kontakten X9 är av den typ som har en inbyggd transformator istället för att kontakten och transformatorn är två separata komponenter. Den inbyggda transformatorn ger en galvanisk skild kommunikation vilket är viktigt för att förhindra att jordströmmar mellan två kommunicerande enheter uppstår.

### 3.2.4 OTG USB

Porten K2 används för att ansluta USB enheter direkt till ARM processorn och låta denna agera master och kommunicera med enheterna. Denna port kan användas för att ansluta till exempel tangentbord, USB-minnen och liknande.

Kretsen STMP2141STR (U17) begränsar den ström som finns tillgänglig för USB anslutna enheter till 500mA och indikerar med hjälp av LED3 om gränsen överskrids.

### 3.2.5 USB Debug

Port (K1) används för USB kommunikation mellan ARM processorn och en dator. Kretsen FT230X (U18) emulerar en serieport på den dator den ansluts till vilket ger en enkel kommunikationskanal mellan enheterna.

Detta gränssnitt är tänkt att användas både för generell kommunikation men även för att programmera ARM processorn. För att ladda över mjukvara till ARM processorn krävs en bootloader som placeras i processorns minne. Denna mjukvara kommer att utvecklas på Chalmers innan plattformen introduceras på laborationer.

En annan stor fördel med denna port är att det genom att ställa strömbrytaren i rätt läge är möjligt att låta hela plattformen drivas av den tillgängliga strömmen i USB porten i datorn.

### 3.2.6 Hörlursförstärkare

Förstärkarkretsen TPA6111A2D (U14) används för att förstärka signalen från ARM processorn för att driva hörlurar som ansluts till 3.5mm uttaget (X8). [6]

Signalen till förstärkarkretsen kan genereras på två sätt från utgången PA5.

- PWM signal som lågpassfiltreras med hjälp utav R10 och C21 vilket genererar en varierande analog spänning till förstärkaren.
- DAC signal med hjälp utav DAC2\_OUT enheten på processorn.

På den aktuella konstruktionen är ljudnivån satt till en fast nivå som anses ge en lämplig ljudnivå i anslutna hörlurar. Nivån går att ändra genom att byta värde på motstånd R14 och R15 men i kommande versioner skulle det vara möjlighet att ersätta detta motstånd med en potentiometer.

Hörlursuttaget kan även användas till andra tillämpningar som till exempel generering av vågformer för analys med oscilloskop i laborationsyfte.

### 3.2.7 SD minneskort

Hållaren för minneskort (U13) kan användas för att ansluta ett micro-SD kort till processorn.

Kommunikation med minneskortet kan ske genom ett SDIO eller SPI gränssnitt. SPI gränssnittet har valts på denna plattform då det är lättare att implementera stöd för kommunikation med minneskort i mjukvaran på processorn. Nackdelen med att använda SPI är att det ger en långsammare överföringshastighet av data mellan processorn och minneskortet.

Vid behov av snabbare dataöverföring kan en SDIO ansluten modul konstrueras och anslutas via expansionsportarna.

### 3.2.8 Nättdel

Plattformen kan matas via Debug USB (K1) anslutningen eller med den interna nättdelen. Vid de tillfällen högre inspanning önskas som till exempel vid batteridrift ansluts kortet till den externa DC kontakten (K3). I detta läge är det i princip bara den fysiska kontakten på nättdelen som begränsar vilken nättdel som kan anslutas så länge den är av DC typ. Helvågsl riktkretsen på ingången gör att polariteten på ingången inte har någon betydelse.

Den switchade nättdelen på kortet är konstruerad med regulatorn TPS54160ADGQ (U21) från Texas instruments. Den maximala inspanningen till denna är 50V och spänning på utgången konfigureras av värden på resistorerna R34 och R35. Kretsen kan maximalt leverera 1.5A men är begränsad med automatsäkring till 1A. Om kortet matas via USB är strömmen begränsad dock till 500mA då ett normalt USB uttag inte klarar av att leverera mer ström.

3.3V genereras av linjär regulatorn LP3875EMP-3.3 (U6) och den maximala strömmen på 3.3V matningen begränsas av säkringarna F1 och F2.

### 3.2.9 Skyddskretsar

GPIO anslutningarna på ARM processorn är relativt tåliga och klarar sig normalt sett bra vid försiktigt användande då de har skyddsdiodes på varje anslutning som klarar korta pulser med hög spänning. För att skapa en robust lösning och förlänga livslängden på systemet krävs ytterligare externa skyddskretsar.

Det finns olika sätt att skydda sig mot överspänning och ESD urladdningar. Vilken typ av lösning som implementeras beror framförallt på vilken grad av skydd som krävs samt hur många GPIO portar som behöver skyddas. Följande lösningar har utvärderats för att bedöma vilken som är lämplig och hur mycket plats som krävs på kretskortet för respektive lösning:

Lösning	Fördelar	Nackdelar
Resistor	Billig och enkel lösning	Strömbegränsad utgång, bandbredds begränsande som ingång, utrymmeskrävande, klarar ej långa pulser med överspänning.
RC filter	Billig lösning, något bättre skydd än med enbart resistor då kondensatorn kan absorbera urladdningar.	Strömbegränsande som utgång, bandbredds begränsande som ingång, utrymmeskrävande, klarar ej långa pulser med överspänning.
Resistor + TVS	Dyr lösning, klarar långa pulser med överspänning	Utrymmeskrävande
IC-krets med flera kanaler som individuellt skyddas med TVS och resistor.	Kompakt lösning, ofta enkel parallell design på kretskortet, klarar långa pulser med överspänning	Ej lämplig om kanalerna som behöver skyddas är utspridda på kretskortet då det blir svårt att nyttja alla kanaler i kretsen.

Tabell 1: Jämförelse mellan olika skyddslösningar för GPIO portar

Då det främsta kravet på skyddslösning i detta fall är att lösningen behöver vara kompakt då det är många GPIO portar som behöver skyddas valdes IC kretsen TPD8F003 ut som skyddar 8 parallella anslutningar och är uppbyggd av både ESD diodes och resistorer i en kapsel.



**Skyddskretsar övriga gränssnitt**

De övriga anslutningarna (CAN, USB och Ethernet) är skyddande med speciella skyddskretsar som är anpassade för de spänningsnivåer och bandbredd som krävs för olika gränssnitt. Här behövde olika kretsar inte utvärderas på samma sätt som för anslutningarna till processorn då tillverkaren av de olika skyddskretsarna anger vilket gränssnitt de är avsedda för. Den avgörande faktorn var istället kostnaden för kretsarna.

**Skyddskrets matningsspänning**

Nätdelen är relativt tålig då spänningsregulatorn klarar upp till 60V. Utöver detta har en likriktarbrygga placerats direkt efter inkommande matningsspänning vilket gör det omöjligt att ansluta en spänningskälla med fel polaritet.

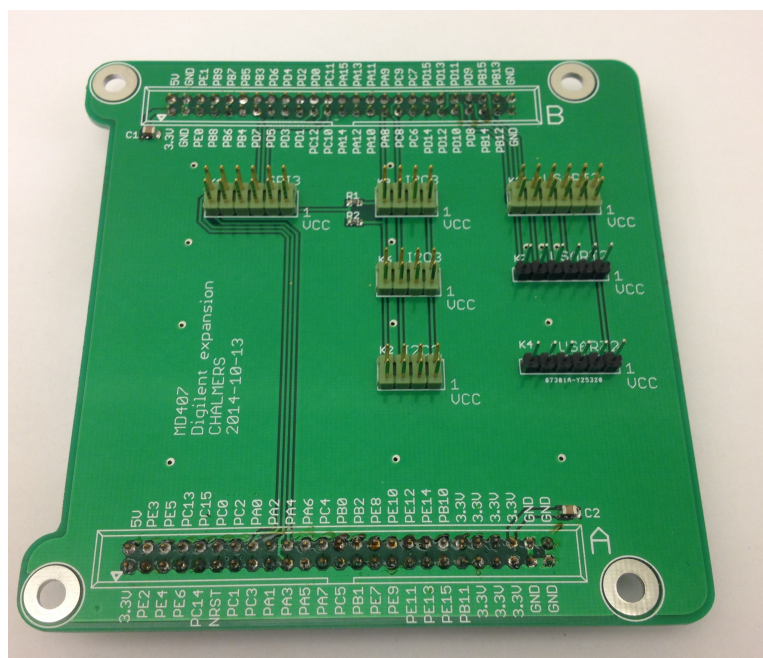
### 3.3 Expansionsmoduler

För expansion av plattformen med moduler anpassade för nya kurser eller projekt är samtliga in/utgångar från processorn tillgängliga via två stycken 50 pinnars kontaktdon. I kontakterna finns även 3.3V och 5V tillgängligt.

Plattformen har utformats på ett sätt som gör att samtliga knappar, kontaktdon är tillgängliga även om en expansionsmodul är ansluten.

För att förenkla processen med att ta fram nya expansionsmoduler har mallar med kontaktdon placerade på rätt positioner samt de yttre maximala måtten för modulen tagits fram. Målet är att successivt ta fram mallar till de större PCB CAD mjukvarorna och i detta projekt har exempelmallar för Eagle PCB, KiCad samt Altium tagits fram.

Som ett exempel på hur moduler kan se ut konstruerades en modul för att ansluta Digilent moduler till MD407.



Figur 1: Expansionsmodul för Digilent moduler

## 4 Uppföljning av kravspecifikation

I detta kapitel sker uppföljning i tabellform av de krav som är ställda i den bifogade kravspecifikationen (Bilaga C).

Krav	Uppfyllt?	Hur är kravet uppfyllt?
1.1	JA	Tydlig märkning av I/O pinnar
1.2	JA	Kommunikation möjlig genom bland annat CAN och USB
1.3	JA	Väldokumenterad konstruktion med tydligt elektriskt schema
2.1	JA	MD407 är baserad på ARM processorn STM32F407
2.2	JA	Kontakt med JTAG gränssnitt finns på kortet
2.3	JA	Möjligt via JTAG interface
2.1.1	JA	USB, Ethernet, USB-master, USB-host stöds
2.1.2	JA	Då det är möjligt att konfigurera vilka ben på processorn som de olika gränssnitten kan anslutas till går det att anpassa efter aktuella behov. Bilaga F visar hur gränssnitten har konfigurerats för att användas samtidigt utan konflikt.
2.2.1	JA	Två 50 portars IDC kontakter ger tillgång till alla ben på processor
2.2.2	JA	Fyra kontaktdon på sidan av kortet
2.3.1	JA	Grön lysdiod kopplad till matningspänningen
2.3.2	JA	Två lysdioder monterade och anslutna till processor
2.3.3	JA	Knapp ansluten till reset ingång på processor
2.3.4	Delvis	Stiftlist med tre lägen
3.1	JA	Konstruktion utförd utan att hänsyn till någon standard
3.2.1	JA	STM32F407 uppfyller minneskraven
3.3.1	JA	Alla kommunikationsgränssnitt tillgängliga via 50 portars IDC kontakter

Tabell 2: Tabell med uppföljning av kravspecifikation

Krav	Uppfyllt?	Hur är kravet uppfyllt?
3.3.2	JA	En 8MHz kristall är ansluten till ARM-processorn. Med hjälp av intern PLL i processorn kan klockfrekvensen justeras från 2MHz upp till 168MHz. Detta gör det möjligt att anpassa klockfrekvensen efter aktuellt behov och då samtidigt påverka EMI och strömförbrukning. Den externa kretsen som hanterar nätverkskommunikationen (DP83848) har en egen oscillator på 50MHz. Denna frekvens är ej valbar då kretsen behöver en 50MHz referenssignal för att hantera nätverkskommunikationen.
3.3.3	Delvis	Konstruktion efter rekommendationer i kretsars datablad, EMC ej testad
3.4.1	JA	Kortets yttre dimensioner är 160x100mm
3.5.1	JA	EMC ej uppmätt men konstruktion har utförts med EMC i åtanke
3.6.1	JA	Regulator klarar max 60V in och säkringar begränsar ström
3.6.2	JA	Helvågslikriktning på ingång
3.7.1	JA	ESD dioder på samtliga anslutningar
3.8.1	JA	Datablad för kretsar som används har studerats under designarbetet
3.9.1	JA	6st fästpunkter placerade på punkter med hård belastning
3.10.1	JA	Vid normalt drift i rumstemperatur är inga komponenter varma
3.11.1	NEJ	Framgår ej i det elektriska schemat men kommer att ingå i manualen

Tabell 3: Tabell med uppföljning av kravspecifikation

## 5 Diskussion och slutsatser

Syftet och målet med projektet var att utveckla tillverka en fungerande prototyp av MD407 enligt given kravspecifikation.

Utvecklingen har gått bra och samtliga punkter i kravspecifikationen är uppfyllda. Resultatet av arbetet är en prototyp som är tillverkad och redo att testas för att få återkoppling från användare samt verifiera att MD407 lämpar sig för de tilltänkta användningsområdena.

Tidig respons från anställda på Chalmers har varit positiv och initiala tester visar att MD407 bör fungera utmärkt för sitt syfte.

Arbetet med utvecklingen av MD407 påbörjades i Mars 2013 och följde till en början den ursprungliga tidsplanen. Underlag i form av schema och kretskortslayout var färdigställda i början av Maj månad och ett första prototyp kretskort samt komponenter beställdes. I slutet av Maj monterades och testades MD407 och de fel som upptäcktes korrigerades på kretskortet och i underlagen. Arbetet stannade sedan upp på grund av studieuppehåll innan rapportskrivningen hade påbörjats. Under ett uppehåll på ett år utfördes endast mindre uppdateringar på underlag samt beställning av 10 st färdiga kretskort för utvärdering på Chalmers.

När arbetet med att skriva rapport startade i Augusti 2014 gick det åt mycket tid för att sätta sig in i projektet igen och arbetet avbröts flertalet gånger vilket ledde till att det tog ytterligare ett år innan rapporten lämnades in. Upphållet mellan projekt och rapportskrivning var väldigt ineffektivt och innebar mycket extra arbete.

## 6 Fortsatt utveckling

När de enheter som beställdes i slutfasen av projektet har testas för att se att allt fungerar behöver återkoppling sammanställas för att utföra eventuella förändringar och tillägg innan fler enheter produceras. Dessa tester bör utföras av både studenter och föreläsare för att få nya synpunkter från en så bred grupp som möjligt.

När uppdatering av underlag har skett bör en förserie av kort tillverkas för att introducera MD407 på Chalmers i ett fåtal kurser för vidare utvärdering. Om MD407 visar sig fungera bra kan användningen av MD407 successivt ökas till fler kurser.

Det kommer att krävas mycket arbete med att ta fram laborationer och mjukvara för dessa men detta arbete är redan påbörjat.

Det långsiktiga målet är att undersöka möjligheten att låta fler skolor använda plattformen. En större volym av tillverkade kort skulle reducera kostnaden per enhet och göra samarbete kring laborationsunderlag mellan olika skolor möjligt.

Som en del av den fortsatta utvecklingen är förhoppningen att användare av plattformen själva tar fram expansionsmoduler till plattformen och gör dessa tillgängliga för övriga användare. Detta kommer innebära att moduler för många olika tillämpningar kommer finnas tillgängliga efter några år.

## 7 Bilagor

Följande bilagor är bifogade i slutet av rapporten:

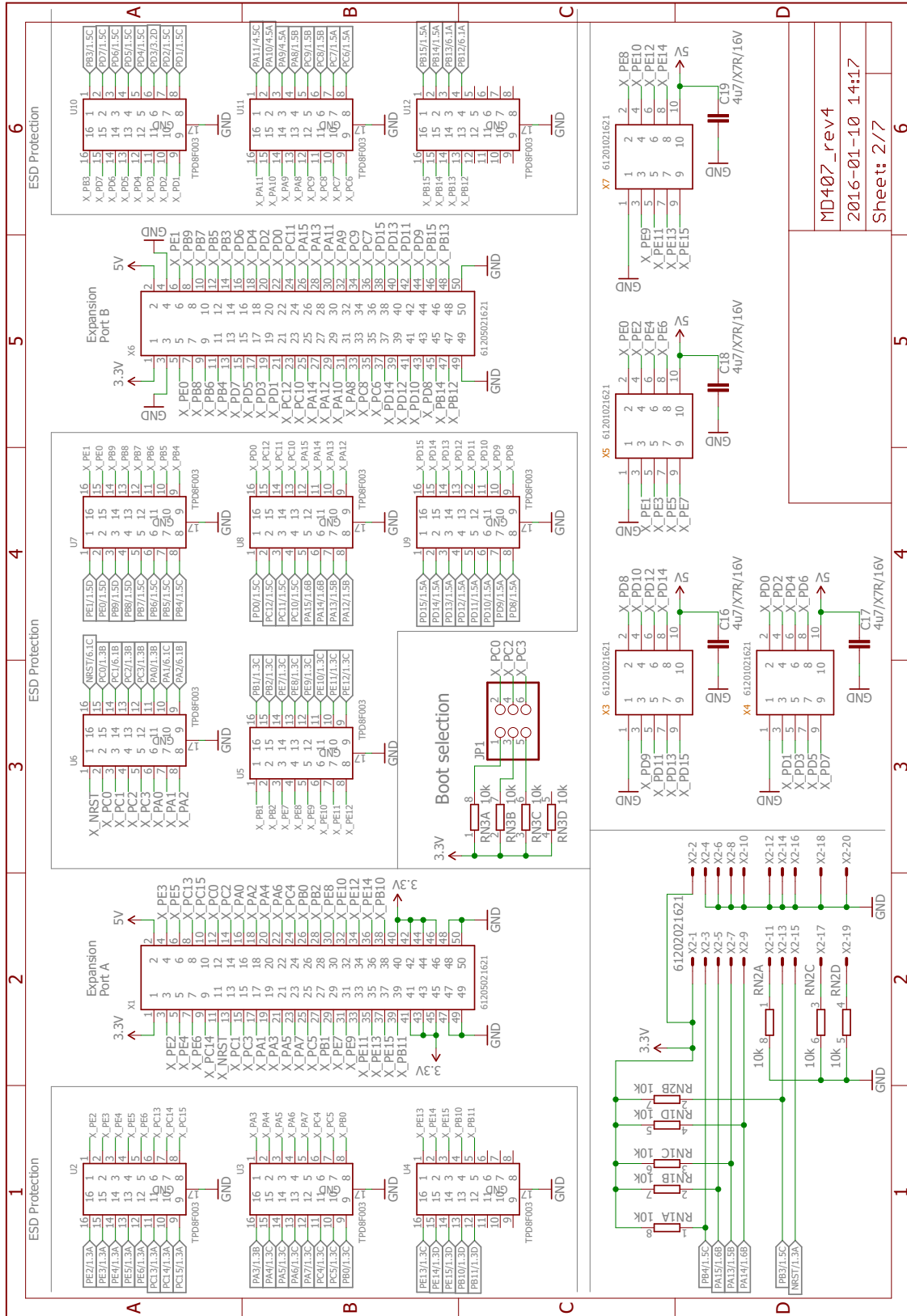
- A) Kretschema
- B) Komponentplacering
- C) Komponentlista
- D) Kravspecifikation
- E) Tidsplanering
- F) Planering av gränssnitt ansluta till processor

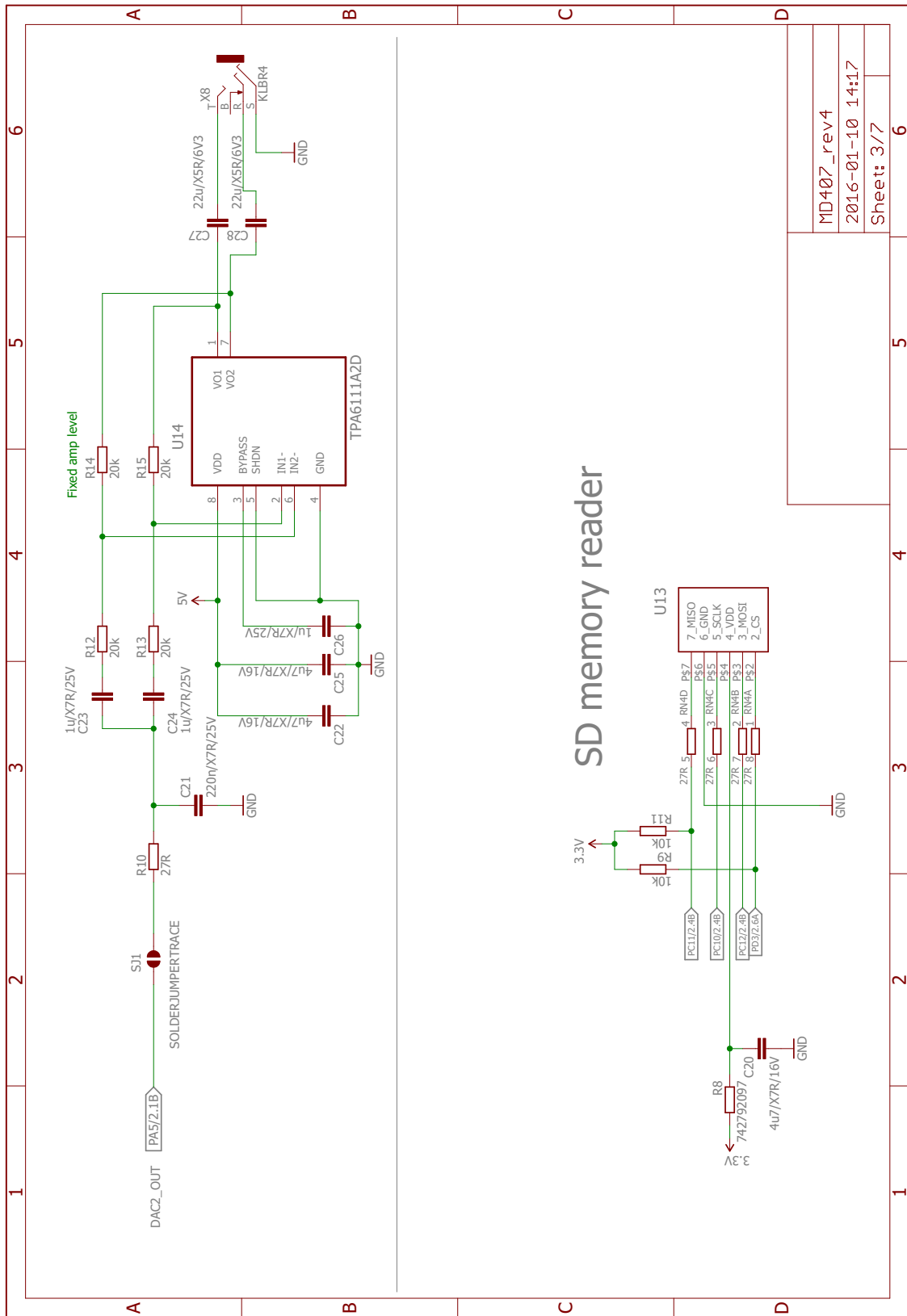
## Referenser

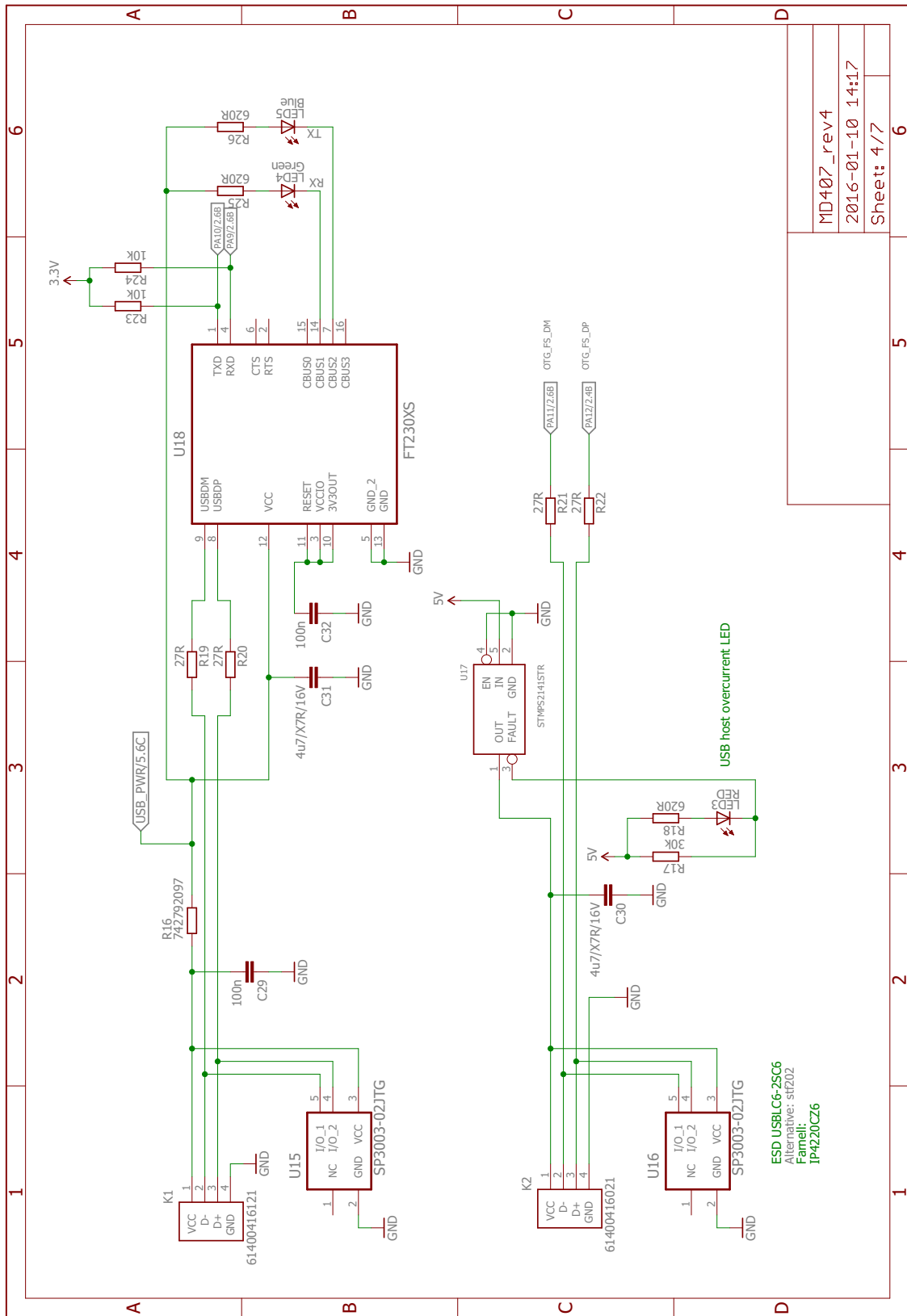
- [1] *Discovery kit for STM32F407*, STMicroelectronics, 01 2014, rev. 4. [Online]. Available: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/DM00039084.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf)
- [2] *STM3220G-EVAL evaluation board*, STMicroelectronics, 01 2012, rev. 5. [Online]. Available: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/DM00022972.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00022972.pdf)
- [3] *STM32F407 datasheet*, STMicroelectronics, 6 2013, rev. 4. [Online]. Available: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>
- [4] *Industry-Standard High-Speed CAN Transceivers with 80V Fault Protection*, Maxim Integrated, 2 2013, rev. 1. [Online]. Available: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX13050-MAX13054.pdf>
- [5] *Extreme Temperature Single Port 10/100 Mb/s Ethernet Physical Layer Transceiver*, Texas Instruments, 6 2012. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dp83848-ep.pdf>
- [6] *150-mW Stereo Headphone Audio Amplifier*, Texas Instruments, 6 2004, rev. 2. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpa6111a2.pdf>







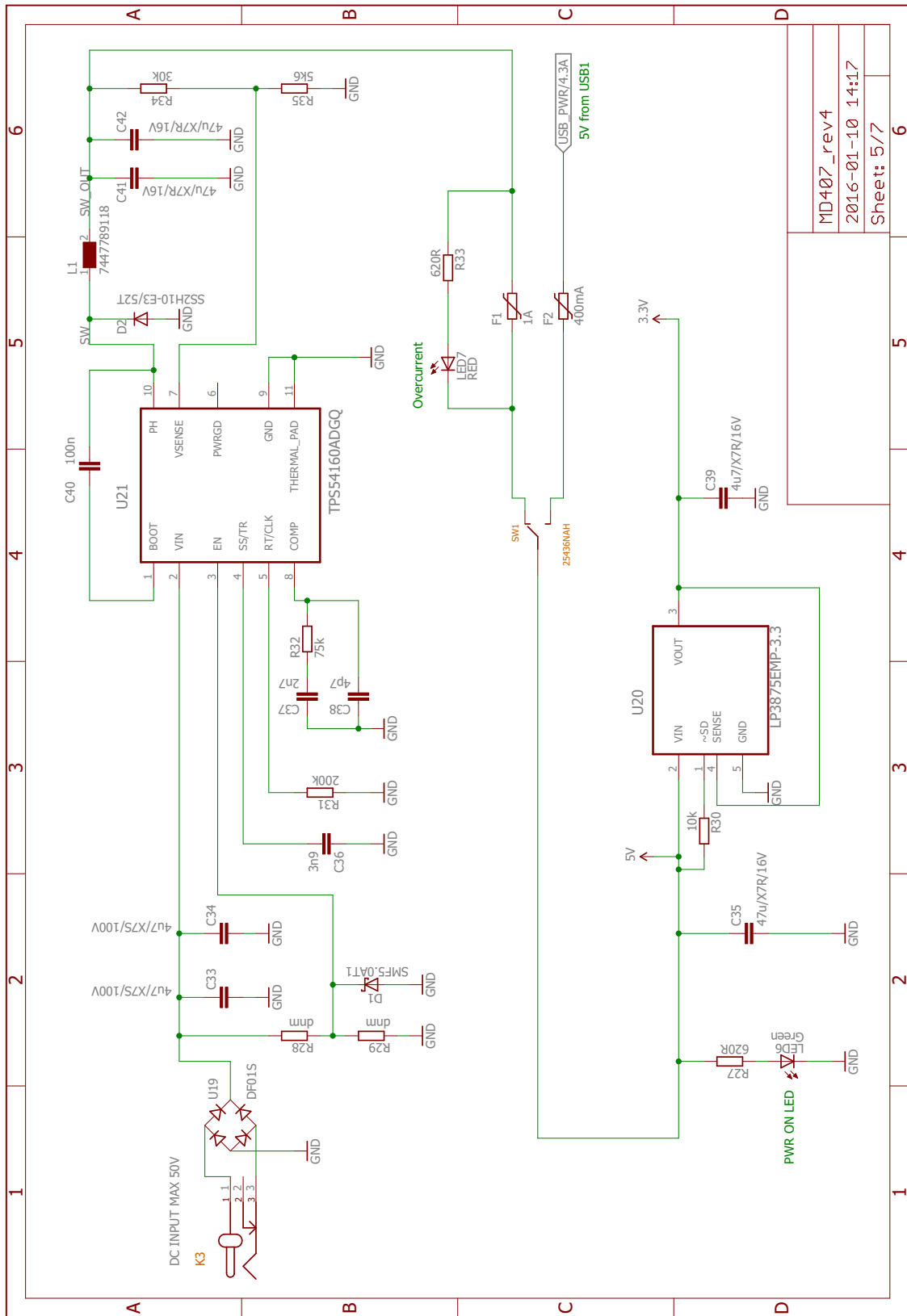


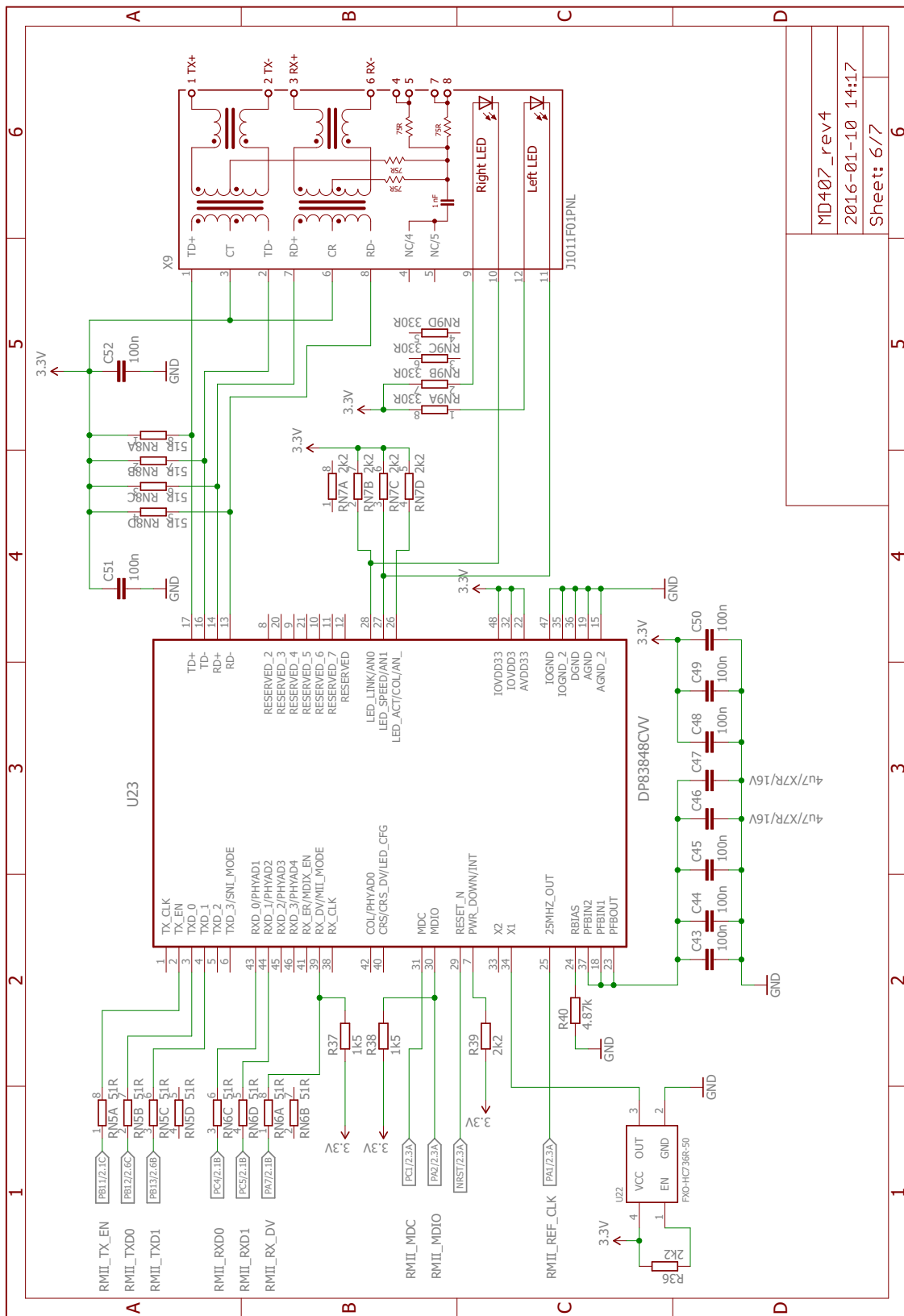


MD407\_rev4

2016-01-10 14:17

Sheet: 4/7

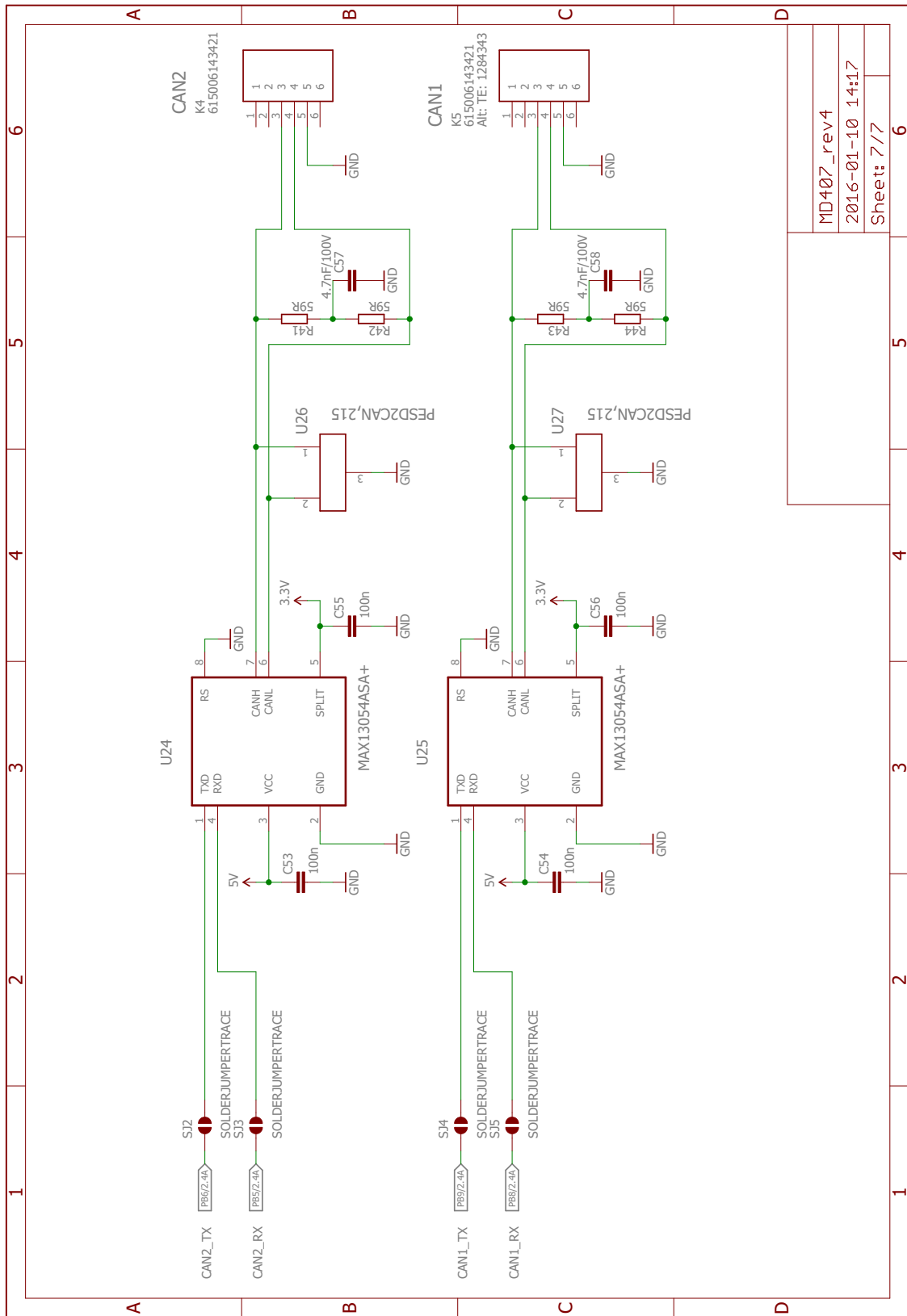




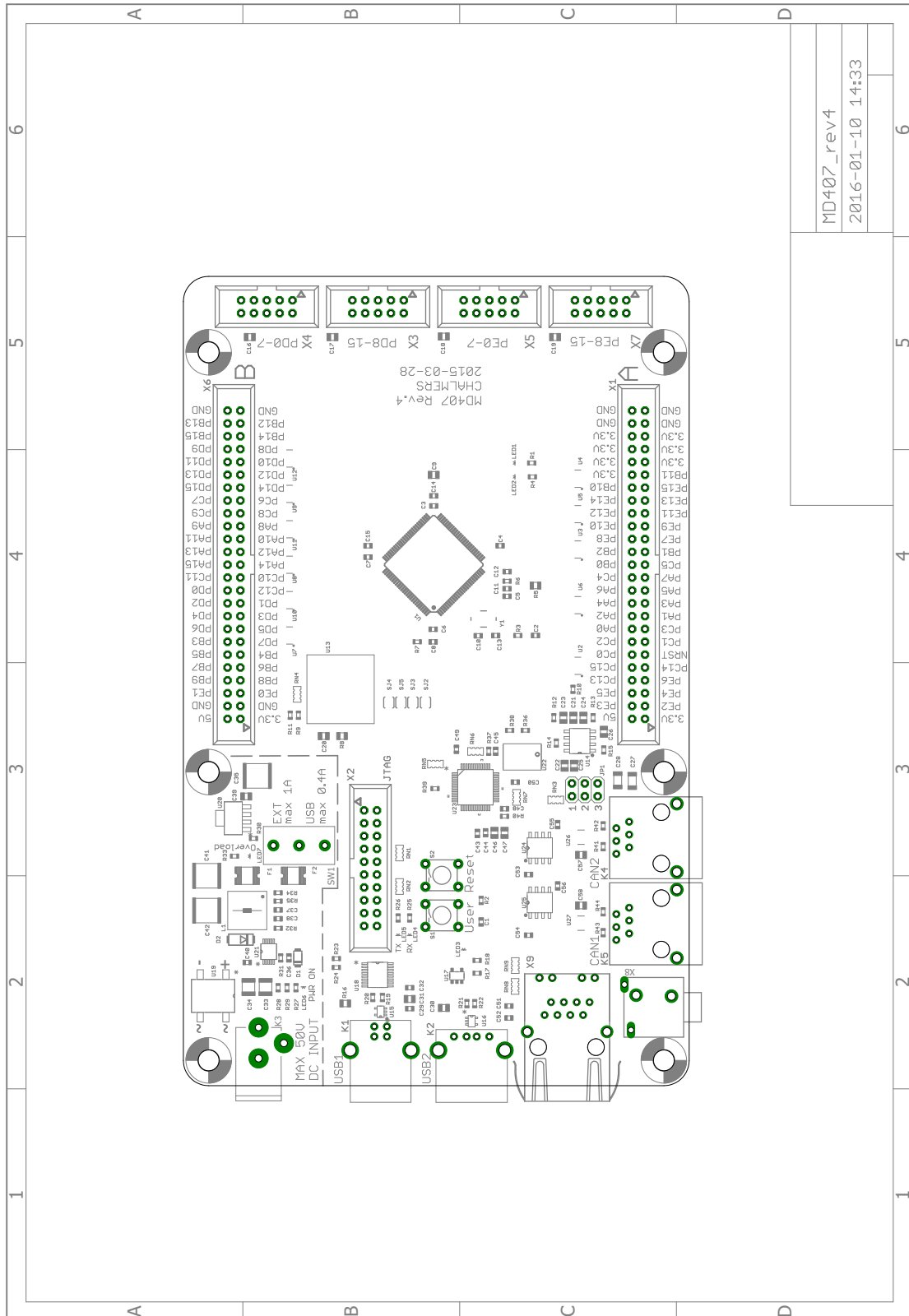
MD407\_rev4

2016-01-10 14:17

Sheet: 6/7



## B Komponentplacering



# C Komponentlista

MD407\_rev4

Qty	Value	Device	Package	Parts
1		PINHD-2X3	2X03	JP1
2	100R	R-EU_R0603	R0603	R1, R4
23	100m/X7R/50V	C-EUC0603	C0603	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C29, C32, C40, C43, C44, C45, C48, C49, C50, C51, C52, C53, C54, C55, C56
3	10k	4R-NCAY16	CAY16	RN1, RN2, RN3
7	10k	R-EU_R0603	R0603	R2, R3, R9, R11, R23, R24, R30
1	1A	1812L050PR	PTC1812L	F1
2	1k5	R-EU_R0603	R0603	R37, R38
3	1u/X7R/25V	C-EUC0805	C0805	C23, C24, C26
1	200k	R-EU_R0603	R0603	R31
4	20k	R-EU_R0603	R0603	R12, R13, R14, R15
1	220m/X7R/25V	C-EUC0805	C0805	C21
2	22p	C-EUC0603	C0603	C10, C13
2	22u/X5R/6V3	C-EUC1206	C1206	C27, C28
1	25436NAH	25436NAH	25436N	SW1
1	27R	4R-NCAY16	CAY16	RN4
5	27R	R-EU_R0603	R0603	R10, R19, R20, R21, R22
1	2k2	4R-NCAY16	CAY16	RN7
2	2k2	R-EU_R0603	R0603	R36, R39
1	2n7	C-EUC0603	C0603	C37
4	2u2/X5R/6V3	C-EUC0603	C0603	C11, C12, C14, C15
2	30k	R-EU_R0603	R0603	R17, R34
1	330R	4R-NCAY16	CAY16	RN9
1	3n9	C-EUC0603	C0603	C36
2	4.7nF/100V	C-EUC0805	C0805	C57, C58
1	4.87k	R-EU_R0603	R0603	R40
1	400mA	1812L020PR	PTC1812L	F2
3	47u/X7R/16V	C-EUC2220K	C2220K	C35, C41, C42
1	4p7	C-EUC0603	C0603	C38
13	4u7/X7R/16V	C-EUC0805	C0805	C9, C16, C17, C18, C19, C20, C22, C25, C30, C31, C39, C46, C47
2	4u7/X7S/100V	C-EUC1210	C1210	C33, C34
1	500901-0801	500901-0801	MICROSD_500901-0801	U13
3	51R	4R-NCAY16	CAY16	RN5, RN6, RN8
5	59R	R-EU_R0603	R0603	R6, R41, R42, R43, R44
1	5k6	R-EU_R0603	R0603	R35
4	61201021621	61201021621	057-010-1	X3, X4, X5, X7
1	61202021621	61202021621	057-020-1	X2

Page 1



MD407\_rev4

2	61205021621	61205021621	057-050-1	X1, X6
1	61400416021	61400416021	61400416021	K2
1	61400416121	61400416121	61400416121	K1
2	6,15006E+11	6,15006E+11	6,15006E+11	K4, K5
5	620R	R-EU R0603	R0603	R18, R25, R26, R27, R33
3	742792097	R-EU R0805	R0805	R5, R8, R16
1	7447789118	WE-PD-7447789118_73	WE-PD_7332/7345_PLASTIC_BAL1	
2	75k	R-EU R0603	R0603	R7, R32
1	8MHz	7B-8.000MAAJ-T	CRYSTAL-SMD-5X3	Y1
1	Blue	LED0603	LED-0603	LED5
1	DF01S	DF01S	SOT508P985X260-4N	U19
1	DP83848CVV	DP83848CVV	QFP50P900X900X160-48N	U23
1	FC681465P	FC681465P	DC-PLUG	K3
1	FIDUCIAL	FIDUCIAL	FIDUCIAL_1MM	U\$1, U\$2, U\$3
3	FT230XS	FT230XS	SOP63P600X175-16N	U18
1	FXO-HC736R-50	FXO-HC736R-50	CRYSTAL-SMD-7.5X5.2-6PIN	U22
3	Green	LED0603	LED-0603	LED2, LED4, LED6
1	J1011F01PNL	J1011F01PNL	J1	X9
1	KLBR4	KLBR4	KLBR4	X8
1	LP3875EMP-3.3	LP3875EMP-3.3	SOT15P696X180-5N	U20
2	MAX13054ASA+	MAX13054ASA+	SOIC127P600X175-8N	U24, U25
6	MOUNT-HOLE4.1	MOUNT-HOLE4.1	4.1	H1, H2, H3, H4, H5, H6
2	PESD2CAN,215	PESD2CAN,215	SOT23	U26, U27
3	RED	LED0603	LED-0603	LED1, LED3, LED7
2	SKQBARA010PTH	SKQBARA010PTH	TACTILE-PTH	S1, S2
1	SMF5.0AT1	SMF5.0AT1	SOD123FL	D1
2	SP3003-02JTG	SP3003-02JTG	SOT65P220X110-5N	U15, U16
1	SS2H10-E3/52T	DIODE-DO214AA	DO214AA	D2
1	STM32F407VGT7	STM32F407VGT7	LQFP100	U1
1	STMP52141STR	STMP52141STR	SOT23-5	U17
1	TPA6111A2D	TPA6111A2D	SOIC127P600X175-8N	U14
11	TPD8F003	TPD8F003	16-WFDFN	U2, U3, U4, U5, U6, U7, U8, U9, U10, U11, U12
1	TPSS54160ADGQ	TPS54160ADGQ	SOP50P490X110-11N	U21

Page 2

## D Kravspecifikation

Detta kapitel innehåller den officiella kravspecifikationen från Chalmers.

# Laborationsdator MD407, kravspecifikation

## 1 Generella krav, mål och syften

Laborationsdatorn MD407 är avsedd att användas i undervisning kring maskinorienterad programmering. Speciellt ska den stödja flera kommunikationsprotokoll och ha goda möjligheter till anslutning av olika in- och utmatningsenheter.

Laborationsdatorn ska kunna användas av en bred kategori med varierande bakgrund, från nybörjare till erfarna experter.

Krav 1.1:

**Kortet skall vara utformat för att underlätta elektriska mätningar.**

Krav 1.2:

**Det skall vara möjligt att inkludera flertalet MD407 enheter i en installation och låta dessa kommunicera med varandra genom ett eller flera protokoll.**

Krav 1.3:

**Dokumentation av hårdvara skall göras tillgänglig för samtliga projektdeltagare samt släppas som öppen hårdvara. Underlaget skall vara tillräckligt detaljerat för att möjliggöra reproduktion av den hårdvara som projektet resulterar i.**

## 2 Funktionella krav

Krav 2.1:

**MD407 skall vara baserad på en modern 32-bitars mikrokontroller, förslagsvis STM32F407.**

Krav 2.2:

**Ett JTAG gränssnitt skall vara tillgängligt på MD407 kortet. Det skall vara möjligt att programmera processorn med en standard PC genom att använda ett standard gränssnitt.**

Krav 2.3:

**MD407 skall stödja ISP programmering (dvs. Programmering av enheten utan att att avlägsna några elektriska komponenter)**

### 2.1 Kommunikationsgränssnitt

Krav 2.1.1:

**MD407 skall stödja följande kommunikationstandarder:**

**CAN, Ethernet, USB-master, USB-host.**

Krav 2.1.2:

**Det skall vara möjligt att samtidigt använda alla kommunikationsgränssnitt som är implementerade.**

### 2.2 I/O anslutningar

Krav 2.2.1:

**Samtliga I/O anslutningar på processorn skall vara tillgängliga genom expansionsportar.**

Krav 2.2.2:

**Fyra stycken kontaktdon med totalt 32 I/O är ett krav på kortet för bakåtkompabilitet med befintlig laborationsutrustning.**

## 2.3 Användargränssnitt

Krav 2.3.1:

**En lysdiod skall indikera att matninspänning är ansluten till MD407.**

Krav 2.3.2:

**Processorn på MD407 kortet skall med hjälp av lysdioder på kortet kunna användas för enklare felsökning och laborationer utan behöva ansluta extern mätutrustning.**

Krav 2.3.3:

**Det skall vara möjligt att utföra en reset av processorn utan att koppla ur matninspänningen till kortet.**

Krav 2.3.4:

**En stiftlist med plats för att placera en bygel på fyra olika positioner skall finnas på kortet. Dessa fyra lägen skall vara kopplade till ingångar på processorn och på så sätt göra det möjligt att ge indata till denna.**

### 3 Icke-funktionella krav

#### 3.1 Standard

**Ingen specifik standard måste beaktas under designen av kortet.**

#### 3.2 Programvarukrav

Krav 3.2.1:

**Den utvalda processorn skall minst uppfylla följande krav:**

- **-512 KB non-volatile program-memory**
- **-192 KB volatile data memory**

#### 3.3 Hårdvarukrav

Krav 3.3.1:

**Samtliga ej använda kommunikationsgränssnitt på processorn skall vara tillgängliga på generella I/O portar. Dessa kan behöva externa kretsar för att fungera.**

Krav 3.3.2:

**Utvald klockfrekvens för processorn skall inte vara högre än vad som anses vara nödvändigt för tilltänkta användningsområden. Detta för att minska EMI påverkan och strömförbrukningen.**

Krav 3.3.3:

**MD407 kortet skall vara designat för att uppfylla grundläggande krav för elektrisk säkerhet och EMI dämpning.**

#### 3.4 Mekaniska dimensioner

Krav 3.4.1:

**De yttre dimensionerna på kortet skall följa standard för Europakort.**

#### 3.5 Elektromagnetisk kompatibilitet

Krav 3.5.1:

**Det finns inga specifika krav för elektromagnetisk kompatibilitet förutom att kortet måste uppfylla grundläggande krav i EMC direktivet för att kunna CE märka produkten.**

#### 3.6 Elektrisk last

Nät-del

Krav 3.6.1:

**Nät-delen skall vara konstruerad för inspänning mellan 12VDC till 48VDC. Säkring skall begränsa den totala ström användningen till 500mA.**

Krav 3.6.2:

**MD407 ska hantera polvändning av matningsspänning på kontakten till nätdelen.**

### 3.7 I/O gränssnitt

Krav 3.7.1:

**Samtliga I/O anslutningar skall vara ESD skyddade.**

### 3.8 Kommunikations kretsar

Krav 3.8.1:

**Kommunikationskretsar på kortet skall vara implementerade enligt tillverkarens rekommendationer. Inga specifika krav är specificerade för dessa kretsar.**

### 3.9 Mekanisk påverkan

Krav 3.9.1:

**Konstruktionen skall vara tillräckligt mekanisk robust för att användas i dess tilltänkta labratoriemiljö.**

### 3.10 Klimatpåverkan

Krav 3.10.1:

**MD407 skall vara designad för att användas i normal rumstemperatur (23 °C) med normal luftfuktighet.**

### 3.11 Kemisk påverkan

Krav 3.11.1:

**MD407 skall ej användas eller förvaras i en miljö som innehåller någon form av skadliga kemikalier som kan påverka kortet eller dess funktionalitet. Detta skall framgå tydligt i dokumentationen för slutanvändare.**

## Appendix 2

Översikt av kravspecifikation med uppskattning av hur viktigt det är att uppfylla de olika kraven samt relevansen av att verifiera att de olika kraven är uppfyllda.

V – Väldigt relevant, M – Medium relevant, E – Ej relevant

*Table 3 – Kravspecifikation översikt*

Subject	Krav ref.	MD407 design	MD407 Verifikation
Generella krav	1.1	V	V
"	1.2	V	V
"	1.3	V	M
Funktionella krav	2.1	V	V
"	2.2	V	V
"	2.3	V	V
"	2.1.1	V	V
"	2.1.2	M	M
"	2.2.1	V	V
"	2.2.2	V	V
"	2.3.1	V	V
"	2.3.2	V	V
"	2.3.3	V	V
"	2.3.4	V	V
Icke funktionella krav	3.1	M	E
"	3.2	V	V
"	3.3.1	V	V
"	3.3.2	V	V
"	3.3.3	V	N
"	3.4.1	V	V
"	3.5.1	V	N
Elektrisk last	3.6.1	V	V
"	3.6.2	V	V
I/O gränssnitt	3.7.1	V	V
Kommunikationskretsar	3.8.1	V	M
Mekanisk påverkan	3.9.1	V	M
Klimatpåverkan	3.10.1	V	N
Kemisk påverkan	3.11.1	M	M



## E Tidsplanering

Innan projektet påbörjades upprättades en tidsplan enligt följande:

Månad (2013)	Vecka	Planerade mål
Mars	1	Genomgång kravspecifikation och förstudier.
	2	Fortsatt förstudie, sammanställning av lämpliga lösningar samt diskussion med handledare.
	3	Val av komponenter och planering över hur de olika gränsnitten skall anslutas till ARM-processor.
	4	Struktur för kretschemat samt påbörja kretschemat.
April	1	Fortsatt schemaritning
	2	Genomgång och kontroll av schema för att verifiera att kravspecifikation kan uppfyllas med konstruktionen.
	3	Genomgång av datablad för de olika kretsarna för att kunna ansluta dem och deras krinkomponenter så optimalt det går. Skapa footprints för komponenterna som ska monteras på kretskortet.
	4	Kretskorts CAD
Maj	1	Kretskorts CAD och genomgång av design med handledare
	2	Generering av underlag för beställning av kretskort och komponenter för beställning av första prototyp kretskortet
	3	Montering av kretskort samt funktionstest av hårdvara som ej programmeras
	4	Buggfixar samt funktionstest av de olika gränsnitten på kortet med hjälp av mjukvara från tillverkaren av ARM-processor.
Juni	1	Rapportskrivning
	2	Rapportskrivning
	3	Rapportskrivning samt förberedelser inför muntlig presentation.

# F Planering av gränsnitt ansluta till processor

STM32F405xx, STM32F407xx

Pinouts and pin description

Table 9. Alternate function mapping

Port	AF0	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF8	AF9	AF10	AF11	AF12	AF13	AF14	AF15
	SYS	TIM1/2	TIM3/4/5	TIM8/9/10/11	I2C1/2/3	SPI1/SPI2/I2S2/I2S4ext	SPI3/I2S3ext/I2S3	USART1/2/3/I2S3ext	USART4/5/USART6	CAN1/2/TIM12/13/14	OTG_FS/OTG_HS	ETH	FSMC/SDIO/OTG_FS	DCMI		
PA0		TIM2_CH1L_ETR	TIM5_CH1	TIM8_ETR				USART2_CTS	USART4_TX			ETH_MII CRS				EVENTOUT
PA1		TIM2_CH2	TIM5_CH2					USART2_RTS	USART4_RX			ETH_MII RX_CLK ETH_MII_TX_CLK ETH_MII_RX_DV				EVENTOUT
PA2		TIM2_CH3	TIM5_CH3	TIM8_CH1				USART2_TX				ETH_MDIO				EVENTOUT
PA3		TIM2_CH4	TIM5_CH4	TIM8_CH2				USART2_RX			OTG_HS_ULPI_LDO	ETH_MII_COL				EVENTOUT
PA4						SPI1_NSS	SPI3_NSS/I2S1_WS	USART2_CK			OTG_HS_ULPI_CK		OTG_HS_SOF	DCMI_HSYN_C		EVENTOUT
PA5		TIM2_CH1L_ETR		TIM8_CH1N		SPI1_SCK										EVENTOUT
PA6		TIM1_BKIN	TIM3_CH1	TIM8_BKIN		SPI1_MISO				TIM13_CH1				DCMI_PIXCK		EVENTOUT
PA7		TIM1_CH1N	TIM3_CH2	TIM8_CH1N		SPI1_MOSI				TIM14_CH1		ETH_MII RX_DV ETH_RMII CRS_DV				EVENTOUT
PA8	MC01	TIM1_CH1			I2C3_SCL			USART1_CK			OTG_FS_SOF					EVENTOUT
PA9		TIM1_CH2			I2C3_SMB_A			USART1_TX					DCMI_D0			EVENTOUT
PA10		TIM1_CH3						USART1_RX			OTG_FS_ID		DCMI_D1			EVENTOUT
PA11		TIM1_CH4						USART1_CTS		CAN1_RX	OTG_FS_DM					EVENTOUT
PA12		TIM1_ETR						USART1_RTS		CAN1_TX	OTG_FS_DP					EVENTOUT
PA13	JTMS: SWDIO															EVENTOUT
PA14	JTCK: SWCLK															EVENTOUT
PA15	JTDI	TIM2_CH1 TIM2_ETR				SPI1_NSS	SPI3_NSS/I2S1_WS									EVENTOUT

## Pinouts and pin description

## STM32F405xx, STM32F407xx

Table 9. Alternate function mapping (continued)

Port	AF0	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF8	AF9	AF10	AF11	AF12	AF13	AF14	AF15
	SYS	TIM1/2	TIM3/4/5	TIM8/9/10/11	I2C1/I23	SP1/SP12/I2S2/I2S2ext	SP13/I2S3ext/I2S3	USART1/I23/I2S3ext	UART4/5/USART6	CAN1/2/TIM12/13/14	OTG_HS_ULPL_D1 OTG_HS_ULPL_D2	ETH	FSMC/SDIO/OTG_FS	DCMI		
PB0		TIM1_CH2N	TIM3_CH3	TIM8_CH3N							OTG_HS_ULPL_D1	ETH_MII_RXD2				EVENTOUT
PB1		TIM1_CH3N	TIM3_CH4	TIM8_CH3N							OTG_HS_ULPL_D2	ETH_MII_RXD3				EVENTOUT
PB2																EVENTOUT
PB3	JTDO/TRACESWO	TIM2_CH2				SP11_SCK	SP13_SCK/I2S3_CK									EVENTOUT
PB4	NJTRST		TIM3_CH1			SP11_MISO	SP10_MISO/I2S3ext_SD									EVENTOUT
PB5			TIM3_CH2		I2C1_SMB_A	SP10_MOSI/I2S3_SD				CAN2_RX	OTG_HS_ULPL_D7	ETH_PFS_OUT		DCMI_D10		EVENTOUT
PB6			TIM4_CH1		I2C1_SCL			USART1_TX		CAN2_TX				DCMI_D5		EVENTOUT
PB7			TIM4_CH2		I2C1_SDA			USART1_RX					FSMC_NL	DCMI_VSYN_C		EVENTOUT
PB8			TIM4_CH3	TIM10_CH1	I2C1_SCL					CAN1_RX		ETH_MII_TXD3	SDIO_D4	DCMI_D6		EVENTOUT
PB9			TIM4_CH4	TIM11_CH1	I2C1_SDA	SP2_NSS/I2S2_WS				CAN1_TX			SDIO_D5	DCMI_D7		EVENTOUT
PB10		TIM2_CH3			I2C2_SCL	SP2_SCK/I2S2_CK		USART3_TX			OTG_HS_ULPL_D3	ETH_MII_RX_ER				EVENTOUT
PB11		TIM2_CH4			I2C2_SDA			USART3_RX			OTG_HS_ULPL_D4	ETH_MII_TX_EN				EVENTOUT
PB12		TIM1_BKIN			I2C2_SMB_A	SP2_NSS/I2S2_WS		USART3_CK		CAN2_RX	OTG_HS_ULPL_D5	ETH_MII_TXD0	OTG_HS_ID			EVENTOUT
PB13		TIM1_CH1N				SP2_SCK/I2S2_CK		USART3_CTS		CAN2_TX	OTG_HS_ULPL_D6	ETH_MII_TXD1				EVENTOUT
PB14		TIM1_CH2N		TIM8_CH2N		SP12_MISO/I2S2_SD		USART3_RTS		TIM12_CH1		ETH_RMII_TXD0	OTG_HS_DM			EVENTOUT
PB15	RTC_REFIN	TIM1_CH3N		TIM8_CH3N		SP12_MOSI/I2S2_SD				TIM12_CH2			OTG_HS_DP			EVENTOUT

## STM32F405xx, STM32F407xx

## Pinouts and pin description

Table 9. Alternate function mapping (continued)

Port	AF0	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF8	AF9	AF10	AF11	AF12	AF13	AF14	AF15
	SYS	TIM1/2	TIM3/4/5	TIM8/9/10/11	I2C1/I23	SPI1/SPI2/I2S2/I2S2ext	SPI3/I2Sext/I2S3	USART1/2/3/I2S3ext	UART4/5/USART6	CAN1/2/TIM12/13/14	OTG_HS_ULP_L DIR	ETH	FSMC/SDIO/OTG_FS	DCMI		
PC0											OTG_HS_ULP_L STP					EVENTOUT
PC1												ETH_MDC				EVENTOUT
PC2						SPI2_MISO	I2S2ext_SD				OTG_HS_ULP_L DIR	ETH_MII_TXD2				EVENTOUT
PC3						SPI2_MOSI/I2S2_SD					OTG_HS_ULP_L NWT	ETH_MII_TX_CLK				EVENTOUT
PC4												ETH_MII_RXD0				EVENTOUT
PC5												ETH_RMII_RXD0				EVENTOUT
												ETH_RMII_RXD1				EVENTOUT
PC6			TIM3_CH1	TIM8_CH1		I2S2_MCK			USART6_TX				SDIO_D6	DCMI_D0		EVENTOUT
PC7			TIM3_CH2	TIM8_CH2			I2S3_MCK		USART6_RX				SDIO_D7	DCMI_D1		EVENTOUT
PC8			TIM3_CH3	TIM8_CH3					USART6_CK				SDIO_D0	DCMI_D2		EVENTOUT
PC9	MC02		TIM3_CH4	TIM8_CH4	I2C3_SDA	I2S_LCKIN							SDIO_D1	DCMI_D3		EVENTOUT
PC10							SPI3_SCK/I2S3_CK		USART3_TX/				SDIO_D2	DCMI_D8		EVENTOUT
PC11						I2S3ext_SD	SPI3_MISO		USART3_RX				SDIO_D3	DCMI_D4		EVENTOUT
PC12							SPI3_MOSI/I2S3_SD		USART3_CK				SDIO_CK	DCMI_D9		EVENTOUT
PC13																EVENTOUT
PC14																EVENTOUT
PC15																EVENTOUT

Port C

## Pinouts and pin description

## STM32F405xx, STM32F407xx

Table 9. Alternate function mapping (continued)

Port	AF0	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF8	AF9	AF10	AF11	AF12	AF13	AF14	AF15
	SYS	TIM1/2	TIM3/4/5	TIM8/9/10/11	I2C1/2/3	SPI1/SPI2/I2S2/I2S2ext	SPI3/I2S3ext/I2S3	USART1/2/3/I2S3ext	UART4/5/USART6	CAN1/2/TIM12/13/14	OTG_FS/OTG_HS	ETH	FSMC/SDIO/OTG_FS	DCMI		
PD0										CAN1_RX			FSMC_D2			EVENTOUT
PD1										CAN1_TX			FSMC_D3			EVENTOUT
PD2			TIM8_ETR						UART6_RX				SDIO_CMD	DCMI_D11		EVENTOUT
PD3								USART2_CTS					FSMC_CLK			EVENTOUT
PD4								USART2_RTS					FSMC_NOE			EVENTOUT
PD5								USART2_TX					FSMC_NWE			EVENTOUT
PD6								USART2_RX					FSMC_NWAIT			EVENTOUT
PD7								USART2_OK					FSMC_NE1/FSMC_NCE2			EVENTOUT
PD8								USART3_TX					FSMC_D13			EVENTOUT
PD9								USART3_RX					FSMC_D14			EVENTOUT
PD10								USART3_OK					FSMC_D15			EVENTOUT
PD11								USART3_CTS					FSMC_A16			EVENTOUT
PD12			TIM4_CH1					USART3_RTS					FSMC_A17			EVENTOUT
PD13			TIM4_CH2										FSMC_A18			EVENTOUT
PD14			TIM4_CH3										FSMC_D0			EVENTOUT
PD15			TIM4_CH4										FSMC_D1			EVENTOUT

## STM32F405xx, STM32F407xx

## Pinouts and pin description

Table 9. Alternate function mapping (continued)

Port	AF0	AF1	AF2	AF3	AF4	AF5	AF6	AF7	AF8	AF9	AF10	AF11	AF12	AF13	AF14	AF15
	SYS	TIM1/2	TIM3/4/5	TIM8/9/10/11	I2C1/2/3	SPI1/SPI2/I2S2/I2S2ext	SPI3/I2S3ext/I2S3	USART1/2/3/I2S3ext	UART4/5/USART6	CAN1/2/TIM12/13/14	OTG_FS/OTG_HS	ETH	FSMC/SDIO/OTG_FS	DCMI		
PE0	-	-	TIM4_ETR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_NBL0	DCMI_D2	-	EVENTOUT
PE1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_NBL1	DCMI_D3	-	EVENTOUT
PE2	TRACECLK	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ETH_MII_TXD3	FSMC_A23	-	-	EVENTOUT
PE3	TRACED0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_A19	-	-	EVENTOUT
PE4	TRACED1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_A20	DCMI_D4	-	EVENTOUT
PE5	TRACED2	-	-	TIM9_CH1	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_A21	DCMI_D6	-	EVENTOUT
PE6	TRACED3	-	-	TIM9_CH2	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_A22	DCMI_D7	-	EVENTOUT
PE7	-	TIM4_ETR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D4	-	-	EVENTOUT
PE8	-	TIM1_CH1N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D5	-	-	EVENTOUT
PE9	-	TIM1_CH1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D6	-	-	EVENTOUT
PE10	-	TIM1_CH2N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D7	-	-	EVENTOUT
PE11	-	TIM1_CH2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D8	-	-	EVENTOUT
PE12	-	TIM1_CH3N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D9	-	-	EVENTOUT
PE13	-	TIM1_CH3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D10	-	-	EVENTOUT
PE14	-	TIM1_CH4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D11	-	-	EVENTOUT
PE15	-	TIM1_BKIN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	FSMC_D12	-	-	EVENTOUT