



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modul pro měření otáček na platformě SIL 3 mikrokontroléru

Autor práce: Bc. Petr Gallistl
Vedoucí práce: Ing. Petr Krist, Ph.D.

Plzeň 2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr GALLISTL**
Osobní číslo: **E14N0079P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Modul pro měření otáček na platformě SIL3 mikrokontroléru**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Pro účely zadávající firmy ZAT a.s. navrhňte a realizujte jednodeskový modul pro měření otáček s vysokou přesností na platformě SIL 3 mikrokontroléru. Při návrhu maximálně využijte jak všech integrovaných periférií mikrokontroléru tak případných externích rozšíření, aby výsledný modul disponoval dostatečnými systémovými prostředky - pro měření otáček s pasivním i aktivním snímačem otáček, pamětí RAM, FLASH, standardními logickými vstupy a výstupy a sadou komunikačních rozhraní RS-232, RS-485, CAN ISO 11898 2.0A a 2.0B, USB 2.0.

1. Seznamte se se základními vlastnostmi rodiny SIL 3 mikrokontrolérů.
2. Na základě předchozího bodu a dodatečných požadavků, specifikovaných firmou ZAT a.s. (přesnost měření, interface, apod.) navrhňte obvodové a konstrukční řešení modulu s vybraným mikrokontrolérem.
3. Návrh obvodového a konstrukčního řešení modulu proveďte na základě blíže specifikovaných požadavků a pravidel firmy ZAT Plzeň a.s. Při návrhu využijte vývojové prostředky kompatibilní s firmou ZAT a.s.
4. Při návrhu zohledněte cílové nasazení modulu v průmyslovém prostředí - tzn. nezbytná galvanická oddělení jednotlivých technologických a komunikačních signálů, potřebné izolační bariéry, odolnost modulu z hlediska EMC kompatibility a zvýšená mechanická odolnost.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. RM48x 16/32-Bit RISC Flash Microcontroller Technical Reference Manual
2. RM48L952 16- and 32-Bit RISC Flash Microcontroller
3. www.ti.com

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Krist, Ph.D.**

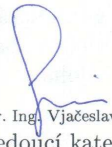
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

V této práci je řešen návrh zařízení pro měření otáček v průmyslovém prostředí. Na začátku práce je krátký úvod a seznámení se zadáním práce. Následuje krátký popis SIL a také srovnání mikrokontroléru, které jsou certifikovány jako SIL 3. Po srovnání mikrokontrolérů je vybrán Hercules RM48L952, který bude použit v dalším návrhu zařízení. Následuje teoretické rozebrání periférií, které jsou v návrhu použity. V další fázi následuje teoretické odvození největší možné chyby měření. Na tyto kapitoly navazuje samotný návrh jednotlivých periférií. V poslední části je pak rozebrán návrh desky plošných spojů ve vývojovém prostředí Altium Designer. . .

Klíčová slova

Měření otáček, Texas Instruments, RM48L952, SIL 3, RS-232, CAN, USB, I^2C , galvanické oddělení, Altium Designer, Hardwarový návrh

Abstract

Gallistl, Petr. *Module for measuring rotation speed on the platform of SIL 3 microcontroller* [*Modul pro měření otáček na platformě SIL 3 mikrokontroléru*]. Pilsen, 2016. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Petr Krist

The presented thesis is focused on design device for measuring rotation speed in industrial environment. In the first part of the thesis is described assignment of work and short overview of SIL, which is followed by selection of appropriate microcontroller which is certified as SIL 3. From this selection was been chosen Hercules RM48L952. In next section are described peripherals needed for design of this device. This part is followed by calculation of maximum theoretical measured error. Next chapter is about design of specific peripherals. In the last part is described design of PCB in Altium Designer...

Keywords

Rotation speed measurement, Texas Instruments, RM48L952, SIL 3, RS-232, CAN, USB, I²C, galvanic isolation, Altium Designer, Hardware design

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 16. května 2016

Bc. Petr Gallistl

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratk	x
1 Úvod	1
2 Teoretický úvod	2
2.1 Požadavky na modul měření otáček	2
2.2 Safety Integrity Level	3
2.3 Mikrokontroléry SIL 3	3
2.3.1 STMicroelectronics	4
2.3.2 Freescale	4
2.3.3 Texas Instruments	5
2.4 Výběr mikrokontroléru	7
2.5 Rozhraní RS-232	8
2.6 Rozhraní RS-485	9
2.7 Rozhraní SPI	9
2.8 Rozhraní I^2C	10
2.9 Rozhraní CAN	10
2.10 Rozhraní USB	12
2.11 Měření otáček	13
2.11.1 Frekvence sítě	13
2.11.2 Měřicí řetězec a vliv přesnost měření	14
2.11.3 Přesnost měření	16
3 Návrh modulu pro měření otáček	18
3.1 Mikrokontrolér RM48L952	18
3.2 Napájení	20
3.3 Paměti	21
3.4 JTAG a systémové diody	22
3.5 Uživatelské LEDs	23

3.6	Uživatelské piny	24
3.7	Universal Serial Bus	24
3.8	Binární vstupy	25
3.8.1	Senzor pro měření otáček	26
3.9	Binární výstupy	27
3.10	RS-232	27
3.11	SSIO	28
3.12	CAN	29
3.13	Konektory přední	30
3.14	Konektor zadní	30
4	Návrh desky plošných spojů	31
4.1	Návrhové prostředí Altium Designer	31
4.2	DPS	31
4.2.1	Rozměry	31
4.2.2	Vrstvy DPS	32
4.2.2.1	Díry v DPS	32
4.3	Návrh	33
4.3.1	Nastavení Altium Designer	33
4.3.2	Import dat ze schémat	34
4.4	Rozvržení modulů DPS	34
4.4.1	Napájení	34
4.4.2	Zadní konektor	34
4.4.3	Přední strana	34
4.4.4	Střed DPS	35
5	Závěr	36
	Reference, použitá literatura	38
	Přílohy	39
A	Teoretický úvod	39
A.1	Anglický popis zkratk v blokovém diagramu	39
B	Schémata zapojení	40
B.1	Schéma procesoru	40
B.2	Schéma paměti	42
B.3	Schéma napájení	43
B.4	Schéma USB	45
B.5	Schéma JTAG a systémových diod	46
B.6	Schéma binárních vstupů	47

B.7	Schéma zapojení uživatelských LED	48
B.8	Schéma rozhraní SSIO	49
B.9	Schéma rozhraní CAN	50
B.10	Schéma rozhraní binárních výstupů	51
B.11	Schéma rozhraní RS-232	52
B.12	Schéma zapojení uživatelských pinů	53
B.13	Schémata zapojení konektorů	54
C	Deska plošných spojů	58
C.1	3D pohled na DPS	58
C.2	Rozložení součástek na DPS	58
C.3	Jednotlivé vrstvy DPS	60

Seznam obrázků

2.1	Architektura mikrokontroléru SPC56EL70L5 Převzato z [4] 	5
2.2	Architektura mikrokontroléru MPC564xL. Převzato z [1] 	6
2.3	Architektura mikrokontroléru RM Převzato z [3]	6
2.4	Princip přesunu dat v rozhraní RS-232.	8
2.5	Princip přesunu dat v rozhraní RS-485 Převzato z [13] 	9
2.6	Princip přesunu dat v rozhraní SPI	10
2.7	Datový rámec CAN.	12
2.8	Konektory pro rozhraní USB. Převzato z [14] 	13
2.9	Přenosový retěz.	14
2.10	Blokové schéma měřící sondy Převzato z [2]	14
2.11	Princip pulsního měření s rozhraním N2HET Převzato z [5] 	16
3.1	Blokové schéma modulu pro měření otáček	18
3.2	Funkce lock step. Převzato z [3] 	19
3.3	Zapojení LED v jednom pouzdře	23
4.1	Vrstvy DPS	32
A.1	Popis zkratk v diagramu mikrokontroléru STMicroelectomic	39
B.1	Schéma zapojení mikrokontroléru	41
B.2	Schéma zapojení paměti	42
B.3	Schéma vstupní části zapojení napájení	43
B.4	Schéma zapojení napájení pro 3,3V a 1,2V	44
B.5	Schéma zapojení USB	45
B.6	Schéma rozhraní JTAG	46
B.7	Schéma zapojení binárních vstupů	47
B.8	Schéma zapojení LED	48
B.9	Schéma zapojení rozhraní SSIO	49
B.10	Schéma zapojení rozhraní CAN	50
B.11	Schéma zapojení binárních výstupů	51
B.12	Schéma zapojení rozhraní RS-232	52
B.13	Schéma zapojení uživatelských pinů	53

B.14 Schéma zapojení předních konektorů	54
B.15 Schéma zapojení zadních konektorů	55
C.1 3D náhled na model osazené dps	58
C.2 Rozložení součástek na DPS a jednotlivé místnosti	59
C.3 1. vrstva DPS	60
C.4 2. vrstva DPS	61
C.5 3. vrstva DPS	62
C.6 4. vrstva DPS	63
C.7 5. vrstva DPS	64
C.8 6. vrstva DPS	65

Seznam tabulek

2.1	Tabulka dovolené četnosti poruch u zařízení v jednotlivých kategoriích SIL	4
2.2	Porovnání různých rodin mikrokontrolérů	8
B.1	Zapojení zadního horního konektoru	56
B.2	Zapojení zadního spodního konektoru	57

Seznam symbolů a zkratek

A/Č	Analogový/Číslicový převodník.
ADC	Analog-to-digital converter. Analogový-číslicový převodník.
BGA	Ball Grid Array.
BIST	Built-In Self-Test. Zabudovaná testovací jednotka.
CAN	Controller Area Network.
CapCom	Capture-compare unit. Jednotka čítače pro zachycení hrany vnějšího signálu.
CMOS	Complementary Metal Oxid Semiconductor.
CPU	Central Processing Unit. Centrální procesorová jednotka.
CRC	Cyclic Redundancy Check. Cyklický redundantní součet.
DPS	Deska Plošných Spojů.
ECC	Error-Correction Code. Kód opravy chyb.
EMAC	Ethernet Media Access Controller. Řízení přístupu na sběrnici Ethernet.
EMC	Electro-magnetic compatibility. Elektro-magnetická kompatibilita
EMIF	External Memory Interface. Vnější paměťové rozhraní.
ESD	Electrostatic Discharge. Elektrostatický výboj.
FPGA	Field-Programmable Gate Array. Programovatelné logické pole.
FPU	Floating-Point Unit. Jednotka pro práci s pohyblivou řádovou čárkou.
GPIO	General-Purpose Input/Output. Všeobecné vstupní/výstupní rozhraní.
I^2C	Inter-Integrated Circuit. Protokol datové sběrnice.
LIN	Local Interconnect Network. Sériová asynchronní sběrnice.
LSB	Least Significant Bit. Bit s nejmenší vahou.
LVDS	Low-Voltage Differential Signaling. Nízkonapěťová diferenční signalizace.
MPU	Memory Protection Unit. Jednotka pro ochranu paměti.
MSB	Most Significant Bit. Bit s největší vahou.
NRZ	Non-Return-to-Zero. Kódování bez návratu k nule.

NRZI	Non-Return-to-Zero Inverted. Invertované kódování bez návratu k nule.
N2HET	Next Generation High-End Timer. Pokročilý časovač.
PC	Personal Computer. Osobní počítač.
QFP	Quad Flat Package. Čtvercové ploché pouzdro.
RAM	Random-Access Memory. Paměť s náhodným přístupem.
RISC	Reduced Instruction Set Computing. Procesor s redukovanou instrukční sadou.
SIL	Safety Integrity Level.
SMD	Surface-Mount Device. Zařízení pro povrchovou montáž.
SMT	Surface-Mount Technology. Technologie povrchové montáže.
SOIC	Small Outline Integrated Circuit. Pouzdro určené k SMT s vývody po dvou stranách.
SPI	Serial Peripheral Interface. Sériové periferní rozhraní.
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. Univerzální asynchronní přijímač/vysílač.
USB	Universal Serial Bus. Univerzální sériově rozhraní.
Via	Prokovená díra.

1

Úvod

Tato práce byla zpracována na základě požadavků zadávající společnosti ZAT a.s. Samotným zadáním diplomové práce je vytvořit zařízení, které bude schopné měřit otáčky turbíny v elektrárně. Konkrétně by toto zařízení mělo fungovat jako nad-otáčková ochrana turbíny. Z požadavků na práci zařízení v průmyslovém prostředí vyplývá potřeba zajištění zvýšené ochrany proti mechanickému a elektrickému namáhání, EMC, tak i zvýšená spolehlivost zařízení.

Pro měření otáček se nejčastěji uvažují jmenovité otáčky turbíny $3000\text{ot}/\text{min}$, a to pro turbíny generující napětí o frekvenci 50Hz. Pro turbíny pracující v síti 60Hz (používaných v USA) jsou to otáčky $3600\text{ot}/\text{min}$. Zde je potřeba, aby měřicí systém byl schopen zvládnout měření až do dvojnásobku jmenovitých otáček. Zvláštní kategorií jsou pak turbíny rychloběžné, ty ale v této práci řešeny nebudou. Požadavky na přesnost měření bývají dle zákazníků společnosti ZAT a.s. v řádech $\pm 0,001\%$. Velmi často se pro tato měření používají zařízení s hradlovými poli FPGA. Jedním z požadavků zadávající společnosti je ovšem zpracování návrhu bez použití zmiňovaného FPGA a současně zjištění maximální teoretické přesnosti měření daného zařízení.

Otáčky turbíny jsou měřeny na principu změn v elektromagnetickém poli. Optické měření se zde nepoužívá z důvodů problematické čistoty prostředí. Samotné otáčky jsou pak měřeny na hřídeli turbíny na snímacím kole. Právě zde jsou umístěny magnetické póly. Jejich počet může být proměnný a to od 30 až do 150. Tyto průmyslové měřicí moduly pracují s pevnou dobou odezvy, z pravidla 50ms. Toto je doba, po které se předávají naměřené údaje k dalšímu zpracování do systému. Samotné měření se pak provádí každých 10ms - 20ms, takto získané výsledky se následně průměrují. Dalším požadavkem firmy ZAT a.s. je vysoká přesnost v měření v navrhovaném zařízení.

V první části této diplomové práce se bude autor zabývat průřezem současných mikrokontrolérů na trhu, jenž splňují požadavky na certifikaci, jako například zařízení SIL 3. Následně z nich bude vybrán vhodný kandidát pro použití v navrhovaném zařízení. V další části textu bude pojednáno o implementaci mikrokontroléru do zařízení a návrhu všech potřebných periférií. Závěrem bude vyhodnocen výsledek této diplomové práce dle stanoveného zadání.

2

Teoretický úvod

Tato kapitola bude zaměřena na krátké přiblížení pojmu SIL. Následně bude proveden průzkum trhu s mikrokontroléry splňujícími podmínky SIL 3. Z tohoto průzkumu bude proveden výběr jednoho mikrokontroléru, který bude použit při řešení této diplomové práce. Na konci kapitoly bude proveden teoretický výpočet přesnosti měření otáček a bude následovat popis jednotlivých použitých periférií.

2.1 Požadavky na modul měření otáček

Modul pro měření otáček bude vybaven dle zadání:

- 1x mikrokontrolérem, který disponuje všemi potřebnými výstupy a je vybaven pamětí RAM o velikosti alespoň 256KB a pamětí FLASH 3MB.
- 1x vstupem pro měření otáček, galvanicky oddělený se vstupním napětím 24V.
- 8x standardními logickými vstupy s galvanickým oddělením a vstupním napětím 24V. Port bude umístěn na zadním konektoru karty.
- 8x standardními logickými výstupy s galvanickým oddělením, které jsou schopný spínat 24V. Port bude umístěn na zadním konektoru karty.
- pamětí FLASH s velikostí alespoň 16Mbit připojené na standardním rozhraní I^2C nebo SPI.
- pamětí EEPROM s velikostí alespoň 256Kbit připojené na standardním rozhraní I^2C nebo SPI.
- RS-232 galvanicky oddělené, konektor D-sub DE-9, na přední straně karty.
- RS-485 galvanicky oddělené na zadním konektoru.
- 2x CAN ISO 11898 galvanicky oddělené s konektory D-sub DE-9. Jednou zásuvkou a jednou zástrčkou na přední straně karty.

- USB 2.0 galvanicky oddělené na přední straně karty.
- Napájení zařízení bude 24V stejnosměrného napětí.
- Rozměry karty jsou standardního rozměru eurocard U6x220mm.

2.2 Safety Integrity Level

Zkráceně SIL popisuje funkční bezpečnost zařízení v případě výskytu vnitřní poruchy. Tato vnitřní porucha může být jak hardwarového rázu, tak i softwarového. Zařízení označené za SIL znamená, že se při návrhu zařízení se dbalo na zásady pro vytvoření zařízení, které bude spolehlivé a v případě problému, je zařízení schopné problém diagnostikovat a chybu nahlásit. Česká norma ČSN EN 61508-6 rozděluje SIL do čtyřech základních stupňů. Nejméně spolehlivá zařízení jsou označována jako SIL 1 a naopak označení SIL 4 patří k zařízením nejspolehlivějším.

Do těchto kategorií jsou zařízení rozdělována podle požadavků na bezchybný chod (Tabulka 2.1), ale také v závislosti na tom jak velký dopad může způsobit případná chyba zařízení (příčemž ohrožení zdraví je považováno za nejzávažnější problém). Jako příklad je uvedeno zařízení s úrovní SIL 1 v režimu nízké poptávky. Z tabulky 2.1 je možné vyčíst, že pravděpodobnost výskytu chyby se pohybuje mezi 0,1 až 0,01. Tento fakt znamená, že pokud v zařízení nastane požadavek na nějakou činnost, například na otevření přetlakového ventilu, tak se nejhůře jednou z deseti případů může stát že se tento ventil neotevře. Nyní je nutné vyhodnotit jaké důsledky tato skutečnost může způsobit. V případě, že důsledky nejsou vážné a je možné je akceptovat, tak můžeme úroveň SIL nechat ponechat na stanovené hladině. Pokud by takto časté chyby byly nepřipustné, nebo nebezpečné, je nutné úroveň SIL zvýšit.

Typickým představitelem zařízení spadajícím do kategorie SIL 1 jsou zařízení, která jsou vybavena samodiagnostikou a splňují jistá pravidla návrhu. Zařízení splňující kategorii SIL 2 nejčastěji bývá vybaveno nezávislým zařízením, které provádí kontrolu správné funkce. Dále jsou uplatněny specifické požadavky na software a dokumentaci zařízení. Pro zařízení spadající do kategorie SIL 3 je požadováno, že jedna chyba nesmí způsobit nebezpečný stav. Toho je dosahováno redundancí prvků zařízení a porovnáváním jejich výstupů. Zařízení v kategorii SIL 4 mnohdy vyžadují i trojí redundanci. Zvláštní kategorií jsou zařízení označovaná jako SIL 0, tato zařízení nemají vliv na bezpečnost a nejsou specifikovány v dané normě.

2.3 Mikrokontroléry SIL 3

Na trhu se nyní nachází celá řada mikrokontrolérů splňující náročné požadavky SIL 3. V dalším textu je pojednáno o možnostech, které nabízejí výrobci čipů.

SIL	Režim nízké poptávky	Režim vysoké poptávky
	Chyba za použití	Chyba za hodinu
1	$\geq 10^{-2}a < 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}a < 10^{-5}$
2	$\geq 10^{-3}a < 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}a < 10^{-6}$
3	$\geq 10^{-4}a < 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}a < 10^{-7}$
4	$\geq 10^{-5}a < 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}a < 10^{-8}$

Tab. 2.1: Tabulka dovolené četnosti poruch u zařízení v jednotlivých kategoriích SIL

2.3.1 STMicroelectronics

Tento výrobce nabízí několik řad mikrokontrolérů splňující podmínky SIL 3. Jsou to řady s označením SPC564Lx a SPC56ELx. Jedná se o mikrokontroléry s 32 bitovou architekturou a s jádrem e200z4. Rozdíl v jednotlivých řadách je ten, že řada SPC564Lx disponuje pouze jedním jádrem, kdežto řada SPC56ELx používá jádra dvě.

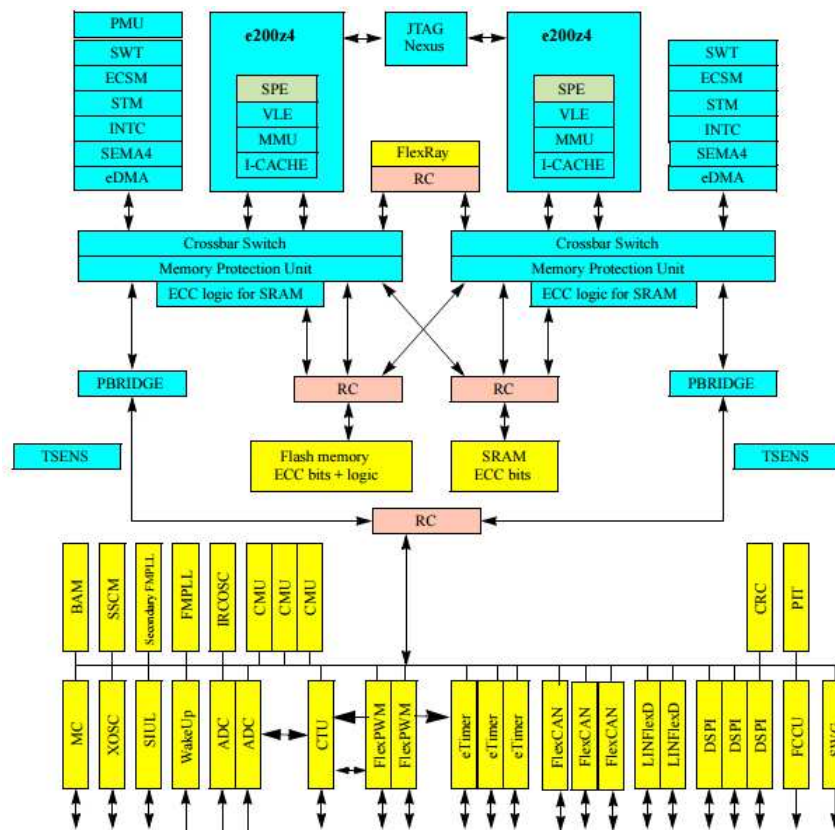
Nejvýkonnější mikrokontrolér je SPC56EL70L5. Ten spadá do rodiny, která je vybavena dvěma 32-bitovými jádry architektury e200z4d. Ta jsou schopna pracovat s maximální frekvencí hodinového signálu 120MHz. Procesor tohoto mikrokontroléru je tvořen pěti stupňovou zřetězenou strukturou (pipeline). K dispozici jsou dvě paměti, 2MB flash a 192 KB SRAM. Obě využívají ECC (error-correcting code, samoopravitelné kódování).

Dále jsou mikrokontroléry vybaveny celou řadou bezpečnostních funkcí. Mezi tyto funkce patří dvě jádra procesorů, která pracují na stejném úkolu a jejich výsledky se porovnávají (režim lock step). Integrovaný testovací hardware (BIST) pro logiku, paměti a A/Č převodník. Nemaskovatelné přerušování, jednotka CRC, FCCU (fault collection and control unit) jednotka pro sběr chyb a řízení výstupu při chybě a jednotky pro kontrolu napájení a hodinových signálů.

Dále je procesor vybaven 97 GPIO (General-purpose input/output, všeobecné vstupně výstupní piny) v pouzdře LQFP 144. K dispozici jsou také tři šesti-kanálové čítače, 2x PWM generátor, 1x SWG (generátor sinusového signálu) a rozhraní MC (Mode control) skrze které se nastavuje režim zařízení. Pro komunikaci jsou zde připraveny rozhraní pro 2x LIN, 3x SPI, 3x CAN a FlexRay. Tento mikrokontrolér je napájen pouze jednou úrovní napětí a to 3V - 3,3V. Blokové schéma je uvedeno níže 2.1

2.3.2 Freescale

Tato společnost prodává mikrokontroléry řady Qorivva MPC564xL s certifikací ISO 26262 SIL 3. Tyto kontroléry jsou také založeny na jádru e200Z4 jako u konkurenční STMicroelectronics. Tato řada využívá dvou-jádrovou architekturu. Vnitřní paměť flash kontroléru je velikosti 1024KB a paměti SRAM velikosti 128KB. Maximální pracovní frekvence je 120 MHz. Dále jsou vybaveny velkým množstvím periférií a samodiagnostickými prostředky. Mezi perifériemi můžeme najít 2x CAN, FlexRay™, A/Č převodníky, generátory PWM



Obr. 2.1: Architektura mikrokontroléru SPC56EL70L5 [Převzato z [4]].

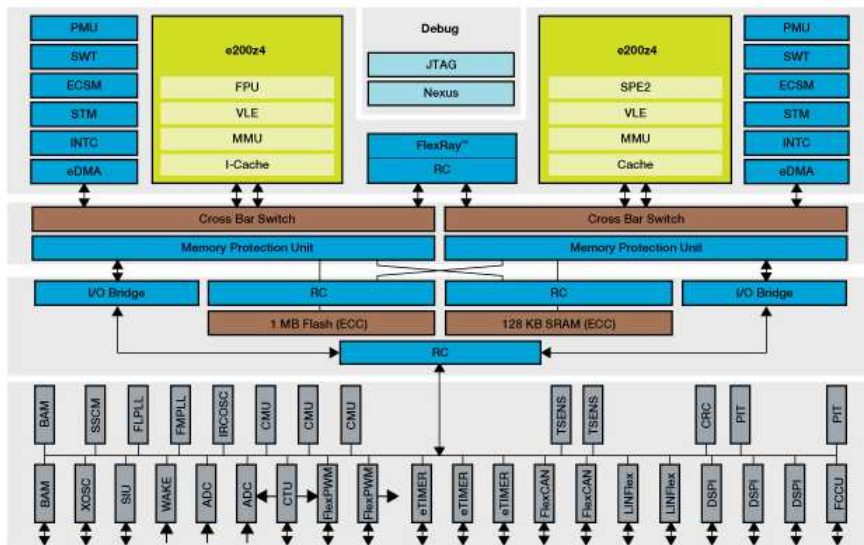
a DMA kanál. V kategorii samodiagnostických prostředků jsou dvě jádra procesoru v režimu lockstep. Falut collection unit, nemaskovatelná přerušení a samoopravné a detekční kódy v RAM a Flash paměti. Pro představu o vnitřním uspořádání jednotlivých bloků je přiložen obrázek 2.2.

Zde je možné porovnat architekturu kontroléru Freescale a STMicroelectronics, které se téměř neliší. Je zde rozdíl pouze ve velikosti paměti a také, že mikrokontrolér SPC56EL70L5 od společnosti STMicroelectronics je navíc vybaven generátorem sinusového signálu a vstupem pro nastavení pracovního režimu.

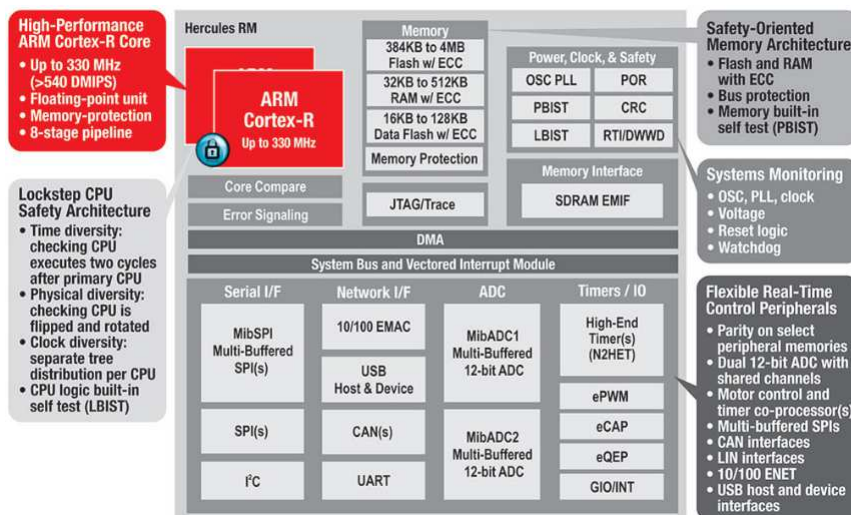
2.3.3 Texas Instruments

Posledním výrobcem je společnost Texas instrument, která nabízí mikrokontroléry, které jsou v souladu se SIL 3 a to v poměrně širokém rozsahu. Má 3 rodiny mikrokontrolérů označovaných jako HerculesTM RM Microcontrollers. Konkrétně TMS470M, TMS570LS a RM.

Rodina TMS470M je rodina mikrokontrolérů, které jsou založené na 32 bitovém procesorovém jádru ARM®Cortex®-M3. Toto jádro může fungovat s maximální frekvencí hodinového signálu 80MHz. Mají interní testovací jednotku pro CPU a RAM. Disponují rozhraními CAN, MibSPI, LIN/UART. Na obrázku níže 2.3 si můžete prohlédnout architekturu tohoto mikrokontroléru.



Obr. 2.2: Architektura mikrokontroléru MPC564xL. [Převzato z [1]]



Obr. 2.3: Architektura mikrokontroléru RM [Převzato z [3]].

Další rodinou je TMS570L. Tato rodina stojí na procesorovém jádře ARM Cortex-R5F, které je schopné jít frekvencí jádra až na 300MHz. Tyto mikrokontroléry jsou vybaveny dvěma jádry, které jsou v lockstepu. Procesor má k dispozici RAM velikosti 512KB, a 4MB paměti flash. Obě tyto paměti jsou zabezpečeny pomocí ECC. Dále jsou vybaveny 12-bit ADC, DMA, JTAG, Ethernet, FlexRay, CAN, LIN, PWM, SPI, N2HET.

Poslední rodinou je řada RM48. Tyto mikrokontroléry jsou vybaveny procesorem ARM Cortex-R, který spolu s druhým jádrem pracuje v režimu lockstep a to až na 330Mhz. Dalšími bezpečnostními prvky jsou ECC (Error-correcting code, Detekční a samoopravné kódování) pro Flash a RAM paměť, BIST (Build-In Self-Test), modul pro signalizaci chyby na externím pinu pouzdra a obvody pro sledování napájecího napětí a monitorování hodinového signálu. Dále tyto mikrokontroléry disponují rozhraním N2HET (NextGen High end Timer, Pokročilý čítač), CAN, LIN, EMAC (Ethernet media access, Rozhraní ethernet), EMIF (External Memory Interface, rozhraní pro připojení vnější paměti) a I^2C . Další rozdíly budou rozebrány dále.

- a) RM57L843 má jádro ARM Cortex-R5F, je ze všech mikrokontrolérů v této řadě nejvýkonnější a nejnovější. Maximální taktovací frekvence se blíží 330MHz. Flash paměť 4096KB a paměť RAM 512KB. Bohužel nedisponuje USB. Vyrábí se pouze v pouzdře BGA
- b) RM48L952 ten má oproti RM57L843 změněné jádro na ARM Cortex-R4F s osmi stupňovým pipeline, které má nižší taktovací frekvenci a to 220MHz. Jádro také obsahuje FPU a MPU. K jádru je připojena RAM velikosti 256KB a paměť flash 3MB. Disponuje také rozhraním USB ve variantách hostitel nebo host. Navíc je vyráběn ve dvou variantách pouzder a to 337 BGA a 144 QFP.

2.4 Výběr mikrokontroléru

Na závěr této kapitoly je provedeno krátké shrnutí a výběr vhodného procesoru, který bude nejlépe odpovídat požadovaným vlastnostem. Mezi ně patří vysoká pracovní frekvence z důvodu co možná nejpřesnějšího měření otáček, jednotka CapCom, dostatek paměti (dle zadání RAM o velikosti alespoň 256KB a FLASH 3MB), dostatek GPIO a požadované periferie.

Jak je z tabulky 2.2 patrné, pro potřeby návrhu zařízení jsou nejvíce vhodné mikrokontroléry od společnosti Texas instruments. A to z důvodu dostatečně velké paměti, vysoké pracovní frekvence, dostatečně velkým počtem pinů, CAN periférií a tím, že všechny tři obsahují jednotku CapCom. Z těch byly následně vybrány nejvýkonnější zástupci a to z TMS570LS3137, RM57L843 a RM48L952. Druhý z uvedených má nejvyšší pracovní frekvenci a to až 330MHz, ale nedisponuje rozhraním pro propojení USB a navíc je na trhu pouze krátkou dobu a není ještě tolik ověřen provozem, stejně tak jako TMS570LS3137. Posledním z nich RM48L952 má bohužel pracovní frekvenci pouze 220MHz, ale za to

Výrobce	STM	Freescale	Texas Instruments		
Rodina	SPC564L	MPC564xL	TMS570L	RM48x	RM57x
Jádro	e200	e200	Cortex-R5F	Cortex-R4F	Cortex-R5F
f_{max} [MHz]	< 120	< 120	< 300	< 220	< 3300
Paměť RAM [KB]	192	128	512	256	512
Paměť flash [MB]	2	1	4	3	4
CapCom	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO
Počet GPIO	97	121	168	144	168
CAN	3	2	4	3	4
USB	NE	NE	NE	ANO	NE

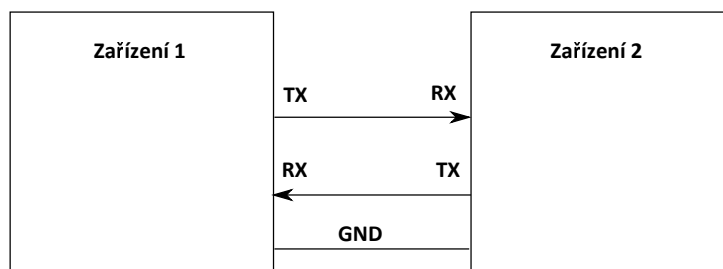
Tab. 2.2: Porovnání různých rodin mikrokontrolérů

disponuje rozhraním USB a na trhu už je delší dobu. Rovněž splňuje i všechny ostatní nároky a proto byl vybrán právě tento model mikrokontroléru. S tímto mikrokontrolérem již také mají ve společnosti ZAT a.s. jisté zkušenosti.

2.5 Rozhraní RS-232

Jedná se o komunikační rozhraní vytvořené pro sériovou komunikaci mezi dvěma zařízeními (PC a modemem, nebo jiným zařízením). Sběrnice je pouze pro dva účastníky a je tvořena dvěma datovými vodiči, jeden pro každý směr, a řídicími signály. Nejčastěji se je možné se setkat s tím, že se zapojují pouze datové vodiče a jeden společný pro zem. Z řídicích signálů je pak možné zapojit RTS, ten indikuje, že odesílající strana má co poslat a signál CTS. Ten indikuje, že zařízení je připraveno přijímat data. Dvouvodičová komunikace je na obrázku 2.4.

V tomto standardu se pro přenos dat používá asynchroní komunikace. Při odesílání dat se nejprve vysílá start bit, následně LSB, a následně další bity až po MSB. Jako poslední se posílá paritní bit a jeden nebo několik stop bitů. Během jednoho přenosu se přeneše osm bitů. Logické úrovně jsou zde pro logickou 1 -3V až -15V, pro logickou 0 je to +3V až +10V. Ve standardu je definováno i několik možných konektorů, nejběžnějším však je D-sub DE-9. Maximální délka vedení je 15m.

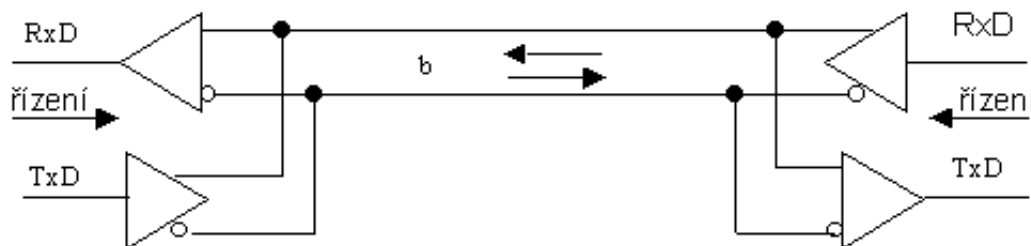


Obr. 2.4: Princip přesunu dat v rozhraní RS-232.

2.6 Rozhraní RS-485

Pro průmyslové prostředí byla RS-232 upravena do standardu RS-485. Tento standard je založen na tom, že při vysílání a přijímání dat se využívá diferenčního vedení. Na diferenčním vedení jsou dva vodiče. Jeden je označen jako A a druhý jako B. Podle standardu platí, že pokud napětí na vodiči $A > B$, tak tento stav znamená logickou 0. Tento stav se nazývá ON. Naopak pokud je napětí na $A < B$, tak je tento stav považován za logickou 1 a je nazýván OFF. Bývá zde i třetí vodič. Tím se spojují země jednotlivých zařízení. Standardní úrovně napětí jsou od $\pm 1,5V$ až po $\pm 6V$.

Dále je zde umožněno připojení na jednu sběrnici až pro 32 jednotek v délce až 1200m. Na této sběrnici, pokud je tvořena jednou dvojicí vodičů, může vysílat pouze jeden uživatel v jeden čas. To je označováno jako polo-duplexní režim komunikace. Tato sběrnice také potřebuje připojit terminační člen. Vysílání a přijímání dat se provádí stejně jako u RS-232, akorát se musí řídit přístup na sběrnici. Ten norma nedefinuje. Jako konektor se používá D-sub DE-9. Příklad toho, jak může sběrnice vypadat je na obrázku 2.5.



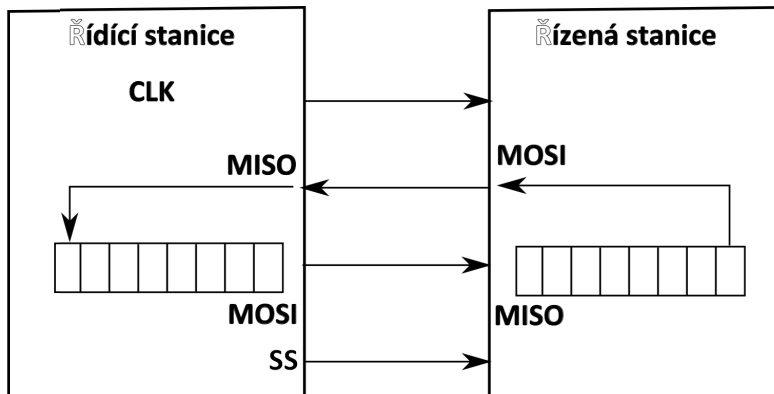
Obr. 2.5: Princip přesunu dat v rozhraní RS-485 |Převzato z [13]|

2.7 Rozhraní SPI

SPI je synchronní Master-slave (Řídící-podřízený) komunikace, která se nejčastěji používá pro komunikaci s jednotkami v jednom zařízení. Typickým příkladem může být komunikace s externí pamětí nebo odesílání dat na displej. Pro komunikaci se používají čtyři vodiče:

- SCLK - slouží pro přenesení hodinových pulzů z řídicí stanice.
- MOSI - Master-out Slave-in. Slouží pro přenos dat z řídicí stanice do podřízené.
- MISO - Master-in Slave-out. Slouží pro přenos dat z podřízené stanice do řídicí.
- SS - Slave select. Slouží pro vybrání konkrétního podřízeného. Tímto se zajišťuje, že na jedné sběrnici může být více podřízených stanic. Tento signál je většinou negovaný.

Rozhraní jednotlivých stanic vypadá tak, že vstupní i výstupní posuvný registr jsou spojeny do kruhu a po výběru podřízené stanice jsou vysílány hodinové impulzy. S každým hodinovým impulzem se zásobník posune o jeden bit a bit, který se vysouvá ze zásobníku ven je přenesen do zásobníku druhého zařízení. Viz obrázek 2.6.



Obr. 2.6: Princip přesunu dat v rozhraní SPI

2.8 Rozhraní I^2C

Jedná se o sériovou synchronní komunikaci, která je určena pro komunikaci s čipy na jedné desce. Pro komunikaci jsou zapotřebí dva vodiče.

- SDA - slouží pro přenášení dat.
- SCL - slouží pro přenášení hodinových signálů

Oba dva tyto vodiče jsou zvednuty rezistory pull-up do hodnoty logické 1. Budiče připojené k této sběrnici jsou obvody s otevřenými kolektory a sběrnici pouze stahují do logické 0. Z toho také plyne označení jednotlivých stavů na sběrnici, a to dominantní a recesivní. Na této sběrnici se komunikuje rychlostmi od 10 kbps až po 3,4 Mbps. Rychlost sběrnice se vždy řídí nejpomalejším členem.

Pro komunikaci na sběrnici se používá systém dotaz-odpověď. Napřed řídící stanice vyšle sedmi, nebo deseti bitovou adresu. Za ní pak bit informující přijímací stanici jestli se jednat o zápis, nebo čtení. Za ním pak už následuje datová zpráva. Ta může být různě dlouhá, ale platí, že vždy po osmi bitech musí přijímací strana na sběrnici potvrdit přijetí zprávy signálem ACK.

2.9 Rozhraní CAN

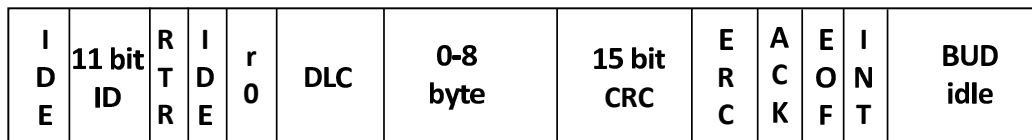
Controller area network je komunikace definována normou ISO 11898. Je vhodná pro aplikace pracující v reálném čase, a s vyššími nároky na bezpečnost komunikace. Přístup na

sběrnici je řízen podle priority zprávy. Komunikace může mít nastaveno více řídicích stanic a probíhat rychlostí až 1MBit/s do vzdálenosti 40m. Pro maximální délku vedení 10km rychlost klesá na 5kBit/s . Pro kódování zprávy je použito NRZ a bitstuffing. Bitstuffing vkládá do po sobě dlouhé série stejných znaků znak obrácený. CAN totiž využívá znakovou synchronizaci zprávy a při dlouhé sérii by se mohl rozsynchronizovat. Data vysílaná po sběrnici CAN nemají žádnou adresu a všechna připojená zařízení je poslouchají. Pomocí vstupních filtrů v každém zařízení se pak může rozhodnout, zda se zpráva zpracuje nebo ne. Toto filtrování se provádí na základě identifikátoru zprávy, ten nedefinuje pouze obsah zprávy, ale i její prioritu. Zde je rozdíl mezi normou CAN2.0A, která používá 11-bitový identifikátor a normou CAN2.0B. Ta používá identifikátor 29-bitový.

Dalšími vlastnostmi sběrnice CAN je, že každá stanice si počítá chybně odeslané rámce. Pokud počet těchto rámců překročí určitou hranici, tak se stanice od sběrnice sama odpojí. Dále jsou také vysílané zprávy zabezpečeny tím, že se za hlavičkou rámce nachází informace o počtu vyslaných bajtů a každá stanice si může zkontrolovat, jestli dorazily všechny. Na konci dat je oblast, ve které je uložen CRC vysílané zprávy. Pokud jsou obě tyto informace správné, tak jakákoliv stanice na sběrnici potvrdí správné odeslání zprávy. Na obrázku 2.7 je zobrazen datový rámeček pro CAN 2.0A, který se skládá:

- SOF - Začátek rámce.
- ID - 11 bitový identifikátor.
- RTR - Určuje, zda zpráva obsahuje data, nebo se o data žádá.
- IDE - Identifikuje formát CAN 2.0A nebo CAN 2.0B.
- r0 - Nevyužitý bit.
- DLC - Informuje o počtu přenesených bajtů.
- Následuje datové pole.
- CRC - 15-ti bitový redundantní součet.
- ERC - Ukončuje CRC.
- ACK - přijímače potvrzují správné vyslání zprávy.
- EOF - Konec rámce. V tomto čase mají přijímače čas informovat vysílače o chybě ve zprávě.
- INT - Prodleva na sběrnici po odvyslání rámce.
- IDE - Sběrnice je nevyužita.

Pokud ne, vyšle rámeček upozorňující na chybu. To je možné protože jednotky připojené na sběrnici jsou s otevřenými kolektory, a tak na sběrnici vznikají dva stavy. Dominantní, kdy pokud jedna stanice stáhne sběrnici do logické 0, tak je znemožněno všem ostatním stanicím cokoliv vysílat a stav recesivní kdy je sběrnice v klidovém stavu.



Obr. 2.7: Datový rámeček CAN.

Přenosová média pro komunikaci na rozhraní CAN nejsou definována, ale musí se jednat o média schopná nabývat dvou logických úrovní. Můžeme se setkat jak médii z optických vláken nebo metalickými.

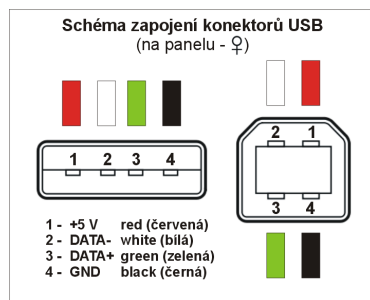
Vysílání se provádí pomocí diferenčního signálu z budiče CAN. Tento signál je přiveden na dva vodiče, CAN_H a CAN_L. U metalického vedení se používají tyto hladiny.

- High speed
 - Dominantní stav - CAN_H = 3,5V a CAN_L = 1,5V.
 - Recesivní stav - oba 2,5V
 - low speed
 - Dominantní stav - CAN_H = 3,6V a CAN_L = 1,4V.
 - Recesivní stav - CAN_H = 0V a CAN_L = 5V.

2.10 Rozhraní USB

Universal Serial Bus je komunikační rozhraní, které se používá pro celou řadu aplikací a nahradila téměř všechny ostatní. Velkou výhodou této sběrnice je podpora plug and play, to znamená, že se zařízení mohou připojovat i za chodu zařízení. Druhou výhodou je, že je ze standardu definováno, že jsou ve sběrnici dva vodiče pro přenos napájení pro koncové zařízení, které jsou schopny připojené zařízení zásobovat proudem 100mA. Po zvláštním ohlášení, se proud může zvýšit až na 500mA. To je velká výhoda pro zařízení s odděleným vstupem a to díky tomu že se pro oddělenou část nemusí dělat další zdroj napájení. Sběrnici celkem tvoří čtyři vodiče. Jak již bylo zmíněno výše, jsou zde dva vodiče pro napájení s napětím 5V, a dva vodiče pro přenos dat označené jako Data + a Data -. Pro rozhraní jsou také standardizovány konektory viz obrázek 2.8

Sběrnice je typu řídicí-podřízený a k jedné řídicí stanici může být připojeno až 127 stanic podřízených. Kódování dat je provedeno metodou NRZI, to znamená, že pokud přicházejí v datech log. 0, tak se mění logická hodnota na sběrnici. V opačném případě,



Obr. 2.8: Konektory pro rozhraní USB. |Převzato z [14]|

kdy přicházejí logické 1, tak hodnota na sběrnici zůstává stejná. Dále jsou také definovány různé rychlosti přenosu dat:

- USB 1.1:
 - LowSpeed - 1,5 Mbit/s
 - FullSpeed - 12 Mbit/s
- USB 2.0:
 - HighSpeed - 480 Mbit/s
- USB 3.0:
 - 5 Gbit/s
- USB 3.1:
 - 10 Gbit/s

Zde uvedené rychlosti jsou teoretické, v praxi jsou dosahované rychlosti menší.

2.11 Měření otáček

Tato část je zaměřena na výpočet přesnosti měření otáček.

2.11.1 Frekvence sítě

Pro výpočet přesnosti měření otáček mi bylo doporučeno provádět výpočet pro elektrickou síť v Evropě a počítat s frekvencí sítě 50Hz. To znamená, že jmenovité otáčky turbíny jsou 3000 ot/min . Maximální otáčky, které jsou přípustné jsou dvojnásobkem otáček jmenovitých. Do těchto hodnot by se ovšem otáčky turbíny nikdy neměli dostat. V reálných případech se výpočty provádějí pro odchylku $\pm 20\%$ od jmenovitých otáček. Pro výpočet byly zvoleny otáčky o 20% vyšší, protože na vyšší frekvenci, by měli být výsledky pro přesnost měření horší. V daném případě je to 60Hz viz. rovnice 2.1.

$$f_{ot} = \frac{3000 * 1,20}{60} [Hz] \quad (2.1)$$

Tato frekvence, ale ještě není konečná a pro měření je potřeba počítat i s tím, že pro měření se na hřídeli turbíny používají prstence s různými počty magnetických pólů. Nejčastěji se používají snímací kola s 60, nebo 120 zuby. To znamená, že výsledná frekvence je mnohonásobně větší. Pro 60 zubů je to 3600Hz, a pro 120 zubů to je 7200Hz, viz rovnice 2.2.

$$f_{men} = f_{ot} * N_{zub} [Hz] \quad (2.2)$$

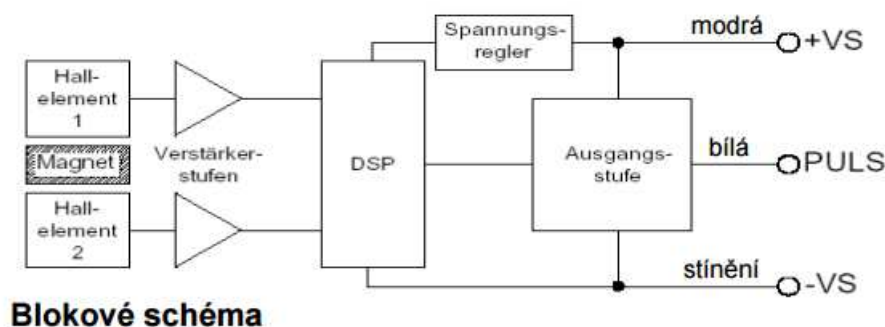
2.11.2 Měřicí řetězec a vliv přesnost měření

Do přesnosti měření samozřejmě zasahují i různá nestálá zpoždění a různé rušivé jevy. V tomto případě byly tyto rušivé jevy odstraněny použitím vyššího napájecího napětí (12V), a nestálá zpoždění jsem se pokusil eliminovat použitím součástek, které mají nejmenší odchylku ve zpoždění signálu, který jimi prochází. Celý přenosový řetězec můžete vidět na obrázku 2.9.



Obr. 2.9: Přenosový řetěz.

Z obrázku je patrné, že prvním článkem řetězu je snímač otáček PR 9376 od společnosti Profess. Tento senzor je schopen měřit magnetické pulzy až do frekvence 12kHz a rychlostí hrany $1\mu s$, to je pro měření 7,2kHz dostatečné. Senzor funguje na principu dvou halových sond, nad kterými je magnet. Pokud se k nim přiblíží magnetický materiál, jako je zub na hřídeli, tak se změní proud procházející jednou sondou a na ně připojený diferenciální stupeň to zaznamená a změní svůj výstup. Viz obrázek 2.10. Z tohoto principu vyplývá, že doba zpoždění pro jednotlivé zuby bude téměř totožná. Drobné odchylky mohou být způsobeny nepřesností mechanického provedení prstence na hřídeli.



Obr. 2.10: Blokové schéma měřící sondy |Převzato z [2]|.

Dalším prvkem je zde přívodní kabel k senzoru. Zde se přenesený signál šíří rychlostí $0,22m/ns$. To znamená, že tento čas můžeme zanedbat, nehledě na to, že zpoždění signálu na vodiči bude pokaždé stejné.

Na druhé straně kabelu je připojen oddělovací člen HCPL-9031-300 od společnosti Avago. Ten pracuje na bázi indukčního převodu informace mezi dvěma elektrickými doménami. Tento člen je schopen pracovat až do frekvence 50MHz a má dobu zpoždění $t_{pd} = 18ns$. Pro účel tohoto měření je ovšem důležitější údaj odchylka od doby. Ta je zde $t_{PSK} = 6ns$ [Převzato z [?]].

Pak je signál přiveden vstup čítače N2HET (Next generation High end timer, pokročilý čítač) mikrokontroléru, který běží na pracovní frekvenci 220MHz. Pracovní frekvence pro čítač se získává z hlavních systémových hodin. A ty jí získávají z externího zdroje hodin SG8002CAPCB20MHZ. Tento krystalový oscilátor má danou frekvenci na které kmitá již z výroby. Pro tento krystal výrobce udává, že se pohybuje ± 50 ppm. Z toho vyplývá, že po zapojení modulu, bude potřeba provést kalibrace frekvence hodin. Dále výrobce uvádí, že se frekvence může v průběhu prvního roku změnit o ± 5 ppm. Tento posun v úvaze není zahrnut.

Pro měření je možné použít dva přístupy. Prvním z nich je spuštění čítače a počítání počtu zubů. Po přesně určeném čase se čítání zastaví a spočte se velikost otáček turbíny. Tato metoda sebou přináší velikost chyby, která se rovná velikosti doby otočení jednoho zubu + dvou taktu hodin (na začátku a na konci měření). Z toho vyplývá, že celková chyba bude rozdílná pro různé počty zubu na hřídeli. Pro 60 zubu se rovná $277,78\mu s$, pro případ se 120 zuby je výsledek $138,89\mu s$. Viz rovnice 2.3.

$$\Delta t_{zuby} = \frac{1}{f_{zub}} + 2 * \frac{1}{f_{clk}} [s] \quad (2.3)$$

Druhou možností měření je čekání, až přijede nejbližší zub, v ten moment spustit časovač a měřit dobu než zub odjede a impuls odezní. Tato metoda sebou přináší pouze nepřesnost dvou hodinových taktů a to je 10ns. Viz 2.4.

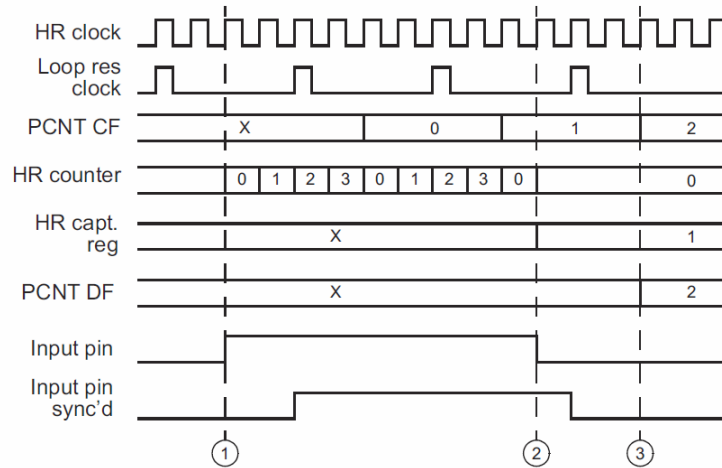
$$\Delta t_{zub} = 2 * \frac{1}{f_{clk}} [s] \quad (2.4)$$

Pro následné úvahy byla zvolena druhá varianta, protože výsledky jsou mnohem lepší než u první metody. Je pravdou, že pokud by v prvním případě pod sondou proběhl dostatek zubů, tak by se tento nelichotivý výsledek průměrováním zlepšoval. To ale znamená, že při počtu 120 zubů, kde byla chyba $138,89\mu s$ by pro dosažení stejného muselo pod senzorem proběhnout 13889 zubů viz rovnice 2.5. Jak je z tohoto čísla vidět tak to jsou téměř plné dvě otáčky hřídele a to je pro měřicí periody v rozmezí 10ms - 20ms nepřijatelné.

$$N_{zub} = \frac{\Delta t_{zuby}}{\Delta t_{zub}} [-] \quad (2.5)$$

Z tohoto důvodu byla zvolena druhá metoda, kde je čítač nastaven v režimu měření pulzů, který funguje, jak dle obrázku 2.11. Po změně na vstupním pinu (Input pin) se

ihned spustí dvou bitový čítač s vysokým rozlišením(HR counter), ten pokud přeteče a je zde zároveň přítomen synchronizační signál(Input pin sync'd), tak se inkrementuje hodnota 25-bitového čítače (PCNT CF). Po skončení pulzu na vstupním pinu, se zastaví čítač s vysokým rozlišením a čeká se na sestupnou hranu synchronizačního signálu. Pak je hodnota uložená v obou registrech přesunuta do RAM. Výsledek měření je tedy 29-bitový. Synchronizační signál je odvozen od času měřící smyčky. Ta je vždy stejná a nebo delší než kmitočet hodin pro vysoké rozlišení.



Obr. 2.11: Princip pulsního měření s rozhraním N2HET [Převzato z [5]]

2.11.3 Přesnost měření

Z výše uvedených předpokladů se dá zjistit přesnost měření a to tak, že jsou použity přesné otáčky a otáčky měřené s maximální odchylkou. Tyto dvě hodnoty jsou pak vzájemně vyděleny. Jak bylo řečeno dříve, tak jsou výpočty prováděny pro jmenovité otáčky +20%. To je 3600 ot/min . Odchylka měřícího řetězce je dána proměnnými dobami měření. Největší chyba může nastat pokud jsou při prvním měření všechny odchylky záporné a při druhém jsou všechny kladné. Z toho vyplývá celková doba zpoždění podle rovnice 2.6 $t_{delay} = 22\text{ns}$.

$$t_{delay} = 2 * t_{zub} + 2 * t_{PSK} [ns] \quad (2.6)$$

Dále je nutné spočítat dobu jednoho otočení hřídele tedy $t_{otoen} = 1/60 \text{ Hz} = 16,666667 \text{ ms}$. K tomu je připočtena maximální možná chyba podle rovnice 2.7.

$$\begin{aligned} t_{max_chyba} &= t_{rot} + t_{delay} \\ &= 16,66 * 10^{-3} + 22 * 10^{-9} \\ &= 16,666689 \end{aligned} \quad (2.7)$$

Následným vydělením a úpravou podle rovnice 2.8, je získávána odchylka měření 0.0001339%.

$$\Delta t = \left(\left(\frac{t_{delay}}{t_{otoen}} \right) - 1 \right) * 100[\%] \quad (2.8)$$

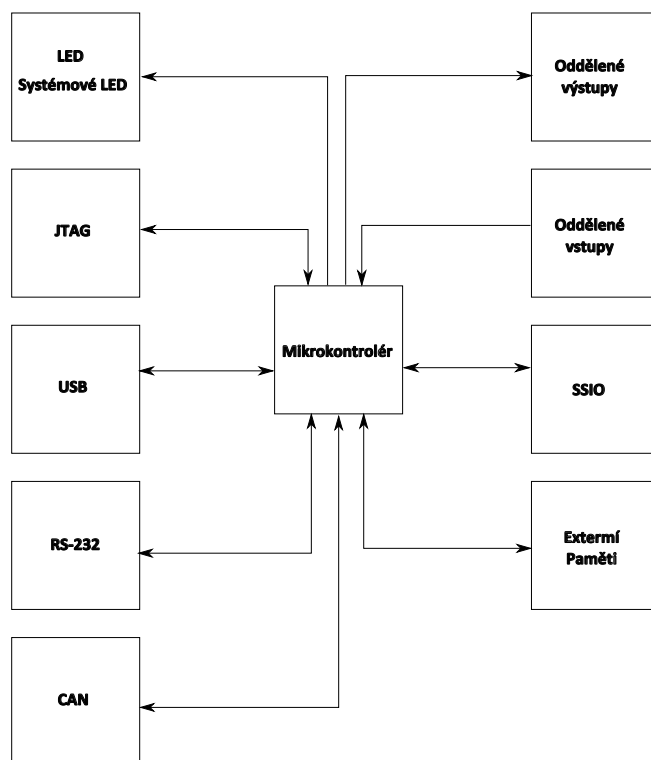
Toto je ovšem pouze teoretická hodnota. V praxi je hodnota mnohem větší a do odchylky měření se započítávají i další vlivy (rušení, strmost hran, různé zákmity, SW řešení a podobně). Spočtenou chybu měření lze ověřit jen praktickými zkouškami.

3

Návrh modulu pro měření otáček

V této kapitole je rozebrána teoretický návrh modulu pro měření otáček. První část je zaměřena na detailnější popis vybraného mikrokontroléru, kterou následují návrhy zapojení všech dalších periférií.

V níže uvedeném blokovém schématu 3.1 je možné detailně rozeznat, jak jsou jednotlivé bloky propojeny.



Obr. 3.1: Blokové schéma modulu pro měření otáček

3.1 Mikrokontrolér RM48L952

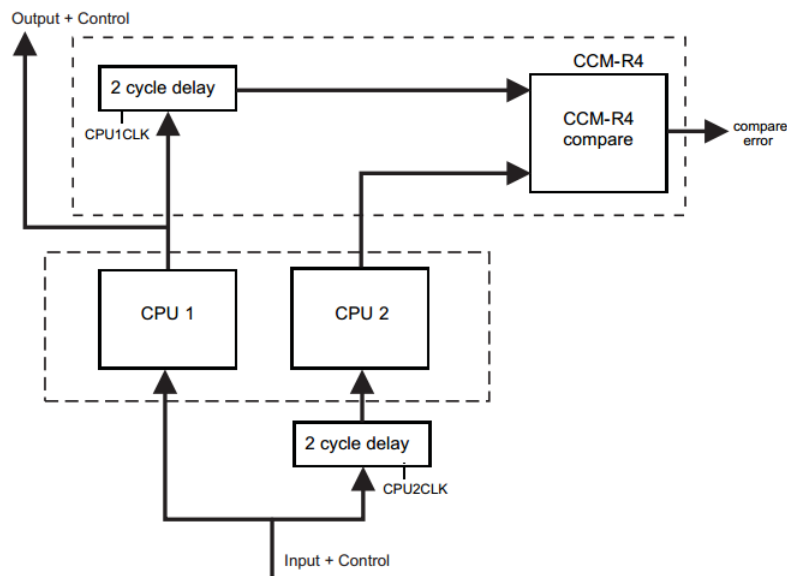
Tento mikrokontrolér obsahuje prvky pro zvýšení bezpečnosti při svém chodu. prvním z nich je jednotka ECC, která se stará o kontrolu dat uložených v paměti a to jak RAM tak

i Flash. Tato jednotka je schopna pomoci kódování dat zkontrolovat pravost uložených dat a pokud nalezne chybu, je schopna chybu v jednom bitu opravit a chybu ve dvou bitech detekovat. O ochranu paměti se také stará MPU (Memory Protection Unit), která je schopna paměť rozdělit na dvanáct chráněných regionů.

Dalším prvkem je BIST (Built-In Self-test). To je kontrolér, který se stará o provádění testování CPU. To probíhá tak, že kontrolér odpojí CPU od okolí a rozdělí test na jednotlivé úseky a ty spustí. Zároveň začne počítat čas na provedení testu. Po ukončení testování obnoví původní činnost CPU.

Přesnost výsledků z CPU zajišťuje dvojice jader procesorů, které jsou svojí dispozicí proti sobě fyzicky otočené a převrácené. Zároveň pracují v režimu lock step viz. obrázek 3.2. Obě jádra vykonávají stejný program a jak je vidět na obrázku, první jádro provádí svoji činnost a výsledek je ihned odeslán na výstup, ale také je poslán do posuvného registru se zpožděním dvou cyklů. Naproti tomu do druhého jádra je ten samý signál zpožděn o dva hodinové cykly a výstup jde pouze do komparační jednotky, kde se porovnává se zpožděným signálem z prvního CPU. Těmito prostředky je zajištěno, aby výsledek operace byl správný, i když kontrola správnosti výsledku je provedena až se zpožděním dvou taktů.

Poslední bezpečnostní vlastností je vyvedený chybový pin, který je připojen k procesoru jako nemaskovatelné přerušení a v případě jakéhokoliv chyby, změní svůj stav a dá tak uživateli vědět, že je něco v nepořádku.



Obr. 3.2: Funkce lock step. [Převzato z [3]]

Tato jádra mají 32-bitovou architekturu a RISC a f_{max} menší než 220 MHz. Každé toto jádro je navrženo jako osmi stupňová zřetězená struktura (pipeline). Procesor také obsahuje jednotku pro operace s pohyblivou řádovou čárkou a to jak pro formát single-precision tak i pro double-precision.

Pro napájení mikrokontroléru je nutné zajistit dvě úrovně napětí a to 3,3V pro periférie a 1,2V pro samotné jádro. A připojit napětí pro A/Č převodníky v rozmezí 3V - 5,25V.

Mikrokontrolér obsahuje 256KB RAM, 3MB paměti flash a 64KB flash paměti pro emulování EEPROM paměti. Všechny tyto paměti jsou vybaveny ECC.

Dále je mikrokontrolér vybaven celou řadou komunikačních periférií, jako je USB v obou režimech. EMAC které zajišťuje komunikaci po ethernetu, 2x ADC s 24 kanály, 2x N2HET (Next Generation High End Timer), 3x MibSPI, 2x SPI, 2x LIN, 1x I^2C .

Schéma zapojení je uvedeno v příloze B.1. Mikrokontrolér je připojen na externí hodinový krystal s frekvencí 20MHz, signalizační diodu pro případ poruchy, tlačítko pro reset připojené na RC článek a osm výstupů pro ladění programu, které jsou pull-up rezistory připojeny k napájecímu napětí 3,3V. Kromě těchto základních prvků, jsou k mikrokontroléru připojeny všechny ostatní periférie a samozřejmě napájení.

Tento mikrokontrolér se vyrábí ve dvou variantách a to LQFP pouze se 144 vývody z čeho je pouze 64 vstupně-výstupních a nebo jako BGA s 337 vývody s 144 vstupně-výstupními piny. Z důvodu, pro potřeby práce bylo 64 GPIO nedostačujících, bylo nutné vybrat pouzdro BGA. To sebou přináší komplikace při návrhu DPS jak z hlediska nutnosti použití vícevrstvé desky, tak i nutnosti být schopen vyvrtat malé díry a to i slepé.

3.2 Napájení

Kompletní schéma zapojení je možné najít v příloze B.3. Ze zadní sběrnice je přivedeno napájení 24V stejnosměrného napětí, které je z důvodu bezpečnosti zdvojeno na dva kanály A a B. Hned na vstupu do zařízení jsou umístěny dvě tavné pojistky F1 a F2 pro každý kanál jedna. Obě jsou dimenzované na protékající proud velikosti 2,5A. Hned za nimi jsou umístěny dvě usměrňovací diody 10MQ100NTRPBF (D1 a D2), které by v případě přivedení závěrného napětí modul odpojily. Pro případ krátkých napěťových špiček je hned za nimi je umístěn transil SMCJ54A (D3), který jakékoliv špičky větší než je 28V svede do nulového potenciálu.

Za ním je pak připojena kondenzátorová baterie. Ta zde slouží pro vykrývání odběrových špiček zařízením. Pod touto baterií je ještě tranzistor IRFH5053PBF (Q1). Ten zde slouží k tomu, aby po připojení napájení postupně propouštěl větší proud až do plného otevření. Hlavním důvodem tohoto zapojení je omezení nárazového proudu při nabíjení kondenzátoru po připojení zařízení do vany nebo jeho zapnutí. Dole je pak v sektoru C2 vidět jeden čtyřkanálový opto-převodník TCMT4600 (U2). Ten je zde umístěn proto, aby procesor měl informaci o napětí v napájecích kanálech a aby od nich byl zároveň galvanicky oddělen. Tato informace je předávána signály PWR_OK_A pro kanál A a PWR_OK_B pro kanál B.

Dole v sektoru D je DC/DC konvertor THM 10-4811WI (U3), který transformuje vstupní napětí 18V-75V na 5V a je schopný dodávat proud až 2A. Posledním prvkem je teplotní senzor AD7814ART (U1) připojený přes rozhraní SPI do mikrokontroléru. Tento

senzor teploty má deseti-bitový převodník, který je schopen měřit teploty od -55°C až do 125°C . Je zde umístěn hlavně proto, aby bylo včas detekováno případné přehřívání. Na DPS je umístěn velmi blízko DC/DC konvertoru (U3).

Pro další dělení napětí je zde jeden step-down měnič a jeden lineární stabilizátor B.4. Prvním z nich DC/DC měnič step-down ADP2118 (U6) pracující s frekvencí 1,2MHz. Ten snižuje napětí z 5V na 3,3V pro potřeby téměř všech zařízení v zařízení. Měnič je schopen dodávat nepřetržitý proud 3A. Je dodáván pouze v pouzdře LFCSP_WQ. Zapojení je provedeno podle doporučení výrobce.

Druhým prvkem na schématu je lineární stabilizátor TPS73512 (U7). Ten transformuje napětí z 3,3V na 1,2V pro napájení jádra procesoru. Je schopen dodávat proud 1A. V zapojení je použito pouzdro PVSON. Zapojení je opět provedeno podle doporučení výrobce.

Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály napájení
 - PWR_OK_A - F1
 - PWR_OK_B - F2

- Signály teploměru U1 jsou připojeny na rozhraní mikrokontroléru SPI4
 - PWR_TEMP_DOUT - V6
 - PWR_TEMP_CS -U1
 - PWR_TEMP_SCLK - K18
 - PWR_TEMP_DIN - W5

3.3 Paměti

Kompletní schéma zapojení je možné najít v příloze B.2. K mikrokontroléru jsou připojeny dvě rozšiřující paměti. Dodatečná paměť typu RAM nebyla implementována, z důvodu, že vnitřní paměť mikrokontroléru byla dostatečná.

První rozšiřující paměť AT25DF321A, která je typu Flash s kapacitou 32Mbit. Na výkresu označená jako U15. Tato paměť je konstruovaná pro použití při napájecím napětí 2,7V až 3,6V. K procesoru je připojena rozhraním SPI, na němž může pracovat rychlostí až 85MHz. Využití této paměti bude hlavně pro uložení provozních informací během běhu programu. Použitá varianta je v pouzdře SOIC8.

Druhou rozšiřující pamětí je paměť AT24C256C EEPROM od společnosti Atmel. Označena jako U16. Velikost paměti je 256Kbit a bude sloužit k uložení nastavovacích parametrů modulu. Možnosti napájení jsou poměrně široké a to od 1,7V až do 5,5V. Paměť je připojena pomocí rozhraní 2-Wire, které je kompatibilní s rozhraním I^2C . Přenosová rychlost se odvíjí od použitého napájecího napětí, v tomto případě to je až 1MHz. Výrobce

dále uvádí že data uložená v paměti vydrží po dobu 40 let. To by mělo bohatě vystačit na celou provozní dobu zařízení. Z nabízených pouzder bylo opět vybráno pouzdro SOIC8. Dále jsou k sběrnici připojeny dva pull-up rezistory pro zvednutí datových linek do vysoké logické úrovně. Toto je nutnost pro správnou funkci rozhraní I^2C .

Signály tohoto bloku a jejich připojení k mikrokontroléru:

- Signály paměti EEPROM U16 a připojení na I^2C
 - CPU_I2C_DATA - B2
 - CPU_I2C_BCLK - C3
- Signály paměti Flash U15 a připojení na SPI2
 - NCPU_SPLFLASH_CS - D3
 - CPU_SPLFLASH_MISO -D2
 - CPU_SPLFLASH_MOSI - D1
 - CPU_SPLFLASH_SCLK - E2

3.4 JTAG a systémové diody

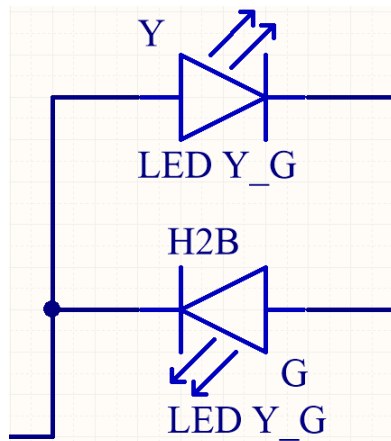
Kompletní schéma zapojení je v příloze B.6. V horní části schématu je vidět zapojení rozhraní JTAG, které je připojené typickým konektorem s 20 piny do ladícího rozhraní mikrokontroléru. Zde jsou datové linky připojené rezistory pull-up k napájecímu napětí. Dále je zde jeden přímý vodič, který vede k resetu mikrokontroléru. Na tomto vodiči je rezistor pull-up až ve schématu pro procesor B.1.

Pod zapojením pro JTAG je zapojení pro systémové diody, které jsou určeny k hlášení stavu modulu. Sem jsou přivedeny signály:

- NSOMEPWRLLED - tento signál značí že ne všechna napětí jsou v pořádku.
- NALLPWRLLED - naopak tento signál slouží k oznámení toho, že jsou všechna napětí v pořádku.
- NERRLED - tento signál je zde pro oznámení chyby.
- NRUNLED - pokud je vše v pořádku a zařízení běží je aktivní tento signál

Tyto signály jsou připojeny k čtyřnásobné výstupní bráně SN74LVC125AD (U14), která zajišťuje dostatečně velké proudové posílení (100mA) pro plně rozsvícení LED. Tento obvod pro svou funkci potřebuje napětí 3,3V. Také disponuje možností výstup převést do stavu vysoké impedance a tak zablokovat svojí funkci, ale tato vlastnost nebyla nevyužita a vývody EO byly připojeny na nulový potenciál a bylo zajištěno, že obvod bude vždy aktivní.

Za tímto obvodem je dvojice LED (H2 a H3). Jak můžete vidět v obrázku 3.3, tak v jednom pouzdře jsou dvě diody zapojené proti sobě. Jedna dioda má zapojenou anodu na katodu druhé a naopak. Tímto se dosáhlo toho, že pro rozsvícení obou LED budou dostačovat dva vodiče, nevýhoda je, že se nedají rozvít obě dvě LED najednou.



Obr. 3.3: Zapojení LED v jednom pouzdře

Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály JTAG a připojení k ladícímu rozhraní
 - JTAG_NRST - B18
 - JTAG_JTDI - A17
 - JTAG_JTMS - C19
 - JTAG_JTCK - B18
 - JTAG_JTDO - C18
 - NCPU_RST - B17
- Signály pro systémové LEDs připojené k GPIO
 - NSOMEPWRLLED - C15
 - NALLPWRLLED - C16
 - NERRLED - C14
 - NRUNLED - C17

3.5 Uživatelské LEDs

Kompletní schéma zapojení je v příloze B.8. Ze schématu je patrné, použití podobné konstrukce jako v případě systémových LED a to že signály z mikrokontroléru jsou přivedeny na výstupní bránu SN74LVC125AD (U22 a U23). Na každém vodiči je rezistor pull-up

ke kladnému napětí. Brána má opět svedené signály OE do země a tak se tedy nedá převést do stavu vysoké impedance. Na výstupní straně jsou použity LED třech barev (Zelené, žluté a červené), které jsou vždy dvě v jednom pouzdře nad sebou. Tyto diody jsou konstruované na protékající proud až 30mA pro červenou barvu a 25mA pro barvu zelenou. Tomu jsou také přizpůsobeny sériově připojené rezistory. Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály LED a jejich připojení k mikrokontroléru na GPIO
 - CPU_USR_LED_Y0 - E16
 - ...
 - CPU_USR_LED_G3 - E19
 - CPU_USR_LED_Y4 - F16
 - ...
 - CPU_USR_LED_R7 - F19

3.6 Uživatelské piny

Kompletní schéma zapojení je možné najít v příloze B.13. V této části je pouze jeden deseti-pinový konektor, který bude sloužit pouze pro ladění programu. Na všech, linkách jsou rezistory pull-up.

- Signály Uživatelských pinů k mikrokontroléru.
 - LADICL_PIN_0 - V10
 - LADICL_PIN_1 - V9
 - LADICL_PIN_2 - V8
 - LADICL_PIN_3 - W9
 - LADICL_PIN_4 - W8
 - LADICL_PIN_5 - W6
 - LADICL_PIN_6 - V6
 - LADICL_PIN_7 - R2

3.7 Universal Serial Bus

Kompletní schéma zapojení je možné najít v příloze B.5. Na schématu je vidět obvod ADuM3160 (U4), který slouží pro galvanické oddělení rozhraní USB od zbytku modulu. Tento modul odděluje vstupní a výstupní stranu pomocí indukční vazby a zajišťuje elektrickou pevnost 2,5kV. Tomu je uzpůsobeno i pouzdro, ve kterém je obvod dodáván a to

SOIC16W. Provedení Wide zajišťuje větší vzdálenost mezi oddělenými stranami a tudíž i větší elektrickou pevnost. Dále je tento obvod schopen pracovat jak v režimu Low-speed, tak i v režimu Full-speed. Z důvodu, že se modul bude vzhledem k USB chovat pouze jako připojené zařízení, tak zde není potřeba přivedení odděleného napětí na oddělenou stranu. Napájení této strany bude zajišťovat pouze napětí přivedené z vnějšku pomocí USB. Pro případ, že by se na vnějším napájení objevilo nějaké přepětí, tak je zde zapojena zenerova dioda (D6). Ta by se v případě přepětí měla otevřít a stabilizovat napětí na 5V.

Na datových linkách je ještě připojena ESD ochrana, která je navržena pro použití na datových linkách USB a splňuje normu IEC 61000-4-2 level 4. To znamená je schopna zvládnout 15kV výboj ze vzduchu a 8kV výboj z přímého kontaktu. Následuje už pouze konektor pro USB-B. Typ B je zde použit z důvodu, jak již bylo zmiňováno, že zařízení se bude chovat pouze jako připojené zařízení. Na levé straně je možné identifikovat LED a výstup pro mikrokontrolér. Ten informuje o tom, že je USB napájeno.

Posledním prvkem pro řízení USB je TUSB1105 (U5). Je to pokročilý USB přijímač-vysílač. Ten zde slouží k převodu signálů z mikrokontroléru na datové linky pro USB. Je kompatibilní se standardem USB 2.0, tak i s USB 1.1. Tento přijímač-vysílač je schopen pracovat podle zapojení jako zařízení typu host, tak i jako připojené zařízení. Jak už bylo řečeno výše, pro účel tohoto zařízení postačí pouze USB v režimu připojeného zařízení a tomu bylo zvoleno odpovídající zapojení.

Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály USB přijímač-vysílač U5 a připojení k mikrokontroléru
 - CPU_USB_GZO_NOE - T1
 - CPU_USB_PUENO_SOFTC - V2
 - CPU_USB_RXDLRCV - W10
 - CPU_USB_RXDMI_VM - C2
 - CPU_USB_RXDPI_VP - A5
 - CPU_USB_SE00_VMO - B3
 - CPU_USB_SUSP_SUSP - V7
 - CPU_USB_TXDO_VPO - C1

3.8 Binární vstupy

Kompletní schéma zapojení jemožné najít v příloze B.7. V této části je postaveno pole 8 binárních vstupů, které jsou galvanicky oddělené od jádra zařízení pomocí dvou čtyřkanálových opto-převodníků TCMT4600 (U11 a U12). Tyto převodníky snesou procházející proud 50mA, a proto jsou na vstupech jednotlivých kanálů připojeny rezistory, které zde slouží k omezení procházejícího proudu právě na 50mA.

Zapojení funguje tak, že pokud je na vstupu napětí velikosti 24V, tak žádný proud neteče a ani nesvítí dioda v převodníku. Naopak pokud je vstup v logické nule, tak proud prochází LED a ta svítí. Tím se sepne tranzistor na oddělené straně a začne protékat proud. Na výstupní straně je připojen pouze mikrokontrolér s minimální spotřebou, a tak není potřeba řešit proudovou zatížitelnost výstupu.

Dalším obvodem v zapojení je vstup pro senzor měření otáček

3.8.1 Senzor pro měření otáček

Pro měření otáček byl zvolen senzor RP 9376 od společnosti Profess. Tento senzor je konstruován pro bezkontaktní měření rychlosti otáčení feromagnetických strojních součástí v průmyslových provozech. To znamená, že pro použití na měření otáček turbíny je to ideální volba. Maximální frekvenční rozsah je až do 12kHz.

Pro napájení senzoru je možné použít napájecí napětí z rozsahu 10V až 30V. A taky byly napájecí svorky připojeny na napájecí napětí zařízení (24V), a tak se jej již nebylo nutné nijak galvanicky oddělovat. Třetí vodič, který přenáší měřené pulzy byl připojen přes převodník HCPL-9031-300 (U13) k mikrokontroléru na rozhraní N2HET (Next generation High End Timer). Tento převodník funguje na indukčním principu a byl zvolen z důvodu velmi malého rozptylu zpoždění přenosu z jedné strany na druhou a to pouze 6nS. Vstup do převodníku je proveden technologií CMOS. To znamená téměř nulové vstupní proudy a vstup snese napětí do $V_{DD} + 0,5V$. Následně bylo nutné upravit napájecí napětí pro převodník a upravit úroveň signálu z 24V na 3,3V. Pro úpravu napájení byl použil lineární stabilizátor L78L33ABD (U9), který je schopen stabilizovat napětí z 30V na 3,3V a je schopen dodat proud 100mA. Pro úpravu napětí z výstupu čidla otáček měření byl použil napěťový dělič a před ním je pro ochranu proti případným špičkám transil (D17) na 26V.

Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály binárních vstupů jejich připojení k mikrokontroléru na GPIO
 - BIN00_CPU - G16
 - ...
 - BIN03_CPU - G19
 - BIN04_CPU - H16
 - ...
 - BIN07_CPU - H19
- Signál měřicího senzoru na rozhraní N2HET1
 - SENSOR_GAL_CPU - W3

3.9 Binární výstupy

Kompletní schéma zapojení lze najít v příloze B.11. V tomto modulu je zapojení osmice výstupních pinů, které jsou galvanicky oddělené od jádra měřícího modulu. V první části je dvojice čtyřnásobných výstupních bran SN74LVC125AD (U31 a U34), které proudově posilují signál z mikrokontroléru. Opět mají spojené vstupy OE spojeny se zemí. Signál pro brány se do této části dostane osmi vodiči, které mají každý svůj rezistor pull-down. Ten zajišťuje, že v případě nečinnosti se zde nemůže naindukovat žádné velké napětí a vstup je vždy v definované úrovni.

Za touto bránou je obvod AQY210KS (U28-U30, U32-U33, U35-U37). Jsou to vlastně spínače, které jsou opticky oddělené s elektrickou pevností 1,5kV AC. Tento obvod pro plné sepnutí výstupu potřebuje proud tekoucí mezi svorkami 1 a 2 velikosti 50mA. Na výstupu může spínat napětí o maximální velikosti 350V a nechat protékat maximální proud 120mA. V řešeném případě bylo počítáno s výstupem maximálně 24V a tomu byla přizpůsobena velikost odporu na výstupní straně, tak i umístěním transilů (D8-D15), které ořezávají napěťové špičky vyšší než 28V.

Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály Binárních výstupů a jejich připojení k mikrokontroléru na GPIO
 - CPU_USR0 - J16
 - ...
 - CPU_USR3 - J19
 - CPU_USR4 - K17
 - CPU_USR5 - K19
 - CPU_USR6 - L18
 - CPU_USR0 - M17

3.10 RS-232

Kompletní schéma zapojení najdete v příloze B.12. Na tomto schématu můžete vidět zapojení rozhraní pro RS-232. Na vstupní straně je obvod ADuM6402CRWZ (U8). Ten je zde jako v předchozích případech pro galvanické oddělení vstupu a výstupu a také díky svému internímu DC/DC konvertoru bude napájet výstupní část. V té je obvod MAX232 (U10) sloužící k ovládání sběrnice RS-232. Tento obvod pracuje se vstupním napětím 5V a svojí vnitřní nábojovou pumpou, s externími kondenzátory, transformuje napětí na $\pm 7V$ potřebných pro práci se sběrní RS-232. Tento obvod má dva plnohodnotné kanály. Obvod je dodáván v různých pouzdrech, pro požadavky tohoto zařízení byl zvolen SOIC 16. Dále jsem kromě dvou datových vodičů, vyvedl i dva řídicí signály. CTS a RTS. Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály RS-232 jsou připojeny k mikrokontroléru na rozhraní LIN, které je velmi podobné rozhraní RS-232 bez řídicích signálů a dá se programově přenastavit.
 - CPU_UART_TX - B7
 - CPU_UART_RX - A7
 - CPU_UART_RTS - C4
 - CPU_UART_CTS - C5

3.11 SSIO

Kompletní schéma zapojení je k nalezení v příloze B.9. Modul SSIO je rozhraní pro sběrnici vyvinutou společností ZAT a.s., které slouží pro komunikaci mezi jednotlivými moduly v sestavě. Tato sběrnice využívá LVDS a pro komunikaci 4 vodiče. Ty jsou připojeny do zadního konektoru modulu na společnou sběrnici ve vaně. K předávání dat se používají dva signály a to jeden hodinový a druhý je datový. Pro datové vodiče se používá standard RS-485. Dále je zde na zadním konektoru zavedeno kódování pozice, díky kterému každý SSIO modul dostane jedinečnou adresu. V neposlední řadě je komunikace zdvojená z důvodu zvýšení bezpečnosti. Nyní k samotnému modulu.

Modul je tvořen ze dvou částí a to z jedné připojené k mikrokontroléru a druhé, která je galvanicky oddělená. O toto oddělení se starají dva integrované obvody ADuM6401 (U18) a ADuM4402 (U20). Tyto obvody pracují, jak již bylo řečeno, na bázi indukční vazby. To přináší jisté výhody a jednu poměrně velkou a to, že je možné přenášet jistou energii i na výstup přes galvanické oddělení a tak není nutné dělat další zdroj napájení. Výsledný proud, který se dá na výstupu získat závisí na použitém napájecím napětí a na pracovní frekvenci. Například pro 3,3V a 90Mbps je to 20mA. Zde použitý obvod ADuM6401 disponuje ještě navíc integrovaným DC/DC konvertorem, který je schopný na výstup dodat výkon až 400mW. Výstup z konvertoru je možné nastavit na hodnotu 3,3V nebo 5V. Izolační pevnost tohoto obvodu je 5kV. Nyní již k samotnému popisu modulu SSIO.

Horní obvod mající DC/DC konvertor je nastaven tak, aby poskytoval napětí 3,3V. Horní obvod U18 má na starosti řízení přístupu na sběrnici. Druhý obvod U20 řeší již samotné vysílání dat na sběrnici. Samotné vysílání řídí dva přijímací-vysílací obvody DS91C176 (U19 a U21). Jedná se o zařízení, která vytvářejí a přijímají diferenční signál a ten převádí na jednostranný a nebo naopak. Tento obvod je schopen pracovat až do frekvence 100MHz a pro napájení mu stačí 3,3V. Dále má dva řídicí signály. Jeden mu povoluje čtení a druhý zápis. Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály SSIO0
 - SSIO0_TX_EN - A8
 - SSIO0_RX_EN - A9

- SSIO0_CPU_RX_CLK - A13
- SSIO0_CPU_RX_DATA - A14
- CPU_SSIO0_TX_CLK - A10
- CPU_SSIO0_TX_DATA - A11
- Signály SSIO1
 - SSIO1_TX_EN - B5
 - SSIO1_RX_EN - B6
 - SSIO1_CPU_RX_CLK - B12
 - SSIO1_CPU_RX_DATA - B13
 - CPU_SSIO1_TX_CLK - B10
 - CPU_SSIO1_TX_DATA - B11

3.12 CAN

Kompletní schéma zapojení se nachází v příloze B.10. Ve schématu jsou dvě stejná zapojení pro dva identické stupně rozhraní CAN. Zde se o galvanické oddělení od jádra modulu stará obvod ADuM3035 (U24 a U25), které jsou přímo konstruované pro použití s rozhraním CAN. To znamená, že kromě izolační pevnosti 2,5kV nabízí i integrovaný DC/DC konvertor. Ten je schopný ze vstupního napětí, jedno jestli 3,3V nebo 5V, na výstupu získat 5V a dodat proud o velikosti 330mA. Dále je obvod vybaven LVDS budičem pro přístup na sběrnici CAN. Tento obvod je kompatibilní s CAN ISO 11898. Za tímto obvodem je už pouze Jumper (J4) a rezistor (R107), který se dá použít pro zakončení sběrnice CAN. Posledním popisovaným členem je rezistor (R23) na výstupu RS. Ten je zde pro změnu rychlosti komunikace na sběrnici CAN, respektive pro řízení rychlosti náběhu hran vysílaného signálu. To se řídí právě velikostí proudu tekoucího z výstupu RS. Signály tohoto bloku a jejich připojení k procesoru:

- Signály CAN0 k mikrokontroléru na rozhraní CAN2
 - CAN0_CPU_RX_DATA - H1
 - CPU_CAN0_TX_DATA - H2
- Signály CAN1 k mikrokontroléru na rozhraní CAN3
 - CAN1_CPU_RX_DATA - M19
 - CPU_CAN1_TX_DATA - M18

3.13 Konektory přední

Kompletní schéma je obsaženo v příloze B.14. Zde jsou pouze vyvedené 2 konektory pro rozhraní CAN a jeden konektor pro rozhraní RS-232. Pro rozhraní CAN jsou oba dva konektory D-sub DE-9, přičemž jeden je zástrčka a druhý zásuvka. V případě konektoru pro RS-232 je zde D-sub DE-9 zásuvka.

Posledním zapojením na tomto schématu je patice, která je vyvedena na předním panelu a slouží k získání informace o tom, zdali je zámek karty modulu zamknut nebo obemknut. Jsou zde dva signály, které jsou přes rezistory Pull-up zvednuty do logické 1 a podle polohy zámku se uzemňují.

- Signály patice zámku modulu jsou přivedeny na GPIO
 - NFRONTPANEL_OPEN - A3
 - NFRONTPANEL_CLOSED - A4

3.14 Konektor zadní

Kompletní schéma zapojení je k nalezení v příloze B.15. Pro výstup a vstup většiny periférií slouží zadní dva konektory. Každý z nich obsahuje 64 pinů. Tyto konektory se po zasunutí karty do vany připojí na vnitřní sběrnici. Přehled připojení jednotlivých pinů na signály je rozepsán v tabulce v příloze B.1 pro horní konektor a v tabulce B.2 pro konektor spodní.

4

Návrh desky plošných spojů

Tato kapitola je zaměřena na samotný návrh DPS. Bude zde krátce popsáno návrhové prostředí Altium Designer, s následným zaměřením na výběr desky plošných spojů. Závěrem je popsáno rozložení jednotlivých modulů na DPS.

4.1 Návrhové prostředí Altium Designer

K návrhu schémat i DPS bylo použito návrhový systém Altium Designer ve verzi 16.0.9. Na tento systém postupně přechází celá společnost ZAT a.s. a tak je zajištěna kompatibilita tohoto návrhu s jejich systémy. To bohužel znamenalo, že většina součástek potřebných k návrhu, ještě není nakreslena pro použití v tomto novém systému a tak bylo nutné většinu součástek nakreslit. Na to má Altium Designer implementované prostředí, ve kterém se dají nové součástky kreslit relativně rychle a snadně.

Prostředí pro samotný návrh DPS pracuje na základě definovaných pravidel, která určují jak blízko od sebe mohou jednotlivé objekty být. Tato pravidla se dají nastavovat rozdílně pro jednotlivé tzv. místnosti (room). Tyto místnosti vznikají při importu součástek ze schématu do DPS a každé jedno schéma má vlastní místnost. Druhou možností je přidávat místnosti ručně. Tato možnost byla využita pro obvody s velmi jemným rozestupem vývodů zejména proto, aby jim byla nastavena menší povolená mezera mezi vývody.

4.2 DPS

V této části je popsána volba vhodného rozměru DPS, a také další konstrukční vlastnosti.

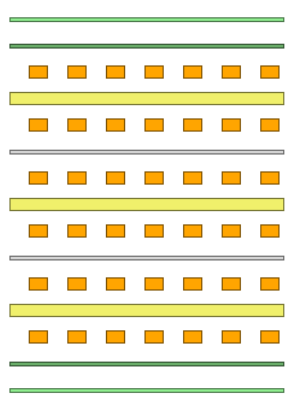
4.2.1 Rozměry

Pro DPS byly zvoleny standardní rozměry eurocard podle standardu IEEE 1101.10. Tento standard definuje různé velikosti DPS pro standardní rozměry van zařízení. Nejčastěji používané výšky DPS jsou definovány dvě. Jedna je do půlky slotu 100mm a druhá je

na velikost slotu 233.35mm. Tyto rozměry jsou velikosti DPS, do velikosti slotu je ještě potřeba připočítat rozměry ližin pro zasunutí DPS. V těchto ližinách jsou umístěny pásy pro svedení el. statického náboje. Rozměry eurocard jsou také uváděny v jednotkách "U" a to 3U a 6U pro výše uvedené rozměry, kde 1U znamená výšku 44.45mm. Délka je také variabilní. Nejkratší karta začíná na délce 100mm a dále se zvětšuje po násobcích 60mm. Pro tuto práci byla zvolena velikost 233.35mm x 220mm. Tato velikost odpovídá rozměrům van, které jsou používány ve společnosti ZAT a.s.

4.2.2 Vrstvy DPS

Pro tento měřicí modul byla zvolena šesti vrstvá deska viz. obrázek 4.1, a to hlavně z důvodu použití mikrokontroléru v pouzdře BGA. Toto BGA pouzdro má velmi jemnou rozteč mezi jednotlivými kuličkami, pouze 0.8mm, a tak by s méně vrstvou deskou bylo nemožné ho nakontaktovat. Mezi 4 signálními vrstvami jsou umístěny ještě dvě vrstvy napájecí. Jedna pro kladný pól a druhá pro nulový potenciál. Tímto by se také měla zvýšit odolnost proti EMC. Základním materiálem je substrát FR-4. Na tento základní materiál jsou připojeny dvě vodivé folie, z každé strany jedna a tvoří tak jednu desku. Takovéto desky jsou zde tři a ty jsou položeny na sebe přičemž je odděluje tenká vrstva prepegu. Vodivé vrstvy jsou tvořeny měděnou fólií o tloušťce 35 μ m. Celková tloušťka DPS je 1.2514mm



Obr. 4.1: Vrstvy DPS

4.2.2.1 Díry v DPS

Použitím mikrokontroléru vznikl požadavek na preciznost výroby děr, a to z důvodu nutnosti vytváření malých prokovených děr pro průstupy do vnořených vrstev, a to jak průchozích, tak i slepých. Zde je limitující velikost vrtáku, který může být nejméně $\varnothing 0,2$ mm DPS pro díru průchozí a $\varnothing 0,25$ mm pro díru slepou.

4.3 Návrh

Tato část je zaměřena na popis návrhu výsledného modulu pro měření otáček.

4.3.1 Nastavení Altium Designer

V první řadě, před začátkem návrhu, je nutné nastavit vývojové prostředí tak, aby držovalo pravidla, podle kterých se bude chovat v průběhu celého návrhu. Postupováno bylo takto:

1. Nastavení počtu vrstev, kde bylo zvoleno šest vrstev a nastaveno rozložení základního materiálu a prepegu. Následně byly pojmenovány jednotlivé vodivé vrstvy pro jednodušší orientaci v návrhovém prostření.
 - (a) Component Side
 - (b) VCC
 - (c) IN layer 1
 - (d) IN layer 2
 - (e) GND
 - (f) Bottom layer
2. Nastavení děr. Zde je nastaveno mezi kterými vrstvami bude možné dělat slepé díry. Nastavena byla možnost dělat slepé díry z vrstvy Component side do vrstvy IN layer 1 a do IN layer 2. Také zde bylo nastaveno dělání děr skrz DPS.
3. Nastavení pravidel pro vzdálenosti mezi různými druhy objektů (cesta-polygon, cesta-SMD ploška). Nastavena byla minimální vzdálenost mezi všemi objekty 0,254mm. Jediná výjimka je pro vzdálenost mezi polygon-polygon a polygon-cesta ve vrstvě VCC a GND kde byla nastavena vzdálenost 1mm.
4. Nastavení propojování. Zde se nastavují mezní šířky vodičů, které se budou dát použít pro propojování jednotlivých částí zařízení. Byla zvolena nejmenší šířka vodiče 0,254mm, ta bude použita pro signální vodiče. Maximální šířka byla nastavena na 1,27mm. Ta bude používána pro napájecí vodiče.
5. Nastavení průměrů děr. Zde byla nastavena dvě pravidla. První je pro celou DPS a to je, že minimální průměr díry je $\varnothing 0,35\text{mm}$. Druhé pravidlo se týká děr, které se dotýkají BGA patice. Ty mohou mít průměr minimálně $\varnothing 0,25\text{mm}$.

Po tomto nastavení je možné přistoupit samotnému kreslení DPS.

4.3.2 Import dat ze schémat

Před začátkem kreslení je důležité definovat velikost DPS, ta byla zvolena 233.35mm x 220mm z důvodů uvedených v kapitole 4.2.1. Poté se importují údaje ze schémat. To probíhá přehlednou tabulkou, kde je vidět co všechno se bude měnit. Po importu se součástky rozdělí jednotlivých místností podle toho z jakého jsou schématu. Tato koncepce má tu výhodu, že pokud chcete přesunout celý modul, tak stačí přenést místnost a všechny vnitřní spoje zůstanou zachovány.

4.4 Rozvržení modulů DPS

V této kapitole bude popsáno umístění jednotlivých modulů na DPS.

4.4.1 Napájení

Osazovací plán v příloze C.2. V dolní části DPS můžete je možné rozpoznat napájecí zdroj, který je připojen na zadní konektor. Poblíž DC/DC konvertoru je umístěno čidlo teploty. Na vstupní straně DC/DC konvertoru jsou připojeny další zdroje napětí a to jeden pro 3,3V a druhý pro 1,2V. Pro lin. stabilizátor U7 muselo být přidáno návrhové pravidlo, které dovoluje mít mezi vývody pouzdra menší vzdálenost než 0,23mm z důvodu pouzdra (PVSON 8) s velmi jemnou roztečí vývodů. Napětí 3,3V je pak rozvedeno polygonem v druhé vrstvě DPS ke všem obvodům pracujícím na tomto napětí. Také je odsud připojen polygon, který rozvádí po DSP nulový potenciál v 5. vrstvě.

4.4.2 Zadní konektor

U zadního konektoru jsou moduly pro komunikaci SSIO, binární vstupy, vstup pro čidlo měření otáček a binární výstupy. Tyto tři moduly mají galvanicky oddělené výstupy a jsou pod nimi rozlité polygony. Ty jsou rozdělené na část pod galvanický oddělenou částí a část směrem do středu zařízení. Část směrem do středu je pak spojena s polygonem, který je rozlité po celém jádru DPS. Pod oddělujícími převodníky je část polygonů vynechána, aby nebyla ovlivněna elektrická pevnost převodníku.

Dále se na zadním konektoru vyskytují piny pro zjištění pozice ve vaně a další piny pro určení vany. Všechna tato rozhraní jsou následně přivedena na příslušné kontakty mikrokontroléru.

4.4.3 Přední strana

Na přední straně jsou pak vyvedeny uživatelsky přístupné periférie. V nejnižším dolním rohu je tří-pinový konektor, který slouží k přenesení informace o zacvaknutém zámku desky ve vaně. Nad ním jsou dvě rozhraní pro CAN, které mají galvanicky oddělenou

vstupní a výstupní stranu. Pod převodníky byly odstraněny polygony pro zajištění udávané elektrické pevnosti. Konektory jednotlivých rozhraní jsou D-sub DE-9 a jsou rozdílné, jeden je zásuvka a druhý zástrčka.

Nad rozhraním CAN je umístěno rozhraní pro RS-232, které je také galvanicky oddělené. Výstupním konektorem je také D-sub DE-9.

Následuje rozhraní pro USB. To má hned za konektorem umístěnou ESD ochranu a ochranu proti napěťovým výbojům v podobě transilu. Následuje galvanické oddělení pomocí převodníku ADuM U4, za nímž následuje převodník signálů z procesoru U5. Ten má velmi malé pouzdro s vývody velmi blízko u sebe a tak jsou zde pro něj a přilehlé vodiče pozměněny pravidla pro hlídání minimálních rozstupů mezi vodiči, která je zmenšena na 0,178mm. Jumper nad U5 zde slouží pro odpojení napájení od modulu USB. Také je zde umístěn modul JTAG se systémovými LED a osmice uživatelských led. Všechna tato rozhraní jsou přivedena do mikrokontroléru.

4.4.4 Střed DPS

Zde je umístěn mikrokontrolér a jsou k němu připojeny všechny periferie. Kolem něj jsou rozmístěny kondenzátory pro hrazení zvýšených odběrů proudu. Ty jsou zde rozmístěny tak, aby na každé straně byl alespoň jeden kondenzátor pro napájení jádra a jeden pro napájení výstupních obvodů. Dále jsou v pravém horním rohu mikrokontroléru ADC převodníky. Pro ty je zde oddělený uzemněný polygon, který snižuje přenos rušivých signálů z datových linek.

Na levé horní straně od procesoru se nachází tlačítko (TL1) s RC členem pro vyvolání resetu mikrokontroléru. Vedle tlačítka je umístěna chybová dioda. Pod mikrokontrolérem jsou umístěné obě dvě externí paměti. Napravo pak patice pro ladění programu.

5

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit zařízení pro měření otáček turbíny v elektrárně podle zadání společností ZAT a.s. V tomto zadání bylo specifikováno, použití mikrokontroléru splňujícího standard SIL 3 podle normy ČSN EN 61508-6 a nároky na potřebné systémové prostředky. Dále zde byly určeny požadavky na potřebné vstupy a výstupy z modulu měření otáček a jejich napěťové úrovně. Specifikovány byly také nároky na externí paměť a použití standardních rozhraní.

První část diplomové práce je zaměřena na krátké přiblížení standardu SIL a jeho vlivu na bezpečnost zařízení. Na to pak navazuje kapitola věnující se průzkumu trhu s mikrokontroléry splňujícími standard SIL 3 a porovnání jejich vlastností. Mezi porovnávané vlastnosti patří, maximální pracovní frekvence, velikost integrovaných pamětí a vybavenost potřebnými perifériemi. Zde byl vybrán mikrokontrolér od společnosti Texas Instruments a to Hercules RM48L952.

Na tuto část pak navazuje text, v němž jsou teoreticky rozebrána použitá rozhraní, které byla vyžadována zadavatelem práce. Konkrétně se jednalo o rozhraní RS-232, RS-485, dále pak rozhraní SPI, I^2C , CAN a USB.

Na konci této pasáže je pak odvozen teoretický výpočet maximální přesnosti měření. Ta byla spočtena na 0,00013%. U podobných zařízení se požadavky na přesnost pohybují kolem 0,001%. To znamená, že navržené zařízení je bez problémů splňuje, ovšem tato spočtená hodnota je pouze teoretická a je tedy zřejmé, že u skutečného bude přesnost měření horší. Tuto skutečnost je možné ověřit pouze praktickými zkouškami.

Třetí kapitolou již byl praktický návrh schémat zapojení dle doporučení společnosti ZAT a.s. Nejprve je zde detailně popsán mikrokontrolér RM48L952 a následně bylo nakresleno schéma obvodového zapojení, na kterém je připojení všech potřebných signálů pro řízení modulu měření otáček a přivedení napájecího napětí k mikrokontroléru.

Následovalo schéma zapojení napájení, které ze vstupního napětí v rozmezí 24V až 60V vytvoří několik napěťových hladin. Jsou to konkrétně napětí 5V, 3,3V a 1,2V. Na vstupu bloku napájení jsou umístěny ochrany proti přepólování, napěťovým špičkám a rázovým odběrům napětí při připojení zařízení.

Následují kapitoly, které popisují jak byly zapojeny všechny vnitřní rozhraní jako

jsou paměti, systémové LED a další. Na tento text pak navazují schémata pro zapojení rozhraní, která jsou vnější. Ty byly navrženy tak, aby případný chybný stav z vně zařízení, nemohl ovlivnit vnitřní strukturu.

V poslední části diplomové práce byla navržena konkrétní podoba prototypu desky plošných spojů, která splňuje požadavky na galvanické oddělení vnějších periférií. Odolnost proti vlivům EMC není u tohoto prototypu zaručena a musí být změřena. Déle jsou zde popsány a nakresleny jednotlivé moduly zařízení a jejich umístění na DPS. V této části jsou také řešeny problémy vznikající při použití obvodů v pouzdrech BGA.

Výsledkem všech těchto dílčích kroků bylo vytvoření modulu pro měření otáček na platformě SIL 3 mikrokontroléru, který splňuje zadání diplomové práce.

Literatura

- [1] Freescale. *Online* Dostupné z: <http://http://www.nxp.com/>
- [2] Profess. *Online* Dostupné z: <http://www.profess.cz>
- [3] Texas Instruments. *Online* Dostupné z: <http://www.ti.com>
- [4] STMicroelectronic. *Online* Dostupné z: <http://www.stmicroelectronics.com.cn/>
- [5] RM48L952 16-and 32-Bit RISC Flash Microcontroller (Rev. D) *Online*
- [6] RM48x 16/32-Bit RISC Flash Microcontroller Technical Reference Manual (Rev. B) *Online*
- [7] Datový list Vishay TCMT1600, TCMT4600, TCMT4606 *Online*
- [8] Datový list Fairchild SMCJ5(C)A - SMCJ170(C)A *Online*
- [9] Datové listy Analog devices *Online* Dostupné z: <http://www.analog.com/>
- [10] TracoPower *Online* Dostupné z: <http:http://www.tracopower.com>
- [11] Atmel *Online* Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/atmel-8568-seeeprom-at24c256c-datasheet.pdf>
- [12] Datový list DS91D176/DS91C176 100 MHz Single Channel M-LVDS Transceivers (Rev. L) *Online*
- [13] Obrázek RS-485 <http://www.papouch.com/> *Online*
- [14] Obrázek USB *Online* https://commons.wikimedia.org/wiki/File:USB_zapojeni_barevne.png

Příloha A

Teoretický úvod

A.1 Anglický popis zkratk v blokovém diagramu

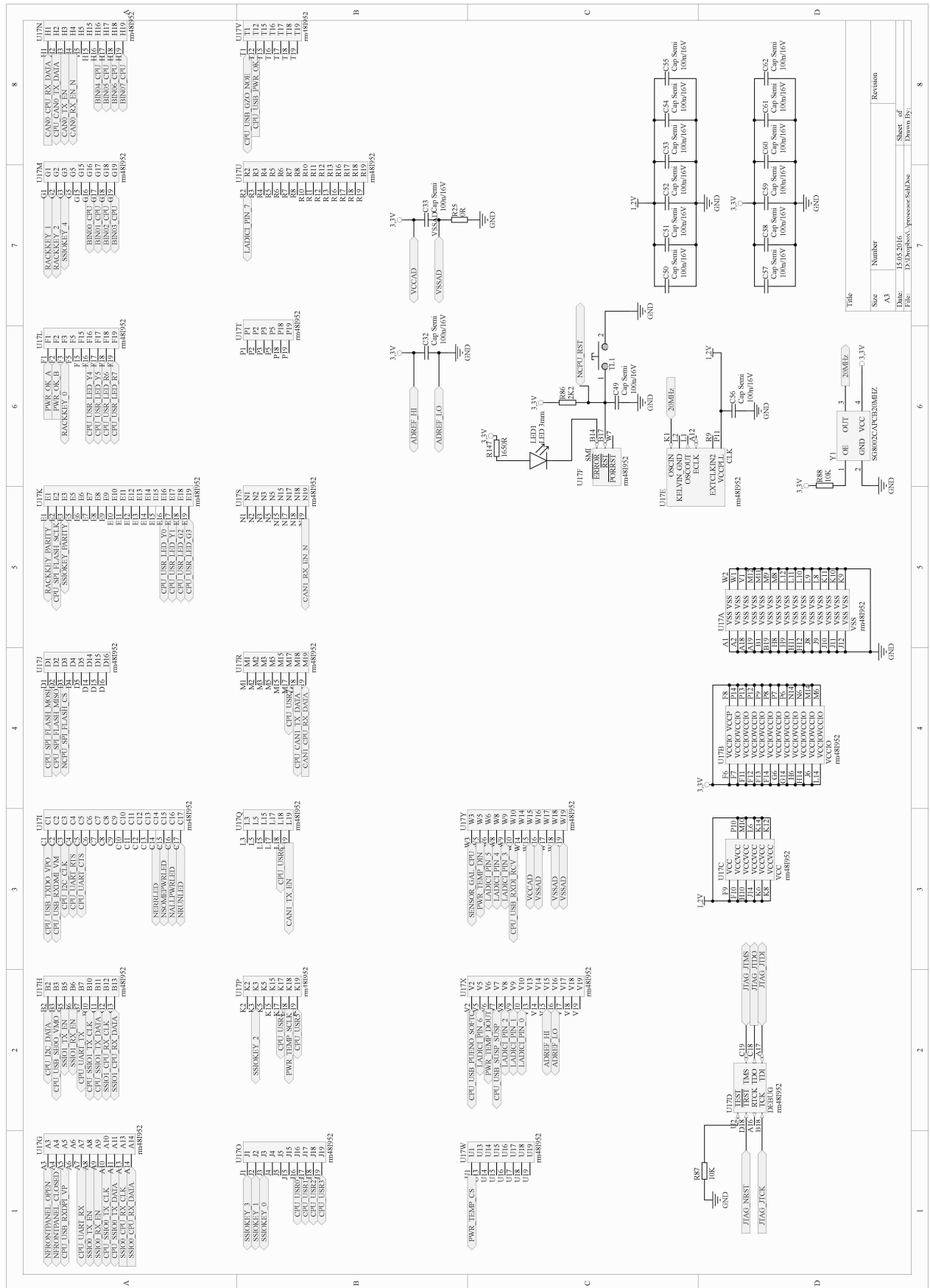
ADC	– Analog-to-Digital Converter	LINFlexD	– LIN controller with DMA support
BAM	– Boot Assist Module	MC	– Mode Entry, Clock, Reset, & Power
CMU	– Clock Monitoring Unit	PBRIDGE	– Peripheral bridge
CRC	– Cyclic Redundancy Check unit	PIT	– Periodic Interrupt Timer
CTU	– Cross Triggering Unit	PMU	– Power Management Unit
DSPi	– Serial Peripherals Interface	RC	– Redundancy Checker
ECC	– Error Correction Code	RTC	– Real Time Clock
ECSM	– Error Correction Status Module	SEMA4	– Semaphore Unit
eDMA	– Enhanced Direct Memory Access controller	SIUL	– System Integration Unit Lite
FCCU	– Fault Collection and Control Unit	SSCM	– System Status and Configuration Module
FlexCAN	– Controller Area Network controller	STM	– System Timer Module
FMPLL	– Frequency Modulated Phase Locked Loop	SWG	– Sine Wave Generator
INTC	– Interrupt Controller	SWT	– Software Watchdog Timer
IRCOSC	– Internal RC Oscillator	TSENS	– Temperature Sensor
JTAG	– Joint Test Action Group interface	XOSC	– Crystal Oscillator

Obr. A.1: Popis zkratk v diagramu mikrokontroléru STMicroelectonic

Příloha B

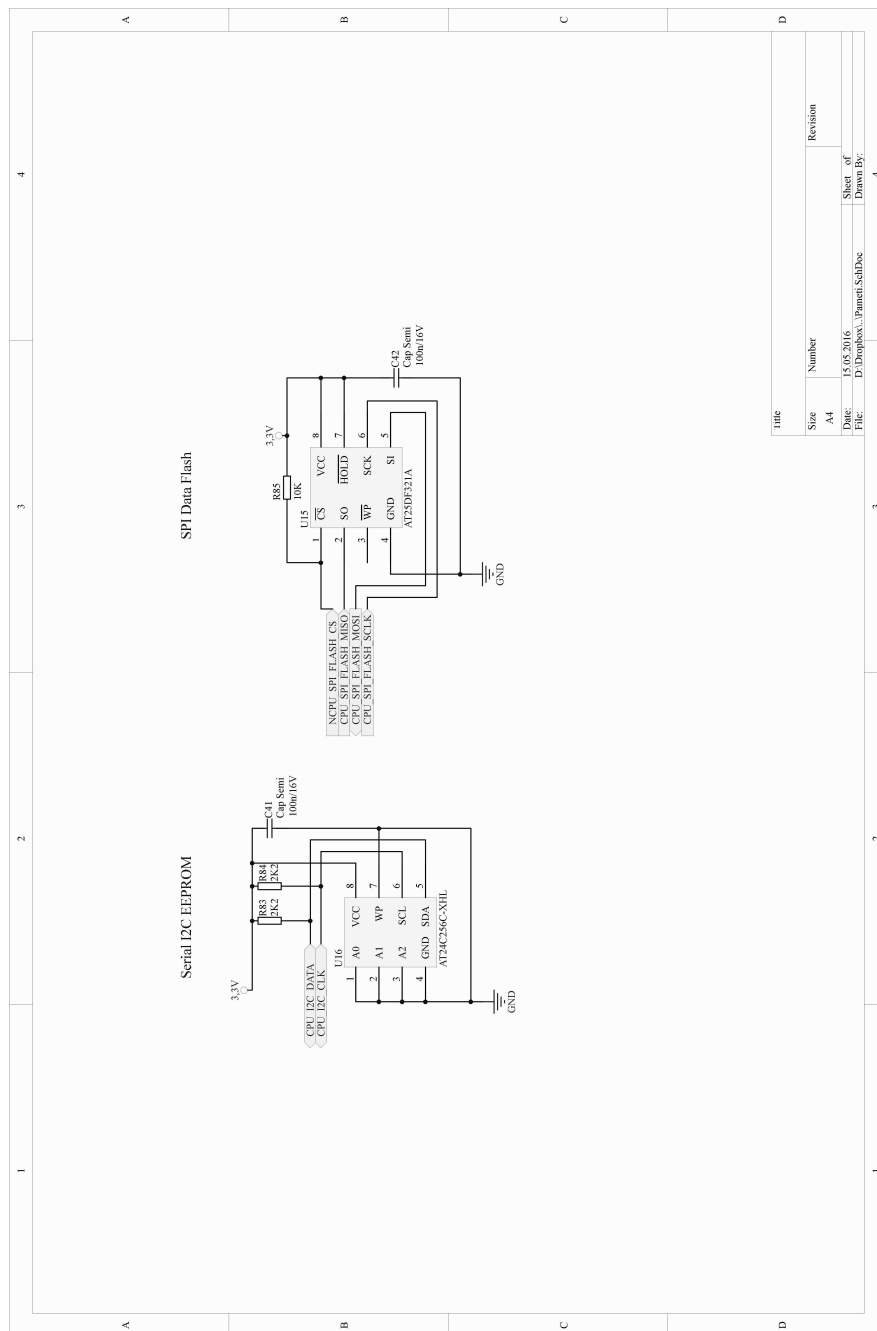
Schémata zapojení

B.1 Schéma procesoru



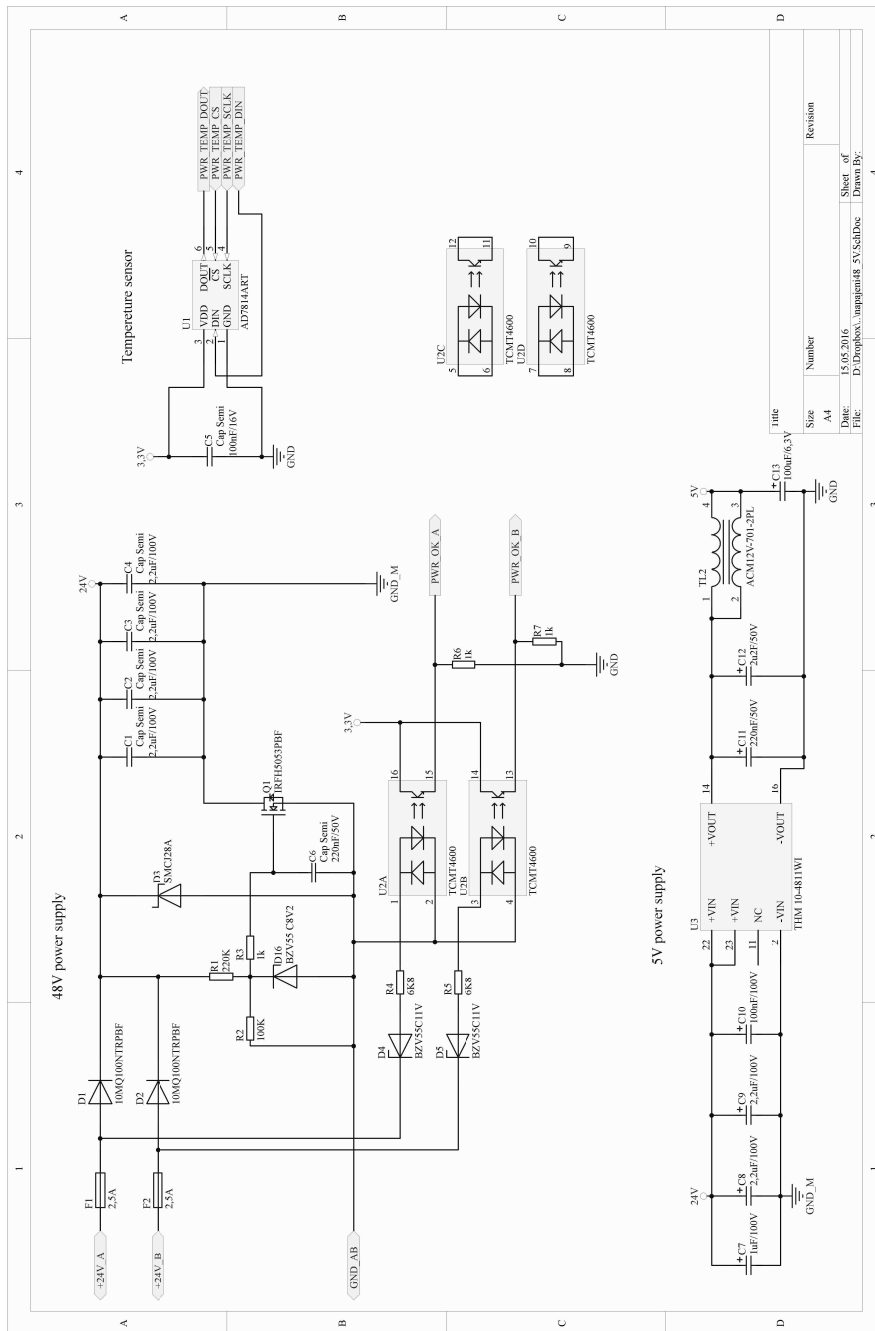
Obř. B.1: Schéma zapojení mikrokontroléřu

B.2 Schéma paměti

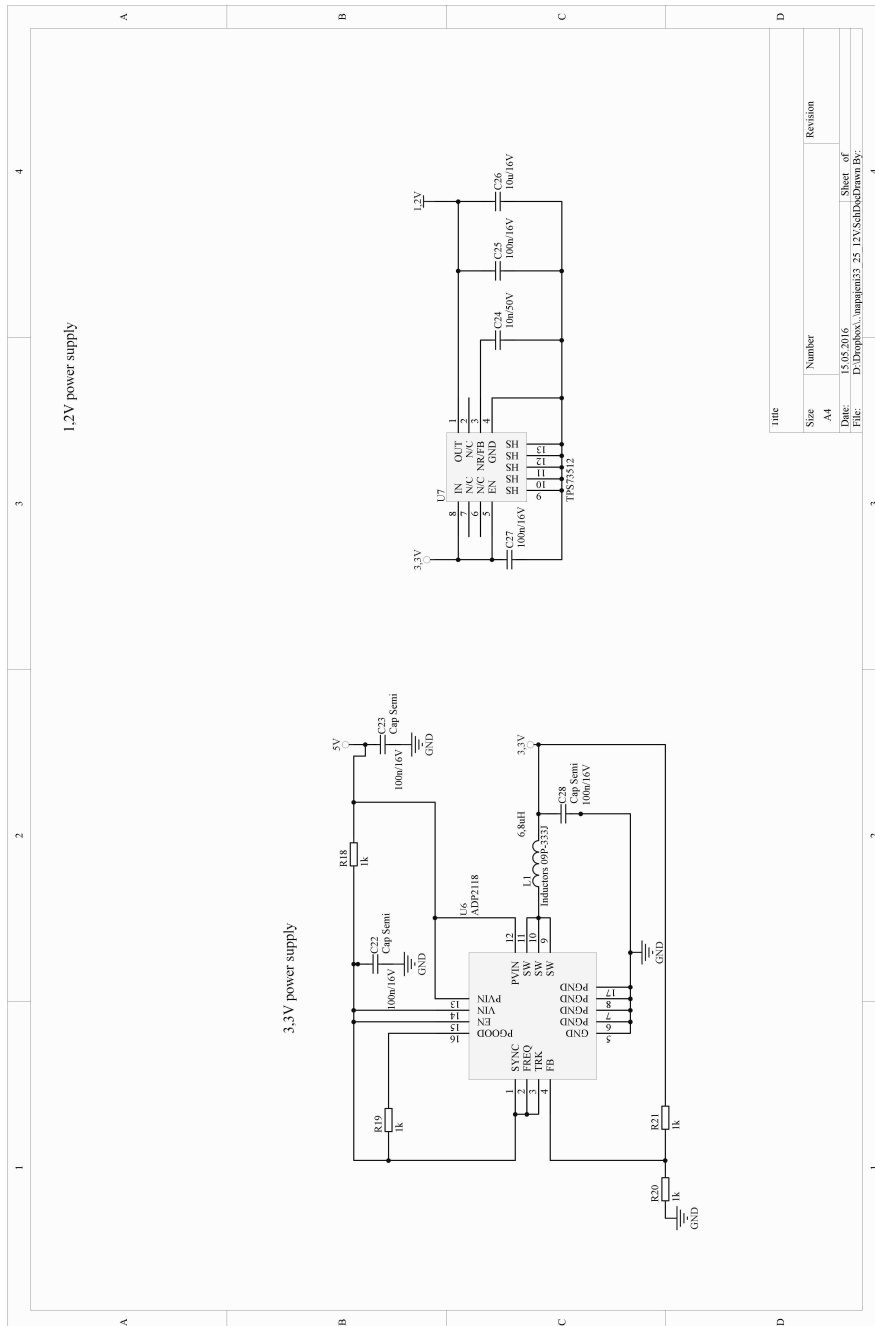


Obr. B.2: Schéma zapojení paměti

B.3 Schéma napájení

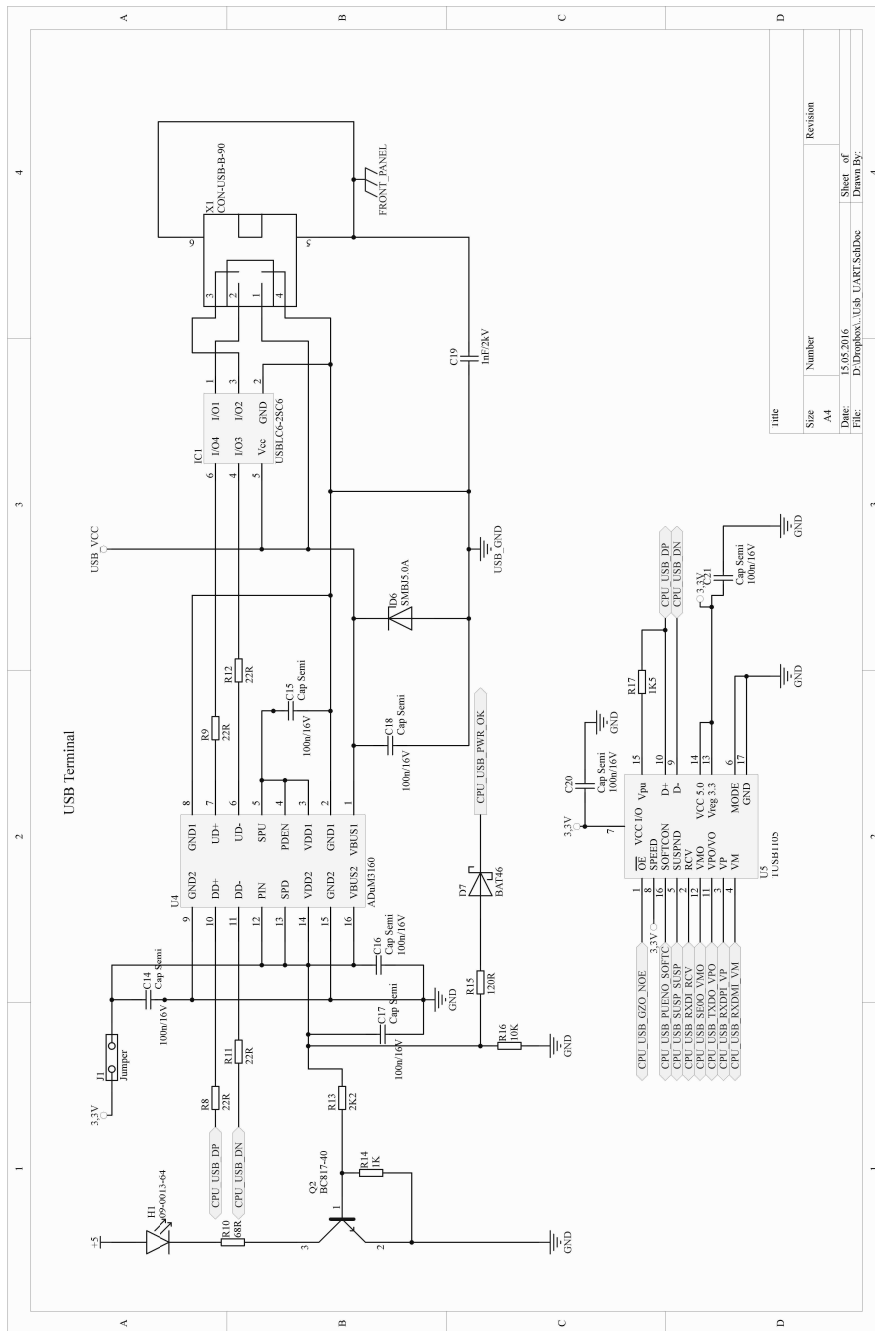


Obr. B.3: Schéma vstupní části zapojení napájení



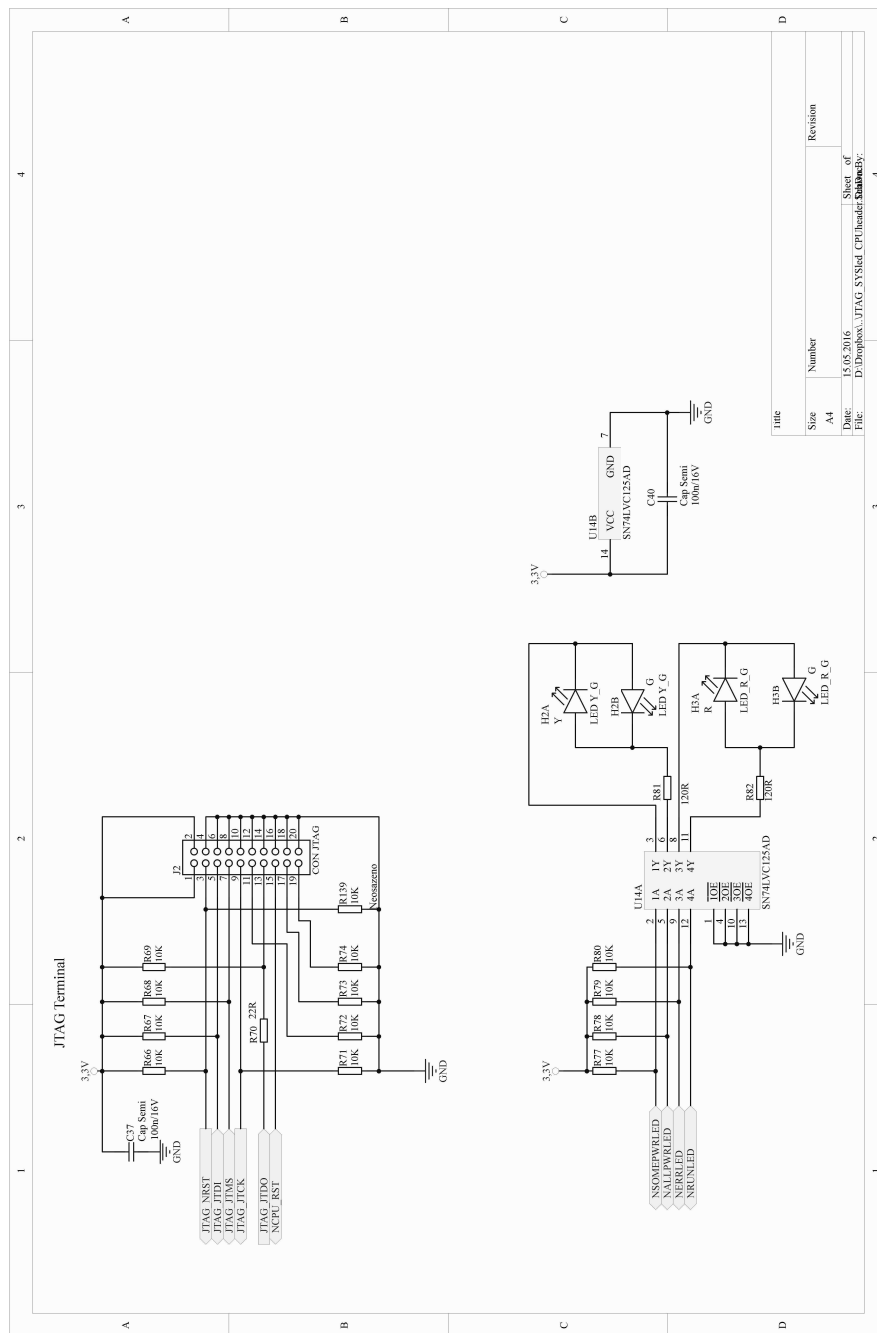
Obr. B.4: Schéma zapojení napájení pro 3,3V a 1,2V

B.4 Schéma USB



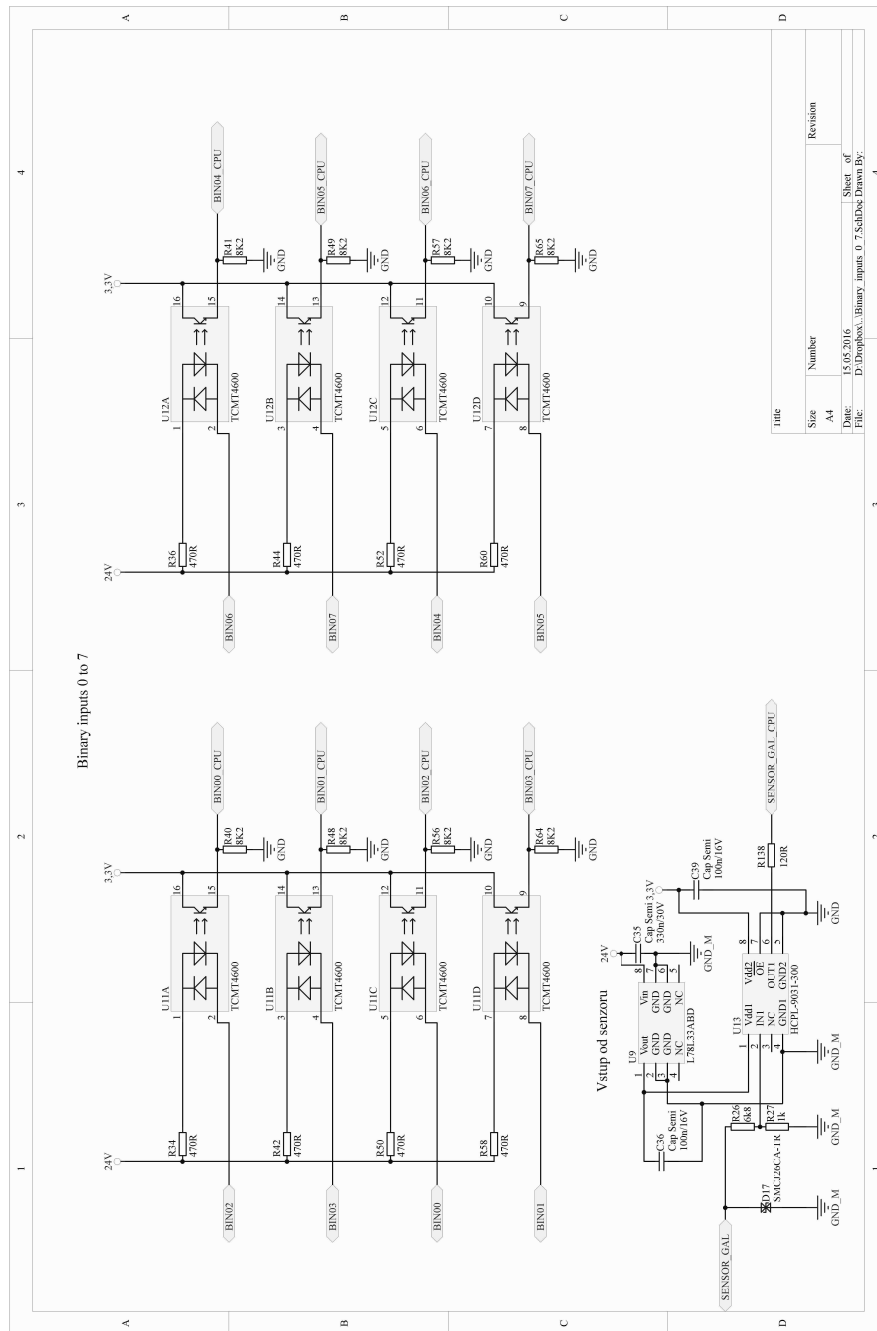
Obr. B.5: Schéma zapojení USB

B.5 Schéma JTAG a systémových diod



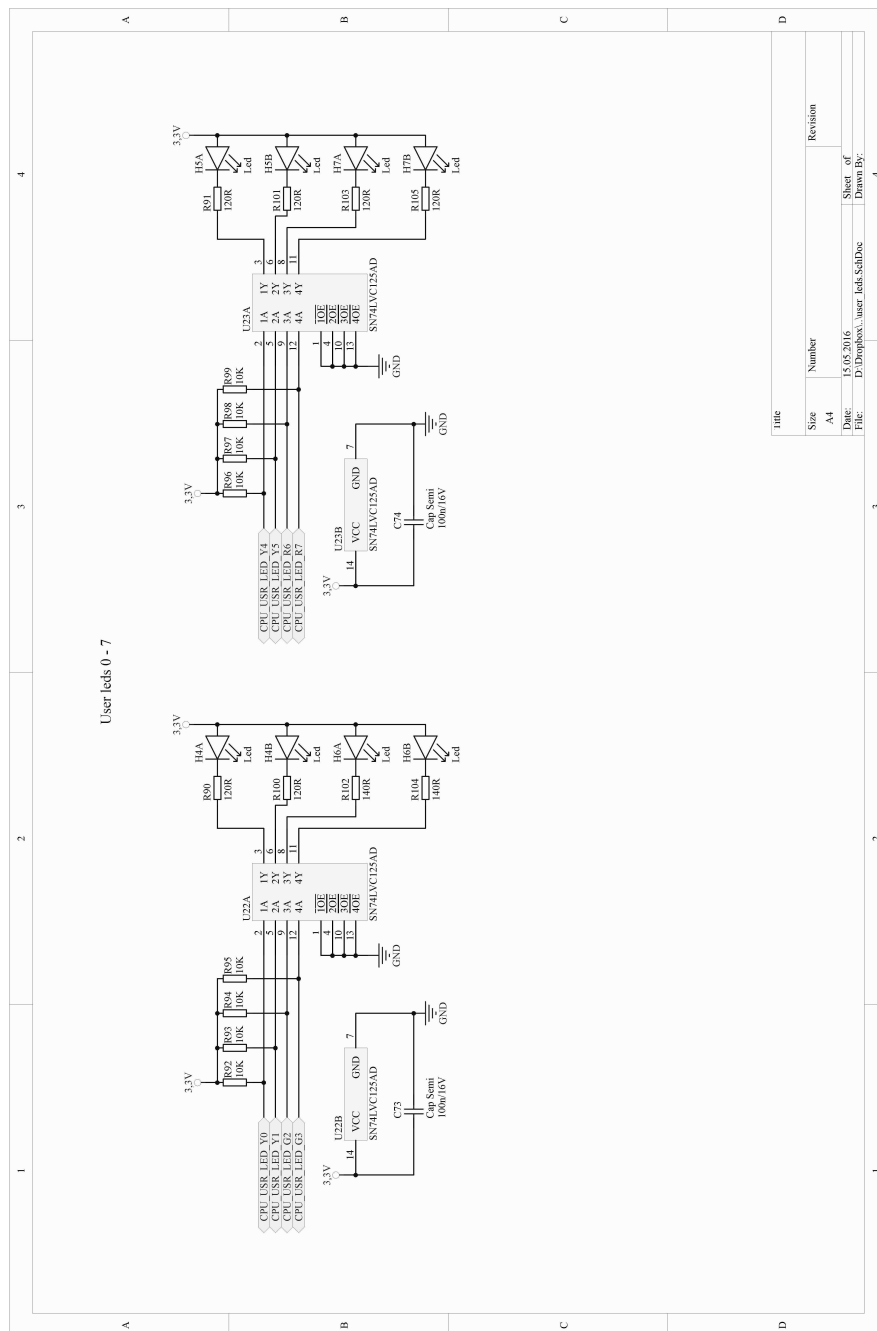
Obr. B.6: Schéma rozhraní JTAG

B.6 Schéma binárních vstupů



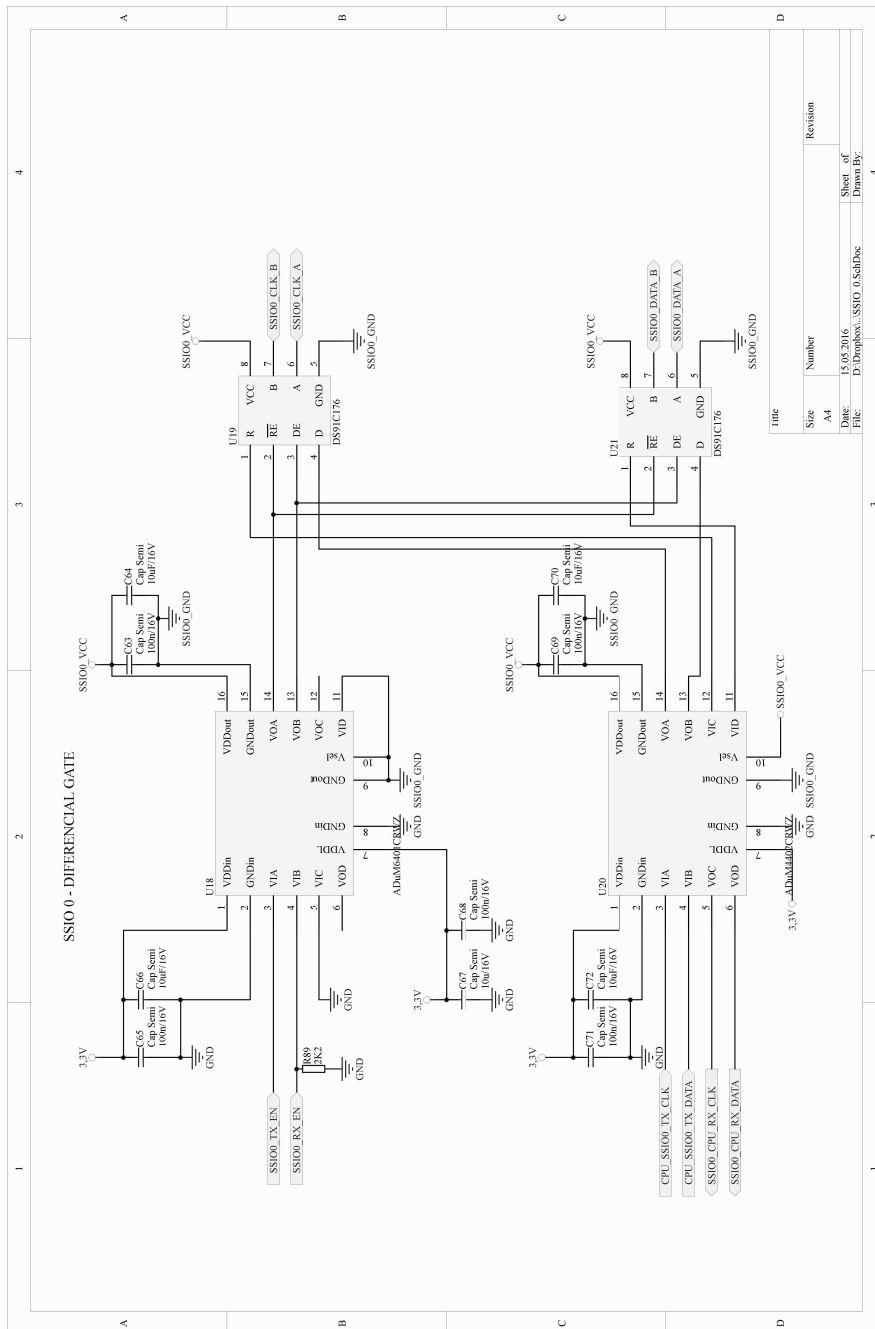
Obr. B.7: Schéma zapojení binárních vstupů

B.7 Schéma zapojení uživatelských LED



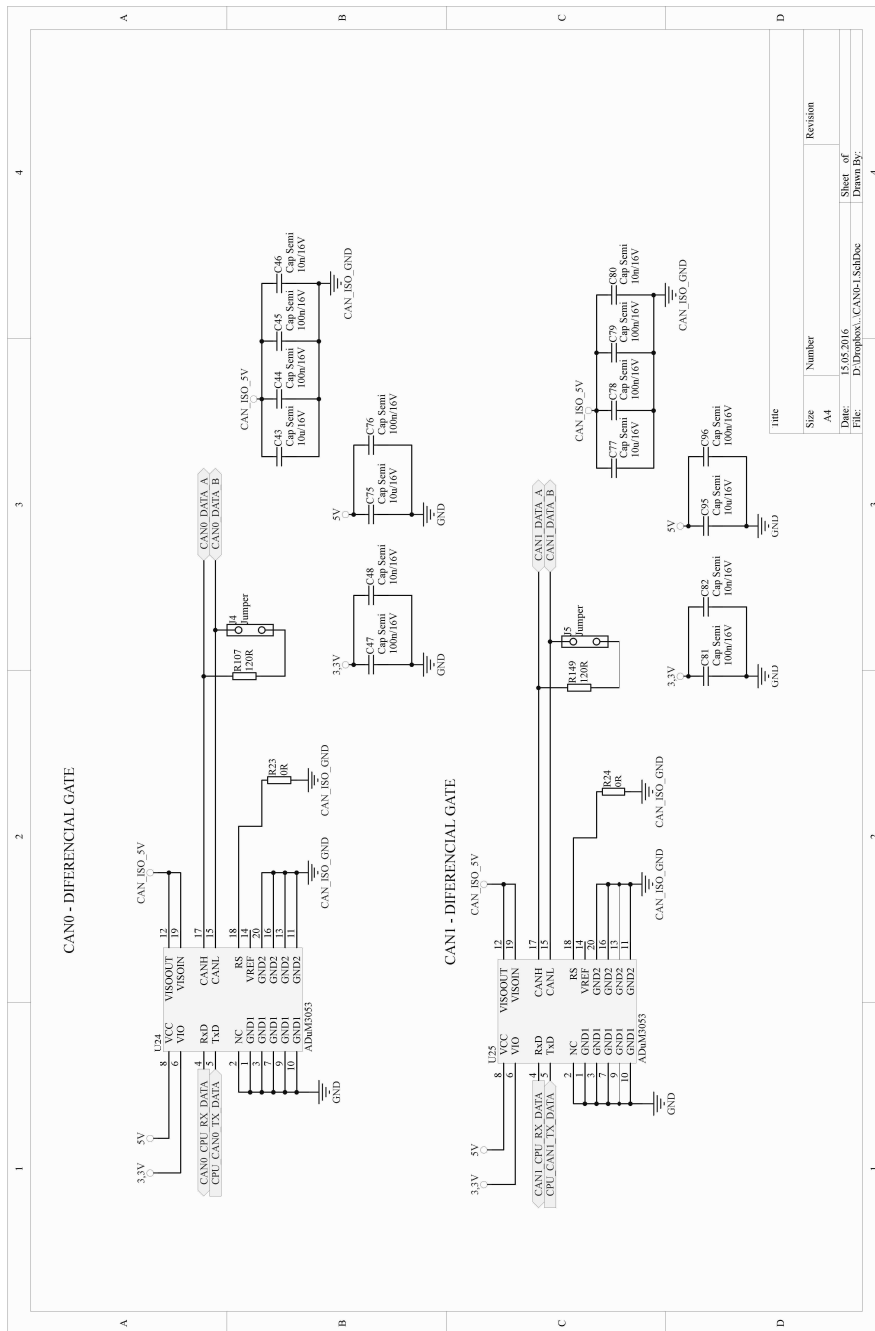
Obr. B.8: Schéma zapojení LED

B.8 Schéma rozhraní SSIO



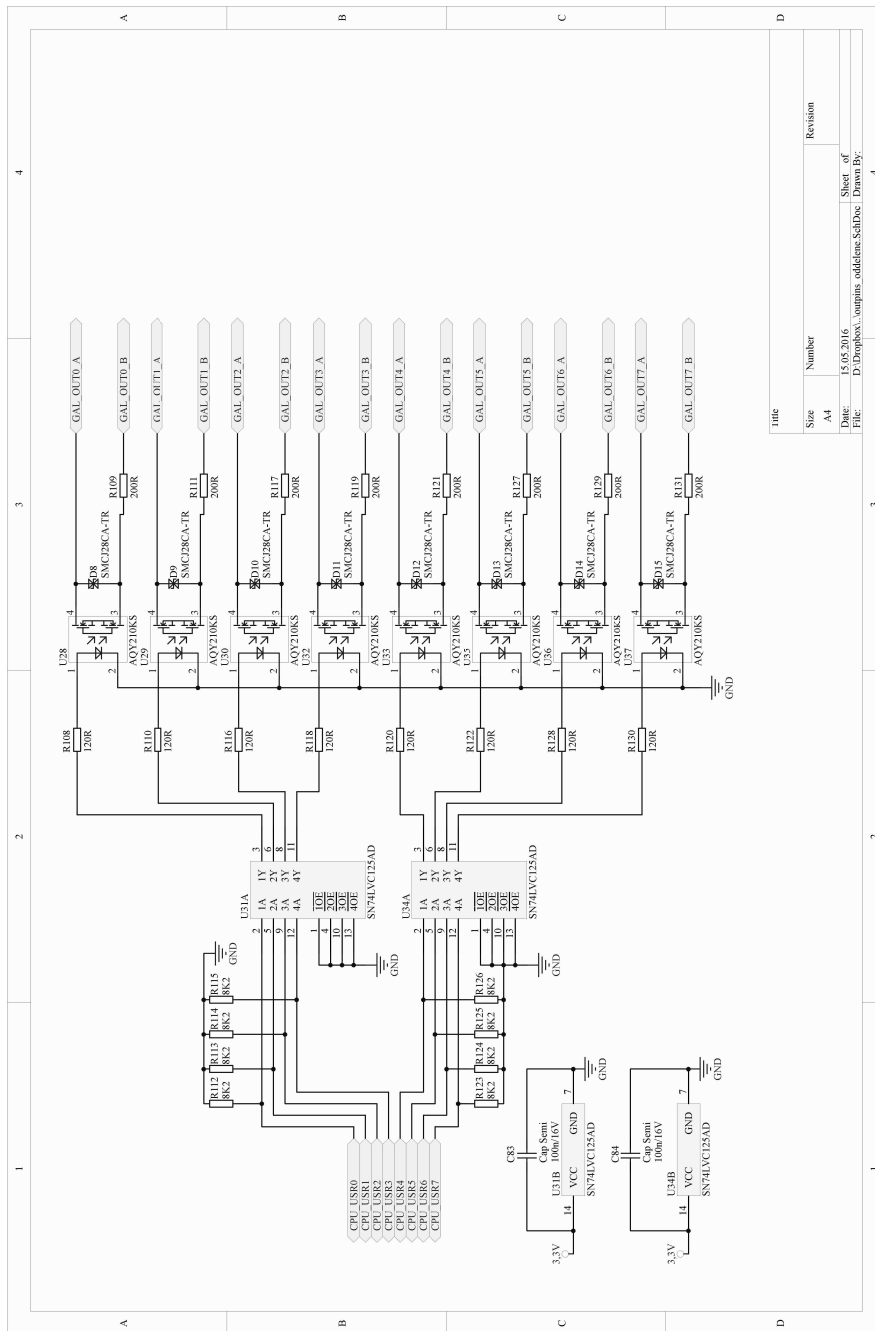
Obr. B.9: Schéma zapojení rozhraní SSIO

B.9 Schéma rozhraní CAN



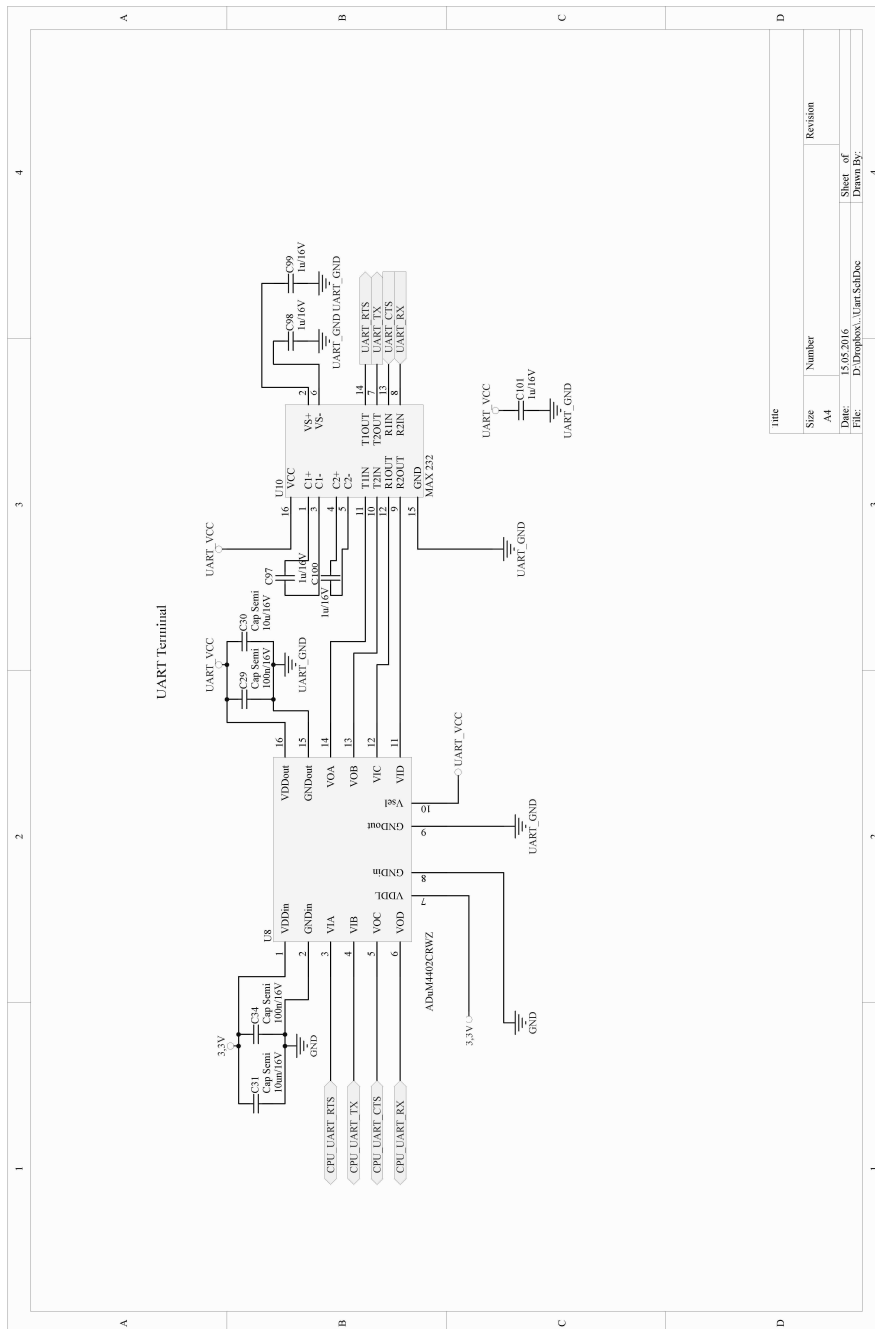
Obr. B.10: Schéma zapojení rozhraní CAN

B.10 Schéma rozhraní binárních výstupů



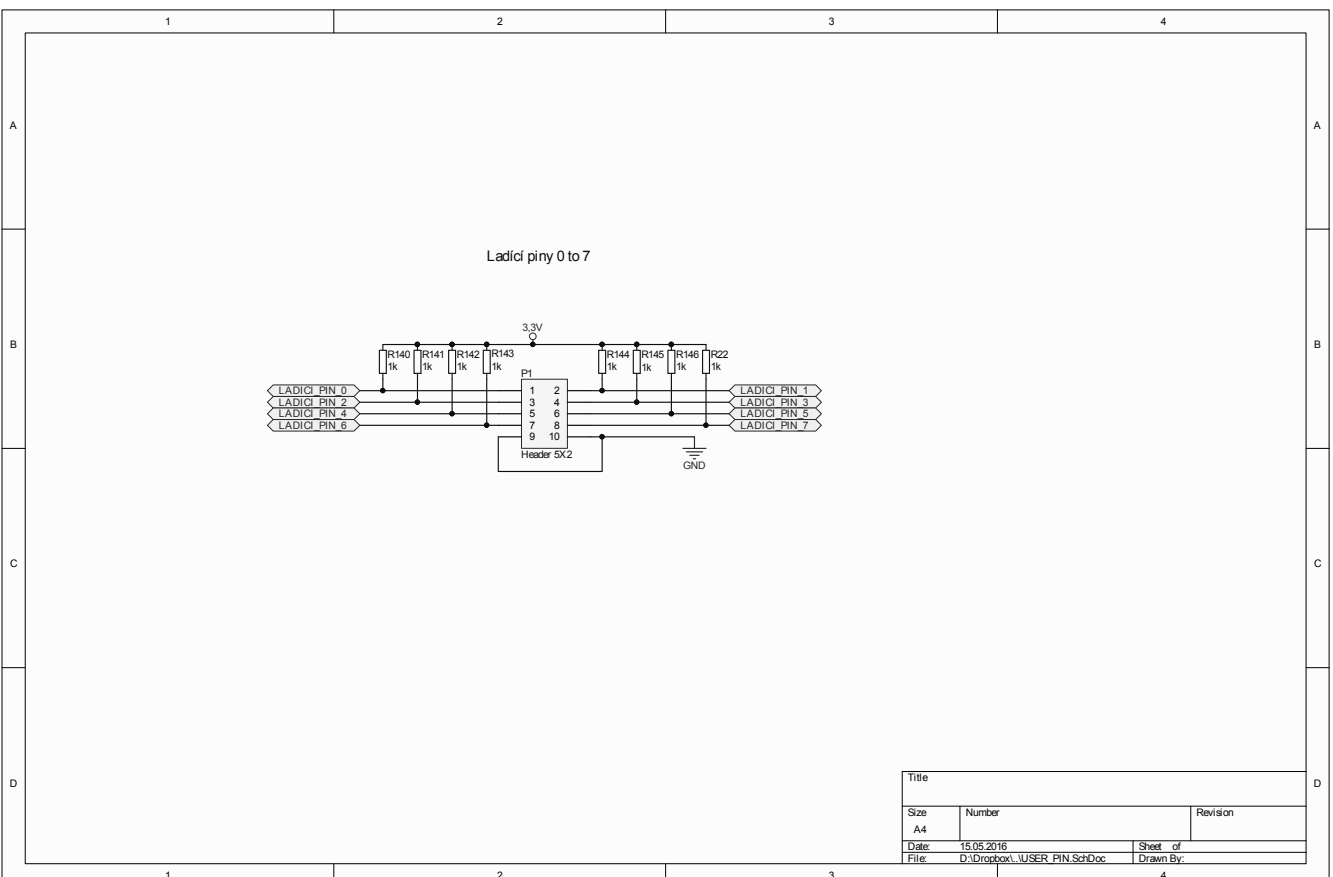
Obr. B.11: Schéma zapojení binárních výstupů

B.11 Schéma rozhraní RS-232



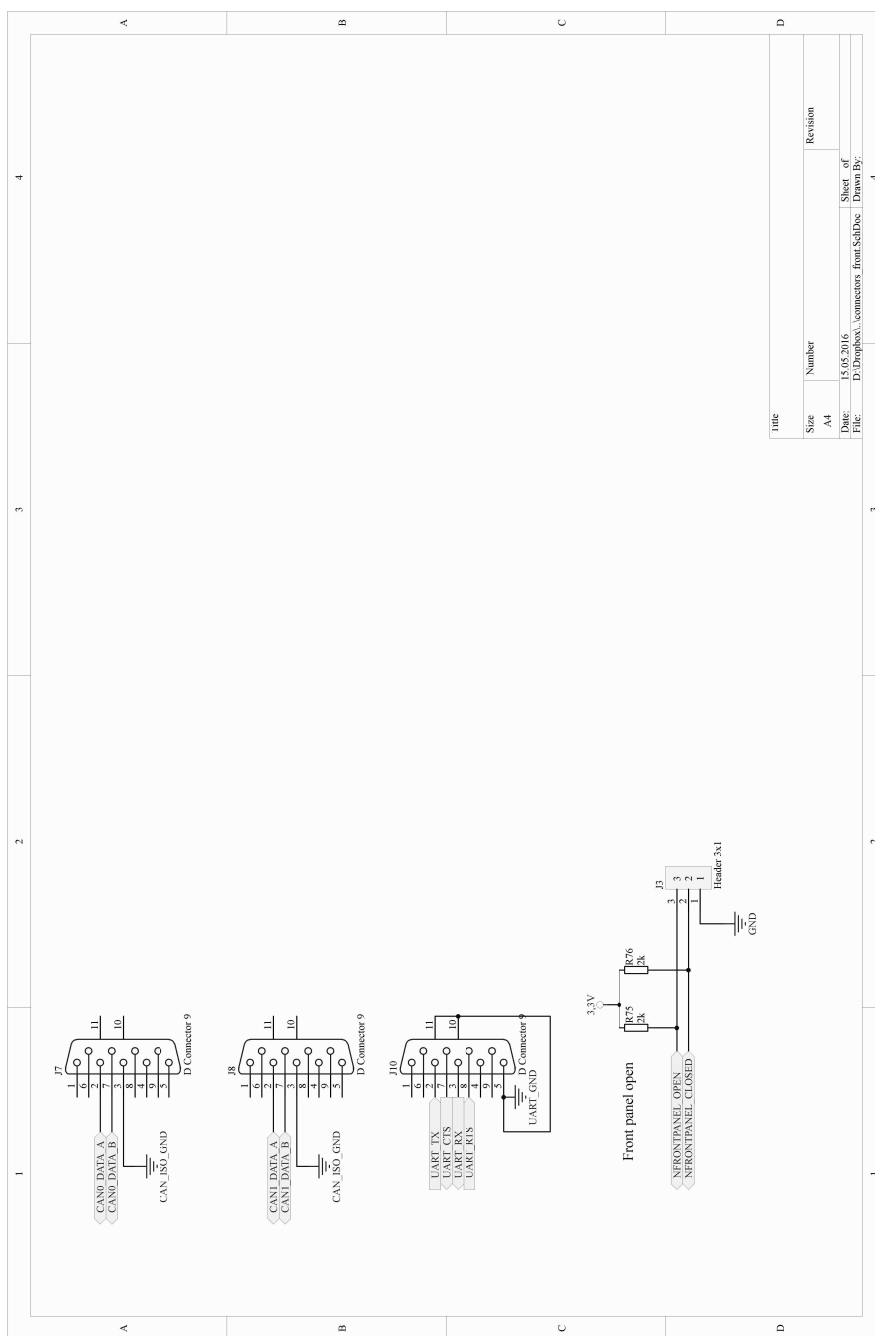
Obr. B.12: Schéma zapojení rozhraní RS-232

B.12 Schéma zapojení uživatelských pinů

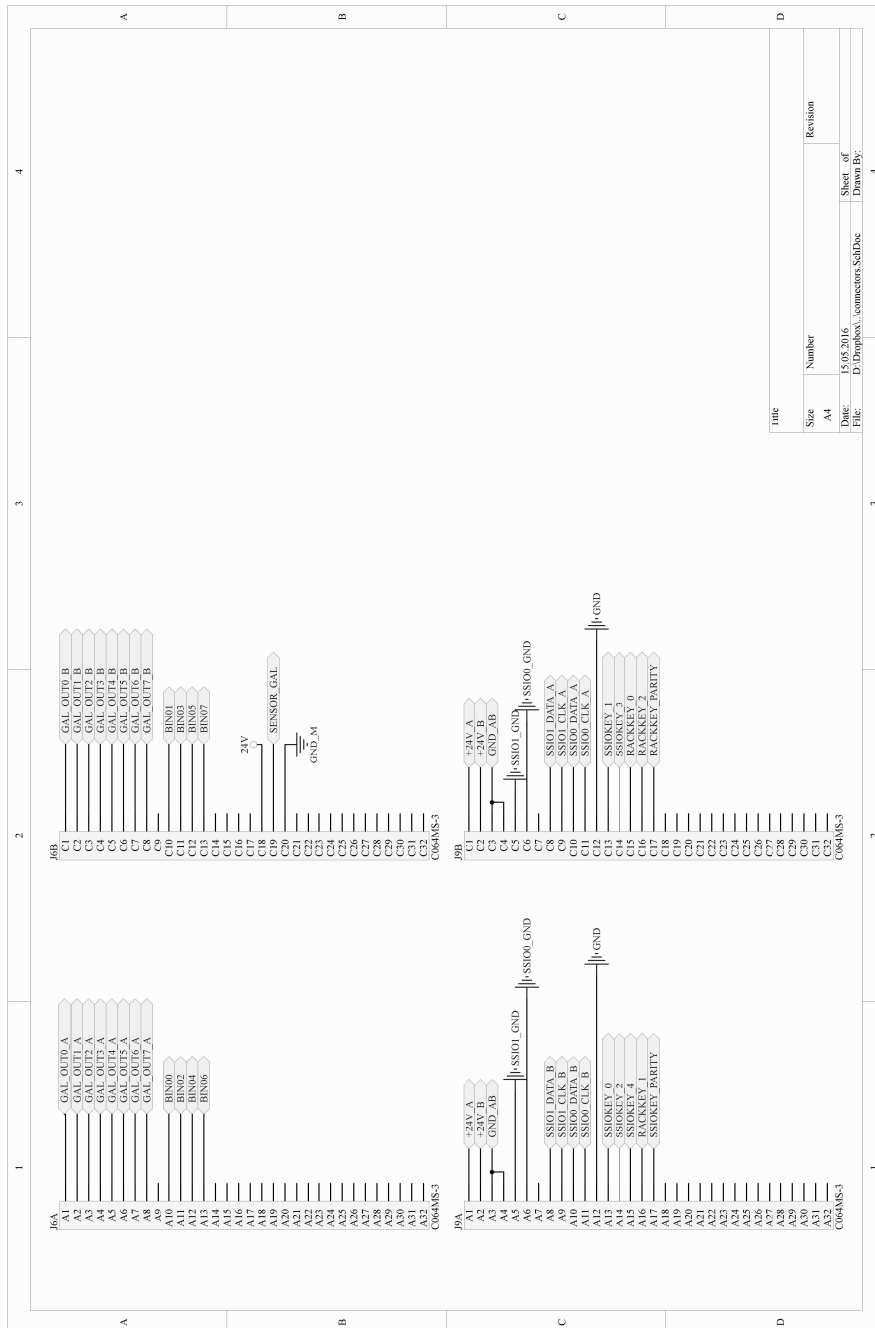


Obr. B.13: Schéma zapojení uživatelských pinů

B.13 Schémata zapojení konektorů



Obr. B.14: Schéma zapojení předních konektorů



Obr. B.15: Schéma zapojení zadních konektorů

Pin	Název	Pin	Název
A1	GAL_OUT0_A	C1	GAL_OUT0_B
A2	GAL_OUT1_A	C2	GAL_OUT1_B
A3	GAL_OUT2_A	C3	GAL_OUT2_B
A4	GAL_OUT3_A	C4	GAL_OUT3_B
A5	GAL_OUT4_A	C5	GAL_OUT4_B
A6	GAL_OUT5_A	C6	GAL_OUT5_B
A7	GAL_OUT6_A	C7	GAL_OUT6_B
A8	GAL_OUT7_A	C8	GAL_OUT7_B
A10	BIN00	C10	BIN01
A11	BIN02	C11	BIN03
A12	BIN04	C12	BIN05
A13	BIN06	C13	BIN07
		C18	24V
		C19	SENSOR_GALL
		C20	GND_M

Tab. B.1: Zapojení zadního horního konektoru

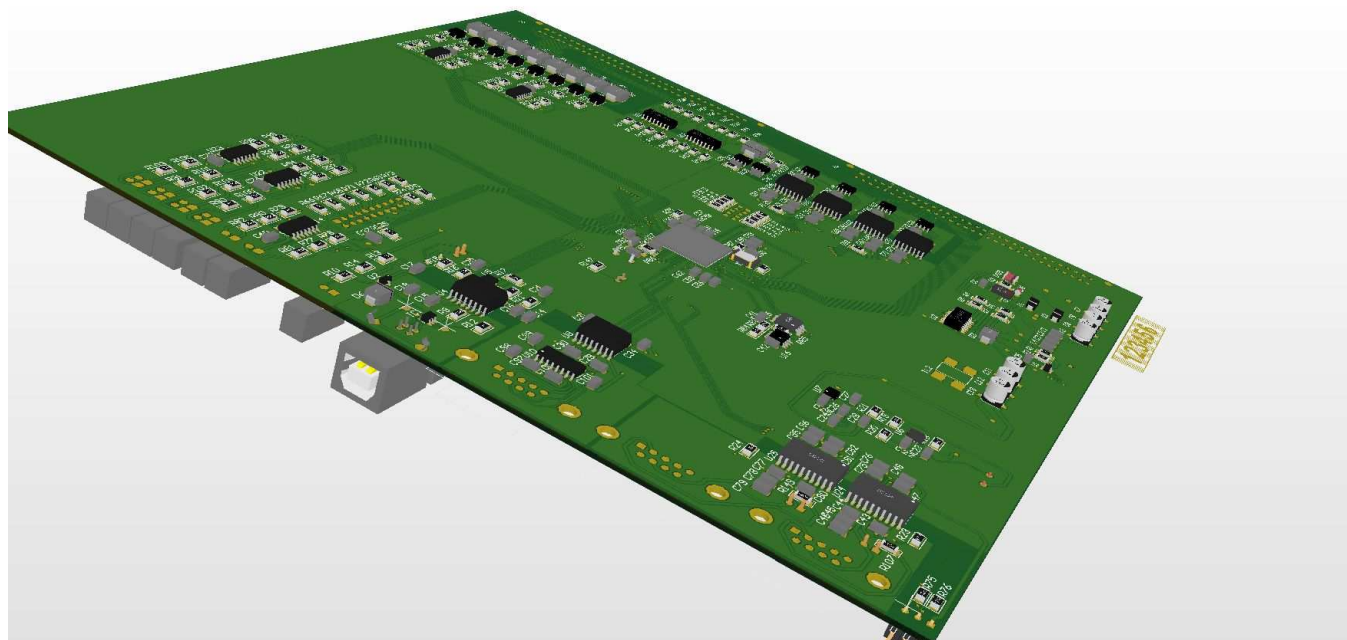
A1	+24V_A	C1	+24V_A
A2	+24V_B	C2	+24V_B
A3	GND_AB	C3	GND_AB
A5	SSIO1_GND	C5	SSIO1_GND
A6	SSIO0_GND	C6	SSIO0_GND
A8	SSIO1_DATA_B	C8	SSIO1_DATA_A
A9	SSIO1_CLK_B	C9	SSIO1_CLK_A
A10	SSIO0_DATA_B	C10	SSIO0_DATA_A
A11	SSIO0_CLK_B	C11	SSIO0_CLK_A
A12	GND	C12	GND
A13	SSIOKEY_0	C13	SSIOKEY_1
A14	SSIOKEY_2	C14	SSIOKEY_3
A15	SSIOKEY_4	C15	RACKKEY_0
A16	RACKKEY_1	C16	RACKKEY_2
A17	SSIOKEY_PARITY	C17	RACKKEY_PARITY

Tab. B.2: Zapojení zadního spodního konektoru

Příloha C

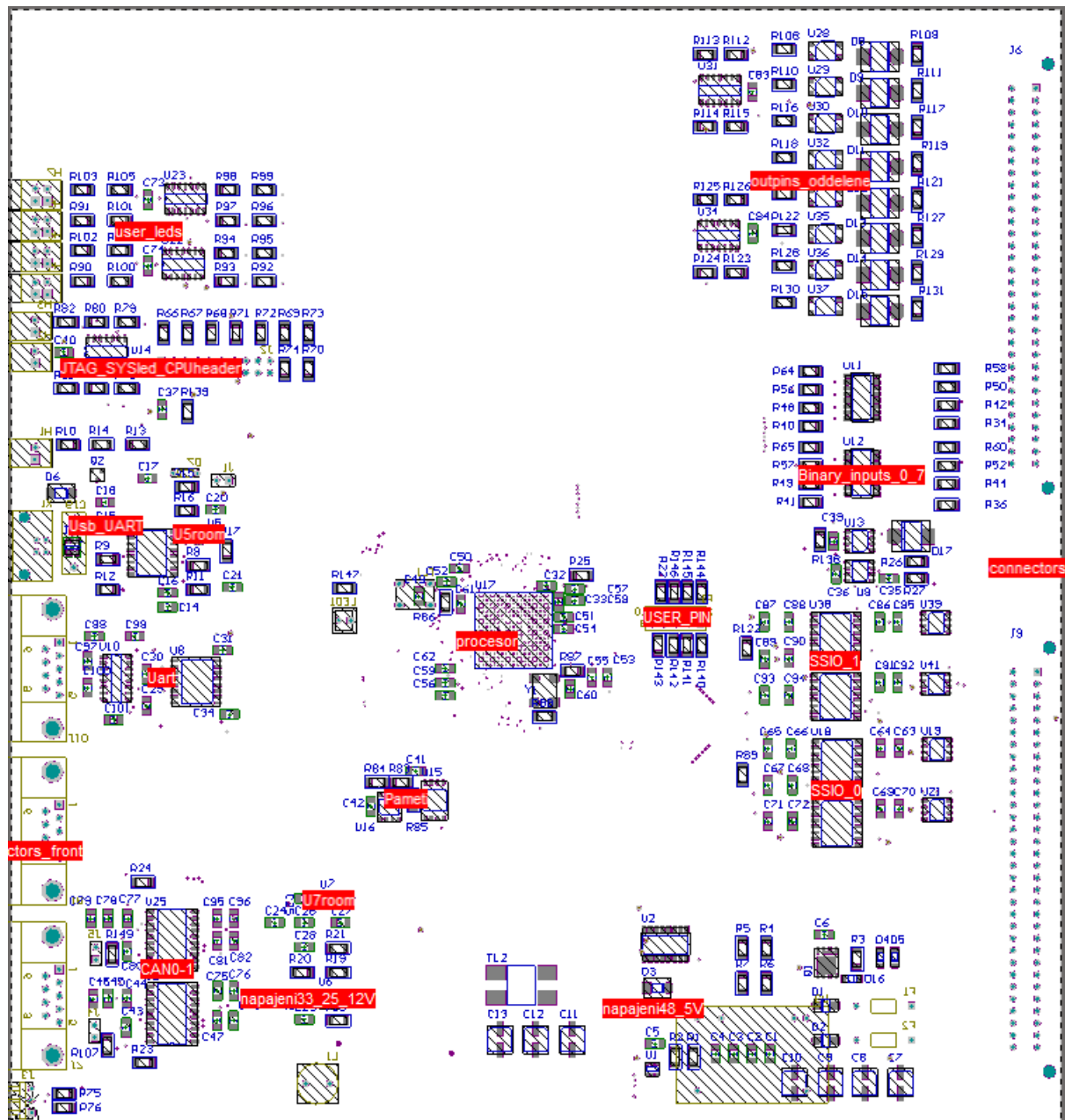
Deska plošných spojů

C.1 3D pohled na DPS



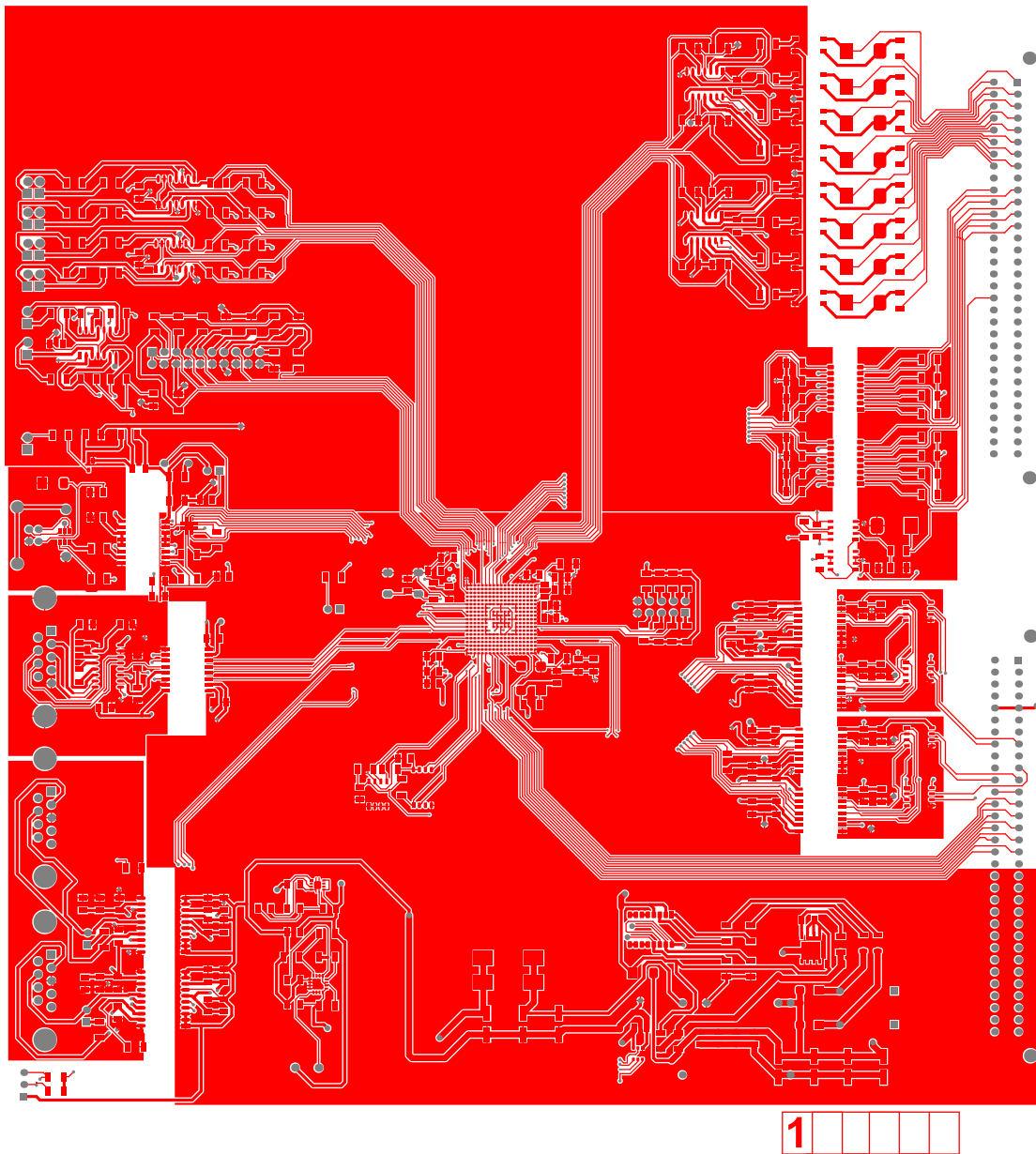
Obr. C.1: 3D náhled na model osazené dps

C.2 Rozložení součástek na DPS

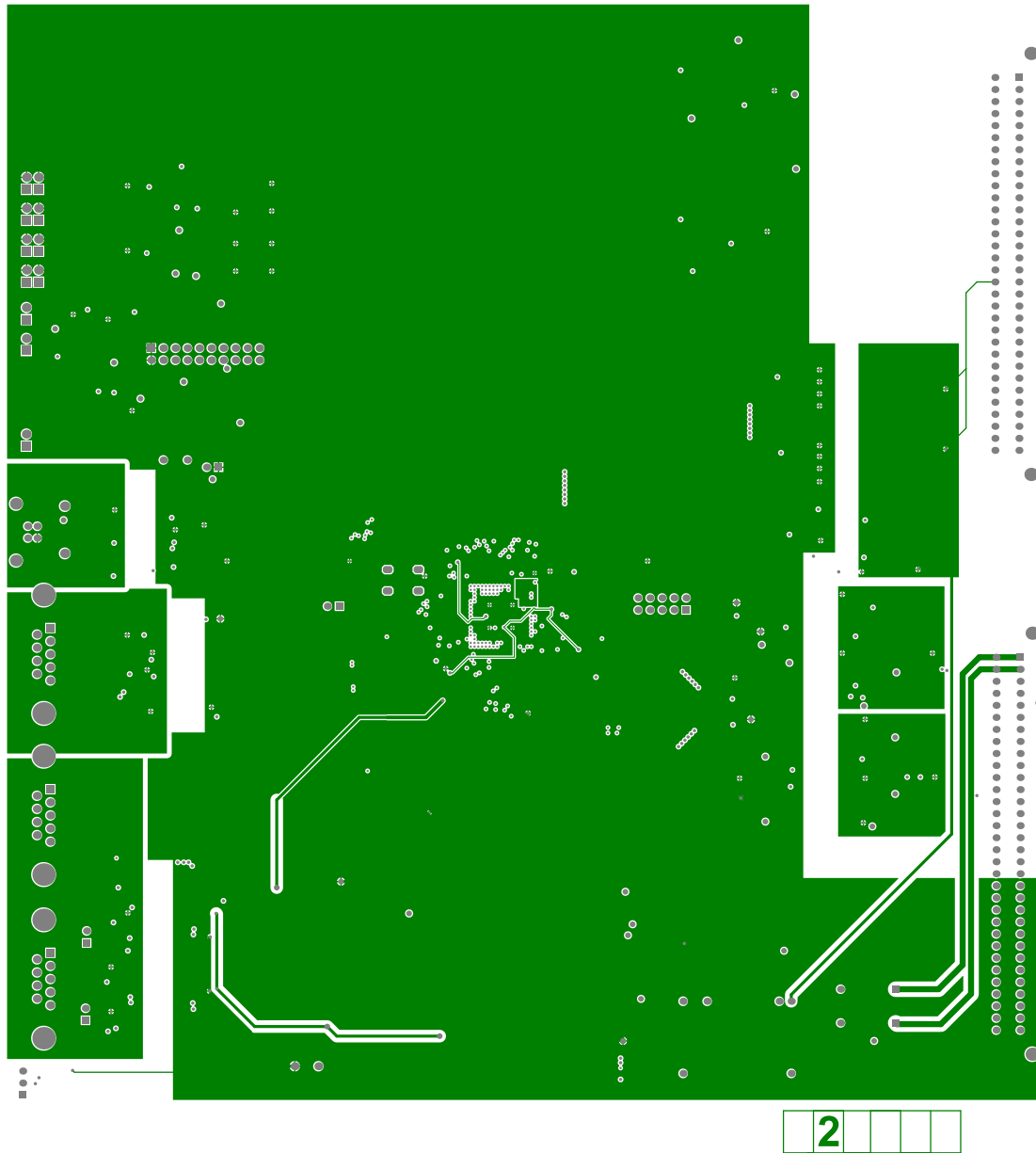


Obr. C.2: Rozložení součástek na DPS a jednotlivé místnosti

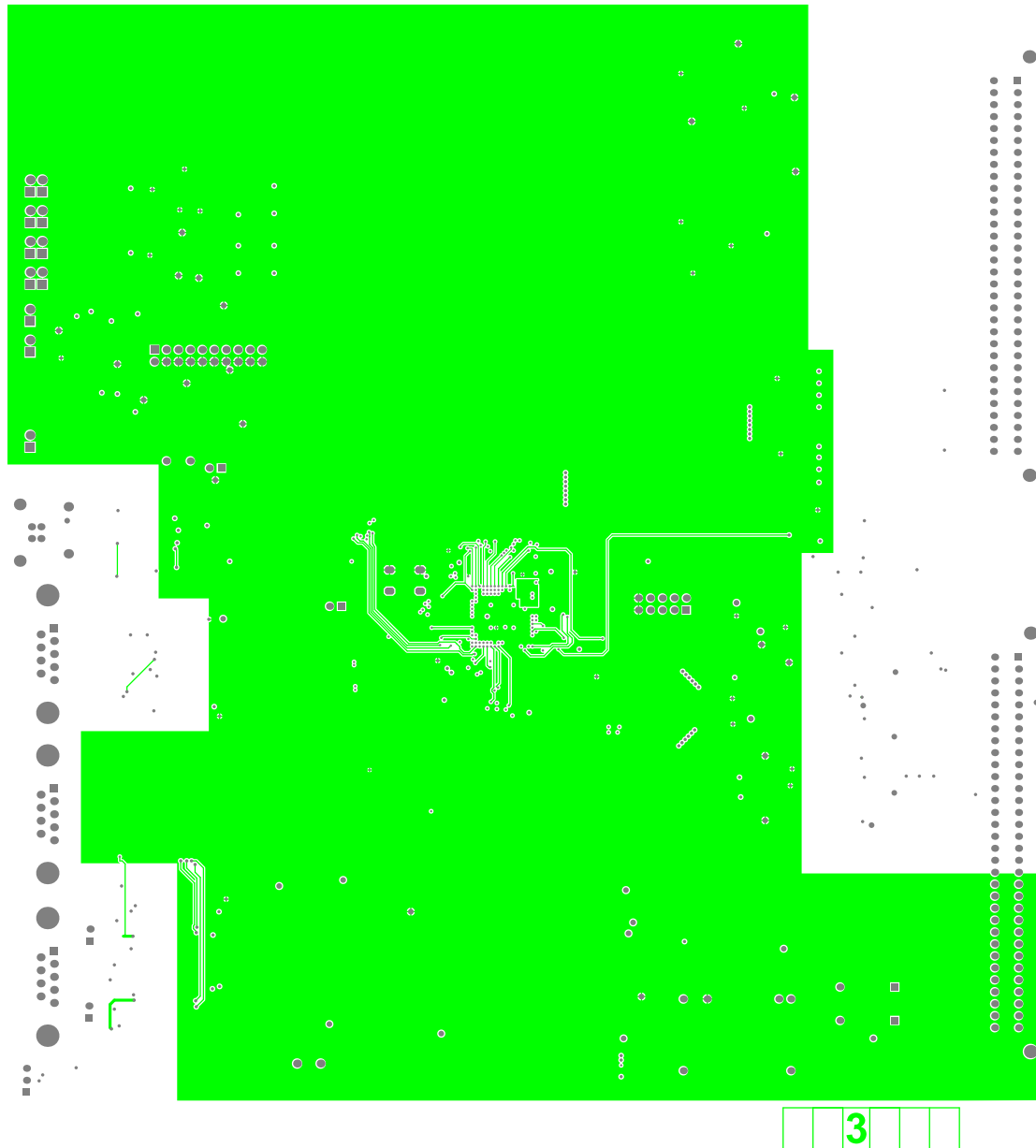
C.3 Jednotlivé vrstvy DPS



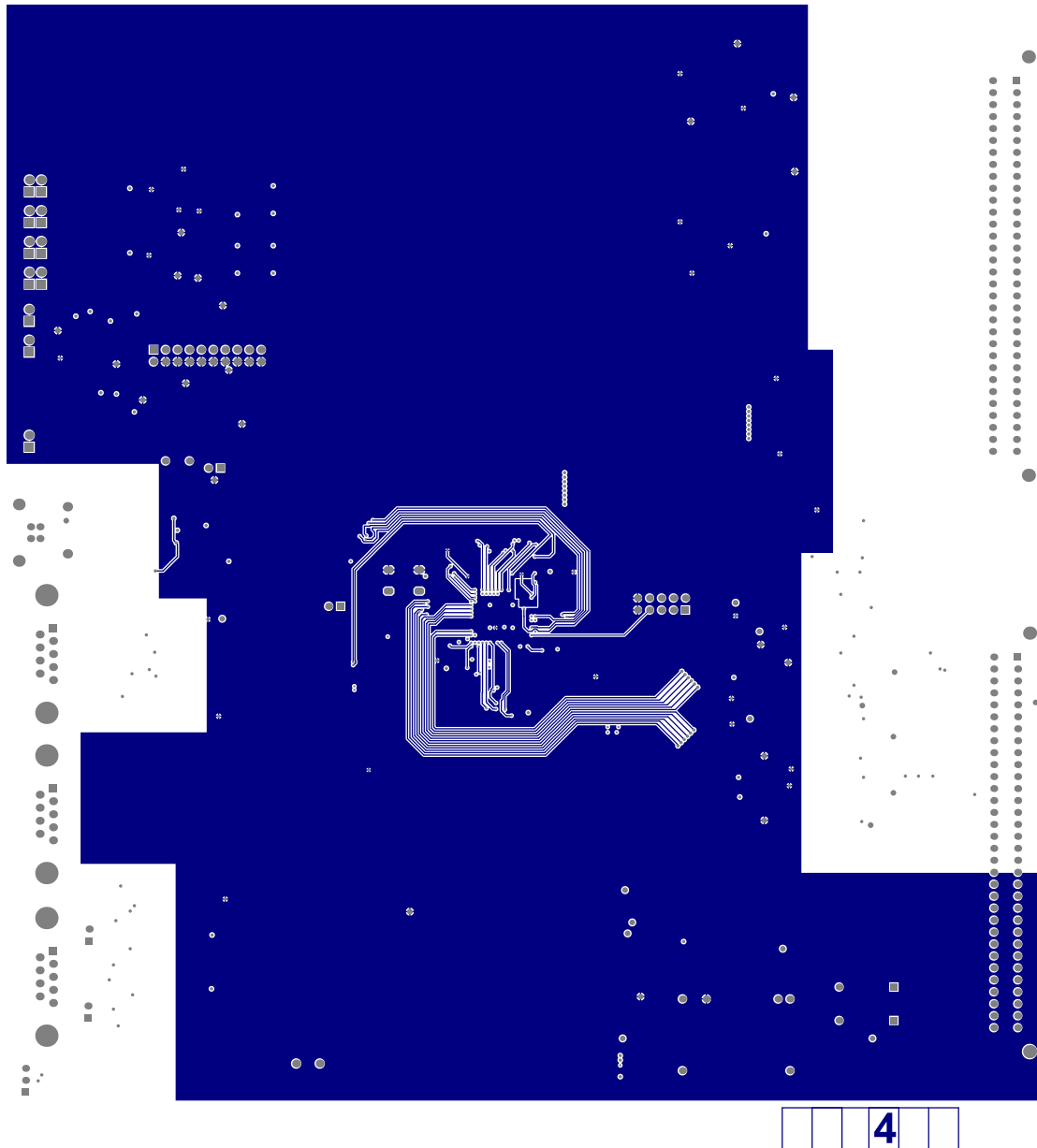
Obr. C.3: 1. vrstva DPS



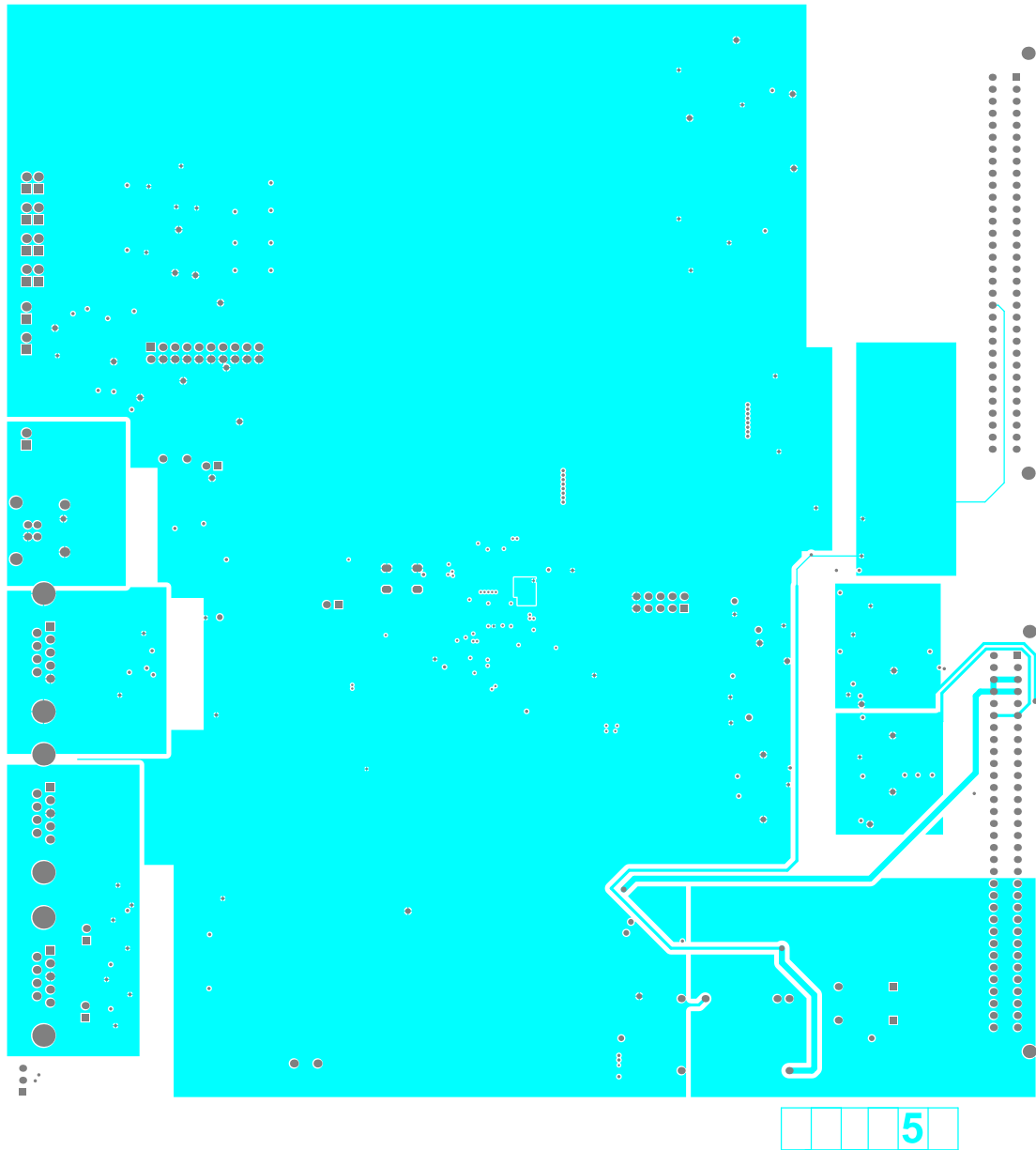
Obr. C.4: 2. vrstva DPS



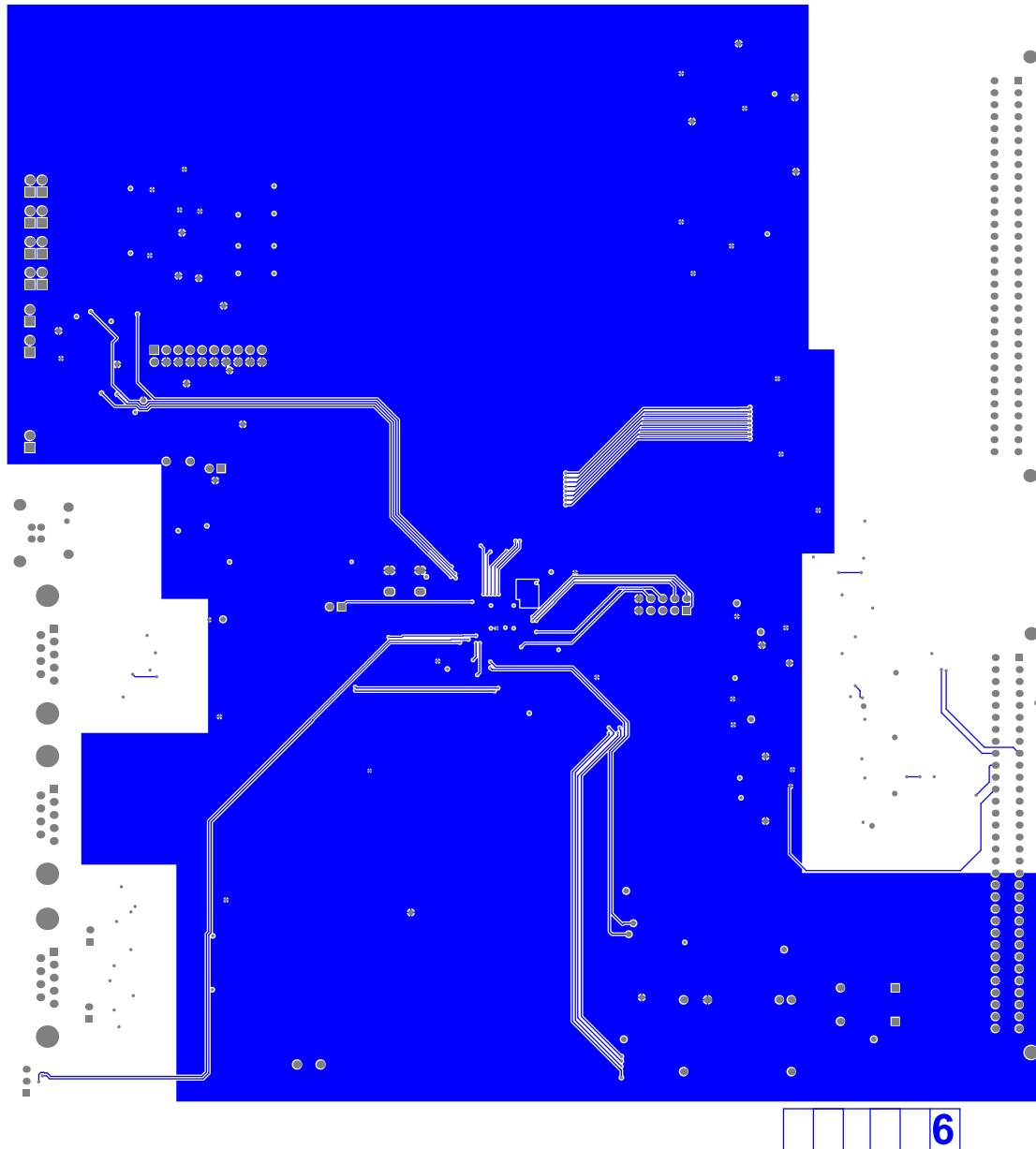
Obr. C.5: 3. vrstva DPS



Obr. C.6: 4. vrstva DPS



Obr. C.7: 5. vrstva DPS



Obr. C.8: 6. vrstva DPS