



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Firemní řídicí mikroprocesorová deska se SAM4

Control board with a microprocessor SAM4

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, Multimédia a Elektronika
Studijní obor: Komunikační systémy

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Skalický, CSc

Bc. Jiří Melichar

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jiří Melichar**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Obor: Komunikační systémy

Název tématu: **Firemní řídicí mikroprocesorová deska se SAM4**

Pokyny pro vypracování:

Navrhňte a zrealizujte univerzální modul mikroprocesorové desky s procesorem Cortex M4 typ ATSAM4E16EA pro vývoj a realizaci firemních aplikací. Desku vybavte nezbytnými periferiemi potřebnými pro firemní aplikace. Vytvořte základní programové vybavení BootLoader umožňující inicializaci procesoru, paměť, komunikace, čtení a zápis do všech použitých pamětí, komunikaci s DebugMonitorem na počítači PC a vlastní nahrání a spuštění aplikace. Vytvořte potřebné podpůrné knihovny pro periferie nutné k vývoji firemních aplikací, případně testovací programy pro ověření funkčnosti vývojové desky.

Seznam odborné literatury:

[1] ARM ® Processors [online], Atmel. Dostupné z:

<http://www.atmel.com/devices/SAM4E16E.aspx?tab=documents>

[2] Skalický, Petr. Přístrojové aplikace mikropočítačů. Praha: Vydavatelství ČVUT 2004, skripta

Vedoucí: doc. Petr Skalický Ing., CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017

L.S.

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 2. 2016

Abstrakt

Procesory ARM jsou dnes jedny z nejpoužívanějších procesorů v oblasti číslicových systémů. Obsahem předložené diplomové práce je návrh univerzální řídicí jednotky pro použití v průmyslové automatizaci, která disponuje dostatečným počtem analogových a digitálních vstupů a výstupů. V teoretické části práce je stručně popsána architektura ARM a jádro Cortex-M4, které tvoří základ mikrokontroléru ATSAM4E16E. V další kapitole je zmíněna sběrnice XBus, což je vlastní řešení firmy ConTeK spol. s.r.o. V závěru teoretické části jsou uvedeny požadavky na řídicí jednotky, které je doporučeno při návrhu jednotky dodržovat. Předmětem praktické části diplomové práce je návrh a následná hardwarová realizace řídicí desky s mikrokontrolérem ATSAM4E16E. V dílčích kapitolách jsou rozepsány jednotlivé bloky tvořící řídicí modul. V poslední kapitole je popsáno softwarové řešení. Byl vytvořen prototyp univerzální řídicího modulu, který splňuje veškeré požadavky dané zadáním.

Klíčová slova: ARM, Cortex-M4, ATSAM4E16E, řídicí jednotka

Abstract

ARM processors are one of the most used processors in digital systems nowadays. The content of this diploma thesis is to design a universal control board for use in industrial automation which has a sufficient number of analog and digital inputs and outputs. The theoretical part briefly describes the architecture of ARM and core Cortex-M4, which forms the basis of microcontroller ATSAM4E16E. Next chapter mentions XBus, which is a custom solution developed by ConTeK Ltd. In conclusion of the theoretical part are listed requirements for the control unit, which are recommended to follow when designing a unit. The subject of the practical part of the thesis is the design and subsequent hardware realization of control board including microcontroller ATSAM4E16E. There are described individual blocks forming control unit in particular chapters. The last chapter describes the software design. A prototype of the universal control unit was made, which fulfill all the requirements set by the task.

Key words: ARM, Cortex-M4, ATSAM4E16E, control unit

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Petru Skalickému, CSc. za odborné rady při konzultacích a čas, který mi věnoval. Dále bych rád poděkoval firmě ConTeK spol. s r.o. za možnost realizace zajímavého tématu. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, přátelům a partnerce za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

1	Úvod	10
1.1	Požadavky na řešení	11
2	Mikrokontroléry řady SAM4.....	12
2.1	Architektura ARM.....	12
2.2	Jádro Cortex-M4.....	14
2.3	Mikrokontrolér ATSAM4E16E.....	15
3	Sběrnice XBus	16
4	Požadavky na řídicí jednotky	17
5	HW realizace řídicí desky.....	18
5.1	Rozbor zadání	18
5.2	Zapojení mikrokontroléru ATSAM4E16E.....	19
5.2.1	Rozhraní JTAG.....	21
5.3	Sériová linka RS-232.....	22
5.4	Externí paměti	22
5.5	Obvod RTC	23
5.6	Digitální vstupy a výstupy.....	24
5.6.1	Digitální vstupy	24
5.6.2	Digitální výstupy	25
5.6.3	Rozhraní EBI.....	27
5.7	Připojení sběrnice XBus	29
5.8	Analogové vstupy	29
5.9	Analogové výstupy	32
5.10	Zdroje napětí.....	34
5.10.1	Spínaný zdroj 5 V	34
5.10.2	Spínaný zdroj 3,3 V	37
5.10.3	Zdroj ±12 V	39
5.11	Sběrnice CAN.....	39
5.12	Sběrnice RS-485/RS-422.....	40
5.13	Fyzická vrstva rozhraní Ethernet.....	42
5.14	Zapojení časovačů/čítačů.....	44
6	SW řešení.....	46
6.1	Bootloader	46
6.2	Implementace knihoven.....	46
7	Závěr.....	48
	Literatura:	49

Seznam obrázků

- obr. 1: Přehled architektur ARM a použitých technologií
- obr. 2: Blokové schéma jádra Cortex – M4
- obr. 3: Zapojení konektoru PSL34 sběrnice XBus
- obr. 4: Požadované rozměry řídicí jednotky
- obr. 5: Blokové schéma řídicí jednotky
- obr. 6: Schéma zapojení mikrokontroléru ATSAM4E16E
- obr. 7: Schéma zapojení konektoru JTAG
- obr. 8: Schéma zapojení komunikace RS-232
- obr. 9: Schéma zapojení obvodu RTC
- obr. 10: Schéma zapojení digitálních vstupů
- obr. 11: Vnitřní struktura obvodu VN808CM-E
- obr. 12: Blokové schéma připojení pomocí EBI
- obr. 13: Schéma zapojení analogových vstupů
- obr. 14: Schéma zapojení analogových výstupů
- obr. 15: Schéma zapojení vstupního filtru a ochrany pro zdroje napětí
- obr. 16: Schéma zapojení spínaného zdroje 5V
- obr. 17: Schéma zapojení spínaného zdroje 3,3 V
- obr. 18: Schéma zapojení zdroje ± 12 V
- obr. 19: Schéma zapojení sběrnice CAN
- obr. 20: Schéma zapojení sběrnice RS-485/RS-422
- obr. 21: Schéma zapojení sloučení signálů COM3 a RS-485
- obr. 22: Schéma zapojení obvodu KSZ8081MNX
- obr. 23: Schéma zapojení konektoru RJ45
- obr. 24: Schéma zapojení časovačů
- obr. 25: Ukázka programu IOTest

Seznam tabulek

Tab. 1: Pravdivostní tabulka přístupu k digitálním výstupům a vstupům

Tab. 2: Volitelné rozsahy analogových vstupů

Tab. 3: Volitelné rozsahy analogových výstupů

1 Úvod

V posledních desetiletích dochází ke stále rychlejšímu rozvoji elektrotechniky a číslicových systémů, které pronikají do všech oblastí lidské činnosti. Jejich hlavní výhodou oproti analogovým systémům je jejich časová a teplotní stálost a daleko větší odolnost proti rušícím signálům. Při použití programovatelných číslicových součástek máme možnost modifikovat zapojení systému, rozšiřovat jeho funkce a využívat jeden hardware, bez nutnosti změny vlastního zapojení na plošném spoji, pro mnoho různých aplikací. Rozvoj výrobních technologií snižuje pořizovací náklady na součástky a díky tomu se číslicové obvody prosazují nejen ve všech oblastech našeho běžného života, ale i v oblastech výroby a zpracování signálu.

Jádrem každého složitějšího číslicového systému je procesor. Stále rostoucí požadavky na rychlost a komplexnost systému nutí výrobce k vývoji stále výkonnějších procesorů s mnoha perifériemi potřebnými pro různé aplikace spotřební elektroniky i pro průmyslové řídicí a měřicí systémy. Mezi perspektivní a v aplikacích se stále více prosazující procesory patří 32-bitové procesory ARM.

Cílem této práce je navrhnout univerzální řídicí jednotku pro použití v průmyslové automatizaci, která vyhoví nejen současným, ale i potřebám v horizontu několika budoucích let. Jednotka by měla disponovat dostatečným počtem analogových a digitálních vstupů a výstupů, splňujících platné normy pro průmyslová rozhraní. Měla by být vybavena sběrníkovým rozhraním pro připojení rozšiřujících jednotek, potřebných pro řízení specializovaných zařízení. Řídicí systém musí být vybaven obvykle používanými komunikačními perifériemi v průmyslových aplikacích a rozhraním Ethernet pro možný dálkový přístup a modifikaci programového vybavení jednotky. Pro realizaci autonomních aplikací bude jednotka vybavena pamětí pro ukládání naměřených dat a případných chybových hlášení. Navržená jednotka je doplněna knihovnamí pro obsluhu jednotlivých periférií, programem umožňujícím nahrání vyvíjené aplikace a testovacím programem vlastní jednotky. S ohledem na požadavky kladené na řídicí jednotku a případnou potřebu zvýšeného výpočetního výkonu v budoucích aplikacích byl pro realizaci jednotky vybrán mikrokontrolér z rodiny ARM Cortex-M4, konkrétně typ ATSAM4E16E od firmy Atmel.

1.1 Požadavky na řešení

Aby řídicí jednotka mohla fungovat i samostatně bez rozšiřujících modulů, bylo nutné ji vybavit alespoň určitým množstvím vstupů a výstupů a dalšími základními komunikačními periferiemi. Zde jsou uvedeny konkrétní požadavky na vyvíjené zařízení s přihlédnutím k využití maximálního potenciálu zvoleného mikrokontroléru.

Vstupy a výstupy:

- 16x digitální vstup 24 V
- 16x digitální výstup 24 V
- 8x analogový vstup 5 V, 10 V, ± 5 V, ± 10 V
- 8x analogový výstup 5 V, 10 V, ± 5 V, ± 10 V

Komunikační rozhraní:

- sériová komunikace RS232
- komunikace CAN s galvanickou izolací
- komunikace USB
- komunikace Ethernet

Další požadované funkce:

- vstupní napětí 24 V DC
- paměť typu FRAM
- hodiny reálného času
- konektor pro připojení paměťových karet
- možnost připojení budičů krokových motorů, frekvenčních vstupů/výstupů
- sběrnice XBus (ConTeK) pro připojení rozšiřujících modulů

2 Mikrokontroléry řady SAM4

Tato kapitola se zabývá jádrem řídicí jednotky. Tím je 32-bitový mikrokontrolér ATSAM4E16E od firmy Atmel. Dále je zde základní popis mikroprocesorů typu ARM a popis řady Cortex-M4.

Výběr této součástky vyplynul ze zadání práce. Mikroprocesor disponuje veškerými potřebnými periferiemi. Podrobnější řešení jednotlivých periferních obvodů je popsáno dále v textu.

2.1 Architektura ARM

Architekturu ARM (původně Acorn RISC Machine, později Advanced RISC Machine) vyvíjí britská společnost ARM Holdings Ltd. od poloviny 80. let minulého století. ARM Holdings v dnešní době není výrobcem, pouze se zabývá vývojem architektur a za poplatek poskytuje licence výrobcům vlastních čipů, kteří si k jádru ARM doplní vhodné periferie či paměti. Mezi firmy vlastníci licenci na výrobu SoC (System on Chip) s architekturou ARM patří například Samsung, HP, IBM, STMicroelectronics, Atmel a další významné firmy z oblasti výrobců elektroniky. Celkem ARM Holding uvádí 1100 licencí pro 300 společností. Proto v dnešní době lze nalézt zařízení obsahující architekturu ARM téměř ve všech oblastech elektroniky, zejména mobilní telefony, tablety, routery, multimediální přehrávače a další různá embedded zařízení [2].

Architektura ARM je nejčastěji 32-bitová, případně v menší míře u novějších architektur 64-bitová. Další charakteristickou vlastností je redukováná instrukční sada, zkráceně RISC. Typickými vlastnostmi procesorů typu RISC je omezený počet instrukcí většinou stejné délky, větší množství registrů, jednoduché adresování a zřetězení instrukcí (pipelining). Dalším znakem je load/store architektura, která znamená, že pokud chceme pracovat s daty, nejprve je nutné je z paměti přenést do registrů a následně vykonat zvolenou operaci.

Za dobu existence ARM architektury, kterou společnost ARM Holdings stále vyvíjí a vylepšuje, vzniklo několik jejích verzí. Některé z nich jsou již zastaralé a nepoužívají se. Na obr. 1 je přehled architektur s ukázkou použití v jednotlivých modelech procesorů. V dolní polovině jsou znázorněny technologie, které daná architektura využívá. Zde je základní shrnutí těch nejpoužívanějších:

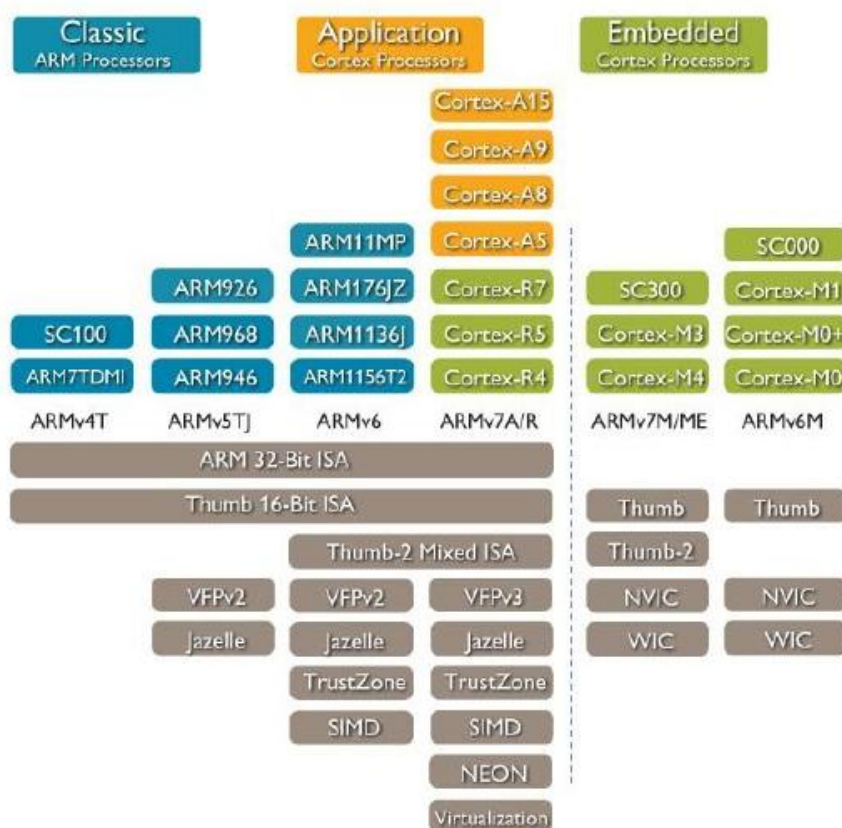
- ARM v4T – mimo 32-bitovou instrukční sadu ARM použita i 16-bitová sada Thumbs
- ARM v5TEJ – přidána podpora pro digitální zpracování signálu DSP (Digital Signal Processing), technologie Jazelle pro podporu Java aplikací
- ARM v6 – podpora audio/video pomocí technologie SIMD (Single instruction, multiple data), instrukční sada Thumbs-2 (kombinace 16-bitové sady Thumbs

s vybranými 32-bitovými instrukcemi sady ARM), rozšířené hardwarové zabezpečení technologií TrustZone

- ARM v7 – technologie NEON pro multimédia (vylepšení SIMD), tuto architekturu využívají všechny tři profily Cortex (vyjma několika Cortex-M využívající starší ARM v6 a nejnovějších Cortex-A)
- ARM v8 – nejnovější architektura zejména pro top produkty profilu Cortex-A, existuje i 64-bitová verze

Jednotlivé profily jádra Cortex:

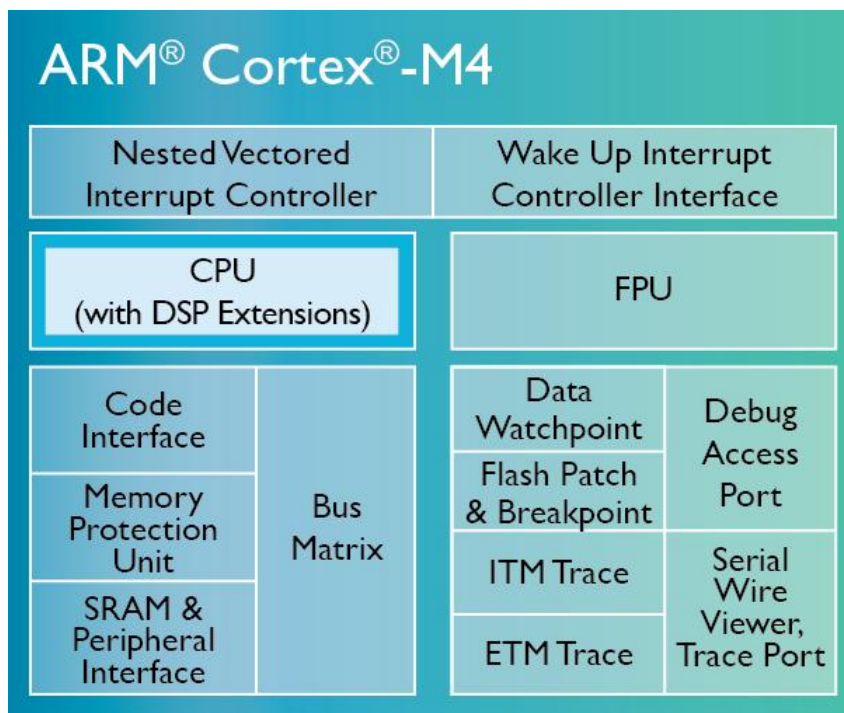
- Cortex-A – aplikační profil, podpora virtuální paměti MMU (Memory Management Unit) a multimédií (NEON), zaměřeno na uživatelské aplikace a operační systém
- Cortex-R – realtime profil, podpora ochrany paměti MPU (Memory Protected Unit), zaměřeno pro výkonné realtime aplikace (automobilový průmysl, řadiče disků atd.)
- Cortex-M – mikrokontroléry a SoC, podpora rychlého přerušování NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller), zaměřeno na cenovou dostupnost a snadnou implementaci pro všeobecné použití ve spotřební elektronice a průmyslovém řízení



obr. 1: Přehled architektur ARM a použitých technologií [3]

2.2 Jádro Cortex-M4

Tato verze jádra Cortex-M byla představena v roce 2011. Jedná se do jisté míry o rozšíření úspěšné verze Cortex-M3. Je kladen důraz na nízkou spotřebu a vysoký výkon při zachování nízké ceny. Další vlastností dle výrobce je jeho snadné použití, které ho předurčuje pro široké uplatnění. Následující obr. 2 znázorňuje jeho blokové schéma.



obr. 2: Blokové schéma jádra Cortex – M4 [1]

Procesory založené na jádře Cortex-M4 používají architekturu ARM v7 a jsou Harvardské koncepce. To znamená, že mají oddělený paměťový prostor určený pro data a pro program. Cortex-M4 využívá instrukční sady Thumb a Thumb-2 spolu s tříúrovňovým zřetěžením instrukcí (pipelining). K jádru je připojena 32-bitová sběrnice využívající standardu AMBA (Advanced Microcontroller Bus Architecture). Ta se dělí na rychlejší AHB (Advanced High-Performance Bus) sloužící jako hlavní systémová sběrnice. Zajišťuje přenos dat a instrukcí mezi procesorem a pamětí. Pomalejší APB (Advanced Peripheral Bus) má na starosti přístup k pomalým periferiím integrovaných do čipu od konkrétního výrobce. Obě sběrnice jsou spojeny v bloku Bus Matrix a s využitím řadiče DMA (Direct Memory Access) je možný současný běh několika procesů, např. čtení instrukce z paměti FLASH současně spolu s přenosem hodnoty ze vstupního vývodu přes APB na AHB do paměti SRAM za využití řadiče DMA.

V jádře procesoru se nachází ALU (Aritmeticko-logická jednotka) s rozšířením pro zpracování digitálního signálu. Jednotka má implementovanou hardwarovou podporu

násobení a dělení v aritmetice se saturací. Hlavním rozdílem oproti starším Cortex-M3 je možnost volitelně do jádra umístit jednotku pro práci s čísly s pohyblivou řádovou čárkou neboli FPU (Floating-Point Unit). Jednotka FPU vyhovuje poslednímu standardu ANSI/IEEE 754-2008 a pracuje s jednoduchou přesností (32 bitů).

2.3 Mikrokontrolér ATSAM4E16E

Výrobcem mikrokontroléru je firma Atmel, která svůj výrobek řadí do kategorie „chytrých a inovativních“ řešení. Zařízení je vybaveno spoustou komunikačních rozhraní a poměrně velkou vnitřní pamětí typu FLASH s velikostí 1 MB. Další pamětí uvnitř je 128 kB paměť SRAM. Mikrokontrolér je založen na jádře Cortex-M4 a jeho maximální taktovací frekvence činí 120 MHz.

Stručný přehled důležitých vlastností a funkcí:

- jednotka FPU
- jednotka hardwarové podpory AES-256
- rozhraní připojení externích pamětí (SRAM, NOR, NAND)
- 2x 16-bitový A/D převodník s až 24 kanály
- 2x 12-bitový D/A převodník
- 117 vývodů GPIO (až 117 přerušení)
- 3x tři bloky 32-bitový čítač/časovač
- čtyři 16-bitové PWM s komplementárními výstupy
- komunikace:
 - 2x USART (1x Full modem)
 - 2x UART
 - 2x CAN2.0A/B
 - 1x USB 2.0 (device)
 - 1x 10/100 Mbit/s Ethernet
 - 3x SPI
 - 2x TWI (I²C)
- rozhraní pro paměťové karty HSMCI (SD/MMC)
- rozhraní JTAG
- módy se sníženou spotřebou: Sleep, Wait a Backup

Rozsah operačního napětí je 1,62 V až 3,6 V, typicky 3,3 V. Součástka je dostupná ve dvou různých SMD pouzdrech LFBGA144 nebo LQFP144 [6].

Výše uvedený stručný přehled předurčuje součástku k širokému použití v průmyslovém řízení a spotřební elektronice.

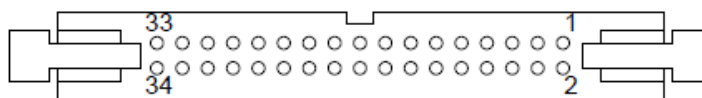
3 Sběrnice XBus

Sběrnice XBus je vlastní řešení firmy ConTeK spol. s r.o. sloužící jako rozhraní řídicích systémů pro připojení rozšiřujících modulů. Principiálně vychází ze sběrnice ISA (Industry Standard Architecture) zavedenou pro počítače typu IBM PC začátkem 80. let 20. století. Oproti sběrnici ISA, jejíž šířka datové sběrnice byla 8 nebo 16 bitů a šířka adresní sběrnice činila 24 bitů, pomocí kterých dokázala pokrýt 16 MB prostor, je rozhraní XBus definováno jako 8-bitová sběrnice s 5V TTL napěťovými úrovněmi.

Moduly mohou být analogové či digitální vstupy nebo výstupy případně kombinace vstupů i výstupů. Dalšími moduly jsou modul s programovatelným hradlovým polem FPGA a modul videodigitizéru pro zpracování obrazu. Každý modul má vlastní jednoduchý identifikátor. Sběrnice XBus umožňuje řídicí systém rozšířit maximálně o 16 modulů.

Šířka adresní a datové sběrnice je 8 bitů. V závislosti na daném modulu je jím obsazený adresní prostor buď 8 bajtů s počátečními adresami 00h-78h nebo 16 bajtů s počátečními adresami 00h-F0h. Adresa modulu je nastavitelná manuálně pomocí čtyř propojek s váhami 08h, 10h, 20h a 40h. Dalšími signály na sběrnici jsou řídicí signály $\overline{\text{READ}}$ a $\overline{\text{WRITE}}$ určující směr toku dat a $\overline{\text{XBus_RESET}}$ signál. Sběrnice obsahuje dvě přerušení $\overline{\text{IRQA}}$ a $\overline{\text{IRQB}}$. Všechny pět řídicích signálů je aktivní v nule. Společně s ostatními signály je po prvních čtyřech vodičích rozvedeno společně 5V napájecí napětí pro rozšiřující moduly. Maximální přenosová rychlost sběrnice je 4 MB/s.

Fyzické rozhraní je pro všechny moduly definováno stejně. Jako propojovací médium slouží plochý 34 žilový kabel s řezným konektorem typu PFL34 a protikusem typu PSL34 osazeným na modulech. Na následujícím obr. 3 je vidět zapojení konektoru. Význam jednotlivých vodičů je uveden v příloze.



obr. 3: Zapojení konektoru PSL34 sběrnice XBus

4 Požadavky na řídicí jednotky

Při návrhu řídicí jednotky, která by měla být reálně nasazena, je třeba brát zřetel na právní požadavky. Těmi se rozumí České státní normy, respektive Evropské a mezinárodní normy přejaty jako České státní normy. Normy však nejsou obecně závazné, pokud není povinnost jejich dodržování stanoveno jiným způsobem, např.:

- právním předpisem (např. právní řád České republiky)
- smlouvou
- pokyny nadřízeného
- rozhodnutím správního orgánu

Je proto doporučeno ve vlastním zájmu každého subjektu, aby byly normy dodržovány [4].

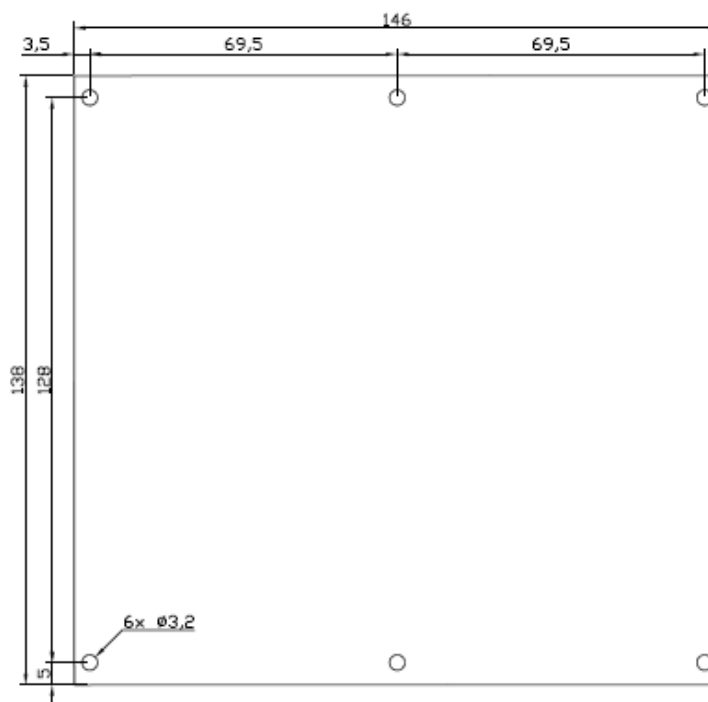
Mimo obecných norem týkající se elektrotechnických zařízení je pro programovatelné řídicí jednotky vydána norma s označením ČSN EN 61131. V této normě a jejích jednotlivých částech je definováno, co se rozumí pod pojmem programovatelné řídicí jednotky PLC (Programmable Logic Controller) a definuje jednotlivé bloky s nimi související. Nejdůležitější z hlediska návrhu je druhá část normy ČSN EN 61131 definující požadavky a zkoušky pro jednotky PLC. Definovány jsou napájecí úrovně a jejich dovolené odchylky, pro digitální vstupy a výstupy jejich rozhodovací úrovně pro jednotlivé varianty operačních podmínek. Pro analogová rozhraní jsou definovány napěťové rozsahy a impedanční vlastnosti z hlediska vstupů, respektive výstupů. Norma dále specifikuje požadované vlastnosti i pro komunikační rozhraní, definuje chování při výpadku nebo kolísání napájecího napětí a další požadavky na elektromagnetickou kompatibilitu.

5 HW realizace řídicí desky

Hlavním úkolem této práce byl návrh a následná realizace řídicí desky s mikrokontrolérem ARM. V následujících kapitolách jsou popsány jednotlivé bloky tvořící řídicí modul.

5.1 Rozbor zadání

Hlavní požadavky na řídicí jednotku jsou zmíněny v úvodu práce. Požadované rozměry desky, aby koncepčně zapadl mezi ostatní řídicí jednotky a rozšiřující moduly firmy ConTeK, jsou na následujícím obr. 4. Podle těchto dvou hlavních požadavků proběh návrh a následná realizace.

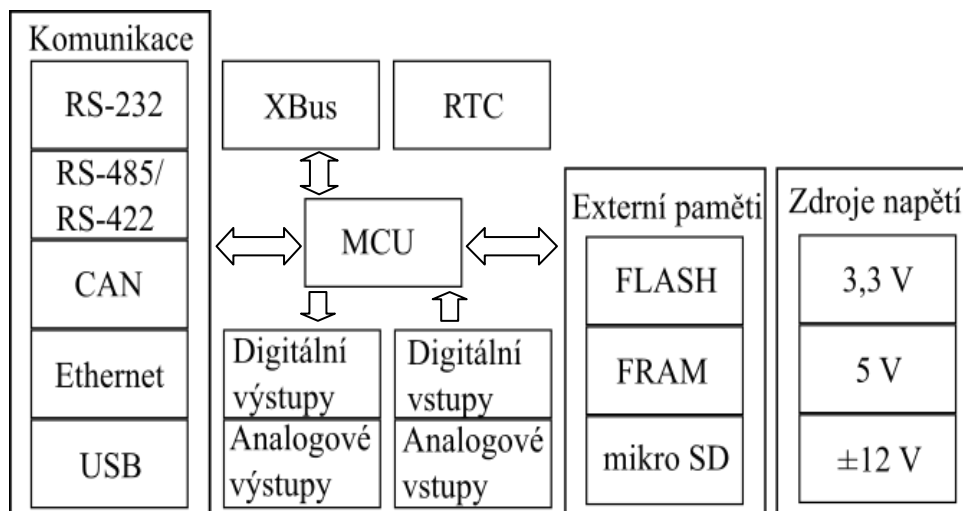


obr. 4: Požadované rozměry řídicí jednotky

Před začátkem návrhu bylo v první řadě potřeba zvážit několik důležitých rozhodnutí. Prvním bylo určení napájecích úrovní pro všechny důležité obvody. Tím nejdůležitějším je mikrokontrolér a od něho se odvíjely další volby součástek. Protože mikrokontrolér nemá 5 V tolerantní vstupy, bylo nutné volit součástky pracující při napětí 3,3 V stejně jako mikrokontrolér, případně realizovat převodníky napěťových úrovní. Další krok spočíval v rozvrhnutí připojení všech obvodů k mikrokontroléru, při čemž bylo potřeba zvolit, která z jeho periférií bude využita. Některé periferie jsou zapojeny na několika různých vývodech, zatímco jiné pouze na jednom. Podle jejich důležitosti byl zvolen připojený signál. Posledním

rozhodnutím před vlastním návrhem desky byla velikost pouzder součástek. Protože celé zapojení je poměrně komplikované a obsahuje velké množství součástek, rozhodl jsem se volit pokud možno co nejmenší pouzdra, která lze zapájet mně dostupnými prostředky, neboť osazení veškerých součástek proběhlo ručně nikoliv strojově.

Navrženo bylo řešení znázorněné blokovým schématem na obr. 5.



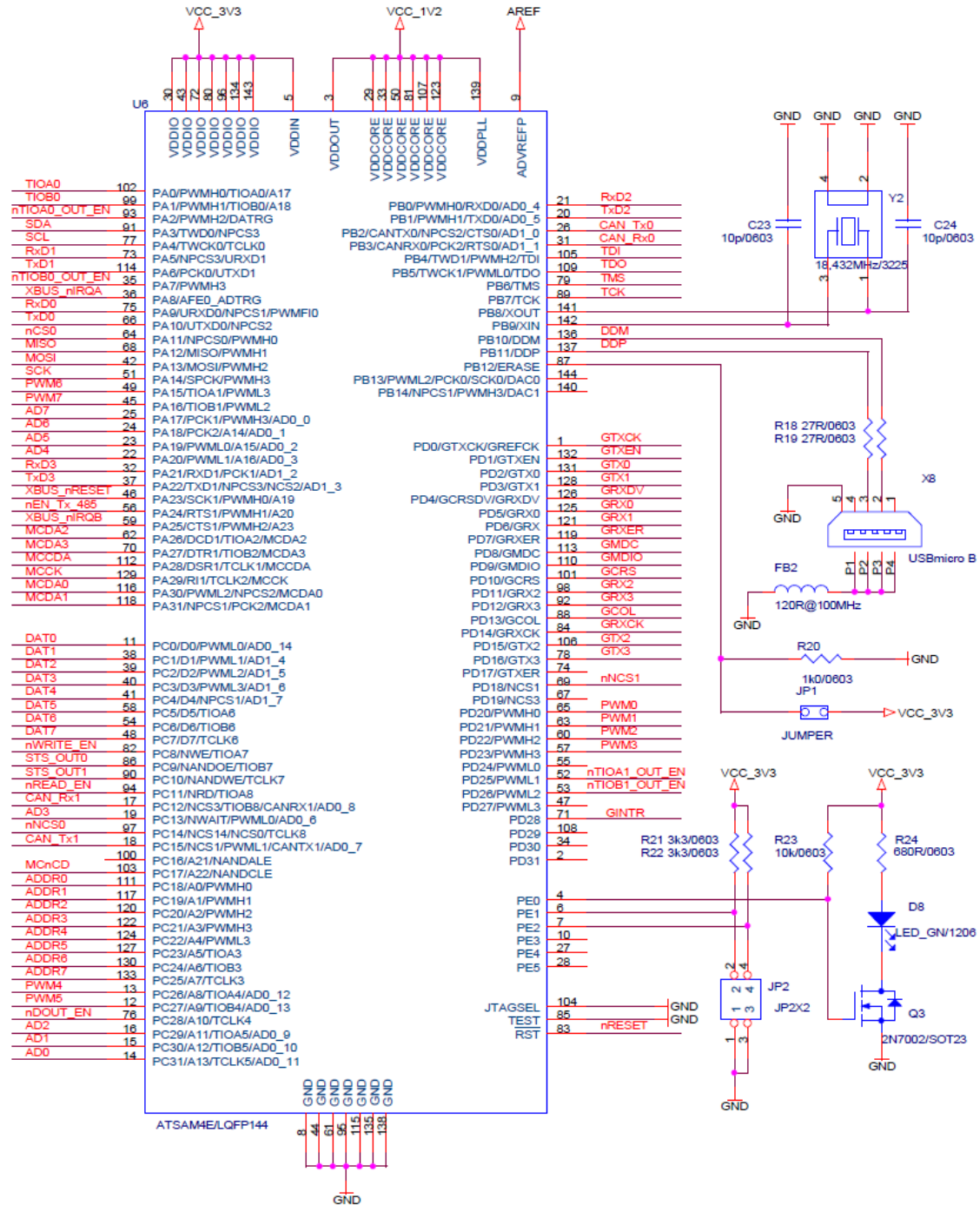
obr. 5: Blokové schéma řídicí jednotky

5.2 Zapojení mikrokontroléru ATSAM4E16E

Mikrokontrolér ATSAM4E16E vyžaduje k činnosti různá minimální napájecí napětí v závislosti na využívaných perifériích. Z důvodu využití periferie USB musí být napájecí napětí pro periferie minimálně 3 V. Dále je nutné zajistit napájení jeho jádra, které musí být v rozmezí 1,08 V až 1,32 V. To lze zajistit buď externím zdrojem, nebo využitím v mikrokontroléru zabudovaného stabilizovaného zdroje napětí 1,2 V. Rozhodl jsem se pro druhou variantu. Díky využití vnitřního zdroje byly dodrženy všechny požadavky na souslednost růstu napájecích napětí uvedené v katalogovém listu součástky [6]. Hlavním zdrojem napájecího napětí mikrokontroléru je spínaný zdroj se výstupním napětím 3,3 V. Toto napětí slouží i jako vstup pro integrovaný stabilizovaný zdroj. Výstupní napětí vnitřního zdroje slouží mimo napájení jádra zároveň pro napájení obvodu smyčky fázového závěsu PLL (Phase-locked loop). Zapojení spínaného zdroje je rozebráno v samostatné kapitole. Poslední napětí přivedené do mikrokontroléru je označené jako AREF. Jedná se o analogovou referenci 3,3 V pro A/D převodníky. Zdrojem tohoto napětí je externí přesná napěťová reference LM4128-3.3 [11].

Na obr. 6 je zapojení mikrokontroléru se všemi připojenými signály. Nejsou zde vidět blokovací kondenzátory. Osazeny jsou vždy u každého vývodu V_{DDIO} , sloužící jako napájení periférií a V_{DDIN} , kdy se jedná o vstup vnitřního stabilizovaného zdroje napětí 1,2 V. Na jeho

výstupu V_{DDOUT} je osazen jeden tantalový kondenzátor a u každého vývodu V_{DDCORE} je umístěn blokovací kondenzátor. Celkem je pro blokování osazeno patnáct keramických kondenzátorů s hodnotou 100 nF a jeden tantalový kondenzátor s hodnotou 10 μ F / 16 V. Při návrhu desky plošných spojů bylo dbáno na to, aby kondenzátory byly umístěny co nejblíže vývodu mikrokontroléru a správně plnily blokovací funkci.

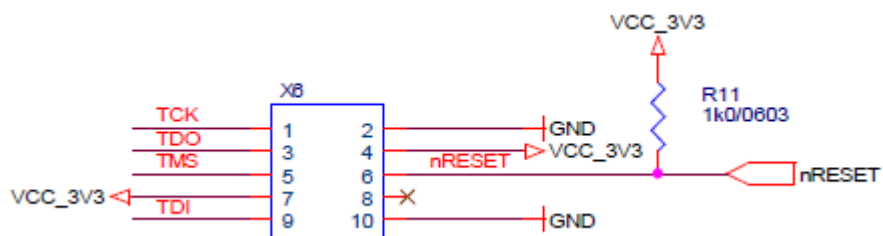


obr. 6: Schéma zapojení mikrokontroléru ATSAM4E16E

Na obr. 6 lze vidět další obvody úzce spjaté s činností mikrokontroléru. V následující části jsou stručně popsány jejich vlastnosti. Jedná se o propojku JP₁ s funkcí vymazání interní FLASH paměti mikrokontroléru. Proti samovolnému smazání vnitřní paměti je osazen odpor R₂₀ zajišťující klidový stav pro funkci ERASE. Dalším obvodem je propojka JP₂ s univerzální funkcí v závislosti na konkrétním softwaru. Spolu s propojkou JP₂ je v závislosti na softwaru určena funkce zelené status LED diody D₈, která je ovládaná přes tranzistor Q₃. V mém případě lze dle rychlosti blikání určit, zda je v mikrokontroléru nahrána aplikace, zaváděcí program bootloader, nebo probíhá pomocí zavaděče nahrávání aplikace do paměti. Dále lze na obr. 6 vidět připojení konektoru USB. Jako konektor byl vybrán typ USB mikro B. Tento typ konektoru jsem zvolil z důvodu jeho dnešní velmi široké rozšířenosti např. v mobilních telefonech, tabletech apod. Mezi konektor a vývody mikrokontroléru jsou vloženy terminálové odpory R₁₈ a R₁₉ o hodnotě 27 Ω, doporučenou katalogovým listem. Konektor je spojen se zemí feritovou perlou FB₂ pro lepší potlačení rušení. Posledním obvodem na obr. 6 je krystalový rezonátor označený Y₂ sloužící jako zdroj hodinového signálu. Zvolená hodnota 18,432 MHz je vhodná pro sériovou komunikaci. Ke krystalu jsou paralelně zapojeny kondenzátory C₂₄ a C₂₄ o shodné hodnotě 10 pF.

5.2.1 Rozhraní JTAG

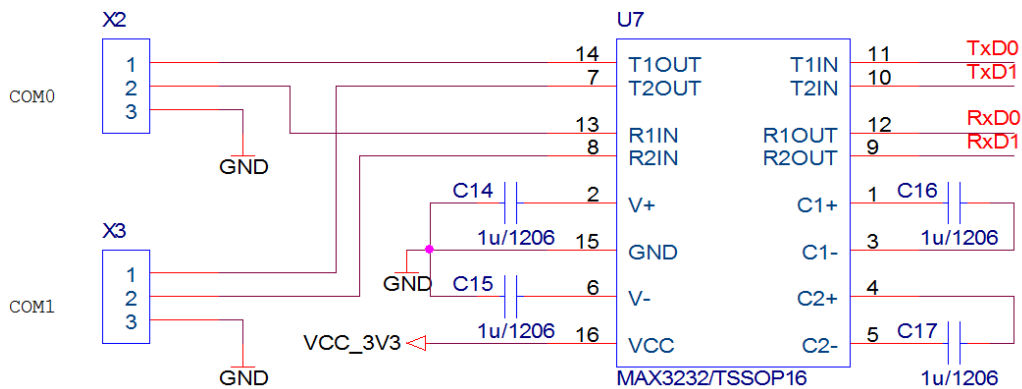
Naprogramování mikrokontroléru lze provést několika způsoby. První je pomocí rychlého programovatelného rozhraní (Fast Flash Programming Interface), kdy je do vnitřní paměti proveden paralelní zápis. Toto řešení je doporučeno pro programování ve velkém množství. Standardní přístup umožňuje dvě varianty, kdy nejčastěji k nahrávání slouží rozhraní JTAG (Join Test Action Group), případně jeho dvou vodičová varianta SWD (Serial Wire Debug). Ty zároveň umožňují sledování stavů registrů, vstupů a výstupů za běhu programu, případně vkládat breakpointy. Rozhraní JTAG nemá definované fyzické rozhraní, a proto jsem zvolil jedno z běžně užívaných zapojení, které je na obr.7.



obr. 7: Schéma zapojení konektoru JTAG

5.3 Sériová linka RS-232

Řídicí jednotku je nezbytné vybavit komunikačními rozhraními. Velmi rozšířenou variantou v průmyslové automatizaci a dalších oborech je sériová linka RS-232. V drtivé většině není využíváno všech vodičů definovaných standardem, ale pouze datových vodičů RxD a TxD. Mikrokontrolér je vybaven celkem čtyřmi páry signálů RxD a TxD ze dvou rozhraní UART a USART. Pro převod z těchto rozhraní na sériovou linku je potřeba integrovaný obvod k zajištění napěťových úrovní vyžadovaných standardem RS-232. Nejpoužívanějším je obvod MAX232, který zde byl použit ve verzi MAX3232 pracující již od 3 V napájecího napětí oproti 5 V pro klasickou variantu. Obvod je potřeba doplnit o čtyři externí kondenzátory. Celé zapojení je na obr. 8.



obr. 8: Schéma zapojení komunikace RS-232

5.4 Externí paměti

Pro správnou funkci řídicí jednotky je potřeba doplnit k mikrokontroléru vhodné paměti. Prvním typem je rychlá sériová FLASH AT45DB321 připojená pomocí rozhraní označené výrobcem jako DataFlash, které vyvinula firma Atmel pro svoje FLASH paměti jako vlastní řešení a je kompatibilní se sběrnici SPI (Serial Peripheral Interface). Velikost paměti činí 32 Mb a je organizována jako 8192 stránek krát 528 bajtů.

Protože celá vnitřní FLASH paměť mikrokontroléru je vyhrazena pro uložení programu, externí paměť slouží pro ukládání průběžných dat a hodnot při běhu aplikace. To vyžaduje velice rychlý zápis i čtení, proto je zvoleno sériové provedení namísto paralelního.

Druhou externí pamětí připojenou k mikrokontroléru je paměť typu FRAM, konkrétně typ FM24CL16B. Spojeny jsou pomocí sběrnice I²C. Protože výstupy obvodů připojených pomocí I²C jsou typu otevřený kolektor, bylo nutné oba vodiče upnout k napájecímu napětí 3,3 V pomocí odporů a nastavit tím klidový stav sběrnice. Zvolená hodnota odporů je 2,2 kΩ.

Paměť FRAM má velikost 16 Kb a oproti výše zmíněné FLASH paměti je přístup pomocí sběrnice I²C velice pomalý. Její výhodou je velmi vysoký počet zápisů až 10¹⁴ a vysoká

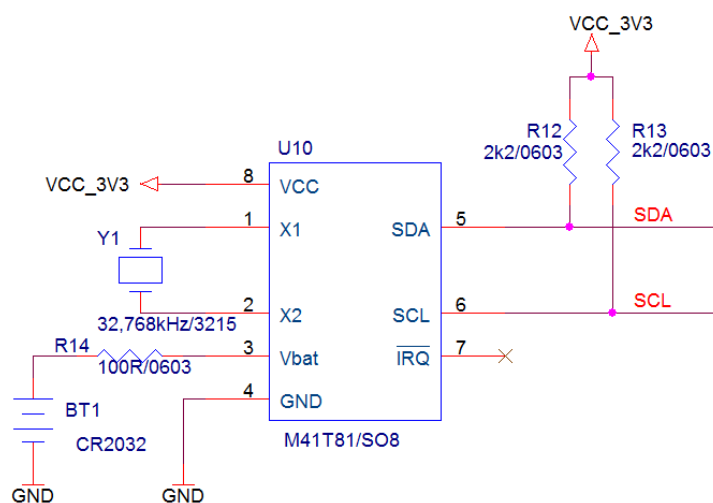
odolnost oproti ztrátě dat. Proto je určena jako zálohovací paměť při vypnutém napájení pro konstanty a nastavení řídicího systému.

Poslední místem, do kterého lze ukládat data je SD karta. Mikrokontrolér obsahuje rozhraní pro připojení vysokorychlostních karet HSMCI (High Speed Multimedia Card Interface), pomocí kterého je možné připojit paměťové karty typu MMC nebo SD. Rozhodl jsem se pro karty typu SD, které dnes patří ve verzi microSD mezi nejrozšířenější typ. Rozhraní podporuje standard SD karet 2.0, to znamená, že je možné připojit karty do velikosti 32 GB. Paměťová karta je připojena v módu takzvané 4-bitové sběrnice, skládající se ze čtyř datových vodičů, vodiče pro hodinový signál a řídicího vodiče. Spolu s nimi je ještě přivedeno napájení a zem. Vybraný konektor navíc disponuje vývodem detekující přítomnost paměťové karty.

Karta může sloužit pro ukládání průběžných dat o stavu řídicího systému, různých hlášení a nastalých chybách, které lze po vyjmutí dále zpracovávat na běžném počítači typu PC.

5.5 Obvod RTC

V některých situacích jako například ukládání chybových hlášení je vhodné zaznamenat spolu s typem chyby i čas události. Proto řídicí systém obsahuje obvod hodin reálného času RTC (Real-Time Clock). Ačkoliv mikrokontrolér obsahuje zabudovaný obvod RTC bylo vhodnější přidat externí obvod. Důvodem je při využití RTC v mikrokontroléru nutnost vybavit jej zálohovacím napájením pro případ výpadku napájení. Proto byl vybrán externí obvod M41T81 [7], pro který zle snáze zajistit zálohované napájení a i spotřeba je nižší. Záložní napájení zajišťuje baterie běžného typu CR2032. Obvod bylo nutné vybavit krystalovým oscilátorem 32 768 Hz. Spojení s mikrokontrolérem je zajištěno po sběrnici I²C, která je využita již pro připojení paměti FRAM. Následující obr. 9 zobrazuje realizované zapojení.



obr. 9: Schéma zapojení obvodu RTC

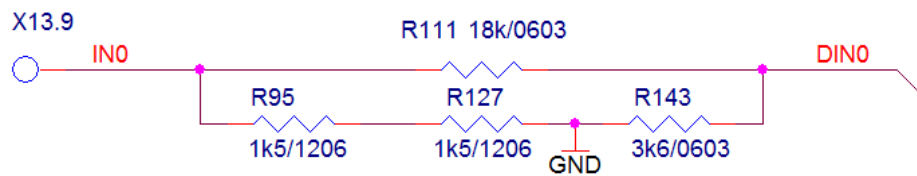
5.6 Digitální vstupy a výstupy

Pokud má navržená deska plnit funkci řídicího systému, je nezbytné ji vybavit určitým počtem vstupů a výstupů. V následujícím textu jsou popsány obvody digitálních vstupů a výstupů.

5.6.1 Digitální vstupy

Ze zadání a ze zdroje [5] vyplývají požadavky na realizaci. Nejprve jsou rozebrány digitální vstupy a poté výstupy.

Na obr. 10 vidíme navržené řešení zapojení digitálních vstupů. Toto řešení je pro všech 16 digitálních vstupů stejné. Jedná se o dvě dvojice po 8 vstupech. Důvodů pro toto rozdělení je několik a jsou vysvětleny na konci této podkapitoly.



obr. 10: Schéma zapojení digitálních vstupů

Zapojení je tvořeno čtveřicí rezistorů, kdy R_{95} a R_{127} společně tvoří zátěž a R_{111} spolu s R_{143} vytvářejí dělič napětí pro další zpracování. Zátěž realizuje dvojice odporů o stejné hodnotě $1\,500\ \Omega$. Volba dvou rezistorů na místo jedno jiného z řady E12, např. o hodnotě $3\,300\ \Omega$, je dána maximálními dovolenými ztrátami pro pouzdro 1206, které činí $250\ \text{mW}$. Druhou možností by bylo zvolit jiné - větší, pouzdro.

Dle [5] pro $24\ \text{V}$ úroveň stejnosměrného napětí musí být splněny požadavky minimální hodnoty proudu tekoucího do vstupu. Splnění podmínek ověřují následující výpočty. Výpočty jsou provedeny pouze pro $24\ \text{V}$ na vstupu (označený jako $IN0$) nazvaný normou „stav 1“. Při výpočtu je zanedbán proud tekoucí z děliče do zátěže. Toto zanedbání je umožněno typem zátěže, jejíž vstupy mají vysoký vstupní odpor.

$$\begin{aligned} I_{IN\ MAX} &= \frac{U_{IN0\ MAX}}{(R_{95} + R_{127}) \parallel (R_{111} + R_{143})} = \\ &= \frac{30}{(1\,500 + 1\,500) \parallel (18\,000 + 3\,600)} \cong 11,4\ \text{mA} \end{aligned} \quad (1)$$

$$I_{IN\ MIN} = \frac{U_{IN0\ MIN}}{(R_{95} + R_{127}) \parallel (R_{111} + R_{143})} = \frac{15}{(1\ 500 + 1\ 500) \parallel (18\ 000 + 3\ 600)} \cong 5,7\ mA \quad (2)$$

Výpočty (1) a (2) bylo ověřeno, že vstupní proud v obou krajních podmínkách vstupního napětí vyhovuje rozmezí $2\ mA < I_{IN} < 15\ mA$ pro „stav 1“ definovaný zdrojem [5]. Úroveň „stavu 1“ odpovídající 24 V je z hlediska dalšího zpracování příliš vysoká. Proto je použit odporový dělič snižující vstupní napětí na nižší. V dnešní době jsou nejčastějšími úrovněmi 0V reprezentující ve většině případů logickou 0. Pro logickou 1 je napětí v rozsahu 1,8 V až 5 V v závislosti na napájecím napětí obvodu. Tímto obvodem je v mém případě neinvertující budič 74HCT541. Jedná se o integrovaný obvod ze známé řady 74 v technologii „High speed CMOS – TTL compatible“, z toho vyplývá požadavek na maximální napětí 5 V (označené jako *DINO*) na vstupech tohoto obvodu, který ověřují výpočty (3) a (4).

$$U_{DINO\ MAX} = \frac{U_{IN0\ MAX} \times R_{143}}{R_{111} + R_{143}} = \frac{30 \times 3\ 600}{18\ 000 + 3\ 600} = 5\ V \quad (3)$$

$$U_{DINO\ MIN} = \frac{U_{IN0\ MAX} \times R_{143}}{R_{111} + R_{143}} = \frac{15 \times 3\ 600}{18\ 000 + 3\ 600} = 2,5\ V \quad (4)$$

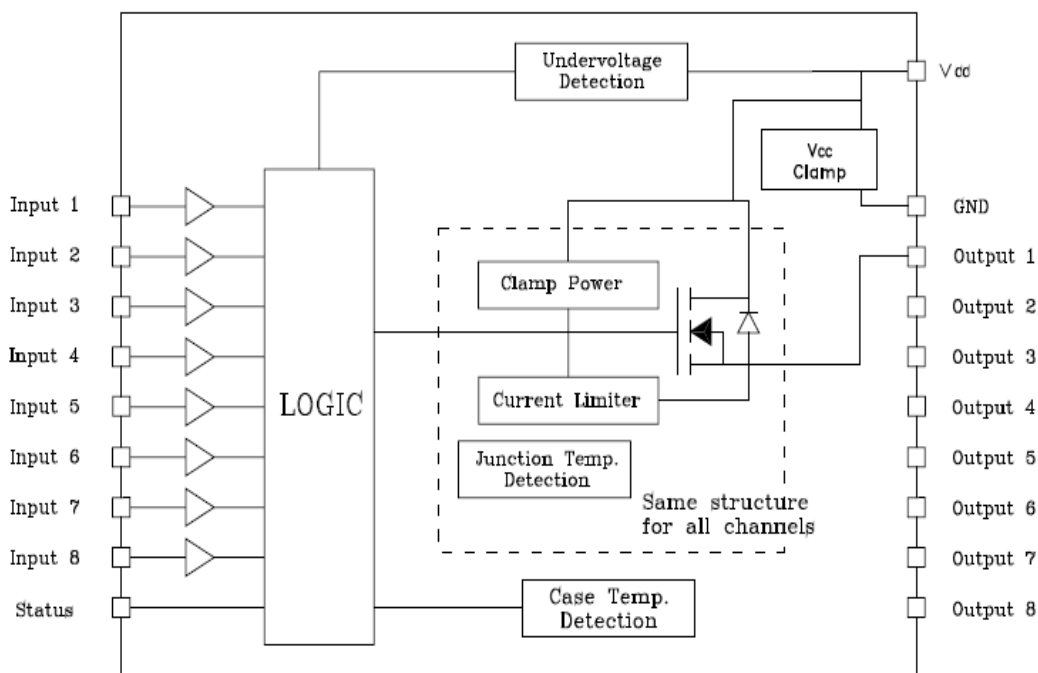
Z výpočtů (3) a (4) vyplývá nepřekročení parametrů definovaných výrobcem. Vstupní napětí 2,5 V je stále ještě vyhodnoceno jako úroveň *HIGH*. Pro úplnost ještě uvádím napájecí napětí 5 V a umístění vazebního kondenzátor 100 nF v těsné blízkosti integrovaného obvodu.

Na výstupu této součástky se nacházejí LED diody indikující stav jednotlivých vstupů. Výstupy jsou zároveň přivedeny na vstup obvodu plnicího zejména funkci převodníku napěťových úrovní. Jedná se také o neinvertující budič 74541, ale v logice LVC (Low voltage CMOS). Rozdíl mezi HCT a LVC logikou je v napájecím napětí. HCT logika vyžaduje 5 V napájecí napětí, kdežto LVC pracuje od napětí 1,65 V do 3,6 V při zachování 5 V tolerantních vstupů. Tím je dokončen převod úrovní mezi vstupním konektorem a mikrokontrolérem, který pracuje s napěťovými úrovněmi 0 V až 3,3 V. Další funkcí druhého budiče je vytvoření přístupové brány. Podrobnější popis této funkce je uveden ve společné části vstupů a výstupů na konci této podkapitoly.

5.6.2 Digitální výstupy

V této části je popsána realizace digitálních výstupů, které také musí splňovat podmínky rozebrané v kapitole 4. Výstupy jsou opět rozděleny do dvou osmic. Popisovány jsou v opačném pořadí než u digitálních vstupů, tedy ve směru od mikrokontroléru ke konektoru.

Prvním stupněm je integrovaný obvod z řady 74. Konkrétně klopný obvod typu D reagující na náběžnou hranu 74HCT574. Z označení je jasné použité napájecí napětí 5 V, tedy i funkce převodníku napěťových úrovní. Druhá funkce spočívá ve vytvoření přístupové brány. Na vstupy klopných obvodů jsou přivedena data od mikrokontroléru. Vstup \overline{OE} povolující výstupy je ovládán z mikrokontroléru přes tranzistor Q_4 signálem $\overline{DOUT_EN}$, který je aktivní v nule. Tranzistor Q_4 má funkci spínače pro signál $\overline{DOUT_EN}$ a řízení jeho funkce zajišťuje signál \overline{RESET} přivedený na jeho hradlo (gate). Tím jsou zajištěny neaktivní výstupy při resetování celé desky. Na výstupy jsou připojeny indikační LED diody zvlášť pro každý výstup a dále jsou k nim připojeny vstupy součástky zajišťující vlastní funkci digitálních výstupů. Za tuto součástku jsem vybral monolitický obvod s označením VN808CM-E od firmy STMicroelectronics. Jedná se o osminásobný budič typu high-side, písmena CM označují vstupy kompatibilní s CMOS napěťovými úrovněmi. To by umožňovalo přímé připojení k mikrokontroléru, ale tato vlastnost není využita. Obvod má v sobě integrovány ochrany proti přehřátí, limitaci výstupního proudu a detekci podpětí. V případě aktivace ochrany je pomocí výstupu STATUS indikován chybový stav zpět do mikrokontroléru. Součástka potřebuje pro svoji činnost napětí v rozsahu 10,5 V až 45 V. Vstup pro něj je vyveden na společný konektor spolu s výstupy. Externí napětí je spínáno na příslušné výstupy a zároveň slouží pro napájení vnitřní logiky. Ochrana proti přepólování napájecího napětí je zajištěna jednosměrným transilem typu SMBJ28A. Volbou transilu je omezeno vstupní a zároveň i výstupní napětí na hodnotu přibližně 30 V. Pokud by bylo potřeba zvýšit spínané napětí, musel by se zvolit transil pro vyšší napětí s ohledem na maximální vstupní napětí obvodu VN808CM-E. Maximální spínaný proud je vnitřně omezen na 0,7 A pro jednotlivý výstup při typickém vnitřním přechodovém odporu $R_{ON} = 160 \text{ m}\Omega$. Vnitřní strukturu součástky ilustruje obr. 11. Součástka je dle [8] plně kompatibilní s požadavky dané normou [5].

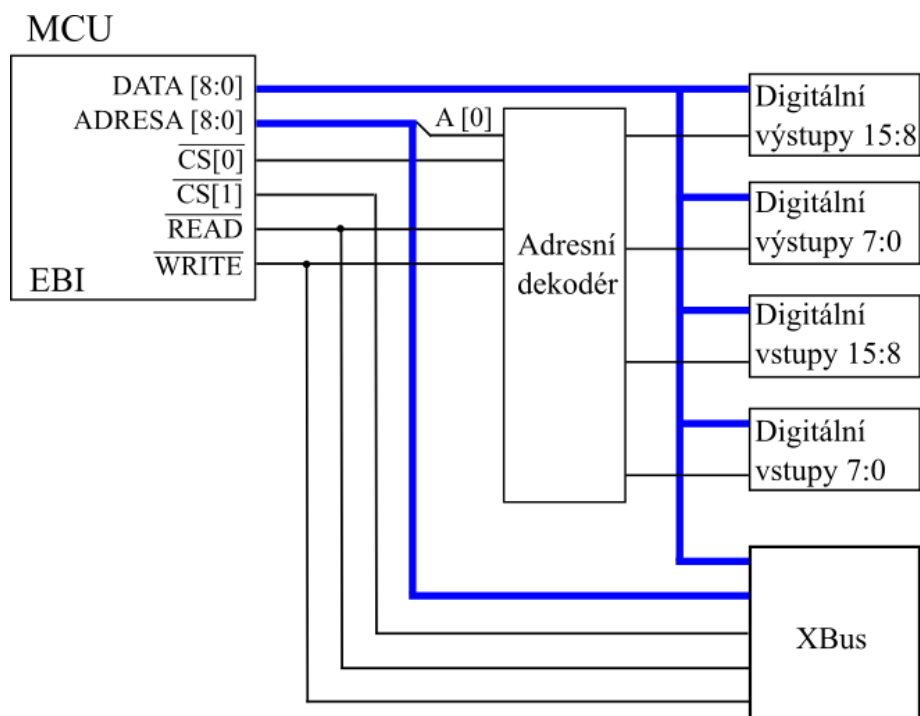


obr. 11: Vnitřní struktura obvodu VN808CM-E [8]

5.6.3 Rozhraní EBI

V následující části je popsán důvod rozdělení vstupů a výstupu na osmice. Hlavním důvodem je způsob připojení k mikrokontroléru. Vstupy a výstupy totiž nejsou připojeny na klasické vstupně/výstupní vývody tzv. GPIO. Jelikož má mikrokontrolér na jedné ze svých bran vyvedené rozhraní pro připojení externích zařízení EBI (External Bus Interface), zejména pro připojení externích pamětí, rozhodl jsem se vstupy a výstupy připojit pomocí něj. EBI disponuje osmi datovými vodiči, proto jsou vstupy a výstupy rozděleny na osmice. Rozhodnutí použít EBI má několik důvodů. Prvním je využití EBI pro připojení rozšiřující sběrnice XBus, dalším nedostatek volných GPIO pro připojení 16 vstupů a 16 výstupů. Posledním důvodem je jednoduchá softwarová obsluha těchto periférií. Např. aktivace výstupu se provede pouhým zápisem hodnoty do paměťového prostoru mikrokontroléru nikoliv jako nastavení stavu GPIO vývodu, obdobně u vstupů je čteno z paměťového prostoru.

Na obr. 12 je blokové schéma zapojení digitálních vstupů a výstupů, spolu s připojením sběrnice XBus.



obr. 12: Blokové schéma připojení pomocí EBI

Adresový dekodér je realizován obvodem 74HC139. Jedná se o dvojnásobný dekodér 1 ze 4, kdy jeden slouží pro výstupy a druhý pro vstupy. Logika HC (High speed CMOS) pracuje v rozsahu napájecího napětí od 2 V do 6 V. Zde je použito napětí 3,3 V.

V následující tabulce Tab. 1 je popsáno přístupu k jednotlivým osmicím pomocí signálů \overline{WRITE} , \overline{READ} a $A[0]$ představující nejnižší bit z 8-bitové adresy. Čtení ani zápis nejsou umožněny, pokud není aktivní signál $\overline{CS[0]}$. Signály \overline{READ} a \overline{WRITE} jsou aktivní v nule a jejich aktivaci automaticky obstarává vnitřní struktura mikrokontroléru v závislosti na spuštěném programu, a proto zde nejsou uvedeny jejich stavy odpovídající "1". Obdobně automatické je ovládání i signálu $\overline{CS[0]}$, který je taktéž aktivní v nule.

A [0]	\overline{WRITE}	Výstupy 15:8	Výstupy 7:0	A [0]	\overline{READ}	Vstupy 15:8	Vstupy 7:0
0	0	0	1	0	0	0	1
1	0	1	0	1	0	1	0

Tab. 1: Pravdivostní tabulka přístupu k digitálním výstupům a vstupům

Z blokového schématu je patrný význam signálu \overline{CS} (Chip Select) sloužící k výběru koncového zařízení. Tento signál chápeme jako sruženou adresu, kdy volbou konkrétního Chip Selectu je nastaven offset v adresním prostoru mikrokontroléru. Pro případ ATSAM4E16 offset činí 0x100000h, to znamená, že pomocí jednoho signálu \overline{CS} můžeme vybrat 16MB blok,

ve kterém konkrétní paměťové místo vybíráme pomocí až 24-bitové adresy z rozhraní EBI. Celkem je mikrokontrolér vybaven čtyřmi signály Chip Select.

5.7 Připojení sběrnice XBus

V následujícím textu je popsáno fyzické rozhraní pro připojení rozšiřující sběrnice XBus firmy ConTeK pomocí rozhraní EBI. Jak bylo zmíněno v kapitole 3 XBus má 8-bitovou adresní i datovou šířku sběrnice. Hlavním problémem bylo vyřešit převod napěťových úrovní, kdy 5 V je nutných pro XBus a 3,3 V vyžaduje mikrokontrolér.

Pro převod úrovní adresových vodičů jsem vybral integrovaný obvod 74HCT573. Jedná se o D klopný obvod typu latch. Obvod se může chovat jako jednobitová paměť v závislosti na jeho vstupu \overline{OE} povolující výstupy. Rozdíl oproti obvodu 74HCT574 je jeho reakce na hodinový signál. Zatímco u 74HCT574 jsou data na výstupech vybavovány s náběžnou hranou hodinového signálu, u 74HCT573 nízká úroveň hodinového signálu způsobí zapamatování vstupních dat na odpovídajících výstupech. Tuto vlastnost je potřeba respektovat při softwarovém nastavení rozhraní EBI, neboť funkci hodinového signálu zde plní signál $\overline{CS[1]}$.

Složitější situace nastává pro datovou část sběrnice. Ve všech předchozích případech se vždy jednalo o jednosměrný převod. V tomto případě je nutné si uvědomit nutnost obousměrného převodu. Data mohou jít oběma směry. Problém obousměrné komunikace jsem vyřešil pomocí integrovaného obvodu 74LVC4245. Součástku můžeme popsat jako neinvertující převodník úrovní s oddělenými napájecími napětími pro port A a port B. Port A je strana pro vyšší úroveň napětí a je napájena 5 V napětím, port B vyžaduje napájení v rozsahu 2,7 V až 3,6 V, zde použito napětí 3,3 V. Směr toku dat lze řídit vstupem DIR, kdy nízká úroveň na tomto vstupu přepne směr dat z portu B na A [9]. Řízení směru toku dat zajišťuje signál \overline{WRITE} z rozhraní EBI.

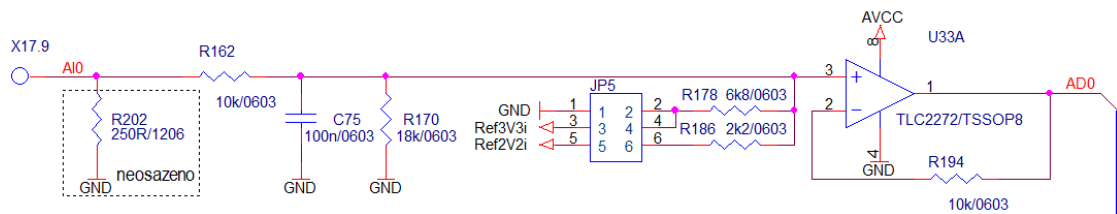
Poslední problém, který bylo nutné vyřešit, se týkal řídicích signálů pro sběrnici XBus. Ve směru od mikrokontroléru se jednalo o tři signály - \overline{READ} , \overline{WRITE} a $\overline{XBus_RESET}$. Jako převodník posloužil budič 74HCT125. Pro opačný směr k mikrokontroléru se nutnost převodu týkala dvou signálů - přerušování \overline{IRQA} a \overline{IRQB} . Funkci převodu obstarává opět budič 74LVC125, kdy je využita vlastnost 5 V tolerantních vstupů při 3,3 V napájení u logiky LVC. Nevyužité vstupy obou budičů jsou přivedeny na zem.

5.8 Analogové vstupy

Řídicí systém potřebuje pro svoji činnost nejen digitální vstupy a výstupy, ale je velice žádoucí, aby disponoval možností snímat analogové veličiny. Nejčastějšími senzory s analogovými výstupy jsou tenzometry, snímače vzdálenosti a přiblížení, teploty, tlaku,

polohy a spousta dalších. Obdobně jako digitální vstupy musí být v souladu se zdrojem [5] i analogové vstupy.

Vlastní převod z analogové hodnoty na digitální obstarává vnitřní A/D převodník mikrokontroléru. Ten má dva 12-bitové A/D převodníky s možností rozšíření na 16-bitové rozlišení pomocí průměrování [6]. Jelikož vstupní napětí mohou nabývat vyšších hodnot než napájecí napětí mikrokontroléru 3,3 V, bylo nutné tento problém vyřešit. Řešení zajišťují odporové děliče, kdy pomocí propojek daný dělič vybereme a tím nastavíme vstupní rozsah. Volitelé rozsahy jsou celkem 4, respektive 5. Poslední pátý rozsah není volen pomocí propojky, ale možností osadit 250 Ω rezistor. Osazením tohoto odporu změníme napěťový vstup na proudový v rozsahu 4 – 20 mA. Tento odpor slouží jako převodník proudu na napětí, neboť je na něm snímán úbytek napětí. Na obr. 13 vidíme zapojení, které je stejné pro všech osm vstupů.



obr. 13: Schéma zapojení analogových vstupů

Zadáním jsou specifikovány rozsahy vstupního napětí (1 - 5 V, 0 - 10 V, ± 5 V, ± 10 V) a k nim bylo nutné adekvátně navrhnout odporové děliče. První vstupní dělič tvořený rezistory R_{162} a R_{170} je přítomen vždy, stejně jako filtrační kondenzátor C_{75} , a je navržen pro 5 V rozsah. Pomocí kolíkové lišty JP_5 lze propojkou volit jednotlivé rozsahy, kdy je k rezistoru R_{170} paralelně zapojen další s případnou napěťovou referencí. Vybrán musí být vždy jen jeden rozsah odpovídající propojkou. V případě osazení 250 Ω rezistoru se žádná propojka neosazuje a tím je vybrán 5 V rozsah, respektive 4 – 20 mA. V následující tabulce Tab. 2 je názorný přehled volitelných rozsahů.

Propojka	Rozsah
-	1 - 5 V / 4 – 20mA
1-2	0 - 10 V
3-4	± 5 V
5-6	± 10 V

Tab. 2: Volitelné rozsahy analogových vstupů

Napětí z děliče je přivedeno do operačního zesilovače zapojený jako napěťový sledovač. Pro vyšší stabilitu je do zpětné smyčky vložen rezistor s hodnotou 10 kΩ. Za operační zesilovač jsem zvolil typ TLC2272. Jedná se o duální operační zesilovač typu rail-to-rail s nízkým šumovým číslem. Součástka je dle výrobce zvláště vhodná jako vstupní rozhraní před A/D převodníky [10]. Operační zesilovače napájí nesymetrické 5 V analogové napětí, v obr. 13 označené jako AVCC, oddělené od standardního 5 V napětí feritovou perlou FB₅.

Zdrojem obou napěťových referencí je precizní napěťová reference LM4128-3.3. Označení 3.3 odpovídá výstupnímu napětí 3,3 V. Její výstup je přiveden na stejné operační zesilovače TLC2272 zapojené jako sledovač napětí, jednou přímo, podruhé upraven děličem. Toto zapojení je z důvodu impedančního oddělení a snahy co nejméně zatížit výstup reference. Volba hodnot 3,3 V a 2,2 V pro referenční napětí byla určena spolu s vhodnou kombinací rezistorů tvořící děliče. Následující ukázkový výpočet metodou superpozice ověřuje správnost návrhu pro rozsah ±10 V. Výpočty jsou provedeny pro krajní hodnoty rozsahu.

Vstupní napětí $U_{IN\ MIN} = -10\ V$:

$$\begin{aligned} U'_1 &= U_{IN} \times \frac{R_{162} \parallel R_{170}}{(R_{162} \parallel R_{170}) + R_{186}} = \\ &= -10 \times \frac{2\ 200 \parallel 18\ 000}{(2\ 200 \parallel 18\ 000) + 10\ 000} \cong -1,64\ V \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} U'_2 &= U_{REF\ 2V2} \times \frac{R_{162} \parallel R_{170}}{(R_{162} \parallel R_{170}) + R_{186}} = \\ &= 2,2 \times \frac{10\ 000 \parallel 18\ 000}{(10\ 000 \parallel 18\ 000) + 2\ 200} \cong 1,64\ V \end{aligned} \quad (6)$$

$$U_{IN\ MIN} = U'_1 + U'_2 = -1,64 + 1,64 = 0\ V \quad (7)$$

Vstupní napětí $U_{IN\ MAX} = 10\ V$:

$$\begin{aligned} U'_1 &= U_{IN} \times \frac{R_{162} \parallel R_{170}}{(R_{162} \parallel R_{170}) + R_{186}} = \\ &= 10 \times \frac{2\ 200 \parallel 18\ 000}{(2\ 200 \parallel 18\ 000) + 10\ 000} \cong 1,64\ V \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} U'_2 &= U_{REF\ 2V2} \times \frac{R_{162} \parallel R_{170}}{(R_{162} \parallel R_{170}) + R_{186}} = \\ &= 2,2 \times \frac{10\ 000 \parallel 18\ 000}{(10\ 000 \parallel 18\ 000) + 2\ 200} \cong 1,64\ V \end{aligned} \quad (9)$$

$$U_{IN\ MAX} = U_1' + U_2' = 1,64 + 1,64 = 3,28\ V \quad (10)$$

Z výpočtů (5) až (10) vyplývá dodržení podmínek 0 V až 3,3 V na výstupech operačních zesilovačů, respektive na vstupech A/D převodníků mikrokontroléru.

K návrhu a ověření vhodné kombinace rezistorů a napěťových referencí jsem využil online obvodový simulátor, dostupný zde [12].

5.9 Analogové výstupy

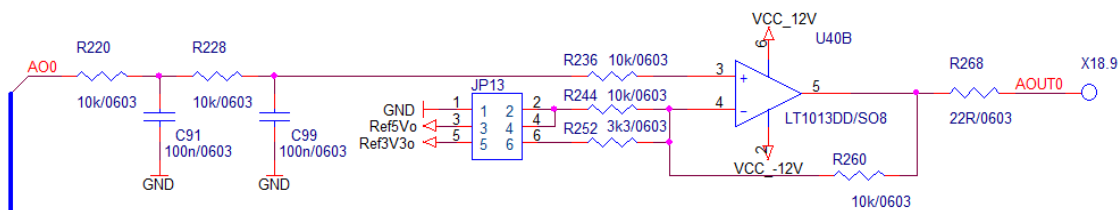
Obdobně jako v případě analogových vstupů je vhodné řídicí jednotku vybavit i analogovými výstupy. Nejčastěji najdou využití jako výstupní signál o rychlosti stroje, pokud jsou řazeny kaskádně za sebou, pro nastavování rychlostí různých dopravníků a rychlostí pohybů obecně. Dále mohou sloužit například pro ovládání proporčních ventilů. Tedy uplatní se všude tam, kde je řízení potřebné provádět spojitě – analogově.

Požadavky na realizaci jsou uvedeny v úvodu práce. Z kapitoly 2.3 popisující mikrokontrolér víme, že obsahuje pouze dva D/A převodníky. Bylo proto nutné navrhnout jiné řešení. Nasnadě je řešení problému pomocí externího D/A převodníku. Toto řešení má nesporné výhody, ale i nevýhody jako např. cena, která může dosahovat až ceny samotného mikrokontroléru. Rozhodl jsem se proto pro jiné řešení, a to využít jeho ostatních periférií. Konkrétně využít výstupy periferie PWM, které jsou ovšem pouze čtyři, neboť jeden PWM kanál má vždy komplementárně sdružený výstup. Jako zbylé čtyři výstupy posloužily časovače vnitřně nastaveny jako PWM výstupy. Podrobnější popis tohoto řešení je uvedeno zde [13] nebo zde [14].

Propojka	Rozsah
-	1 – 5 V
1-2	0 - 10 V
3-4	± 5 V
5-6	± 10 V

Tab. 3: Volitelné rozsahy analogových výstupů

Rozsahy výstupních napětí uvedené v tabulce Tab. 3 je možné volit propojkou na obr. 14 označena jako JP₁₃. Řešení je obdobné jako v případě analogových vstupů a je stejné pro všech osm výstupů.



obr. 14: Schéma zapojení analogových výstupů

Nejprve je pomocí integrovaného obvodu 74HCT541 proveden převod napěťových úrovní z 0 V – 3,3 V (výstup mikrokontroléru) na 0 V – 5 V. Signál z jeho výstupů je přiveden na RC filtr druhého řádu typu dolní propust. Přefiltrovaný signál vstupuje do operačního zesilovače zapojený jako rozdílový zesilovač. Dle zvoleného rozsahu je vybrána kombinace rezistorů a referenčního napětí. Výstupní napětí můžeme určit opět metodou superpozice, ukázka pro rozsah ± 5 V:

Požadované výstupní napětí $U_{OUT\ MIN} = -5$ V:

$$U'_1 = U_{IN} \times \left(1 + \frac{R_{160}}{R_{252}}\right) = 0 \times \left(1 + \frac{10\ 000}{10\ 000}\right) = 0\ V \quad (11)$$

$$U'_2 = -U_{REF\ 5V} \times \frac{R_{160}}{R_{144}} = -5 \times \frac{10\ 000}{10\ 000} = -5\ V \quad (12)$$

$$U_{OUT\ MIN} = U'_1 + U'_2 = 0 - 5 = -5\ V \quad (13)$$

Požadované výstupní napětí $U_{OUT\ MAX} = 5$ V:

$$U'_1 = U_{IN} \times \left(1 + \frac{R_{160}}{R_{252}}\right) = 5 \times \left(1 + \frac{10\ 000}{10\ 000}\right) = 10\ V \quad (14)$$

$$U'_2 = -U_{REF\ 5V} \times \frac{R_{160}}{R_{144}} = -5 \times \frac{10\ 000}{10\ 000} = -5\ V \quad (15)$$

$$U_{OUT\ MAX} = U'_1 + U'_2 = 10 - 5 = 5\ V \quad (16)$$

Za operační zesilovač jsem vybral typ LT1013. Výhodou tohoto precizního duálního zesilovače je možnost širokého napájecího rozsahu ± 15 V. V mém případě je použito symetrické napájení ± 12 V. Další výhodou je odolnost proti zkratování výstupu [15]. Pro jistotu je na výstup OZ vložen 22 Ω rezistor limitující výstupní proud. Z dřívější zkušenosti s tímto obvodem vím, že v případě výskytu napětí na výstupu OZ (např. naindukované napětí po vodičích), před přivedením napájecího napětí dojde k otevření jeho vnitřních struktur, tzv. latchup efektu. Tento stav může mít za následek zničení zesilovače nebo zdroje jeho napájecího napětí. K ochraně před tímto jevem slouží dvě shottky diody typu BAT54 vložené mezi napájecí napětí a zem.

Zdrojem napětových referencí je obdobná součástka jako v zapojení analogových vstupů, konkrétně LM4128-2.5 s výstupním napětím 2,5 V [11], které je přivedeno na dva LT1013, zapojeny jako neinvertující zesilovače. Jejich výstupní napětí určují následující vztahy:

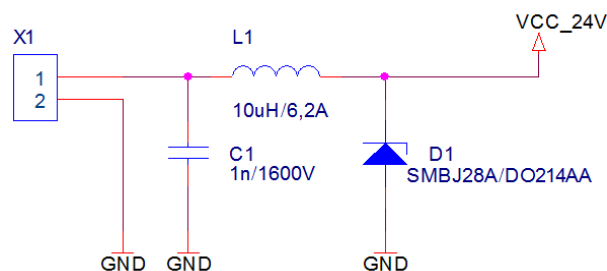
$$U_{REF\ 5V} = U_{IN} \times \left(1 + \frac{R_{276}}{R_{277}}\right) = 2,5 \times \left(1 + \frac{10\ 000}{10\ 000}\right) = 5\ V \quad (17)$$

$$U_{REF\ 3V3} = U_{IN} \times \left(1 + \frac{R_{278}}{R_{279}}\right) = 2,5 \times \left(1 + \frac{10\ 000}{30\ 000}\right) \cong 3,3\ V \quad (18)$$

5.10 Zdroje napětí

Ze zadání je známé vstupní napětí 24 V určené k napájení řídicí jednotky. Z předchozích kapitol víme potřebná napájecí napětí jednotlivých součástek, které jsou nejčastěji 3,3 V a 5 V. Z důvodu poměrně velkého rozdílu mezi vstupním napětím a oběma hodnotami není vhodné použít stabilizovaný zdroj pro velký ztrátový výkon. Proto bylo potřeba navrhnout spínané zdroje dodávající potřebná napětí.

Společný vstup pro oba zdroje na obr. 15 je tvořen filtrem složeným z fóliového kondenzátoru C₁ a tlumivky L₁ a ochranným jednosměrným transilem D₁ s průrazným napětím přibližně 32 V.



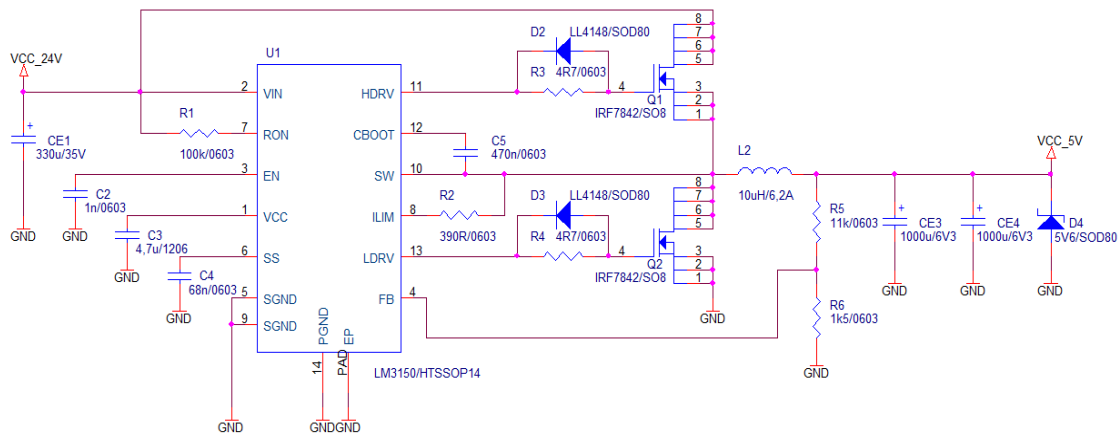
obr. 15: Schéma zapojení vstupního filtru a ochrany pro zdroje napětí

Vstupní filtr zároveň slouží i jako výstupní filtr proti zpětnému rušení způsobené spínanými zdroji napětí.

5.10.1 Spínaný zdroj 5 V

Z důvodu přítomnosti sběrnice XBus bylo nutné navrhnout silný zdroj 5 V, neboť po zapnutí se může vyskytnout špičkový odběr proudu od rozšiřujících modulů napájených po sběrnici. Z tohoto důvodu byl navržen snižující spínaný zdroj s parametry 5 V / 5 A. Jako základ slouží integrovaný obvod LM3150. Jedná se o synchronní nastavitelný zdroj s širokým vstupním napětím 6 V až 42 V a maximálním výstupním proudem 12 A. Maximální pracovní

frekvence činní 1 MHz [16]. Označení synchronní znamená, že ke své činnosti nevyužívá externí kombinaci tranzistoru a diody, ale dvou tranzistorů. Tato vlastnost zvyšuje účinnost, protože úbytek na spodním tranzistoru je nižší, než v případě použití diody. Na obr. 16 je realizované zapojení.



obr. 16: Schéma zapojení spínaného zdroje 5V

Vlastní návrh probíhal podle instrukcí a aplikačních poznámek uvedených v katalogovém listě součástky. Nejprve bylo nutné navrhnout odporový dělič zpětné vazby, pomocí kterého je nastaveno výstupní napětí. Při požadavku napětí zpětné vazby $U_{FB} = 0,6 \text{ V}$ a výstupního napětí $U_{OUT} = 5 \text{ V}$, byl zvolen jeden z rezistorů $R_6 = 1\,500 \, \Omega$ a druhý dopočítám podle vztahu:

$$R_5 = R_6 \times \left(\frac{U_{OUT}}{U_{FB}} - 1 \right) = 1\,500 \times \left(\frac{5}{0,6} - 1 \right) = 11 \text{ k}\Omega \quad (19)$$

Obě hodnoty přesně odpovídají rezistorům z řady E24 a jsou běžně k sehnání. Jediným požadavkem z hlediska přesnosti výstupního napětí je tolerance 1%.

Dalším krokem návrhu bylo určení maximální pracovní frekvence. Pro tento obvod se neurčuje jeho pracovní kmitočet, ale maximální možný. Pracuje totiž v režimu konstantní doby sepnutí COT (Constant On Time), to znamená, že v závislosti na zátěži nemění dobu sepnutí pracovních tranzistorů, ale mění frekvenci spínání. Bylo třeba brát zřetel na tuto vlastnost při výběru pracovních tranzistorů podle jejich kapacity hradla a rychlosti spínání. Maximální dosažitelnou frekvenci $f_{S \text{ MAX}}$ lze nastavit rezistorem vloženým mezi vstupní napětí a vstup označený jako RON. Velikost rezistoru je závislá na podílu výstupního a minimálního vstupního napětí, při dodržení minimální doby rozepnutí $t_{OFF} > 725 \text{ ns}$.

$$f_{S \text{ MAX}} = \left(\frac{1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN \text{ MIN}}}}{t_{OFF \text{ MIN}}} \right) = \left(\frac{1 - \frac{5}{12}}{725 \times 10^{-9}} \right) \cong 804,6 \text{ kHz} \quad (20)$$

$$f_S = \frac{U_{OUT}}{K \times R_{ON}} = \frac{5}{100 \times 10^{-9} \times 100 \times 10^3} = 500 \text{ kHz} \quad (21)$$

Při konstantě $K = 100 \text{ pC}$ a zvoleném rezistoru $R_{ON} = 100 \text{ k}\Omega$ vychází maximální pracovní frekvence $f_S = 500 \text{ kHz}$.

Následujícím krokem návrhu zdroje je výběr indukčnosti. K tomu slouží nomogram uvedený v katalogovém listě. Dle něho byla určena minimální hodnota indukčnosti $3,3 \text{ }\mu\text{H}$, z důvodu dostupnosti jsem zvolil cívku s indukčností $10 \text{ }\mu\text{H}/6,2 \text{ A}$. Velikost vstupní a výstupní kapacity jsem odhadl dle vlastních zkušeností, konkrétně pro vstup jsem vybral elektrolytický kondenzátor $330 \text{ }\mu\text{F}/35 \text{ V}$. Na výstupu je umístěna dvojice elektrolytických kondenzátorů $1000 \text{ }\mu\text{F}/6,3 \text{ V}$. Oba typy jsou z řady označené výrobcem jako LXZ, která má velmi nízký ekvivalentní sériový odpor ESR. Tím je splněn požadavek na obě součástky. Zvolená velikost obou kapacit se ukázala jako správná volba při ožívování desky.

Důležitou součástí návrhu byl výběr tranzistorů. Jak bylo zmíněno výše v textu, mezi hlavní kritéria výběru byla vstupní kapacita hradla, která musí splňovat následující nerovnost:

$$Q_{G \text{ TOT}} < \frac{I_{VCC L}}{f_S} \quad 2 \times 33 < \frac{0,065}{500 \text{ 000}} \quad (66 < 130) \text{ nC} \quad (22)$$

kde $I_{VCC L}$ je proudový limit vnitřního stabilizátoru a $Q_{G \text{ TOT}}$ celková kapacita hradel obou tranzistorů.

Dalšími požadovanými vlastnostmi byl nízký přechodový odpor $R_{DS (ON)}$, napětí drain-source minimálně 1,2 násobek vstupního napětí 24 V a maximální proud větší než 5 A . Volba padla na IRF7842, který splňuje všechny uvedené požadavky [17]. Pro ochranu je mezi budič a hradlo tranzistoru vložen sériový rezistor $4,7 \text{ }\Omega$ spolu s antiparalelní diodou LL4148.

Limitaci výstupního proudu zajišťuje rezistor R_2 , kdy jeho hodnota byla určena následujícím vztahem:

$$R_2 = \frac{I_{CL} \times R_{DS (ON)}}{I_{LIM}} = \frac{1,2 \times 5 \times 0,006}{85 \times 10^{-6}} \cong 423 \text{ }\Omega \quad (23)$$

kde I_{CL} je 1,2 násobek výstupního proudu, $R_{DS (ON)}$ přechodový odpor spodního tranzistoru při maximální teplotě přechodu a I_{LIM} vnitřní zdroj proudu. Zvolená hodnota $390 \text{ }\Omega$ je nejbližší z řady E12.

Integrovaný obvod LM3150 je vybaven funkcí soft-startu umožňující postupný nárůst napětí a tím omezit proudové špičky při zapnutí. Délka trvání soft-startu je určena dobou nabíjení kondenzátoru připojeného k vstupu SS a při zvolené době $t_{SS} = 5 \text{ ms}$ je velikost kondenzátoru určena dle následujícího vztahu:

$$C_4 = \frac{I_{SS} \times t_{SS}}{U_{FB}} = \frac{7,7 \times 10^{-6} \times 5 \times 10^{-3}}{0,6} \cong 64 \text{ nF} \quad (24)$$

kde I_{SS} je nabíjecí proud. Zvolena byla nejbližší vyráběná hodnota 68 nF, pro kterou délka soft-startu vychází $t_{SS} = 5,3 \text{ ms}$.

Poslední externí součástky potřebné pro správné fungování zdroje jsou tři kondenzátory. První kondenzátor C_2 na vstupu Enable, další C_3 slouží pro vnitřní stabilizátor napájející budiče tranzistorů a interní logiku. Poslední C_5 plní funkci nábojové pumpy pro horní tranzistor. Všechny hodnoty jsou doporučené hodnoty z katalogového listu.

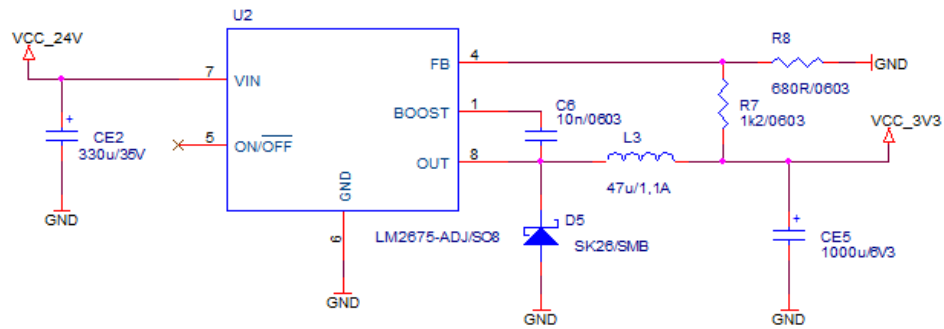
Na výstupu zdroje je umístěna zenerova dioda D_4 se zenerovým napětím 5,6 V. Neplní zde funkci stabilizace napětí, ale pojistky v případě selhání zdroje. Maximální ztrátový výkon pouzdra SOD80 je pouze 0,5 W a vyšší napětí na diodě by spolehlivě vedlo k jejímu průrazu a tím ke zkratování 5 V napájecí větve.

Při ožívování desky se vyskytl neočekávaný problém. Tím byl výše zmíněný vnitřní stabilizátor, který ze vstupního napětí 24 V vytváří napětí přibližně 5,95 V pro vnitřní logiku. Rozdíl napětí je poměrně značný a ztrátový výkon způsobuje ohřívání součástky i při odpojené zátěži. Tato negativní vlastnost je o to více výrazná, kdy zdroj pracuje s minimální zátěží, tj. při nepřipojených rozšiřujících modulech sběrnice XBus, neboť při testování s externí zátěží byl další nárůst teploty nepatrný. Při testování byla snížena maximální frekvence pro snížení střední hodnoty pulzního proudu do hradel tranzistorů, ale tato úprava nevedla k omezení ohřevu součástky.

5.10.2 Spínaný zdroj 3,3 V

Základem zdroje napětí 3,3 V je integrovaný obvod LM2675-ADJ s nastavitelným výstupním napětím. Pracovní frekvence 260 kHz je pevná na rozdíl od minulého zdroje. Maximální výstupní proud činí 1 A. Vstupní napětí může být v rozsahu 8 V až 40 V a obvod může dosáhnout účinnosti větší než 90% [18].

Pro svoji činnost je nutné zdroj doplnit externími součástkami. Těmi jsou rezistory tvořící dělič pro zpětnou vazbu, vstupní a výstupní kondenzátory, tlumivka a pracovní dioda. Není nutný externí tranzistor, neboť je již integrován v součástce. Navržené zapojení je na obr. 17.



obr. 17: Schéma zapojení spínaného zdroje 3,3 V

Prvním krokem návrhu byl výpočet děliče pro určení výstupního napětí. Hodnota rezistoru R_8 by měla být v rozmezí 240Ω až 1500Ω pro vyšší šumovou odolnost. Požadovaná hodnota napětí zpětné vazby je $U_{FB} = 1,21 \text{ V}$. S ohledem na požadavky a dostupnost byla zvolena hodnota $R_8 = 680 \Omega$ a velikost druhého rezistoru dopočítána podle vztahu:

$$R_7 = R_8 \times \left(\frac{U_{OUT}}{U_{FB}} - 1 \right) = 680 \times \left(\frac{3,3}{1,21} - 1 \right) \cong 1174,54 \Omega \quad (25)$$

Nejbližší vyráběná hodnota je 1200Ω , pro kterou vychází výstupní napětí:

$$U_{OUT} = U_{FB} \times \left(\frac{R_7}{R_8} + 1 \right) = 1,21 \times \left(\frac{1200}{680} + 1 \right) \cong 3,35 \text{ V} \quad (26)$$

Výběr pracovní tlumivky byl proveden podle nomogramu v katalogovém listě součástky. Protože maximální výstupní proud obvodu je 1 A , byla vybrána pro mě snadno dostupná cívka s vlastnostmi $47 \mu\text{H}/1,1 \text{ A}$.

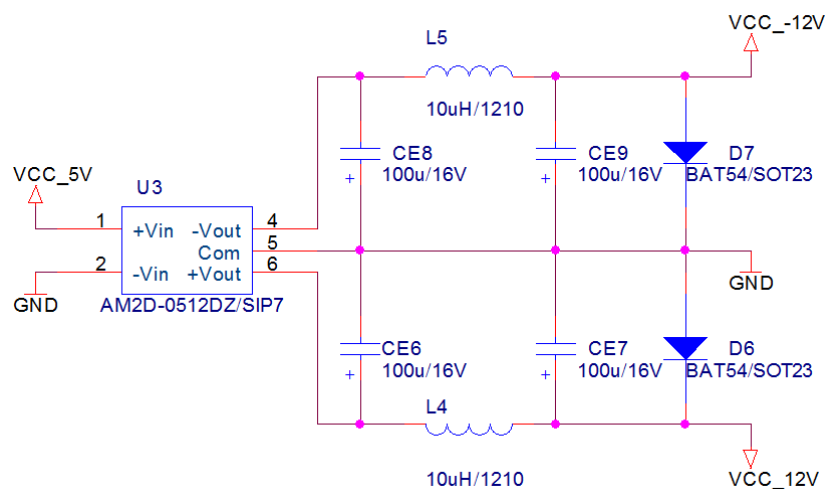
Velikost vstupní a výstupní kapacity jsem odhadl a použil stejné součástky jako pro 5 V zdroj. Vstupní kondenzátor má parametry $330 \mu\text{F}/35 \text{ V}$ a na výstupu je osazen $1000 \mu\text{F}/6,3 \text{ V}$. Zvolené hodnoty se opět ukázaly jako vyhovující.

Pracovní dioda by měla splňovat následující podmínky: závěrné napětí alespoň 1,25krát větší než vstupní napětí, proud 1,3krát větší než výstupní a rychlá Shottkyho typu. Všem parametrům vyhovuje vybraný typ SK26.

Poslední externí součástkou je kondenzátor C_6 s funkcí nábojové pumpy pro spínání vnitřního tranzistoru. Hodnota 10 nF je doporučena katalogovým listem součástky.

5.10.3 Zdroj ± 12 V

Posledními napěťovými úrovněmi přítomnými na desce jsou $+12$ V a -12 V. Obě napětí slouží k napájení operačních zesilovačů tvořící analogové výstupy. Vlastním zdrojem obou napětí je izolovaný DC-DC měnič firmy Aimtec AM2D-0512DZ. Z označení lze vyčíst, že se jedná o 2 W zdroj v pouzdře SIP7 (2D) s 5 V vstupem (05) a 12 V výstupem, kde písmeno ‚D‘ značí duální výstup [19]. Standardní izolační pevnost je 1 kV, která není využita a součástka slouží pouze jako zdroj obou napětí bez galvanického oddělení. Důvodem je šetření místa na desce a není nutné navrhovat zvlášť dva zdroje pro $+12$ V a -12 V. Následující obr. 18 zobrazuje realizované zapojení.



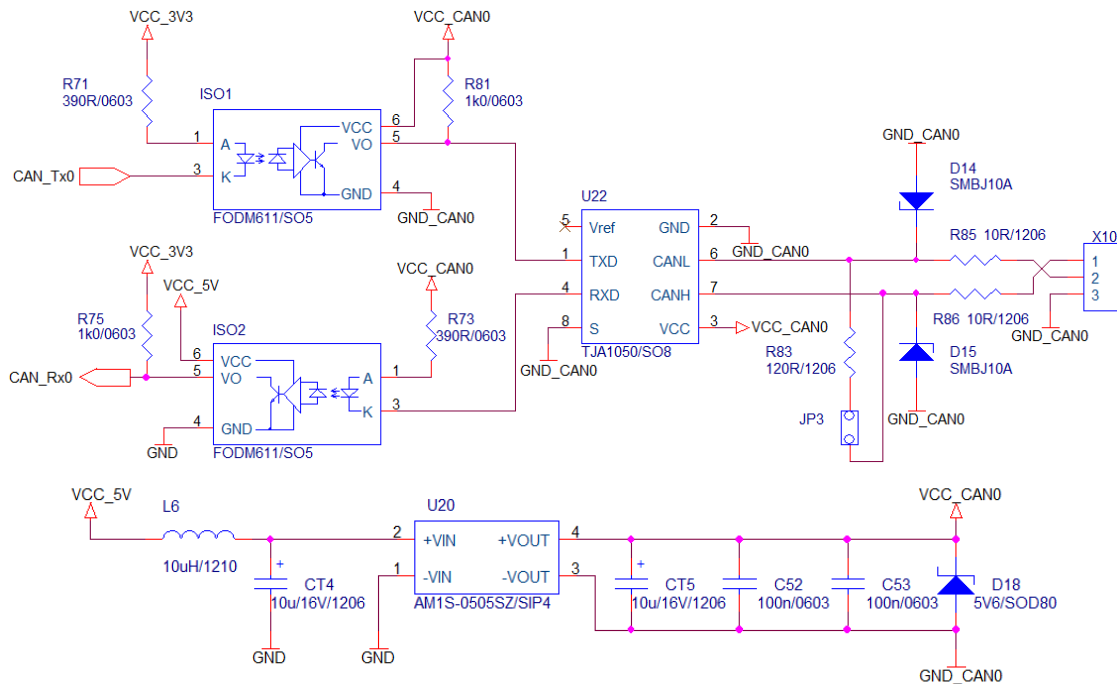
obr. 18: Schéma zapojení zdroje ± 12 V

Výstup obou napěťových větví je opatřen elektrolytickým kondenzátory $100 \mu\text{F}/16$ V, za kterými následuje cívka $10 \mu\text{F}$ a další elektrolytický kondenzátor. První kondenzátory jsou umístěny v blízkosti zdroje a cívky spolu s druhými kondenzátory jsou na desce umístěny co nejbližší spotřebičům, kterými jsou operační zesilovače pro analogové výstupy. Diody D_6 a D_7 slouží jako ochrany. Jejich funkce je podrobněji rozebrána v kapitole 5.9.

5.11 Sběrnice CAN

Navržená deska disponuje dvěma galvanicky oddělenými rozhraními CAN. Mikrokontrolér obsahuje dva CAN kontroléry podporující oba formáty standardu CAN 2.0 s maximální přenosovou rychlostí 1 Mbit/s. Pro správnou činnost je nutné obvod vybavit budičem sběrnice, konkrétně byl vybrán TJA1050 podporující standard ISO 11898 [20]. Galvanickou izolaci obstarává dvojice optočlenů FODM611. Jedná se o vysokorychlostní optočleny s maximální přenosovou rychlostí 10 Mbit/s s izolační pevností 3,75 kV a výstupem

typu otevřený kolektor [21]. Pro galvanické oddělení napájení budiče sběrnice slouží DC-DC měnič typu AM1S-0505SZ. V tomto případě se jedná o 1 W zdroj v pouzdře SIP4 se shodným vstupním a výstupním napětím 5 V a izolační pevností 1 kV. Protože výstupy optočtenů jsou typu otevřený kolektor, bylo nutné na jejich výstup a napájecí napětí umístit rezistor pro definování stavu.



obr. 19: Schéma zapojení sběrnice CAN

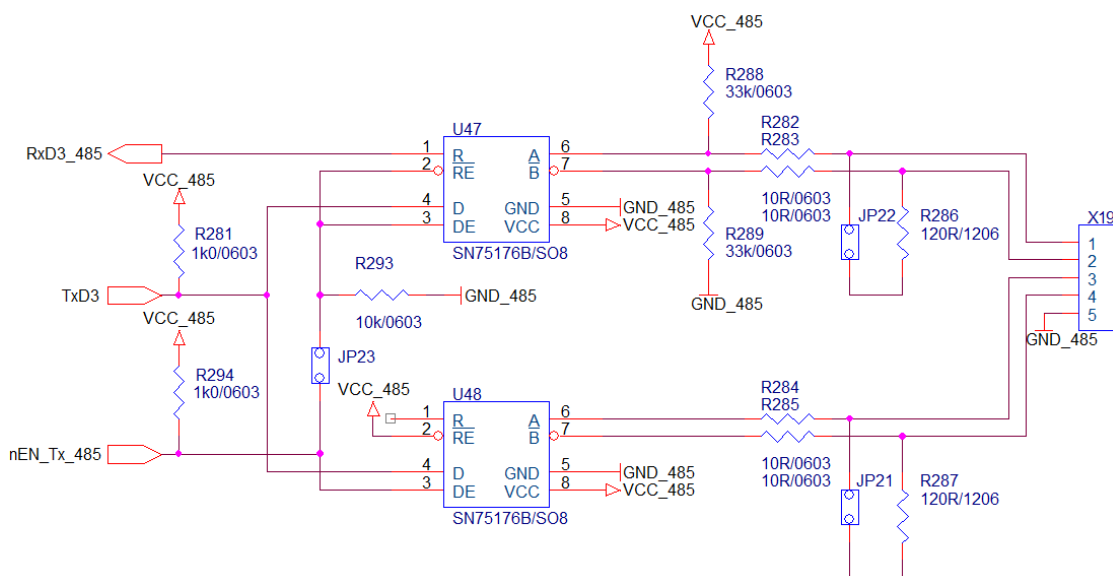
Navržené a zrealizované zapojení totožné pro oba CAN kanály je na obr. 19. Budič sběrnice je nastaven do režimu „High speed“ pomocí vývodu S připojeným na zem. Pomocí propojky JP₃ lze vložit zakončovací odpor 120 Ω v případě, že by se jednotka nacházela na jednom z konců sběrnice. Signály CAN L a CAN H jsou chráněny pomocí transilů a vložených odporů 10 Ω.

Na straně mikrokontroléru jsou oba signály CAN Tx i CAN Rx přivedeny do duálního monostabilního klopného obvodu 74HCT123, pomocí kterého je indikována komunikace po sběrnici. Na jeho negovaných výstupech jsou osazeny LED diody, kde červená odpovídá vysílání a zelená příjmu dat.

5.12 Sběrnice RS-485/RS-422

Mikrokontrolér umožňuje v jedné ze svých periférií USART možnost režimu RS-485. V tomto módu činnosti je vnitřně řízen signál RTS povolující vysílání po sběrnici. Obdobně jako v případě sběrnice CAN je i zde nutné umístit budič sběrnice. Pro tento účel byla vybrána

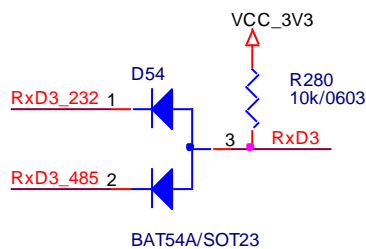
součástka SN75176B. Aby výhody obou sběrnic dané diferenciálním vyhodnocováním a potlačení zemních smyček měly smysl je nutné je galvanicky oddělit. Galvanickou izolaci zajišťují stejné optočleny i DC-DC měnič jako v případě sběrnice CAN. Mimo signály RxD a TxD bylo nutné zajistit galvanickou izolaci i pro signál RTS označený jako $\overline{\text{EN_Tx_485}}$. Realizované zapojení umožňuje dva režimy činnosti. Prvním režimem je half-duplex realizovaný jedním párem vodičů, kdy jsou oba vodiče zároveň přivedeny na vysílač i přijímač. Druhý režim umožňuje obousměrnou komunikaci full-duplex pomocí dvou párů vodičů. Režimy je možné přepínat propojkou JP₂₃.



obr. 20: Schéma zapojení sběrnice RS-485/RS-422

Na obr. 20 je vidět část navrženého zapojení pomocí dvojice budičů. Každý pár vodičů lze volitelně pomocí propojek zakončit 120 Ω rezistorem. Klidový stav linky je definován rezistory R₂₈₈ a R₂₈₉.

Signály RxD a TxD jsou společné pro sběrnice a zároveň pro poslední vyvedou sériovou linku označenou jako COM3. Vyvedeny jsou tedy současně na dva konektory a signál RxD je sloučen pomocí diodové logiky zobrazené následujícím obr. 21. Není proto možné provozovat oba typy komunikace naráz.



obr. 21: Schéma zapojení sloučení signálů COM3 a RS-485

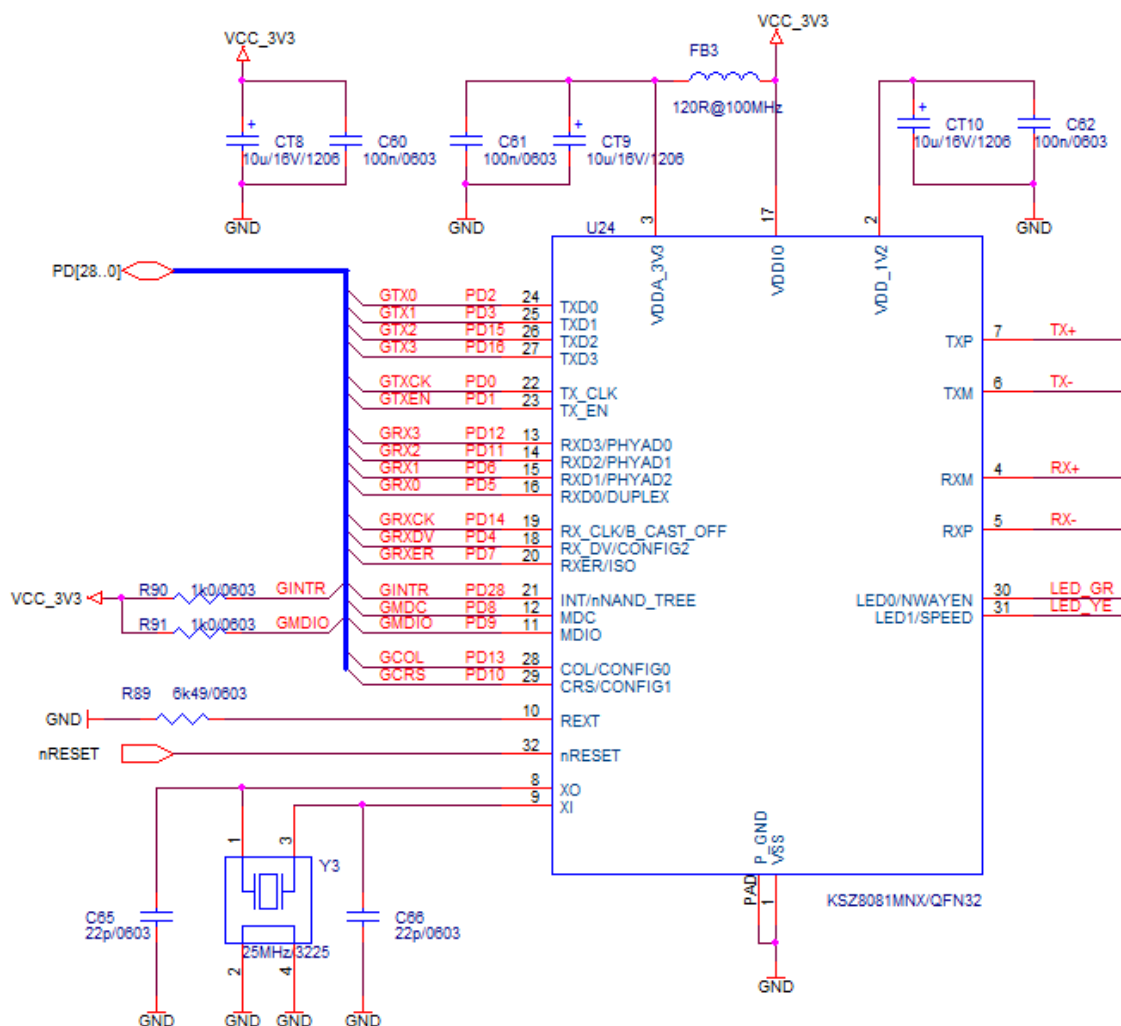
5.13 Fyzická vrstva rozhraní Ethernet

Obdobně jako u sběrnic CAN nebo RS-485 je nutné pro správnou funkci zajistit fyzickou vrstvu. Zatímco v předešlých případech se jednalo o poměrně jednoduchý budič sběrnice, pro rozhraní Ethernet je potřebný složitější obvod. Mikrokontrolér obsahuje Ethernet MAC (Media Access Controller) odpovídající druhé vrstvě modelu ISO/OSI. Nejnižší fyzickou vrstvu musí zajistit externí součástka, tzv. obvod PHY. Mikrokontrolér s ní komunikuje pomocí rozhraní MII (Media Independent Interface) a MDIO (Management Data Input/Output). Tím je dán hlavní požadavek na obvod tvořící fyzické rozhraní. Druhým důležitým je maximální komunikační rychlost. Mikrokontrolér podporuje rychlosti 10 nebo 100 Mbit/s. Adekvátně k popsaným požadavkům byl vybrán obvod PHY a konektor RJ45 se zabudovaným transformátorem.

Vybraným obvodem fyzického rozhraní je KSZ8081MNX splňující všechny požadavky. Při zapojení jsem vycházel z aplikačních poznámek uvedených v katalogovém listu [22]. Obvod vyžaduje dvojí napájení a to klasické 3,3 V a analogové 3,3 V, které je od klasického odděleno feritovou perlou FB₃. Obvod obsahuje zabudovaný stabilizátor vytvářející napětí 1,2 V pro napájení jádra. Všechny tři napětí jsou blokovány pomocí dvojce kondenzátorů 100 nF a tantalového 10 μF/16V. Pro fungování je nezbytné zajistit 25 MHz zdroj taktu, tím může být krystalový oscilátor nebo externí hodinový signál. Zvolen byl krystalový oscilátor, ke kterému jsou paralelně připojeny kondenzátory C₆₅ a C₆₆ s hodnotou 22 pF. K vývodu REXT je připojen rezistor R₈₉ = 6,49 kΩ, kterým je nastaven výstupní proud. Význam ostatních signálů rozhraní MII a MDIO lze nalézt v katalogovém listě součástky. Realizované zapojení je na obr. 22.

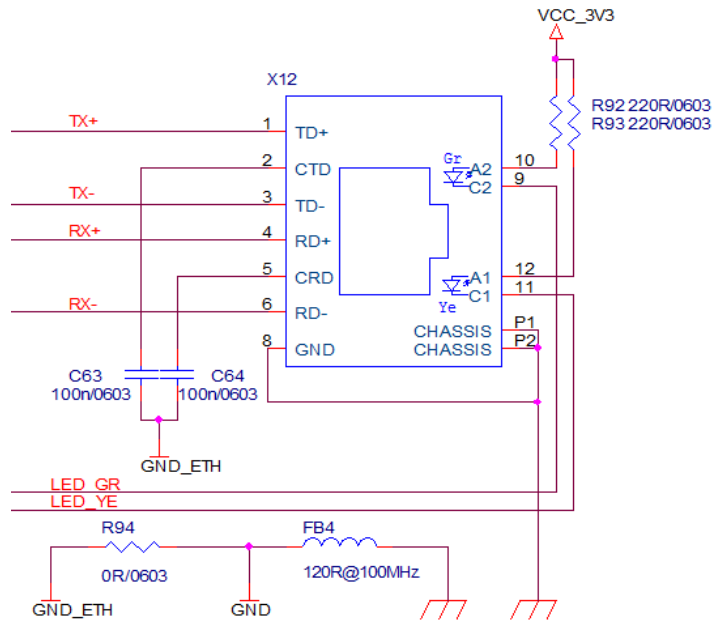
Výběr vhodného konektoru je dán požadavky obvodu KSZ8081MNX. Oddělovací transformátor v konektoru musí splňovat následující parametry:

- převodní poměr 1:1
- indukčnost minimálně 350 μH
- vložené ztráty typicky 1,1 dB
- elektrická pevnost 1500 V



obr. 22: Schéma zapojení obvodu KSZ8081MNX

Vybraný typ konektoru splňuje zadané požadavky, navíc je vybaven dvěma indikačními LED diodami zelené a žluté barvy. Ty jsou ovládané z KSZ8081MNX a jejich funkce je programově volitelná. Zapojení celého konektoru je vidět na obr. 23. Vyvedené středy transformátorů jsou připojeny přes dva kondenzátory C_{63} a C_{64} k potenciálu označený jako GND_ETH. Ten může být volitelně spojen se signálovou zemí GND propojkou $R_{94} = 0 \Omega$. Kostra konektoru je spojena se signálovou zemí přes feritovou perlu FB_4 .



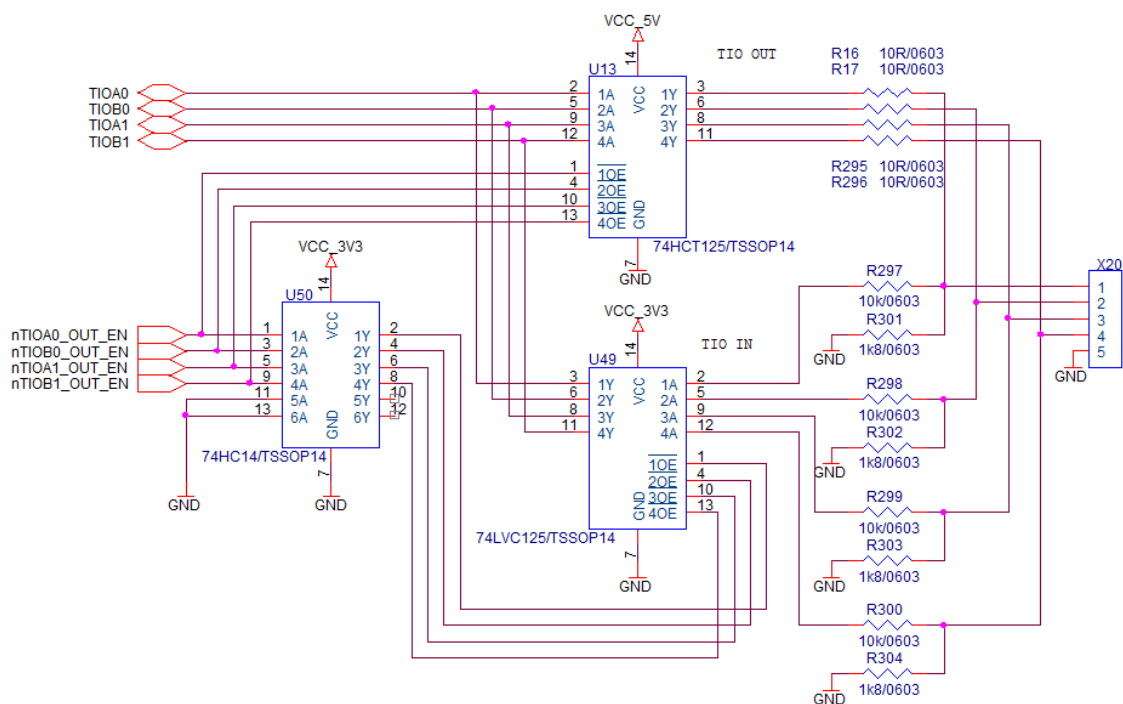
obr. 23: Schéma zapojení konektoru RJ45

5.14 Zapojení časovačů/čítačů

Z požadavku možnost řídit např. krokové motory nebo naopak snímat signál z IRC (Incremental Rotary Encoder) snímačů byly vyvedeny na konektor vývody čítačů mikrokontroléru. Ten obsahuje celkem tři 32-bitové čítače a každý čítač má tři nezávislé kanály se signály TCLK, TIOA a TIOB. Celkem mikrokontrolér disponuje 9 nezávislými vstupy či výstupy čítačů označené jako TIOA a TIOB. Signál TCLK je vstup pro externí hodinový signál. Pro každý kanál může být nezávisle vybrán zdroj hodinového signálu buď externí TCLK nebo vnitřní odvozený od taktu mikrokontroléru. Signál TIOA může též sloužit jako zpětná vazba signálu TIOB, který je vnitřně zapojen jako zdroj hodinového signálu. To je velice výhodné právě v případě řízení krokového motoru, kdy tímto způsobem mohou být počítány kroky a tím určena pozice motoru při znalosti počtu kroků na jednu otáčku.

Protože funkce časovačů jsou na vývodech mikrokontroléru alternovány s jinými perifériemi, zůstala volná pouze jedna dvojice signálů TIOA a TIOB. Z důvodu využití některých časovačů ve funkci PWM výstupů pro analogové výstupy jsem se rozhodl jednu dvojici TIOA a TIOB využít dvakrát. Jednou ve funkci analogových výstupů a podruhé čistě jako časovače. V případě využití jako časovač je počet použitelných analogových výstupů snižena na šest. Na toto rozhodnutí bylo třeba brát zřetel při tvorbě softwaru.

Vlastní zapojení je ovlivněno faktem, že se může jednat o vstup nebo výstup a to pro každý jeden vývod nezávisle. Navrženo bylo řešení, zobrazené na obr. 24, které umožňuje volitelně pro jednotlivé vývody určit směr. Řízení směru je ovládáno čtveřicí signálů TIO_OUT_EN.



obr. 24: Schéma zapojení časovačů

Pro zajištění bez kolizních stavů jsou ovládací signály zapojeny přímo do budiče výstupů a přes invertor přivedeny do obvodu zajišťující vstupy. Tím je 74LVC125, který slouží jako převodník úrovní. Mezi jeho vstupy a konektor jsou vloženy rezistory 10 k Ω jako ochrana. Rezistory 1,8 k Ω slouží jako zátěž pro signál a tím zvyšují odolnost proti rušení, neboť obvodem protéká definovaný proud a vstup tak nemá vysokoimpedanční charakter. Výstupy realizuje obvod 74HCT125, na jehož výstupech jsou umístěny 10 Ω rezistory limitující výstupní proud. Maximální úroveň signálů, které lze na konektor připojit je 5 V. Úroveň výstupních signálů je také 5 V.

6 SW řešení

Druhým úkolem práce bylo vytvořit základní programové vybavení pro vyvinutou řídicí jednotku. Stručně je zde popsán jeho návrh a funkce. Protože vytvoření zaváděcí aplikace Bootloader je obecně složitá záležitost, byly mi firmou ConTeK poskytnuty základní části, ze kterých jsem mohl vycházet. Jednalo se o podpůrné knihovny vytvořené firmou ConTeK nebo o přeжатé a upravené knihovny vydané výrobcem mikrokontroléru. Původní verze jsou volně dostupné na internetových stránkách firmy Atmel, která mikrokontrolér vyrábí.

6.1 Bootloader

Bootloader je jednoduchá aplikace sloužící k nahrávání dalších uživatelských aplikací. Nahrána je do vnitřní paměti FLASH pomocí rozhraní JTAG. V mém případě k tomu posloužil volně šiřitelný nástroj OpenOCD. Hlavní funkcí Bootloaderu je prvotní inicializace mikrokontroléru. Při ní jsou nastaveny systémové hodiny, základní periferie jako např. UART sloužící pro následnou komunikaci se zavaděčem.

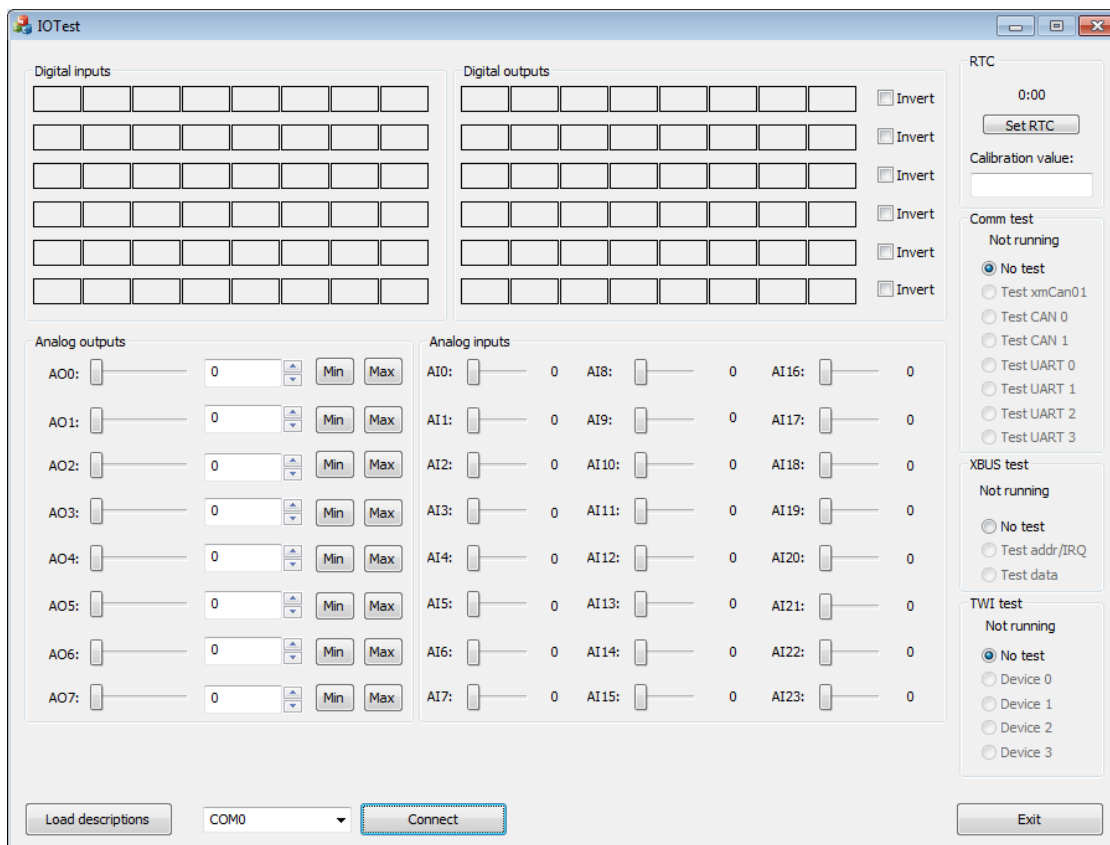
Po zapnutí je z paměti FLASH zkopírován do SRAM paměti a v ní spuštěn. Po spuštění dojde k inicializaci nezbytných periférií. Po té jsou kontrolovány podmínky, zda má dojít ke spuštění uživatelské aplikace či nikoliv. První je stav volitelné propojky JP₂ na vývodech 1-2, kdy nízká úroveň znamená setrvání v Bootloaderu. Druhou podmínkou je testování přítomnosti příznaku zda se ve FLASH paměti nachází aplikace. Pokud je příznak nalezen, aplikace je spuštěna.

6.2 Implementace knihoven

Protože Bootloader je ve firmě ConTeK vytvořen jako univerzální aplikace z části nezávislá na hardwaru, pomocí podmíněných překladů a využívající jen knihoven pro danou hardwarovou konfiguraci, bylo mým úkolem tyto knihovny vytvořit. Knihovny tvoří jakousi nejnižší vrstvu definující použitý hardware a slouží jako rozhraní, které využívají aplikace vyšších vrstev. Ty mohou být obdobně jako Bootloader přenositelné, tedy naprogramovány univerzálně nezávisle na využití hardwarové platformě. Vytvořeny byly dvě knihovny *ioboard.h* a *hwboard.h*, tak aby svou strukturou odpovídaly ostatním firemním knihovnám a umožňovaly univerzální využití.

Knihovna *ioboard* slouží přímo k obsluze zařízení řídicí jednotky. Zajišťuje zápis a čtení hodnot na vstupech a výstupech. Druhá knihovna *hwboard* odpovídá použitému hardwaru a má na starosti inicializaci. Nastavuje jednotlivým vývodům mikrokontroléru konkrétní funkci v závislosti na využití periférii. Pro ně povoluje napájení a hodinový signál dané periferie, případně nastaví výchozí stav nevyužitým vývodům mikrokontroléru.

Obě knihovny využívají aplikace Bootloader a IOTest, která slouží pro testování hardwarového vybavení řídicí jednotky. Testování probíhá pomocí programu *IOTest.exe* spuštěným na PC. Komunikace s řídicí jednotkou s nahanou aplikací IOTest probíhá pomocí sériové linky. Na obr. 25 je ukázka z programu *IOTest.exe*.



obr. 25: Ukázka programu IOTest

7 Závěr

Cílem této diplomové práce byla realizace univerzální řídicí jednotky s mikrokontrolérem ATSAM4E16E. Při návrhu hardwaru byly splněny veškeré požadavky. Desku plošných spojů jsem nechal dle výrobních podkladů zhotovit, následně jsem ji osadil příslušnými součástkami, oživil a otestoval funkčnost jednotlivých periférií.

V druhé části práce týkající se programového vybavení byly vytvořeny dvě knihovny *ioboard.h* a *hwboard.h*. Pomocí nich byl vytvořena aplikace Bootloader přiložená na CD ve formátu *.hex* pro možnost nahrání do paměti mikrokontroléru. Zároveň knihovny sloužily pro aplikaci IOTEST (přiložené na CD), pomocí které proběhlo otestování základních periférií řídicí desky. Z důvodů časové tísňe a nedodání součástek distributorem nebyly otestovány všechny periferie. Konkrétně se jedná o obvod fyzické vrstvy ethernetu, a proto nebylo možné vyzkoušet tuto periférii. Testovány byly digitální a analogové vstupy a výstupy, komunikační rozhraní RS-232 a CAN. Dále byl otestován zápis do použitých externích pamětí, mimo zápis na paměťovou kartu mikroSD.

Při návrhu jsem se dopustil chyby v zapojení spínaného zdroje 3,3 V. Bylo špatně vytvořeno pouzdro součástky a to vedlo k nefunkčnosti zdroje. Tuto chybu jsem vyřešil pomocí stabilizovaného zdroje LM1117 s výstupním napětím 3,3 V, který jsem měl k dispozici. Vstupní napětí do stabilizátoru je 5 V z druhého spínaného zdroje. Díky tomuto řešení bylo možné otestovat hlavní části desky.

Výhody této řídicí jednotky vidím především v robustním designu s možností dlouhodobého uplatnění. Mikrokontrolér disponuje velkým výpočetním výkonem.

Literatura:

- [1] Cortex-M4 Processor – ARM [online]. ARM Ltd. [cit. 2016.04.15]. Dostupné z: <https://www.arm.com/products/processors/cortex-m/cortex-m4-processor.php>
- [2] ARM Company Milestones - ARM [online]. ARM Ltd. [cit. 2016.04.15]. Dostupné z: <http://www.arm.com/about/company-profile/milestones.php>
- [3] Arm3.jpg. In: *Sunwook's Blog* [online]. Sunwook's Blog [cit. 2016.04.15]. Dostupné z: <https://swbae98.files.wordpress.com/2011/04/arm3.jpg>
- [4] Jsou české technické normy v ČR závazné? A jak je tomu ve světě? [online]. Úřad pro technickou normalizaci metrologii a státní zkušebnictví [cit. 2016.04.19]. Dostupné z: <http://www.unmz.cz/urad/prehrlub.asp?cd=53&typ=c>
- [5] ČSN EN 61131-2 ed. 2. *Programovatelné řídicí jednotky - Část 2: Požadavky na zařízení a zkoušky*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2008. 140 p., zakoupeno firmou ConTeK, spol. s r.o.
- [6] ATSAM4E16E katalogový list: SAM4E Series. Atmel Corporation. *Atmel Corporation* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-11157-32-bit-Cortex-M4-Microcontroller-SAM4E16-SAM4E8_Datasheet.pdf
- [7] M41T81 katalogový list: Serial access real-time clock with alarm. STMICROELECTRONICS. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/ed/fa/ab/15/1e/86/46/3c/CD00002302.pdf/files/CD00002302.pdf/jcr:content/translations/en.CD00002302.pdf>
- [8] VN808CM-E katalogový list: Octal channel high-side driver. STMICROELECTRONICS. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group2/a7/3a/c1/a2/1f/7d/4c/cb/CD00059622/files/CD00059622.pdf/jcr:content/translations/en.CD00059622.pdf>
- [9] 74LVC4245 katalogový list: SN74LVC4245A Octal Bus Transceiver and 3.3-V to 5-V Shifter With 3-State Outputs. Texas Instrumens. *Texas Instrumens* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc4245a.pdf>
- [10] TLC2272 katalogový list: TLC227x, TLC227xA: Advanced LinCMOS Rail-to-Rail Operational Amplifiers. Texas Instrumens. *Texas Instrumens* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc2272.pdf>
- [11] LM4128-Q1 katalogový list: LM4128/LM4128Q SOT-23 Precision Micropower Series Voltage Reference. Texas Instrumens. *Texas Instrumens* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4128-q1.pdf>

- [12] Circuit Simulator Applet [online]. Paul Falstad [cit. 2016.04.19]. Dostupné z: <http://www.falstad.com/circuit/index.html>
- [13] David M. Alter. Using PWM Output as a Digital-to-Analog Converter on a TMS320F280x Digital Signal Controller Application Report. In: *Texas Instrumens* [online]. Texas Instrumens 2008. Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/spraa88a/spraa88a.pdf>
- [14] AllegroMicroSystem - Method for Converting a PWM Output to an Analog Output When Using Hall Effect Sensor ICs [online]. AllegroMicroSystem. [cit. 2016.03.19]. Odstupné z: <http://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Method-for-Converting-a-PWM-Output-to-an-Analog-Output-When-Using-Hall-Effect-Sensor-ICs.aspx>
- [15] LT1013D katalogový list: LT1013D Dual precision operational amplifier. Texas Instrumens. *Texas Instrumens* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lt1013d.pdf>
- [16] LM3150 katalogový list: LM3150 Wide-VIN Synchronous Buck Controller. Texas Instrumens. *Texas Instrumens* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3150.pdf>
- [17] IRF7842 katalogový list: IRF7842 HEXFET® Power MOSFET. International Rectifier. *International Rectifier* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf7842.pdf>
- [18] LM2675 katalogový list: LM2675 SIMPLE SWITCHER® Power Converter High Efficiency 1A Step-Down Voltage Regulator. Texas Instrumens. *Texas Instrumens* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2675.pdf>
- [19] AM2D-0512DZ katalogový list: Series AM2D-Z, DC-DC Converter. Aimtec. *Aimtec* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/Datasheet/HighResolution/AM2D-Z.pdf?ft4=12-769>
- [20] TJA1050 katalogový list: TJA1050 High speed CAN transceiver. NXP. *NXP* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/TJA1050.pdf
- [21] FODM611 katalogový list: FODM611 High Noise Immunity, 5V, 10Mbit/sec Logic Gate Output (Open Collector) Optocoupler. Fairchild Semiconductor Corporation. *Fairchild Semiconductor Corporation* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FO/FODM611.pdf>
- [22] KSZ8081MNX katalogový list: KSZ8081MNX 10Base - T/100Base - TX Physical Layer Transceiver. Micrel Inc. *Micrel Inc.* [online]. [cit. 2016.05.10]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/KSZ8081MNX-RNB.pdf>

Přílohy

Příloha 1: Schéma řídicí desky

Příloha 2: Osazovací plán, vrchní a spodní strana DPS

Příloha 3: Seznam použitých součástek

Příloha 4: Zapojení sběrnice XBus

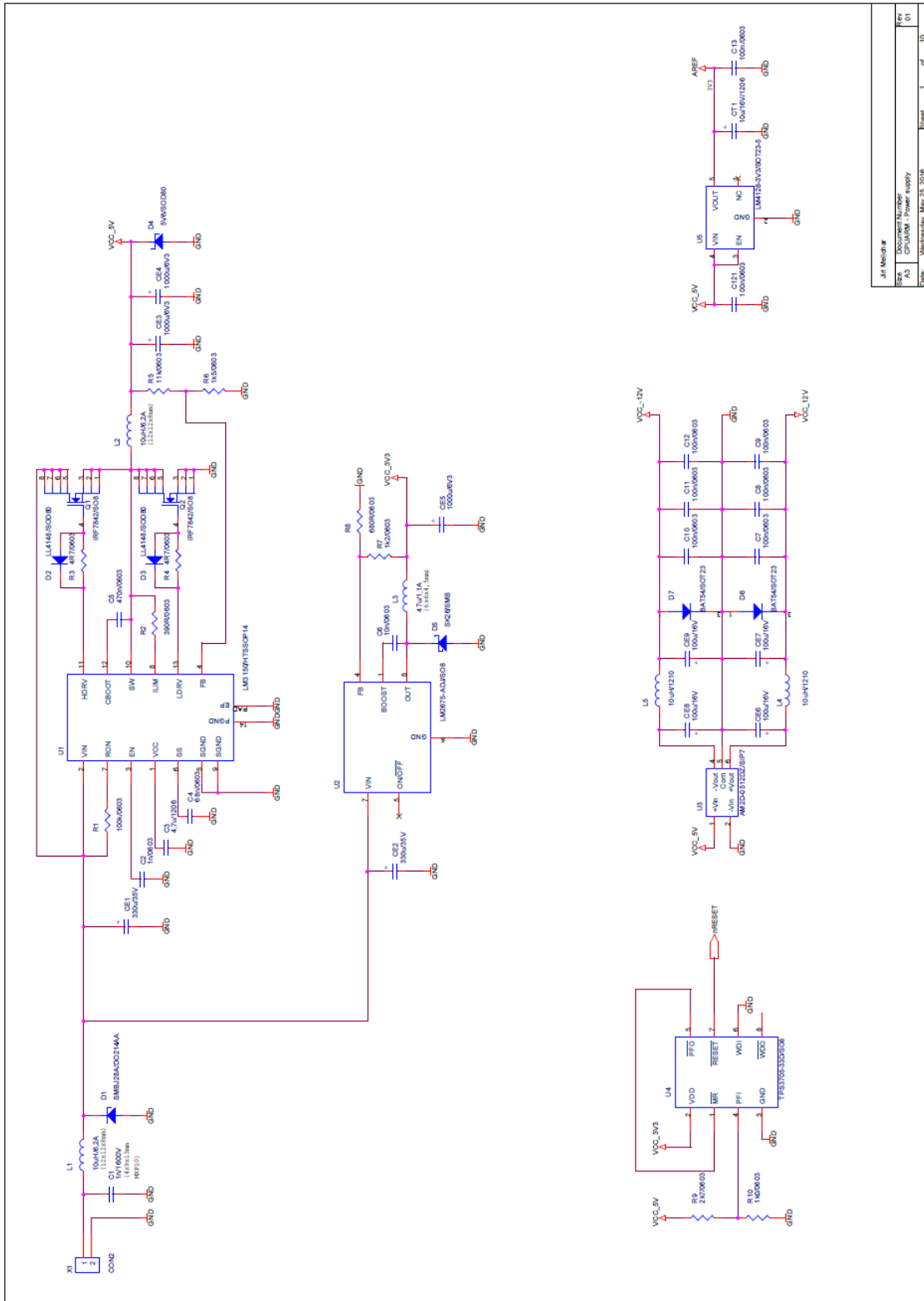
Příloha 5: Fotografie finálního výrobku

Příloha 6: Obsah přiloženého CD: Text diplomové práce

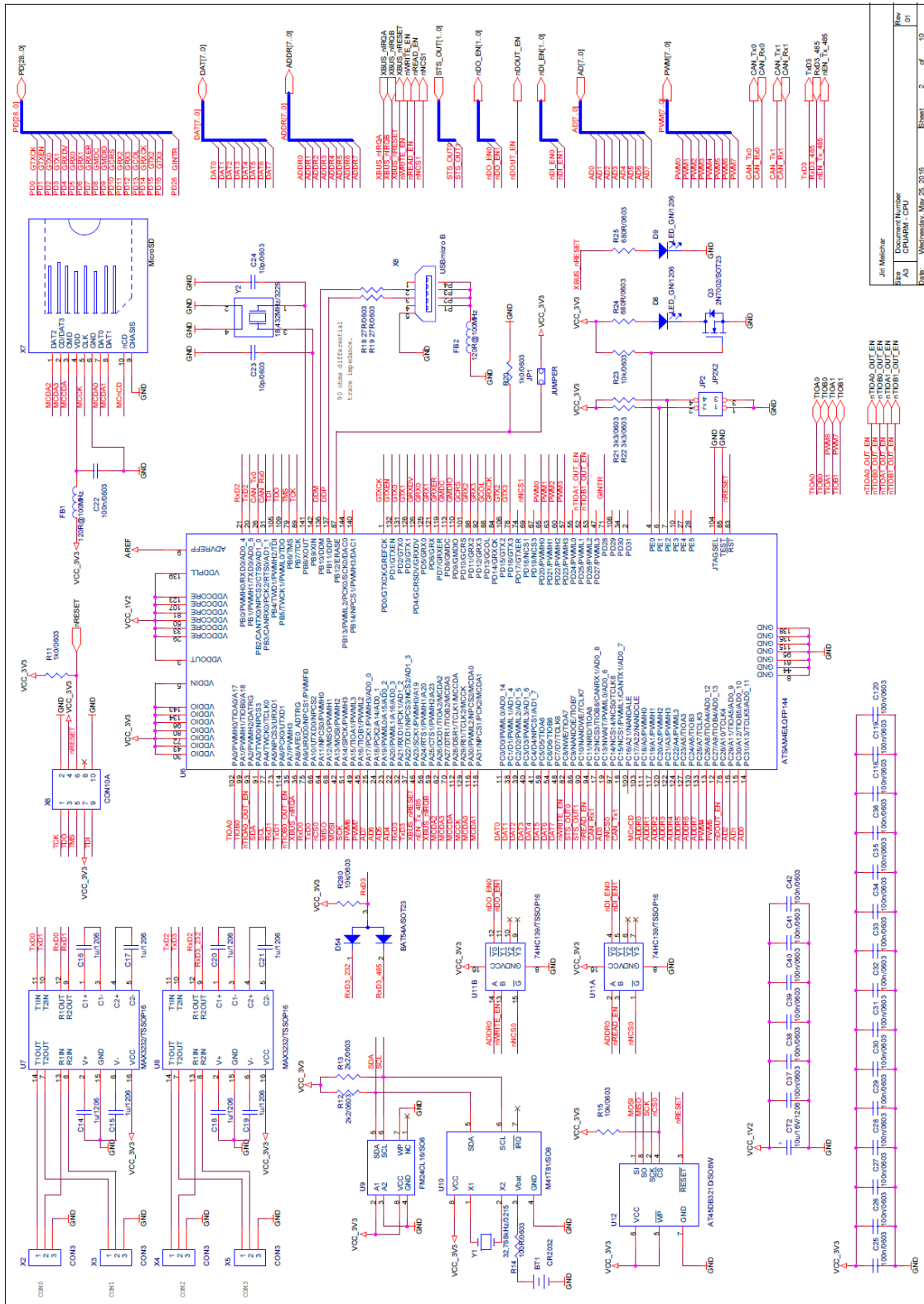
Přílohy

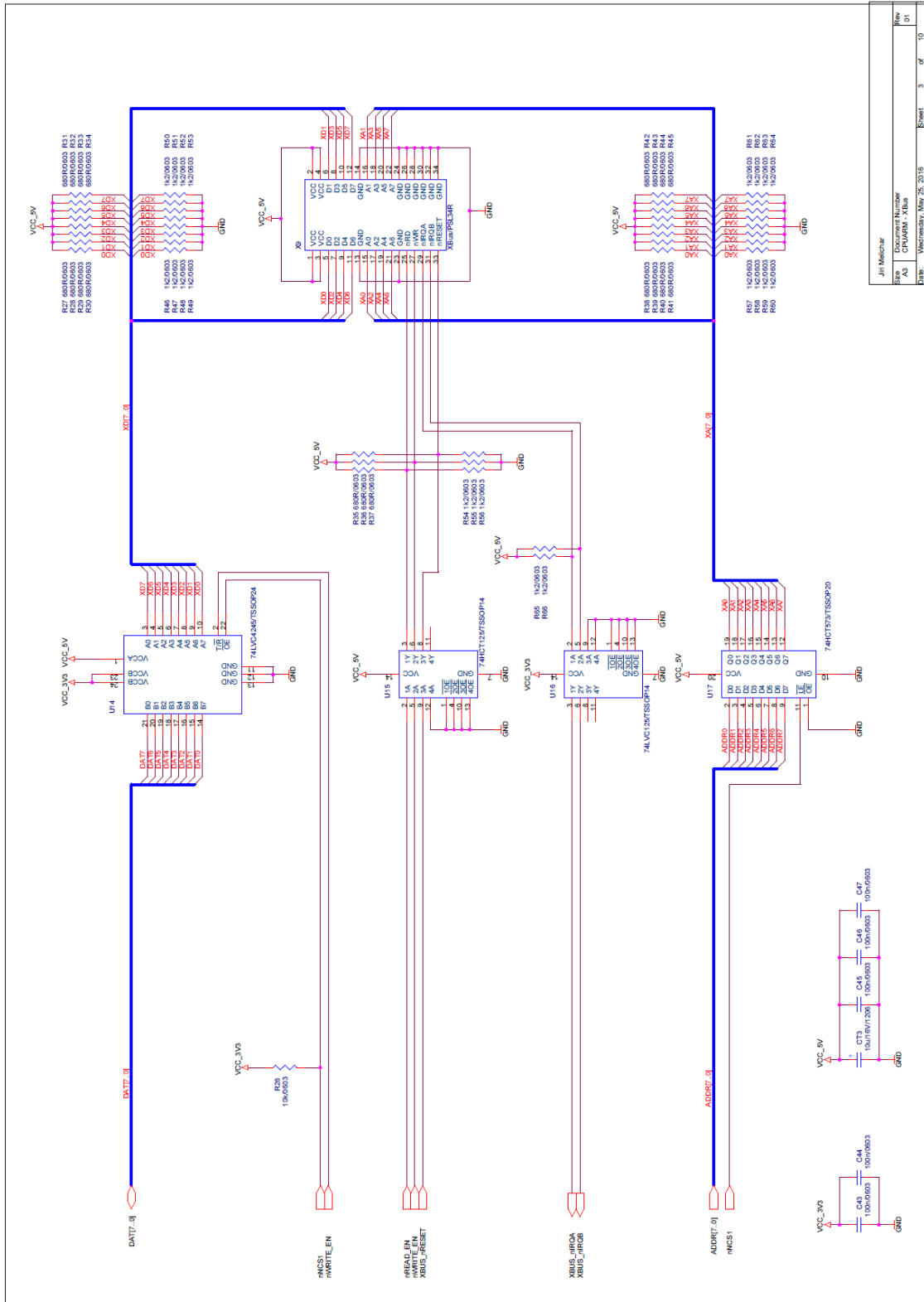
Archiv zálohy celého obsahu

Příloha 1: Schéma řídicí desky

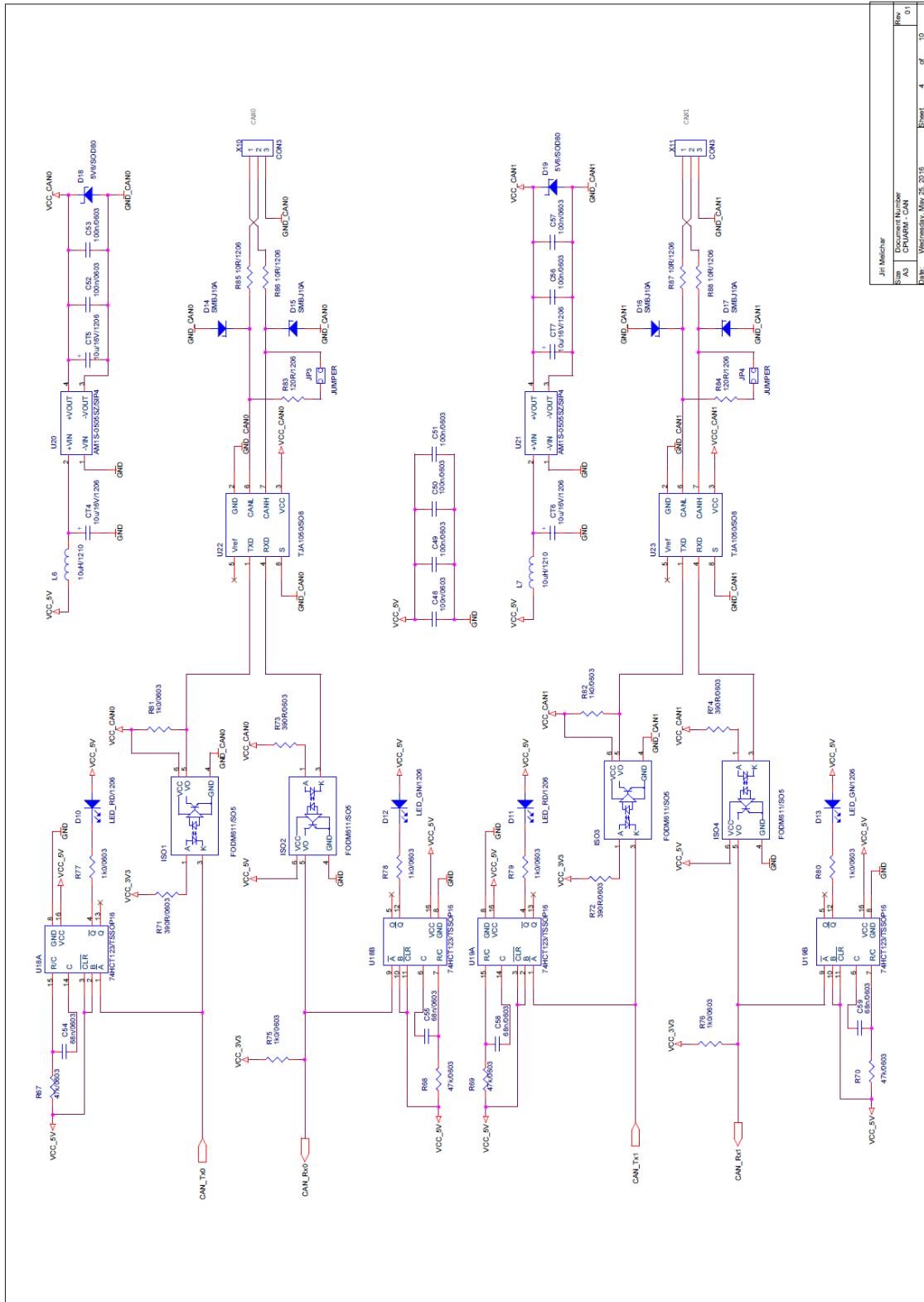


Jiří Melichar	Sheet	of	10
Document Number			
CS: CPUARM - Power supply			
Date: 2018.05.23			

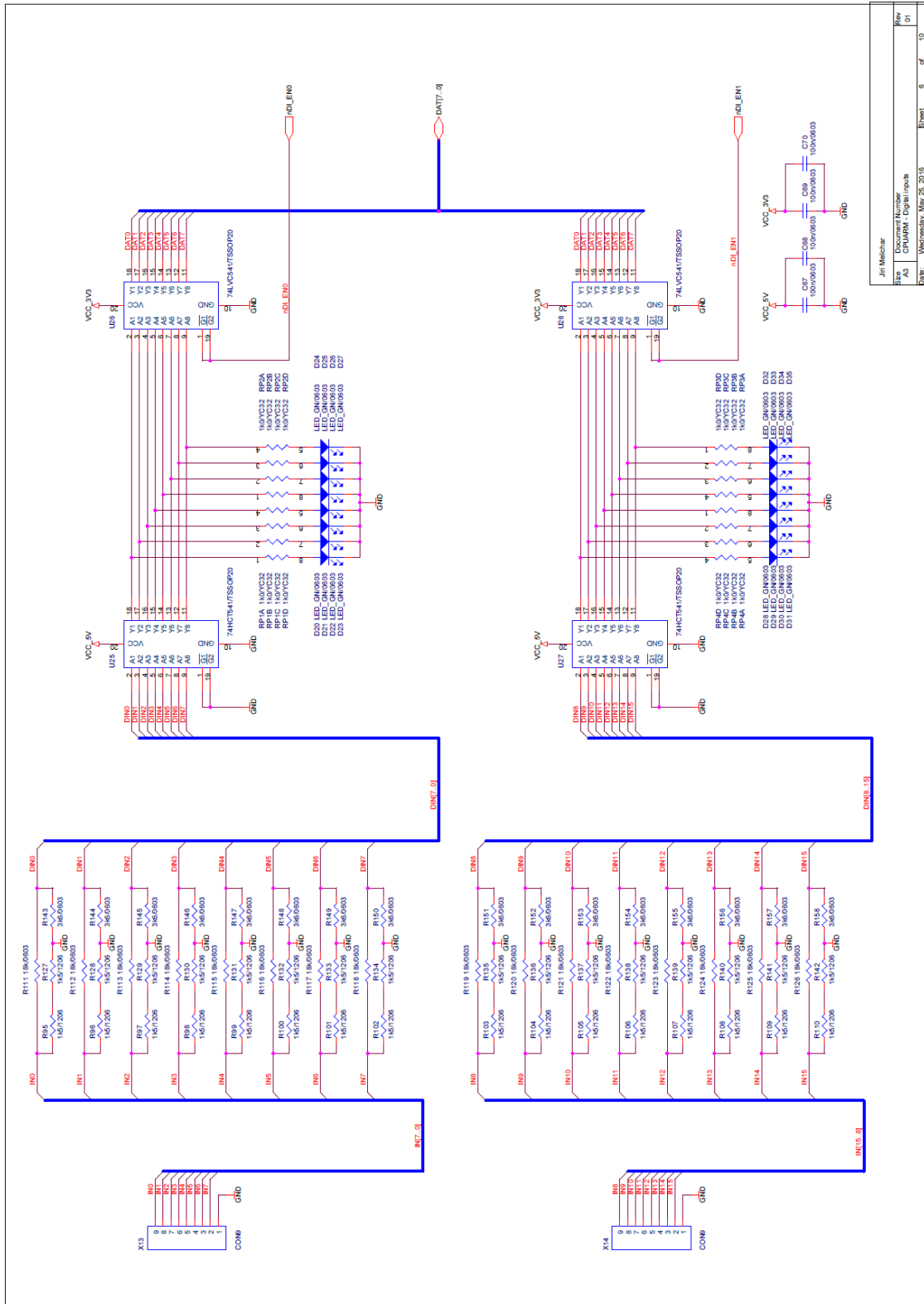




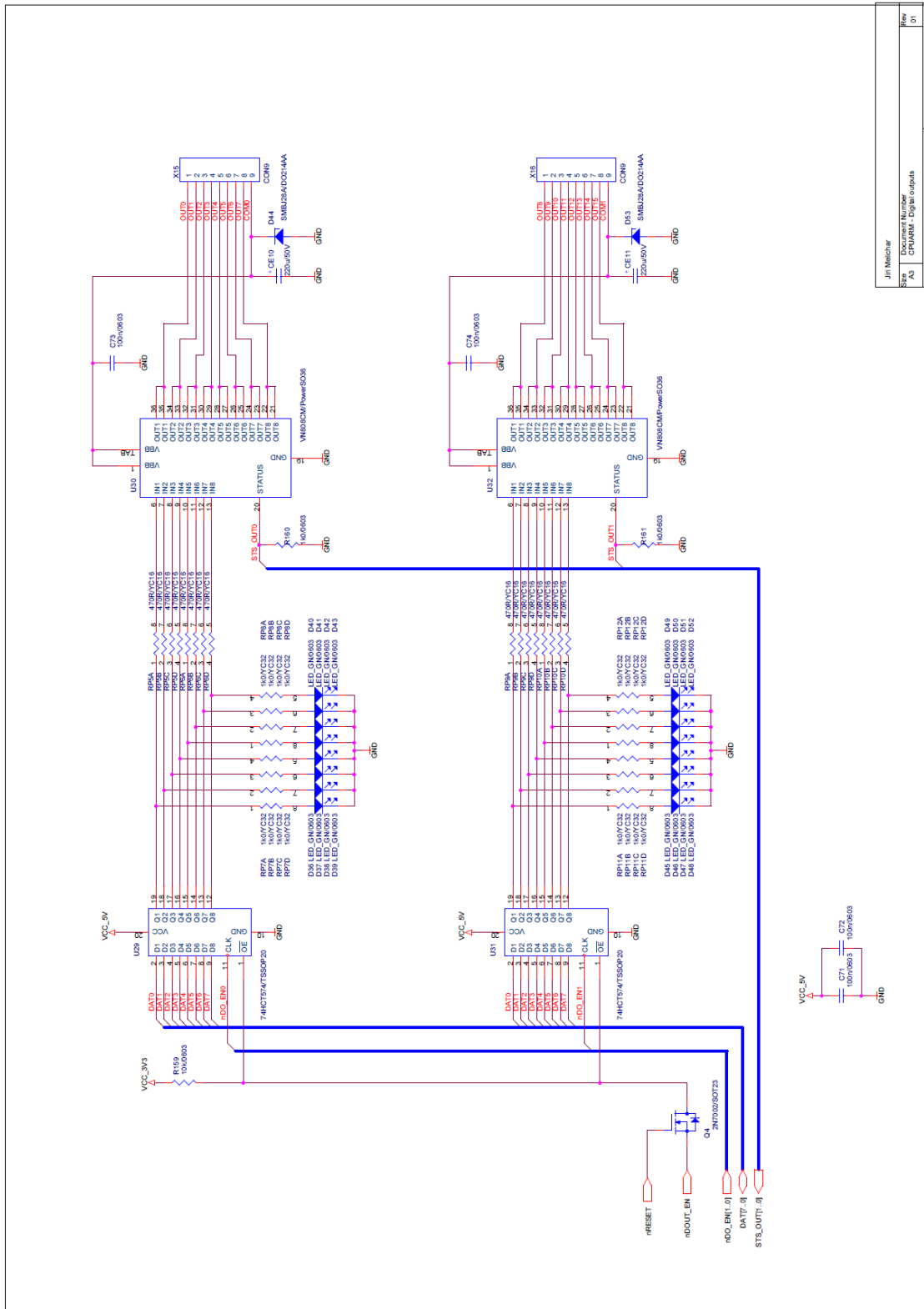
Jiji Meenar	Sheet	3	of	10
Docu	Document Number			
AI	CPUMARM - XEla			
2016	Wednesday, May 26, 2016			



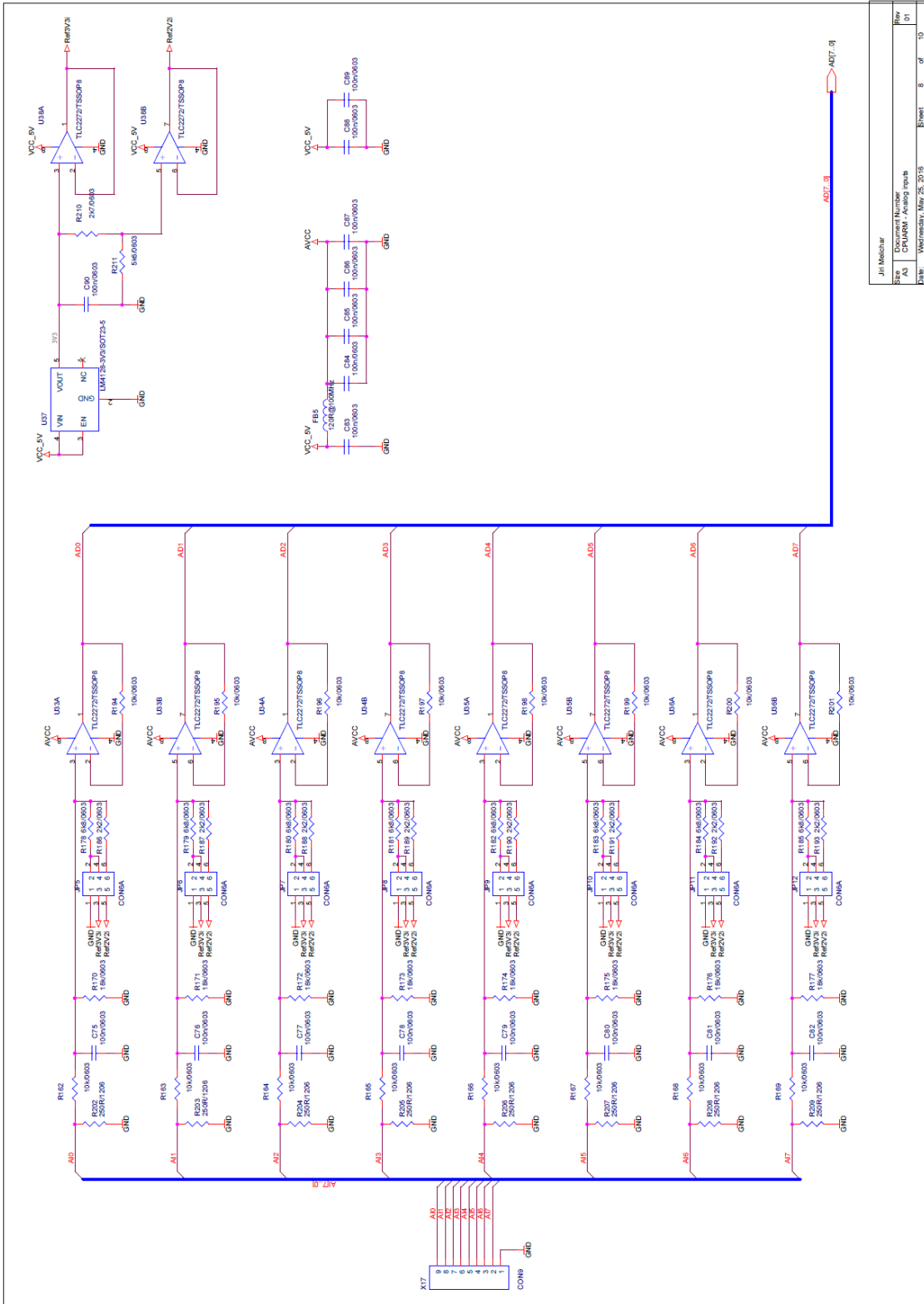
Jiri Melichar	Document Number	Rev
Size	CPJARM - CAN	01
Date	Wednesday, May 26, 2016	Sheet 4 of 10



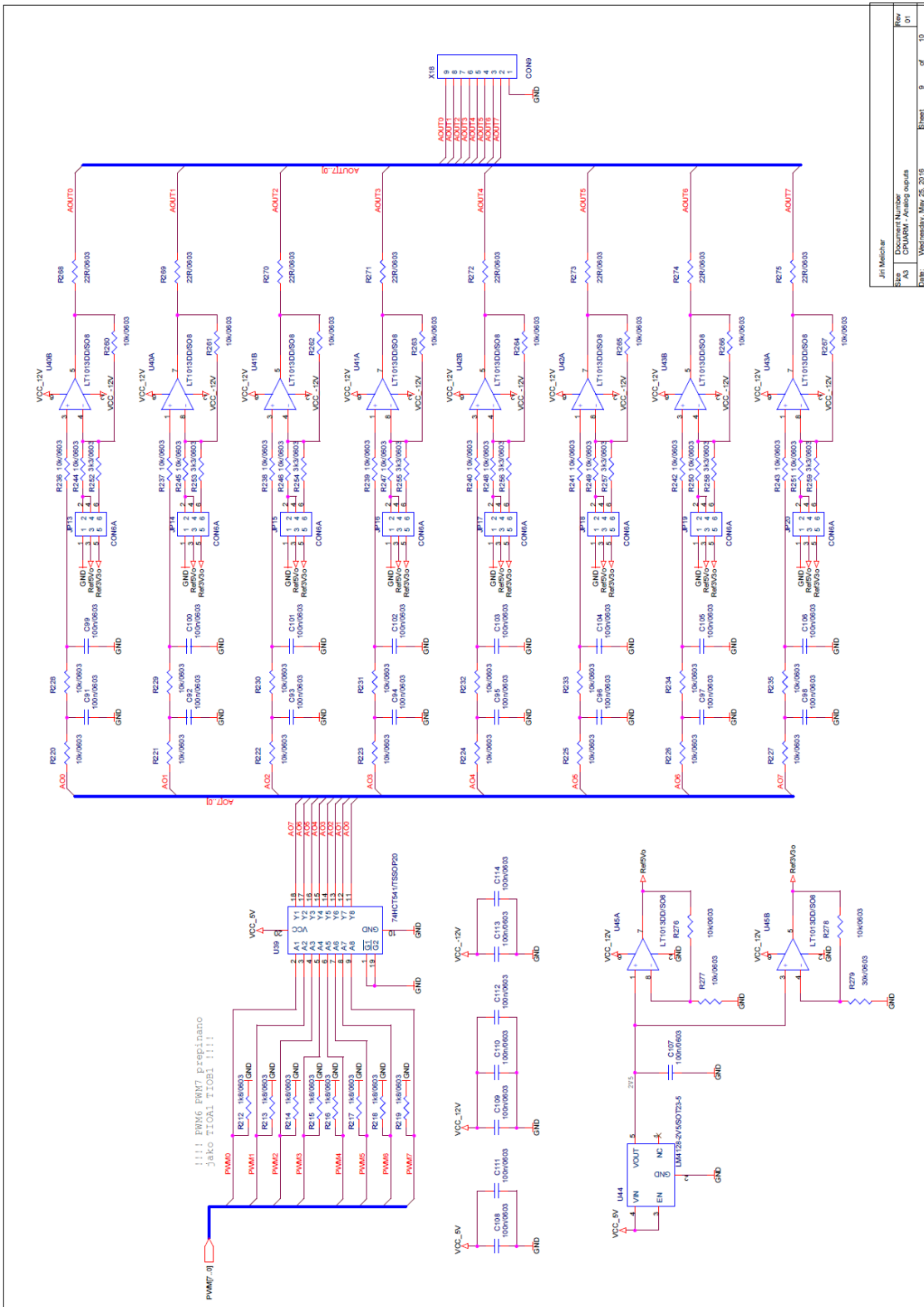
Doc No	CPUMAM - Digital Inputs
Rev	01
Page	6 of 10
Date	Wednesday, May 26, 2010
Sheet	6 of 10



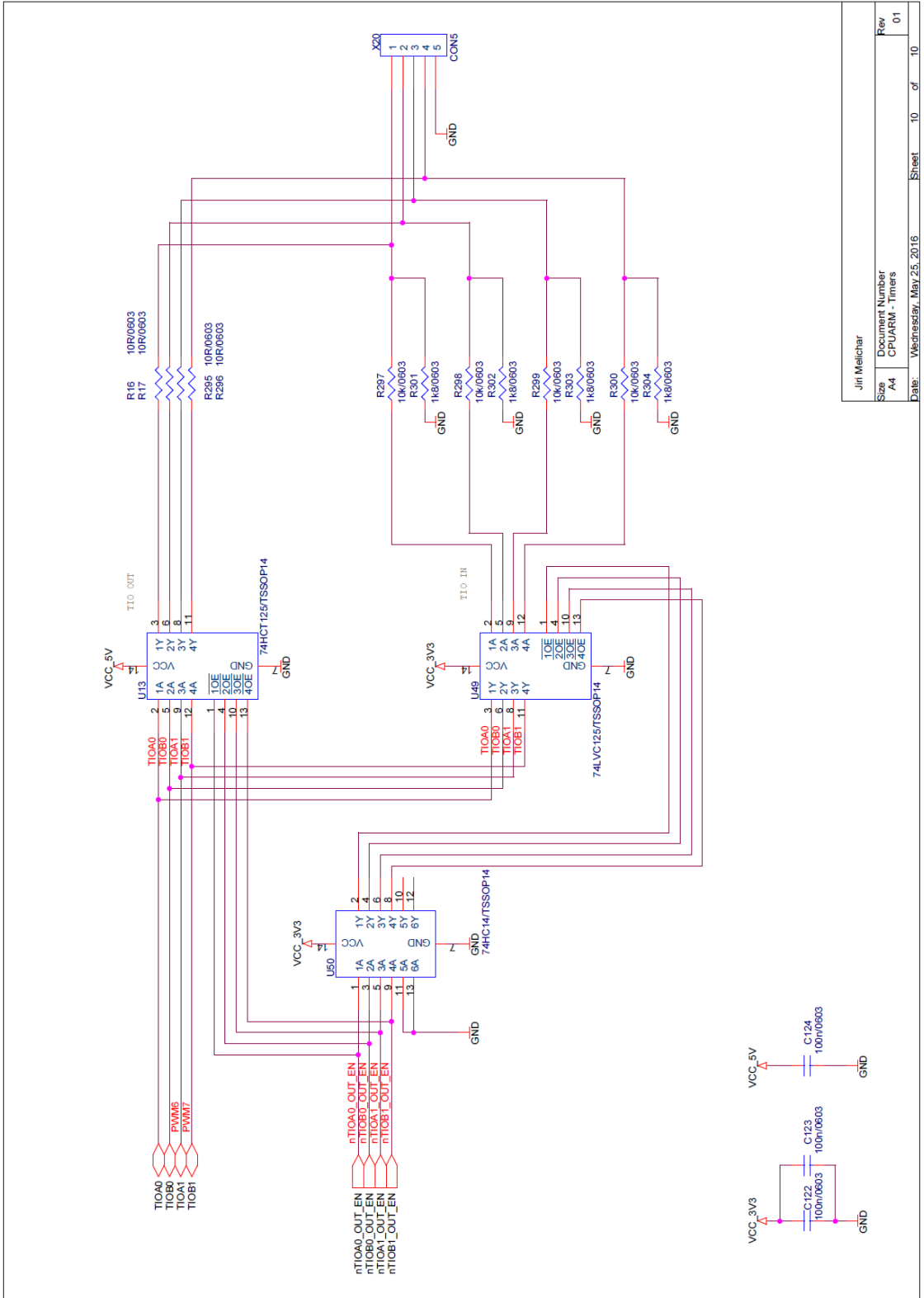
Jiri Melichar	Document Number	Rev
Size	CPUMAM - Digital outputs	01
Date	Wednesday, May 26, 2016	Sheet 7 of 10



Size	Document Number	Rev
A3	CP1ARM - Analog Inputs	01
Date	Wednesday, May 25, 2018	Sheet 6 of 10

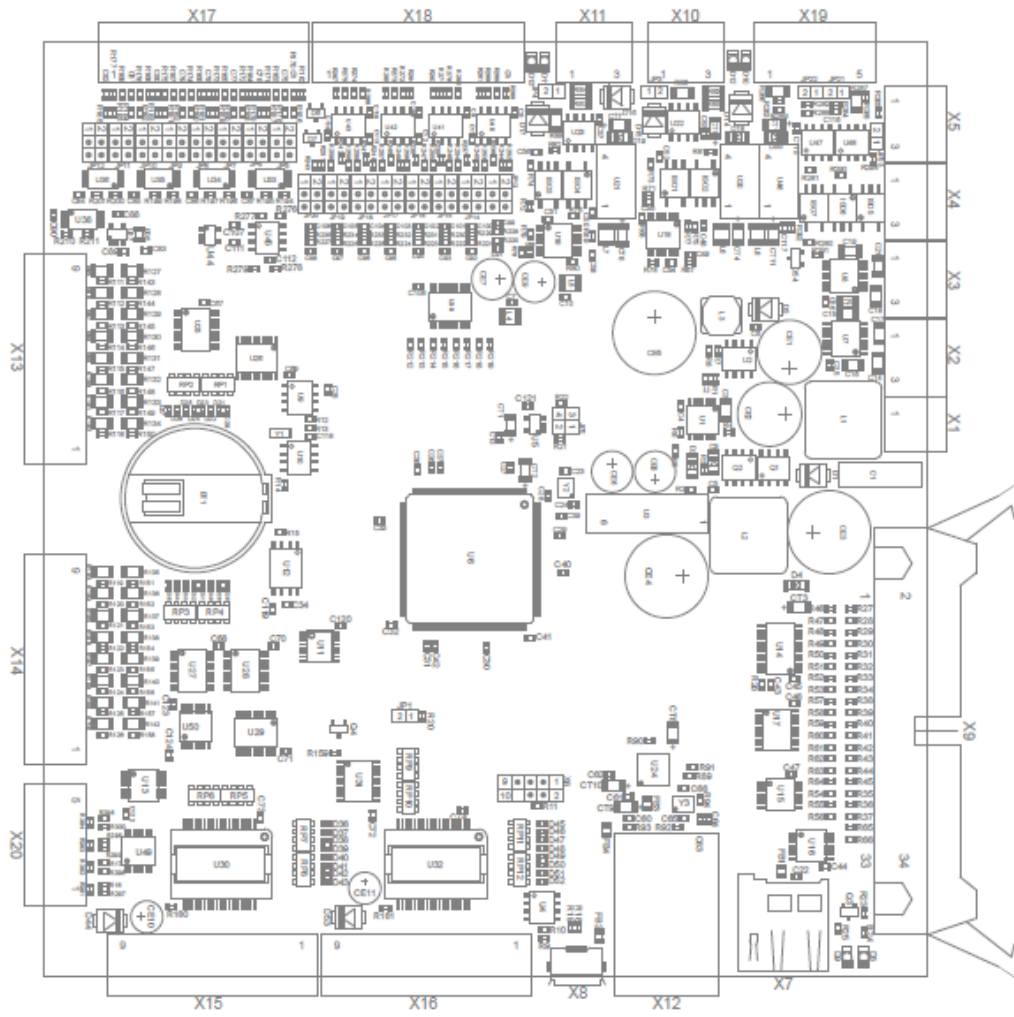


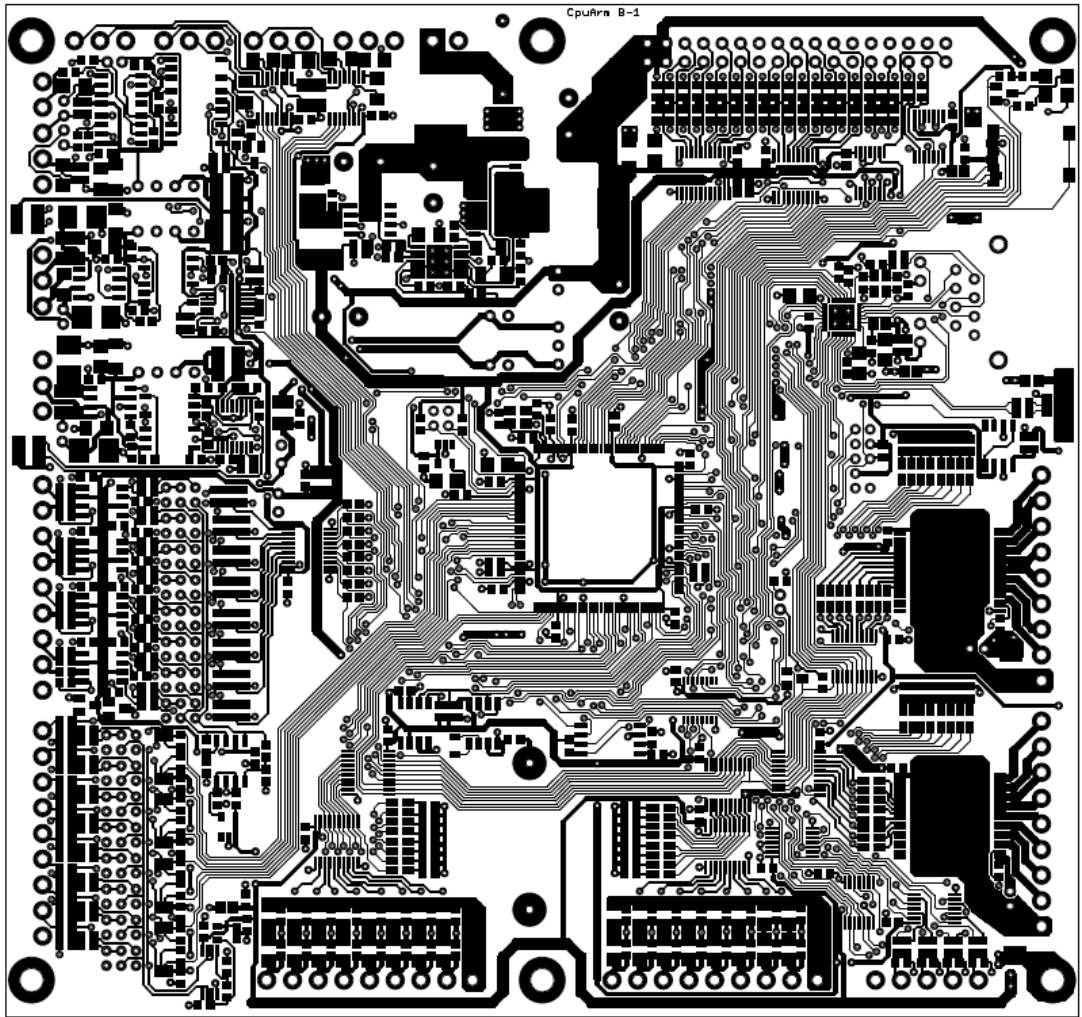
Jiri Melichar	Revision	9	of	10
Docuement Number	Rev			
CP4ARM - Analog output	A			
Date	Drawn	Wednesday, März 28, 2018		

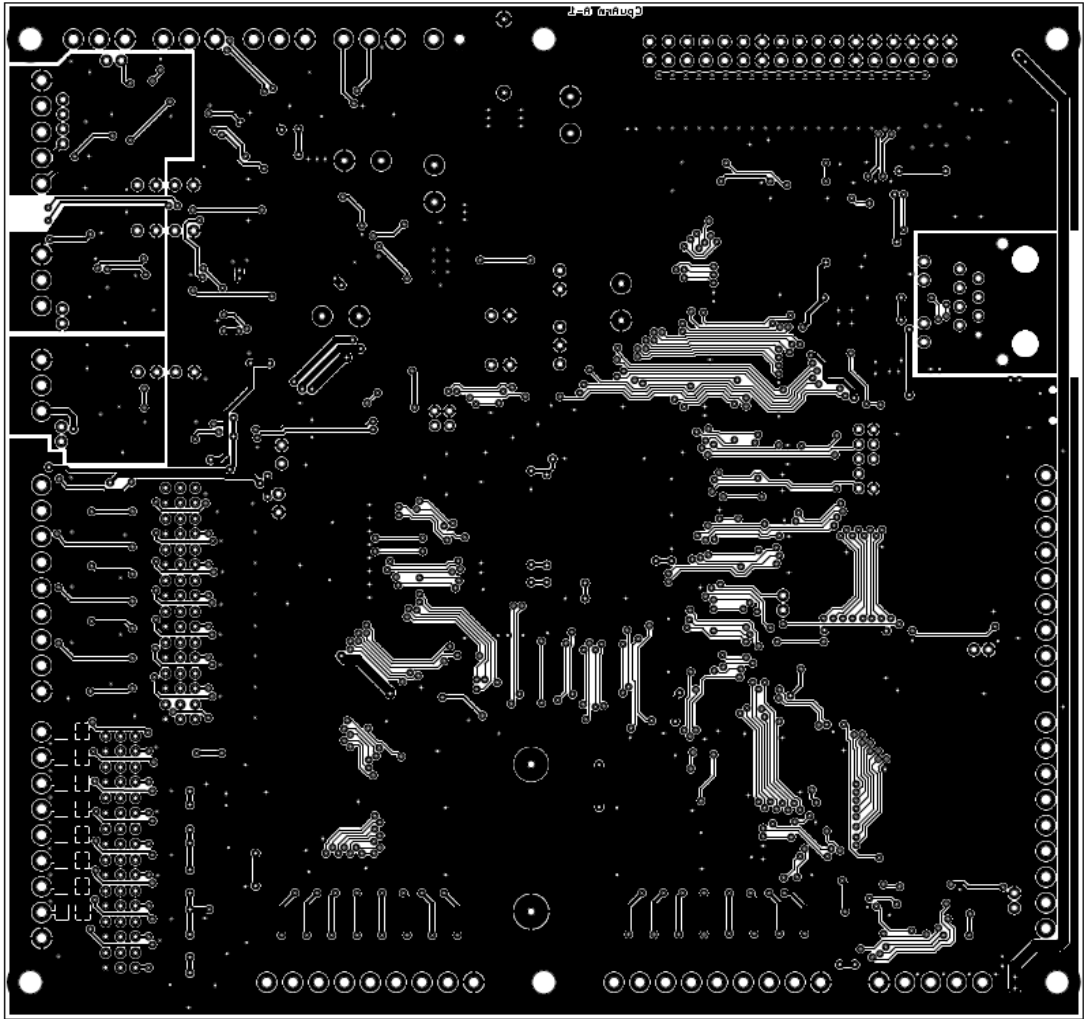


Jin Meilchar			
Size	Document Number	Rev	
A4	CPU/ARM - Timers	01	
Date:	Wednesday, May 25, 2016	Sheet	10 of 10

Příloha 2: Osazovací plán, vrchní a spodní strana DPS







Příloha 3. Seznam použitých součástek

Označení	Počet	Popis
X1	1	Konektor RM=3.50mm PCB, 90°, 2 piny
X2-5	4	Konektor RM=3.50mm PCB, 90°, 3 piny
X6	1	Kolíková lišta lámací 2x5 rovná, 2mm
X7	1	Konektor mikroSD, katalogové číslo 693 071 010 811
X8	1	Konektor mikroUSB, katalogové číslo 629 105 136 821
X9	1	Konektor PSL34R s klapkami 90° DPS
X10-11	2	Konektor RM=3.50mm PCB, 90°, 3 piny
X12	1	Konektor RJ45, katalogové číslo 749 901 012 1A
X13-18	6	Konektor RM=3.50mm PCB, 90°, 9 pinů
X19-20	2	Konektor RM=3.50mm PCB, 90°, 5 pinů
JP1	1	Kolíková lišta lámací 1x2 rovná, rozteč 2mm
JP2	1	Kolíková lišta lámací 2x2 rovná, rozteč 2mm
JP3-4	2	Kolíková lišta lámací 1x2 rovná, rozteč 2mm
JP5-20	16	Kolíková lišta lámací 2x3rovná, rozteč 2mm
JP21-23	3	Kolíková lišta lámací 1x2 rovná, rozteč 2mm
U1	1	DC-DC kontroler LM3150 HTSSOP14
U2	1	DC-DC regulátor LM2675 1,2-37V 1A SO8
U3	1	DC-DC AM2D-0512DZ 5V/+-12V +-83mA 2W
U4	1	Reset generátor TPS3705 3,3V SO8
U5, U37	2	Reference LM4128-3V3 SOT23-5p
U6	1	Procesor Cortex M4 ATSAM4E16EA 120MHz 1MB FLASH 128kB SRAM LQFP144
U7, U8	2	Budič RS232 MAX3232D 3-5V 250kBit TSSOP16
U9	1	FRAM 2kBx8bit I2C 3.3V SO8
U10	1	RTC I2C SMD SO8
U11	1	Integrovaný obvod 74HC139 TSSOP16
U12	1	Seriová FLASH 32Mbit AT45DB321D-SU SO8W
U13, U15	2	Integrovaný obvod 74HCT125 TSSOP16
U14	1	8x obousměrný budič 5V/3.3V 74LVC4245ADW TSSOP24
U16, U49	2	Integrovaný obvod 74LVC125 TSSOP16
U17	1	Integrovaný obvod 74HCT573 TSSOP20
U18, U19	2	Integrovaný obvod 74HCT123 TSSOP20
U20, U21, U49	3	DC-DC 5V/5V 200mA 1W SIP4
U22, U23	2	Budič CAN TJA1050T/N1 SO8
U24	1	Ethernet PHY 100Base-T KSZ8081RNXCA QFN32
U25, U27, U39	3	Integrovaný obvod 74HCT541PW TSSOP20
U26, U28	2	Integrovaný obvod 74LVC541APW TSSOP20
U29, U31	2	Integrovaný obvod 74HCT574PW TSSOP20
U30, U32	2	8x High Side budič 45V 0,7A PowerSO36

U33-U36, U38	5	Operační zesilovač TLC2272ACPW Rail2Rail TSSOP8
U40-U43, U45	5	Operační zesilovač LT1013DD SO8
U44	1	Reference LM4128-2V5 SOT23-5p
U47, U48	2	Budič RS485 SN75176B SMD SO8
U50	1	Integrovaný obvod 74HC14 TSSOP16
Y1		Krystal 32,768kHz 20ppm 12,5pF SMD 3215
Y2		Krystal 18,432MHz SMD 3225
Y3		krystal 25MHz SMD 3225
L1, L2	2	Indukčnost 10uH 6,2A SMD 12x12x8mm
L3	1	Indukčnost 47uH 1,1A SMD 6x6x4,5
L4-L8	5	Indukčnost 10uH 450mA SMD 1210
FB1-FB5	5	EMI feritová perla 120R@100MHz 0,5A high speed SMD 0805
ISO1-ISO7	7	Optočlen FODM611 SO5
D1, D44, D53	1	Transil jednosměrný 28V/600W $U_{br}=33V$ SMD DO214AA
D2, D3	2	Dioda LL4148 0,2A 75V SMD SOD80
D4, D18, D19, D55	4	Dioda Zenerova BZV55C 5,6V 0,5W SMD SOD80
D5	1	Dioda Shottky SK26 60V 2A SMB
D6, D7	2	Dioda Shottky BAT54, 30V 0,2A SOT23
D8, D9, D12, D13	4	LED dioda zelená SMD 1206
D10, D11	2	LED dioda červená SMD 1206
D14-D17	4	Transil jednosměrný 10V/600W $U_{br}=12V$ SMD DO214AA
D20-D43, D45-D52	32	LED dioda zelená SMD 0603
D54	1	Dioda Shottky BAT54, 2x spol. anoda, 30V 0,2A SOT23
Q1, Q2	2	Tranzistor MOSFET-N IRF7842 40V 18A SO8
Q3, Q4	2	Tranzistor MOSFET-N 2N7002 60V 0,11A SOT23
BT1	1	Držák baterie CR2032 DPS
C1	1	Kondenzátor foliový pro impulsní napětí MKP10 1n $\pm 20\%$ 1600V 4x13x9mm, RM=10mm
C2	1	Kondenzátor keramický 1n $\pm 10\%$ 50V X7R SMD 0603
C3	1	Kondenzátor keramický 4,7u $\pm 10\%$ 50V X7R SMD 1206
C4, C54, C55, C58, C59	5	Kondenzátor keramický 68n $\pm 10\%$ 50V X7R SMD 0603

C5	1	Kondenzátor keramický 470n ±10% 16V X7R SMD 0603
C6	1	Kondenzátor keramický 10n ±10% 50V X7R SMD 0603
C7-C13, C22, C25- C53, C56, C57, C60-C64, C67-C124	102	Kondenzátor keramický 100n ±10% 50V X7R SMD 0603
C14-C21	8	Kondenzátor keramický 1u -20+80% 50V Y5V SMD 1206
C23, C24	2	Kondenzátor keramický 10p ±5% 50V NP0 SMD 0603
C65, C66	2	Kondenzátor keramický 22p ±5% 50V NP0 SMD 0603
CE1, CE2	2	Kondenzátor elektrolytický radiální LOW ESR 35V 330u ±20% 10×16mm, RM=5mm
CE3-CE5	3	Kondenzátor elektrolytický radiální LOW ESR 6V3 1000u ±20% 8×15mm, RM=3,5mm
CE6-CE9	4	Kondenzátor elektrolytický radiální LOW ESR 16V 100u ±20% 6,3×11,5mm, RM=2,5mm
CE10, CE11	2	Kondenzátor elektrolytický radiální LOW ESR 50V 220u ±20% 10×20mm, RM=5mm
CT1-CT12	12	Kondenzátor tantalový 16V 10u/M SMD 1206
R1	1	Rezistor 0,1W 100k 1% SMD 0603
R2, R71-R74, R290- R292	8	Rezistor 0,1W 390R 1% SMD 0603
R3, R4	2	Rezistor 0,1W 4R7 1% SMD 0603
R5	1	Rezistor 0,1W 11k 1% SMD 0603
R6	1	Rezistor 0,1W 1k5 1% SMD 0603
R7, R46-R66	22	Rezistor 0,1W 1k2 1% SMD 0603
R8, R24, R25, R27- R45	22	Rezistor 0,1W 680R 1% SMD 0603
R9, R210	2	Rezistor 0,1W 2k7 1% SMD 0603
R10, R11, R20, R75-R82, R90, R91, R160, R161, R281, R294	17	Rezistor 0,1W 1k 1% SMD 0603
R12,R13,R186R193	10	Rezistor 0,1W 2k2 1% SMD 0603
R14	1	Rezistor 0,1W 100R 1% SMD 0603

R15, R23, R26, R159, R162-169, R194-R201, R220- R251, R260-R267, R276-R278, R280, R293	65	Rezistor 0,1W 10k 1% SMD 0603
R16, R17, R282- R285, R295, R296	8	Rezistor 0,1W 10R 1% SMD 0603
R18, R19	2	Rezistor 0,1W 27R 1% SMD 0603
R21, R22, R252- R259	10	Rezistor 0,1W 3k3 1% SMD 0603
R67-R70	4	Rezistor 0,1W 47k 1% SMD 0603
R89	1	Rezistor 0,1W 6k49 1% SMD 0603
R92, R93	2	Rezistor 0,1W 220R 1% SMD 0603
R94	1	Rezistor 0,1W 0R 1% SMD 0603
R111-R126, R170- R177, R297-R300	28	Rezistor 0,1W 18k 1% SMD 0603
R143-R158	16	Rezistor 0,1W 3k6 1% SMD 0603
R178-185	8	Rezistor 0,1W 6k8 1% SMD 0603
R211	1	Rezistor 0,1W 5k6 1% SMD 0603
R212-R219, R301- R304	12	Rezistor 0,1W 1k8 1% SMD 0603
R268-R275	8	Rezistor 0,1W 22R 1% SMD 0603
RR279	1	Rezistor 0,1W 30k 1% SMD 0603
R288, R289	2	Rezistor 0,1W 33k 1% SMD 0603
R83,R84,R286,R287	4	Rezistor 0,25W 120R 1% SMD 1206
R85-R88	4	Rezistor 0,25W 10R 1% SMD 1206
R95-R110, R127- R142	32	Rezistor 0,25W 1k5 1% SMD 1206
R202-R209	8	Rezistor 0,25W 250R 1% SMD 1206
RP1-RP4, RP7- RP12	8	Odporová síť 4x1k0/8 4x0,125W SMD 4x1206
RP5, RP6, RP9, RP10	4	Odporová síť 4x470R/8 4x0,0625W SMD 1206

Příloha 4: Zapojení sběrnice XBus

Vývod	Název signálu	Funkce signálu
1	VCC	výstup napájení 5 V _{DC}
2	VCC	výstup napájení 5 V _{DC}
3	VCC	výstup napájení 5 V _{DC}
4	VCC	výstup napájení 5 V _{DC}
5	D0	vstup/výstup DATA 0
6	D1	vstup/výstup DATA 1
7	D2	vstup/výstup DATA 2
8	D3	vstup/výstup DATA 3
9	D4	vstup/výstup DATA 4
10	D5	vstup/výstup DATA 5
11	D6	vstup/výstup DATA 6
12	D7	vstup/výstup DATA 7
13	GND	zem
14	GND	zem
15	A0	výstup ADDR 0
16	A1	výstup ADDR 1
17	A2	výstup ADDR 2
18	A3	výstup ADDR 3
19	A4	výstup ADDR 4
20	A5	výstup ADDR 5
21	A6	výstup ADDR 6
22	A7	výstup ADDR 7
23	GND	zem
24	GND	zem
25	\overline{RD}	výstup READ, aktivní v L
26	GND	zem
27	\overline{WR}	výstup WRITE, aktivní v L
28	GND	zem
29	\overline{IRQA}	vstup IRQA, aktivní v L
30	GND	zem
31	\overline{IRQB}	vstup IRQB, aktivní v L
32	GND	zem
33	\overline{RESET}	výstup RESET, aktivní v L
34	GND	zem

Příloha 5: Fotografie finálního výrobku

