



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PRŮMYSLOVÝ DATA KONCENTRÁTOR

INDUSTRIAL DATA LOGGER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Matula

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Beneš

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Ondřej Matula

ID: 211161

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Průmyslový data koncentrátor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit průmyslové zařízení umožňující snímání dat na strojích a motorech v průmyslu.

1. Seznamte se s komerčními řešeními a porovnejte jejich výhody a nevýhody.
2. Definujte veličiny, které je vhodné měřit. Vyberte vhodné snímače, porovnejte parametry a vhodnost do průmyslové aplikace.
3. Navrhněte DPS pro měření vybraných fyzikálních veličin.
4. Vytvořte HW a SW pro Vámi navrženou DPS.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a zdokumentujte řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

White, E., c2012. Making embedded systems, Sebastopol: O'Reilly.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 17.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Beneš

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Předložená práce se zabývá návrhem ON-LINE diagnostického systému pojmenovaným jako „průmyslový data koncentrátor“. Práce se na samotný návrh kouká komplexně a sdružuje části jako jsou definování užitečných diagnostických veličin, porovnáním konkurenceschopnosti s již dostupnými komerčními produkty a samotným návrhem průmyslového data koncentrátoru jak po stránce hardwarové, tak po stránce softwarové.

KLÍČOVÁ SLOVA

Průmyslový data koncentrátor, ON-LINE diagnostický systém, monitorování technického stavu, ESP32-S3

ABSTRACT

This thesis deals with the design of an ON-LINE diagnostic system named as "industrial data concentrator". The thesis looks at the design itself in a comprehensive way and brings together parts such as defining useful diagnostic variables, a competitive comparison with already available commercial products and the actual design of the industrial data concentrator both in terms of hardware and software.

KEYWORDS

Industrial data logger, ON-LINE diagnostic system, technical condition monitoring, ESP32-S3

MATULA, Ondřej. *Průmyslový data koncentrátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2023, 113 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Beneš

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Ondřej Matula
VUT ID autora: 211161
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Průmyslový data koncentrátor

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno 17. května 2023
.....

.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Tomášovi Benešovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	13
1 Cíle práce	14
2 Koncepce	15
2.1 Základní koncepce	15
2.2 Funkční požadavky	15
3 Komerční řešení	17
3.1 Produkty	17
3.1.1 IFM	17
3.1.2 FLIR SV87-kit	18
3.1.3 Siemens Simotics connect 400	19
3.1.4 Bently Nevada 2300 series	19
3.2 Finální shrnutí	20
4 Selektce veličin a prostředků	23
4.1 Měření momentu	23
4.1.1 Magnetický kompas HMC5883L	24
4.1.2 Hallův snímač SS49E	24
4.2 Měření proudu	26
4.3 Měření vibrací	28
4.3.1 MPU6050	29
4.4 Měření teploty	30
5 Obvodové řešení	32
5.1 Požadavky	32
5.2 Blokové schéma	32
5.3 Mikrokontrolér	34
5.3.1 Výběr	34
5.3.2 Konfigurace	36
5.3.3 Programování	36
5.3.4 IO expander	38
5.3.5 Ovládání	39
5.3.6 USB 2.0	39
5.4 Komunikační rozhraní	41
5.4.1 RS-485	41
5.4.2 Ethernet	43

5.5	Interní snímač teploty a vlhkosti	45
5.6	Digitální vstupy a výstupy	46
5.6.1	Digitální vstupy	47
5.6.2	Digitální výstupy	47
5.6.3	Výkonové výstupy	48
5.7	Analogové vstupy	48
5.8	Měření proudu	50
5.9	Měření teploty	52
5.9.1	Princip	53
5.10	Měření vibrací	54
5.10.1	Princip	55
5.10.2	Zapojení	56
5.11	Napájení	58
5.11.1	Blokové uspořádání	58
6	DPS/mechanická konstrukce	59
6.1	Deska plošného spoje	59
6.1.1	Umístění obvodových prvků	60
6.1.2	Osazení	60
6.1.3	Země	60
6.2	Mechanická konstrukce	61
7	Programové vybavení	64
7.1	Vývojové prostředí	64
7.2	Bootloader	64
7.3	Ladění	64
7.4	Knihovny pro periferie	66
7.4.1	Konfigurace periférií MCU	66
7.5	Postup konfigurace	67
	Literatura	71
	Seznam symbolů a zkratk	75
	Seznam příloh	78
A	Náčrty přípravků pro 3D tisk	80
A.1	Přípravek na nevyváženost	81
A.2	Držák magnetu na rotoru motoru	82
A.3	Základna pro snímač otáček	83
A.4	Držák pro snímač otáček	84

B	Náčrty plechové krabičky skládané konstrukce	85
B.1	Skládaná krabička z plechu - vrchní díl	86
B.2	Skládaná krabička z plechu - spodní díl	87
C	Schémata zapojení	88
C.1	Přehledové schéma včetně MCU	89
C.2	Rozhraní pro CT	90
C.3	Napájení	91
C.4	Rozhraní USB 2.0	92
C.5	HW konfigurace MCU	93
C.6	Rozhraní RS-485	94
C.7	Rozhraní RTD	95
C.8	Rozhraní analogových vstupů	96
C.9	Rozhraní Ethernet	97
C.10	IEPE kompletní schéma	98
C.11	Mikrokontrolér	99
C.12	Rozhraní DIO	100
C.13	IEPE 1	101
C.14	IEPE 2	102
C.15	IEPE 3	103
C.16	Výkonové výstupy	104
C.17	Interní snímač teploty a vlhkosti	105
C.18	IO expander	106
C.19	Rozhraní UART 5V	107
C.20	Tlačítka a LED	108
C.21	IEPE 4	109
C.22	Digitální napájení	110
C.23	Analogové napájení	111
D	Obsah příloženého CD	112
D.1	Projekt KiCad	112
D.2	Schéma ve formátu pdf	112
D.3	Výrobní podklady	112
D.4	Náčrty	112
D.5	Firmware	112
D.6	Adresářová struktura	112

Seznam obrázků

2.1	Koncepce Průmyslového data koncentrátoru	16
3.1	IFM-VSE003 a IFM-VSE152	18
3.2	FLIR SV87-kit	19
3.3	Siemens Simotics connect 400	20
3.4	Bently Nevada 2300/25	21
4.1	ESP-WROVER-KIT v4.1	23
4.2	Držák pro Hallův snímač na motoru	25
4.3	Měření otáček rotoru motoru pomocí Hallova snímače	26
4.4	Testovací obvod pro měření proudu do motoru (jedna fáze)	27
4.5	Měření proudu s transformátorem CT08CL10	27
4.6	Osazený přípravek na nevyváženost motoru	28
4.7	Měření vibrací pomocí snímače MPU6050 při nevyváženosti	29
4.8	Měření vibrací při startu motoru bez zátěže	30
5.1	Blokový diagram průmyslového data koncentrátoru	33
5.2	Blokové schéma MCU ESP32-S3-WROOM-1U-N16R2	35
5.3	Schéma zapojení konfigurace části MCU	37
5.4	Vývodové zapojení konektorů UART Prog (nalevo) a JTAG (napravo)	37
5.5	Schéma zapojení IO Expanderu	39
5.6	Schéma zapojení USB 2.0	40
5.7	Blokový diagram RS-485 transceiveru ADM2486	42
5.8	Schéma zapojení rozhraní RS-485	43
5.9	Blokový diagram obvodu W5500	44
5.10	Zapojení RJ45 konektoru ARJM11C7-009[21]	46
5.11	Schéma zapojení digitálních vstupů	47
5.12	Schéma zapojení digitálních výstupů	48
5.13	Schéma zapojení výkonových výstupů	49
5.14	Schéma zapojení analogových vstupů	49
5.15	LAFCH navrženého anti-aliasing filtru	50
5.16	Schéma zapojení pro proudový transformátor	51
5.17	Schéma zapojení RTD rozhraní	54
5.18	Externí převodník IEPE100	55
5.19	Principiální schéma zapojení IEPE	55
5.20	Grafické zobrazení signálu IEPE	56
5.21	Blokové zapojení IEPE rozhraní dle TIDA-01471	57
5.22	Blokové uspořádání napájecích obvodů	58
6.1	3D vizualizace DPS (vrchní pohled)	59
6.2	Osazená DPS (vrchní pohled)	61

6.3	Osazená DPS (spodní pohled)	62
6.4	Vizualizace skládaného plechového krytu	63
7.1	Vizuální podoba konfiguračního nástroje menuconfig (ESP-IDF)	65
7.2	Blokové schéma ladícího řetězce pro MCU ESP32	65
7.3	Vývojový diagram webové konfigurace	68

Seznam tabulek

3.1	Porovnání parametrů komerčních řešení	22
5.1	Volitelné útlumy integrovaného ADC (viz programová příručka [26])	51
7.1	Vyvedení pinů externích periférií	66

Úvod

Předložená práce se zabývá návrhem ON-LINE diagnostického systému pojmenovaného jako „průmyslový data koncentrátor“ (dále jen koncentrátor). ON-LINE diagnostickým systémem je myšlen soubor zařízení (koncentrátor, snímače atd.), které jsou napevno instalovány a v reálném čase vyhodnocují technický stav zájmového zařízení (elektrické točivé stroje, převodovky)[1].

V případě navrhovaného koncentrátoru se konkrétně jedná o detekci a lokalizaci poruchy na zájmovém zařízení. Toho je dosaženo pomocí lokálního zpracování užitečných dat a jejich předání databázovému serveru, který má za úkol jednotlivé technické stavy zájmových zařízení monitorovat a provádět nad nimi další analýzu.

Práce se na samotný návrh kouká komplexně a sdružuje tedy části jako jsou definování užitečných diagnostických veličin, porovnáním konkurenceschopnosti s již dostupnými komerčními produkty a samotným návrhem koncentrátoru, jak po stránce hardwarové, tak po stránce softwarové.

Jednotlivé části práce jsou logicky seřazeny tak, aby odpovídaly postupu jakým je koncentrátor navržen. První část práce se tedy zaměřuje na definování cílů práce a stanovením vhodného postupu jakým je vhodné vypracovávat (kapitola 1). Druhou částí práce je zdefinování obecné koncepce zařízení (kapitola 2). Ve třetí části (kapitola 3) jsou porovnána podobná komerční řešení podle parametrů definovaných v kapitole 2. V navazující kapitole jsou blíže specifikovány a vybrány veličiny a senzory s jakými koncentrátor operuje (kapitola 4). Samotný fyzický návrh zařízení začíná od kapitoly 5 návrhem obvodové části koncentrátoru, pokračuje návrhem desky plošných spojů (kapitola 6.1) a končí návrhem mechanické konstrukce popsané v kapitole 6.2. Návrh programového vybavení, zejména firmwaru, je poté obsažen v kapitole 7. Dosažené výsledky jsou shrnuty v závěru přiložené práce.

1 Cíle práce

Cílem práce bylo navrhnout víceúčelové zařízení, určené pro monitorování technického stavu¹ vybraných zájmových objektů (motory a stroje primárně rotačního charakteru) v průmyslových aplikacích. Zařízení by mělo být schopné měřit vybrané diagnostické veličiny a za pomoci zpracování naměřených dat určit technický stav zájmového objektu. Dále byl také kladen důraz na to, aby bylo zařízení schopno vyhodnocovat technický stav zájmového objektu bez asistence kvalifikovaného technika (po prvotní instalaci). Nejdůležitějším parametrem při definici parametrů bylo to, že zmiňované zájmové objekty jsou již nainstalovány a zařízení má sloužit pouze jako nástavba.

To lze považovat za velmi obecné specifikum, proto bylo nutné v rámci práce, a v souladu s vedoucím práce, stanovit obecný koncept navrhovaného zařízení tak, aby odpovídal technickým požadavkům, a zároveň bylo zařízení technicky realizovatelné a cenově přijatelné.

Proto aby, byl návrh smysluplný, a odpovídal v jednotlivých fázích představě vedoucího práce, byl vypracován, postup jakým má být samotné zařízení, později pojmenované jako „Průmyslový data koncentrátor“ (en: „Industrial data logger“), navrhováno. Tento postup je nastíněn v seznamu níže.

1. Stanovení koncepce navrhovaného zařízení dle požadavků vedoucího práce (kapitola 2).
2. Průzkum trhu se zařízeními, které jsou koncepčně podobné a promítnutí zjištěných výsledků do navrhované konstrukce (kapitola 3).
3. Definování diagnostických veličin, které budou v rámci průmyslového data koncentrátoru podporovány (kapitola 4).
4. Stanování požadavků na konstrukci a programové vybavení.
5. Návrh obvodového řešení (kapitola 5).
6. Návrh DPS (Deska Plošných Spojů) (kapitola 6.1).
7. Navržení programového vybavení (kapitola 7).

Jednotlivé body výše popsaného postupu, se odkazují na příslušné kapitoly práce, ve kterých je daná problematika blíže rozebrána.

¹Použitá terminologie vyháází z práce „Technická diagnostika a spolehlivost: Vibrodiagnostika 2“ od Františka Helebranta [1]

2 Koncepce

Tato kapitola se zabývá návržením konceptu průmyslového data koncentrátoru tak, aby odpovídal obecným požadavkům vedoucího práce práce popsaných v kapitole 1.

2.1 Základní koncepce

Z již dříve definovaných požadavků vychází, že zařízení spadá do kategorie ON-LINE diagnostického systému (měřicího systému určeného pro trvalou instalaci). Samotný koncentrátor lze následně blíže charakterizovat jako DAQ (Data Acquisition - sběr dat) systém.

Základní koncepce je tedy taková, že hlavní měřicí zařízení (koncentrátor) bude zprostředkovávat výpočetní výkon a interní rozhraní pro podporu externích snímačů. Tyto snímače mohou být buď standardní (IEPE, Modbus, proudová smyčka, digitální vstupy, atd.) a nebo vzhledem k důrazu na nízkou cenu zařízení proprietární (např. snímače připojené ke koncentrátoru přes digitální sběrnici).

Vzhledem ke skutečnosti, že se počítá s nasazením koncentrátoru ve větším množství v rámci jedné lokace (např. tovární budovy), musí být možno data z jednotlivých koncentrátorů sdružována v jedné databázi. Ke zmíněnému požadavku bylo zvoleno řešení, ve kterém bude koncentrátor připojen k LAN Local Area Network - lokální síť (drátově nebo bezdrátově) a naměřená data budou koncentrována v databázovém serveru (mySQL). Základní nástin popsané koncepce je vyobrazen na funkčním diagramu obrázek 2.1.

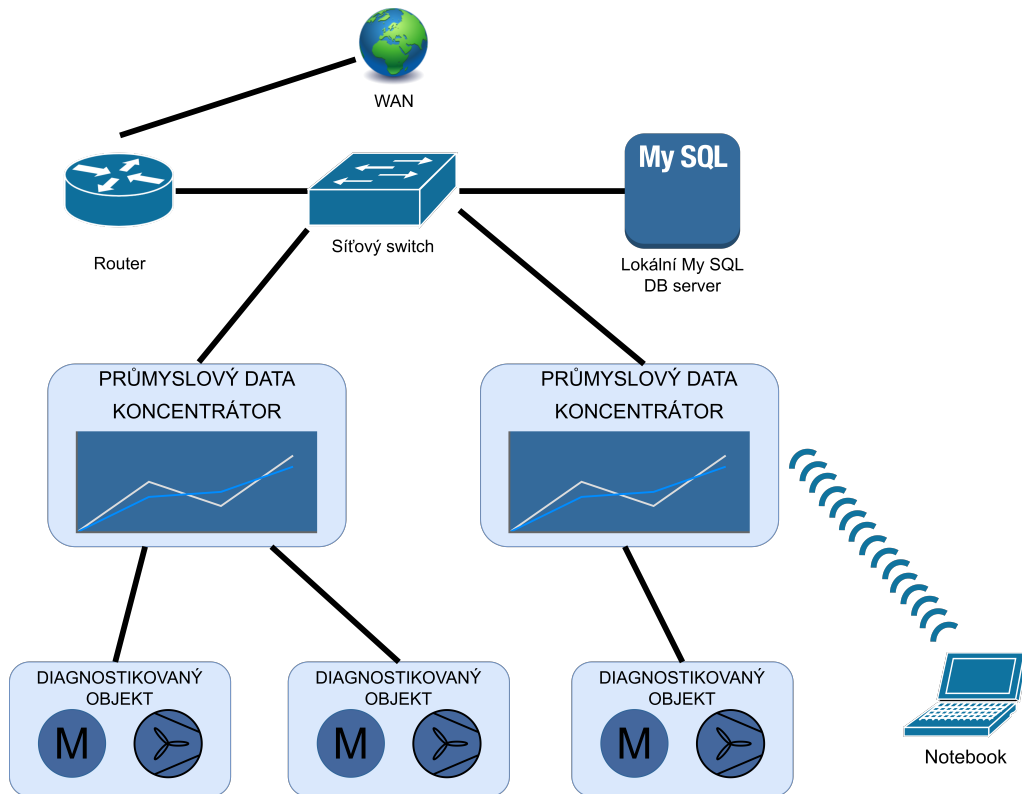
Jelikož je průmyslový data koncentrátor primárně určen pro nasazení v průmyslových aplikacích, musí být při jeho návrhu zohledněny specifické požadavky na spolehlivost¹ a EMC (Electromagnetic Compatibility - elektromagnetická kompatibilita), které se promítnou hlavně v obvodovém řešení (kapitola 5). Avšak, jelikož je konstrukce data koncentrátoru pouze první iterací, odpovídající testy a jejich výsledky nebudou v rámci práce obsaženy.

2.2 Funkční požadavky

Ze samotné koncepce a požadavků vedoucího práce byly následně odvozeny požadavky funkční, jaké jsou od průmyslového data koncentrátoru očekávány. Konkrétní požadavky jsou sepsány v seznamu níže.

- ON-LINE monitoring vybraných veličin v závislosti na aplikaci.

¹Definovanou normou ČSN EIC 60050-192 (2016)



Obr. 2.1: Koncepce Průmyslového data koncentrátoru

- Primárně přizpůsobené pro monitoring točivých strojů.
- Zpracování naměřených dat a následné určení technického stavu zájmového zařízení.
- Odesílání naměřených dat na databázový server.
- Indikace provozního stavu elektrického motoru (vypnuto/zapnuto).
- Počítání provozních hodin elektrických motorů.
- Počítání počtu startů elektrických pohonů.
- Měření spotřeby energie.
- Měření aktuálního příkonu elektrického motoru.
- Lokální iterační (digitální vstupy a výstupy)
- Určené pro provoz v průmyslu.

3 Komerční řešení

Snahou kapitoly je popsat koncepčně podobná komerční řešení, určit jestli má data koncentrátor smysl konstruovat a případně vyvést důsledky na selekci diagnostických veličin, (kapitola 4) a technického řešení (kapitola 5).

3.1 Produkty

V následujících odstavcích jsou popsány funkce a parametry takových komerčně dostupných zařízení, které koncepčně odpovídají průmyslovému data koncentrátoru (ON-LINE diagnostickému systému).

3.1.1 IFM

Svoje zařízení IFM obchodně pojmenoval „diagnostická elektronika pro vibrační snímače“. Jak již název napovídá, jsou to zařízení primárně určena pro měření vibrací, nicméně i tak nabízí množství rozšiřujících rozhraní, které rozšiřují jeho funkčnost. Výrobce v tomto segmentu nabízí celou modelovou řadu VSE, kde se jednotlivé modely liší zejména počtem I/O (Input/Output - vstup/výstup), fyzickým komunikačním rozhraním a příslušným protokolem (např. PROFINET IO, EtherNet/IP, EtherCAT, ModbusTCP). Všechny zařízení z modelové řady neobsahují žádné integrované snímače, ale všechny jsou připojovány externě dle potřeby. Zařízení ze začátku a konce modelové řady VSE jsou vyobrazena na obrázku 3.1.1.

Analogové vstupní rozhraní je rozděleno na statické a dynamické, kde dynamické je určené pro snímání rychle měnících se veličin, jako jsou právě vibrace, a statické pro veličiny s pomalou časovou konstantou (např. měření teploty). Rozdíl jednotlivých typů analogových vstupů je potom v rozlišení převodníku (16 bit místo 12 bit), vzorkovací frekvenci a šířkou frekvenčního pásma. Jak vstupy statické tak vstupy dynamické používají pro připojení vodičů šroubové svorky, a to i pro rozhraní IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric - integrované rozhraní pro piezoelektrický senzor).

Zařízení je určené pro stálou montáž do rozváděče a je tedy kompatibilní s uchycením na normovanou DIN (Deutsche Industrie Norm - německá průmyslová norma) lištu. Naměřená data jsou následně předána přes rozhraní průmyslového Ethernetu OPC (Online Platform Communications - standardizovaná specifikace komunikačního rozhraní) serveru, který data následně předá výrobcem poskytnuté aplikaci VSE004 (OPC klientovy). Takto poskládaný měřicí řetězec je dle výrobce vhodný pro monitorování úrovně vibrací, sledování stavu valivých ložisek a ozubení. [2]



Obr. 3.1: IFM-VSE003 (na levo) a IFM-VSE152 (na pravo) [3]

3.1.2 FLIR SV87-kit

Zařízení od výrobce FLIR je primárně určeno pro monitorování vibrací a teploty. Zařízení jakožto celek je složeno ze dvou základních komponent, a to z bateriově napájených snímačů SV87, které komunikují s bránou (GW65) napájenou síťovým napětím 100 - 240 VAC. Komunikace mezi snímači a bránou je obstarána pomocí protokolu Bluetooth (BLE 4.2) a data mezi nimi jsou posílána s periodou 90 s. Komunikaci mezi bránou a monitorovací aplikací (Windows PC, Mobile IOS/Android) zprostředkovává komunikační rozhraní Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n). Jednotlivé brány je možné libovolně zřetězovat tak, aby bylo dosaženo optimálního pokrytí. Zařízení je možné zakoupit buď po jednotlivých komponentech (snímače, brány) a nebo jako celek (jedna brána + čtveřice snímačů), jak je zobrazeno na obrázku 3.2.

Omezení zařízení plyne právě z bezdrátového spojení mezi snímači a bránou, kde maximální vzdálenost činí 65 m. Zároveň je potřeba v jednotlivých snímačích měnit 3,6 V baterie, u nichž výrobce deklaruje průměrnou životnost 4 roky, v závislosti na použití. Modul snímače SV87 jako takový, integruje všechny senzory (teploty, vibrace) interně a není možné k němu připojit jiné externí příslušenství.

Určení zařízení, jakožto celku, výrobce doporučuje primárně pro monitorování technického stavu asynchronních motorů, ventilátorů a dopravníkových pásů. Montáž modulů snímačů probíhá tak, že se připevní na doporučená místa, dle výrobce, pomocí oboustranné lepicí pásky.[4]



Obr. 3.2: FLIR SV87-kit [5]

3.1.3 Siemens Simotics connect 400

Zařízení Simotics connect 400 od výrobce Siemens patří stejně jako zařízení FLIR (odstavec 3.1.2) do segmentu bateriově napájených (doba provozu na baterii přibližně 2 roky) zařízení určených primárně pro monitorování technického stavu asynchronních motorů. Zařízení kromě měření teploty v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vibrací ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 1,6 kHz měří také magnetické pole motoru ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 300 Hz. Konkrétně potom frekvenci statorového pole a frekvenci skluzu, ze kterých je nepřímou metodou schopno dopočítat moment na hřídeli motoru. Výrobce zároveň pro měření deklaruje kompatibilitu s VFD (Variable Frequency Drive - frekvenční měnič). Zařízení je určeno pro montáž na chladicí žebrovaní motoru, pomocí doporučeného lepidla s kovovou příměsí (LOCTITE HY 4090).

Komunikační rozhraní zařízení je bezdrátové a používá dvě technologie Bluetooth v4.1 pro konfiguraci a uvedení do provozu (mobilní aplikace SIDRIVE IW Config) a WLAN (IEEE 802.11 b/g/n) pro přenášení naměřených dat. Frekvence s jakou jsou data posílána na server je konfigurovatelná v intervalu 1 min až 1 h. Reálný vzhled zařízení je na obrázku 3.3.[6]

3.1.4 Bently Nevada 2300 series

Zařízení od výrobce Bently Nevada (série 2300) je označováno jako monitor vibrací, které má stejně jako předchozí zařízení za úkol monitorovat technický stav zařízení v průmyslových aplikacích. Vizualní podoba zařízení je na obrázku 3.4.



Obr. 3.3: Siemens Simotics connect 400 [7]

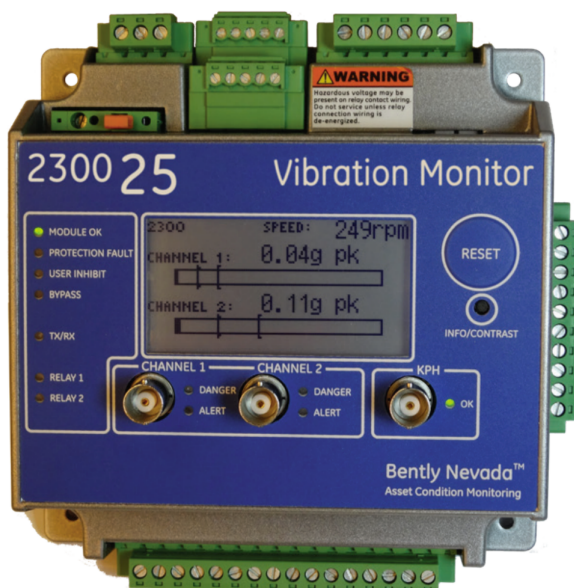
Zařízení disponuje dvěma analogovými vstupy podporujícími standard IEPE. Kromě toho, má zařízení další rozšiřující analogové a digitální I/O. K analogovým vstupům lze připojit snímače z nabídky Bently Nevada jako jsou: snímač teploty, rychlosti a proximitní snímače. Napájení je zajištěno pomocí napětí 24 VDC a montáž je možná pomocí čtveřice otvorů nebo pomocí DIN lišty.

Komunikace probíhá drátově pomocí průmyslového Ethernetu (protokol Modbus). Hrubý stav jednotlivých vstupů je také možné monitorovat na integrovaném grafickém displeji.[8]

3.2 Finální shrnutí

V předchozích odstavcích byly shrnuty jednotlivé relevantní atributy a principy komerčních řešení ON-LINE diagnostických systémů. Podrobnější parametry každého zařízení byly zpracovány v přehledové tabulce 3.1. Kromě základních parametrů tabulka obsahuje také informaci o ceně a doplňujících parametrech.

Po provedení průzkumu v oblasti komerčních řešení a vzhledem k požadavkům zadavatele se ukázalo, že jakožto přímého konkurenta lze označit zařízení výrobců Bently Nevada 2300 (odstavec 3.1.4) a IFM VSE (odstavec 3.1.1). Obě zařízení jsou určeny pro pevnou montáž a je nutné je osadit externími snímači. Zařízení, které disponují integrovanými snímači nejsou vhodné pro přesnější diagnostiku, jelikož je vzhledem k jejich konstrukci například omezen frekvenční rozsah měření vibrací, nebo neumožňují umístit snímač na vhodné místo (měření vibrací nebo teploty u lo-



Obr. 3.4: Bently Nevada 2300/25 [9]

žiska). Následkem těchto skutečností byla koncepce zařízení s integrovanými snímači prohlášena jako nevhodná pro finální řešení koncentrátoru.

Dále z průzkumu vyšlo najevo, že by finální zařízení mělo být schopné měřit primárně teplotu a vibrace, jakožto diagnostické veličiny, protože mají největší vypovídající hodnotu v úloze určení technického stavu diagnostikovaného objektu.

Hlavní otázkou bylo, zdali má průmyslový data koncentrátor smysl konstruovat. Výsledkem průzkumu je stanovisko, že ano, jelikož zařízení, které by bylo možné v rámci dané aplikace použít, jsou buď velmi drahá Bently Nevada 2300/25 (cena viz tabulka 3.1) a nebo diagnostickou veličinu měří interními snímači, které se neslučují s požadovanou flexibilitou úlohy měření.

Tab. 3.1: Porovnání parametrů komerčních řešení

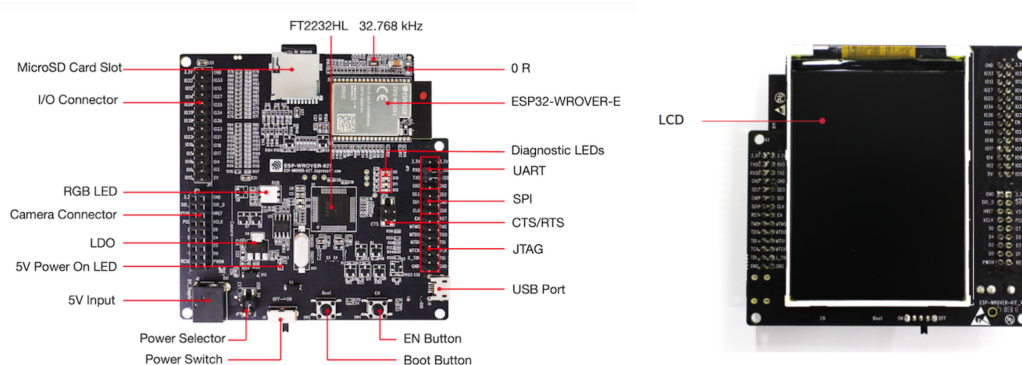
Výrobce		IFM	Flir	Siemens	Bently nevada
Modelová řada		VSE003 - VSE152	SV87-kit	Simotics connect 400	2300 series
Komunikační rozhraní	sběrnice	Průmyslový ethernet	bezdrátové 2,4 GHz	bezdrátové 2,4 GHz	Průmyslový ethernet
	protokol	EtherCAT, TCP/IP, Modbus TCP, Profinet	Wi-Fi, Bluetooth	Wi-Fi, Bluetooth	Modbus
Místo montáže		DIN (do rozváděče)	Přímé	Přímé	DIN (do rozváděče) / montážní otvory
Provozní ambientní teplota [°C]	rozhraní	0 až 70	30 až 80	40 až 80	30 až 65
	počet měřících os	1	3	3	2
	frekvenční rozsah [Hz]	0,1 až 12000	10 až 1000	10 až 1600	0,2 až 20000
	rozsah výchylky	-	± 32 g	0,02 až 180 mm/s	2 až 80 g
	rozdílení ADC	16 bit	-	-	24 bit
Měření vibrací	vzorkovací frekvence [samples]	100 k	-	-	-
	rozhraní	4 - 20 mA	integrované	integrované	4 - 20 mA
Měření teploty	princip snímače	-	MEMS	-	-
	rozdílení	12 bit (4096 LSB)	30 až 80	0,03 °C	-
Vstupy	teplotní rozsah [°C]	-	-	40 až 85	-
	rozhraní digitálních	-	-	-	-
	počet digitálních	4	-	-	2
	rozhraní analogových	12 bit (4096 LSB)	-	-	4 - 20 mA
	počet analogových	2	-	-	2
Výstupy	rozhraní digitálních	PNP	-	-	kontakt
	počet digitálních	2	-	-	2
	počet analogových	0	-	-	1
Měření magnetického pole	počet výkonových (relé)	0	-	-	2 (6 A, 250 VAC)
		NE	NE	ANO	NE
Napájení		24 VDC	Gateway (100 - 240 VAC), Snímač (3,6 V baterie)	Bateriové (4 články * 3,6 V)	24 VDC
	Cena bez DPH (1.1.2023)	14653 Kč (VSE003) až 24955 Kč (VSE152)	9453 Kč (SV87 + GW65) až 24796 Kč (SV87-kit)	4798 Kč	145 408 Kč

4 Selekce veličin a prostředků

Následující kapitola se zabývá výběrem konkrétních diagnostických veličin a typem senzorů, které bude průmyslový data koncentrátor podporovat. Volba jednotlivých senzorů a snímačů byla po fázi teoretické realizovatelnosti ověřena experimentálně. Jednotlivé experimenty jsou také součástí následujících kapitol.

Jako rozhraní mezi počítačem a snímači byl použit vývojový kit ESP-WROVER-KIT v4.1 (rozložení viz obrázek 4.1), ke kterému byly postupně jednotlivé snímače připojovány a testovány. Zpracování naměřených dat probíhalo v programu LabVIEW 2022 od výrobce National Instrument. Komunikaci mezi vývojovým kitem a počítačem zprostředkovalo rozhraní USB (Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice) pomocí specificky, pro aplikaci vytvořeného, komunikačního protokolu.

Hlavním důvodem pro použití vývojového kitu už v testovací fázi, byl cíl napsat knihovny pro periferie, které lze ve finálním návrhu použít. Jednotlivé komponenty, které byly předmětem testování jsou detailněji popsány v následujících odstavcích.



Obr. 4.1: ESP-WROVER-KIT v4.1 [10]

4.1 Měření momentu

Jako jeden z užitečných parametrů pro určení technického stavu motoru byl zvolen mechanický moment na hřídeli asynchronního motoru. Měřením momentu lze například odhalit v čase zvyšující se zátěž připojenou ke hřídel motoru, která může signalizovat zvyšující opotřebení. Stejnou funkcionalitu disponuje také zařízení Siemens Simotic connect 400 (kapitola 3.3), které moment dokáže nepřímým způsobem dopočítat z parazitní frekvence magnetického pole, jenž je součástí synchronní frekvence statorového magnetického rotačního pole, jakožto vyšší harmonická. Snímání magnetického pole vinutí je realizováno pomocí Hallova snímače.

Zmíněný princip je však zatížen relativně velikou chybou, proto pro konstrukci byla zvolena cesta nepřímého dopočtení mechanického momentu hřídele motoru z frekvence skluzu rotoru. V návaznosti na to, je ale potřeba měřit reálné otáčky rotoru a zároveň znát model motoru.

Reálné měření otáček rotoru lze více způsoby, jako například jsou: použití tachodynamu spojeného s rotorem motoru, použitím optického čítače pulsů, anebo měřením magnetického pole permanentního magnetu připevněného na rotoru motoru. V rámci testování byla zvolena poslední zmíněná varianta. Snímání magnetického pole permanentního magnetu bylo testováno pomocí magnetického kompasu HMC5883L (řešení je obsaženo v kapitole 4.1.1) a následně pomocí Hallova snímače (v kapitole 4.1.2). Nutno však podotknout, že řešení není příliš obvyklé, a pro měření otáček rotoru existují jednodušší metody (např. optický čítač pulsů a reflexní pásek umístěný na rotoru motoru), avšak cílem bylo otestovat alternativní metodu, která by byla finančně méně nákladná a zároveň dokázala průběh otáček měřit kvazi spojitě. Předpokládaná výhoda popsaného řešení je možnost určit případné anomálie ve změnách rychlosti v rámci jedné otáčky rotoru.

4.1.1 Magnetický kompas HMC5883L

Snímač HMC5883L je MEMS (Micro Electro Mechanical Systems - mikroelektromechanická součástka) digitální tříosý magnetický kompas od výrobce Honeywell, který umožňuje měřit sílu magnetického pole ve třech osách. Snímač komunikuje přes digitální sběrnici I2C (Inter Integrated Circuit - dvou vodičová sběrnice), pro kterou byla napsána knihovna v jazyce C.

Experiment probíhal tak, že na hřídel rotoru testovacího asynchronního motoru (VYBO Electric 1AL-71M1-4ZS3) byl přichycen neodymový magnet a magnetický kompas, který byl umístěn centricky osou Z snímače a s osou hřídele motoru. V průběhu měření byla ekvidistantně (po 2 mm) měněna vzdálenost od konce hřídele rotoru.

Měřením však bylo zjištěno, že kompas má příliš vysokou citlivost na okolní rušivé magnetické pole i s ohledem na zvětšující se vzdálenost od rotoru motoru, a proto je pro aplikaci měření otáček nevhodný. To se při měření projevovalo tím způsobem, že výstup oscilloval v mezích saturace.

4.1.2 Hallův snímač SS49E

Jako další iterace byl (jako snímač otáček) otestován lineární Hallův snímač SS49E, který je součástí vývojového kitu HW-484 v0.2. Součástí samotného kitu je kromě analogového výstupu z Hallova snímače výstup digitální. Ten je připojen na interní komparátor, který porovnává výstupní úroveň napětí ze snímače a úroveň

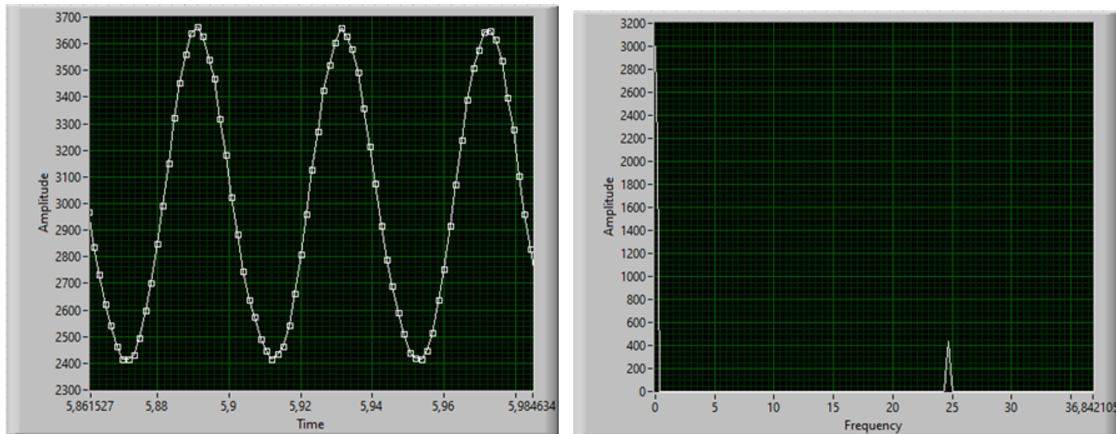
napětí z laditelného děliče napětí (více-otáčkový trimr). Pro potřeby měření otáček je preferováno měření analogového výstupu ze snímače, který nese větší množství potřebných informací o technickém stavu motoru.

Testování probíhalo na třífázovém asynchronním motoru SG 80-4B. Pro uchycení neodymového magnetu na hřídel motoru v oblasti ventilátoru byl navrhnut držák viz příloha A.2. Držák na hřídeli drží díky kónickému tvaru a aplikovanému lepidlu. Pro uchycení samotné Hallova snímače byl navrhnut bezšroubový mechanismus, určený pro montáž na zadní krycí mřížku ventilátoru (viz přílohy A.4 a A.3). Vzdálenost snímače od magnetu je možné nastavovat povolením šroubové upínky, a následným vysunutím nebo zasunutím na potřebnou vzdálenost. Reálné umístění držáku na motoru je vyobrazeno na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Držák pro Hallův snímač na motoru

Analogový výstup ze snímače je připojen na integrovaný ADC (Analog To Digital Converter - analogově digitální převodník)(viz testovací řetězec kapitola 4). Naměřený průběh otáček rotoru motoru pomocí Hallova snímače při 1450 rpm (odpovídá přibližně frekvenci 24,1 Hz) je na levém obrázku 4.3. Signál ve frekvenční doméně (pravý obrázek 4.3) byl dopočten pomocí FFT.



Obr. 4.3: Měření otáček rotoru motoru pomocí Hallova snímače (časová doména [s] - nalevo, frekvenční doména [Hz] - napravo, amplituda [LSB])

Experiment splnil teoretická očekávání autora a jak konstrukce snímače, tak diagnostická veličina (průběh otáček rotoru) budou použity ve finálním návrhu jakožto proprietární snímač pro méně náročné aplikace.

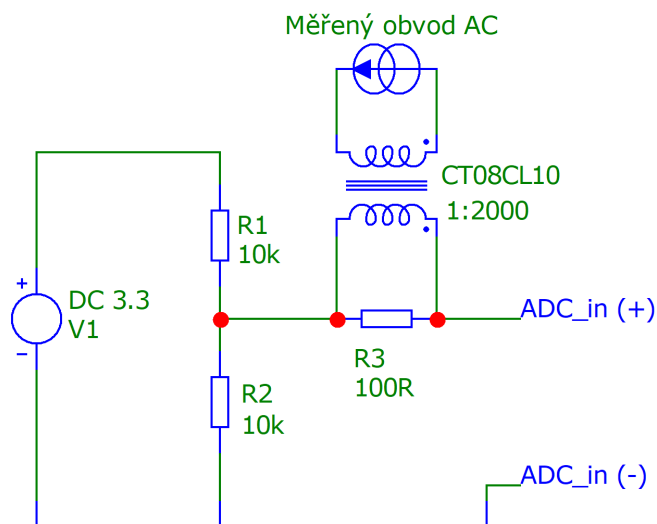
4.2 Měření proudu

Měření třífázového proudu motoru bylo jedním ze základních požadavků definovaných v kapitole 2. Zároveň bylo zadavatelem vymezeno, že proud musí být měřen neinvazivně, proto bylo zvoleno řešení za použití CT (Current Transformer - proudový transformátor). Pro testovací účely měření byl zvolen transformátor CT08CL10 s neděleným jádrem, převodním poměrem 1:2000 a jmenovitým primárním proudem 20 A.

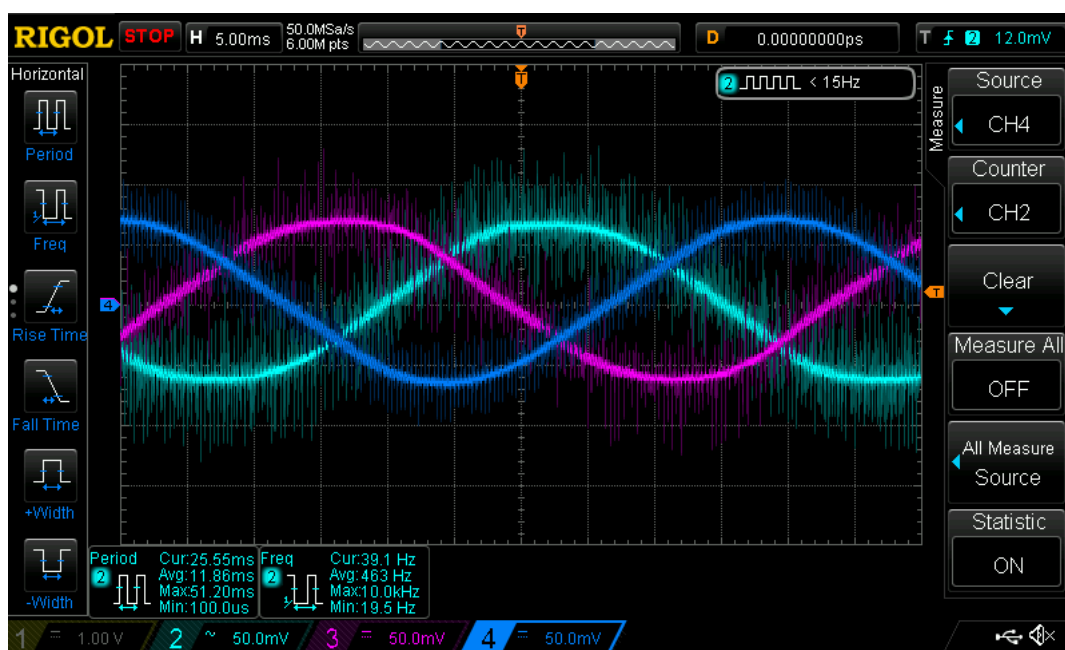
Cílem bylo experimentálně otestovat jaké parazitní frekvence se v průběhu proudu projevují při použití VFD (Variable Frequency Drive - frekvenční měnič). Zapojení transformátorů při experimentu bylo nejzákladnější možné, pracující na principu na-superponování stejnosměrné složky z děliče napětí na signál z proudového transformátoru (zapojení viz obrázek 4.4)

Průběh napájecího třífázového proudu, při použití frekvenčního měniče Control Techniques M200, je na obrázku 4.5.

Z naměřených průběhů je patrné, že do motoru prostupuje parazitní vysokofrekvenční rušení, které je generováno spínáním výkonového stupně umístěného za stejnosměrným meziobvodem uvnitř VFD. Avšak, jelikož má parazitní frekvence (desítky kHz) velký odstup od frekvence užitečné (50 Hz), nebude ve finální imple-



Obr. 4.4: Testovací obvod pro měření proudu do motoru (jedna fáze)



Obr. 4.5: Měření proudu s transformátorem CT08CL10 a osciloskopem Rigol DS1054Z

mentaci tvořit překážku, jelikož je možné ji odfiltrovat pomocí jednoduchého (nízký řád systému) analogového filtru typu dolní propust.

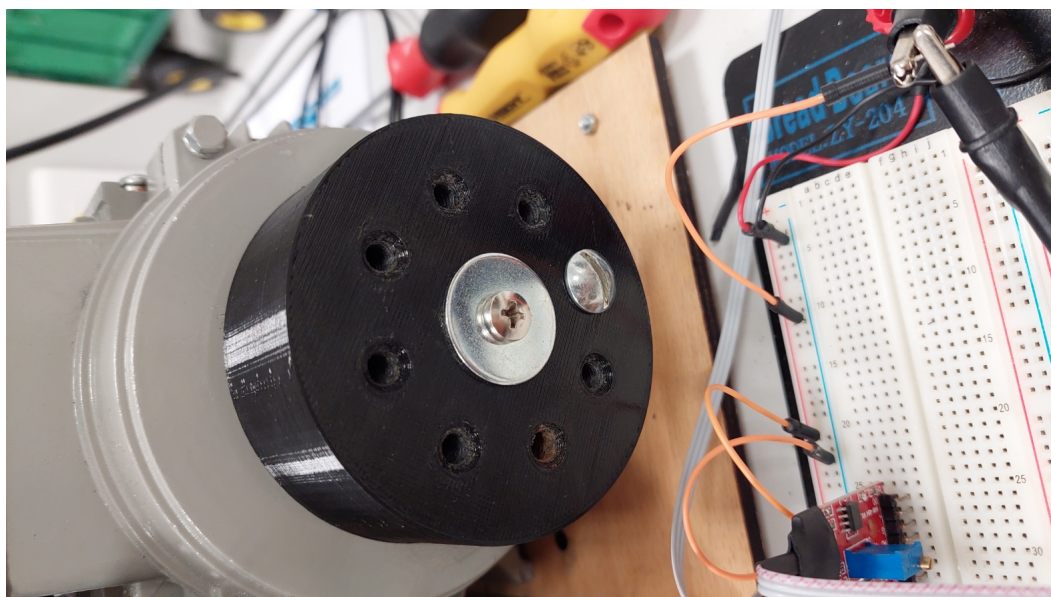
Měření proudu, primárně asynchronního motoru, pomocí proudového transformátoru je tedy vhodné pro finální implementaci. Návrh rozhraní je popsán v kapi-

tole 5.8.

4.3 Měření vibrací

Měření vibrací je spolu s měřením teploty nejdůležitější technickou veličinou datového koncentrátoru. Avšak úlohou experimentálního ověření bylo zjistit, jestli je možné získat kvalitativně užitečná data pomocí MEMS akcelerometru, anebo bude potřeba použít akcelerometr pracující na piezoelektrické principu. Ostatní absolutní snímače vibrací jako jsou: tepelný akcelerometr, elektrodynamický snímač nebo serwoakcelerometr nebyly pro jejich konstrukční složitost v rámci návrhu uvažovány.

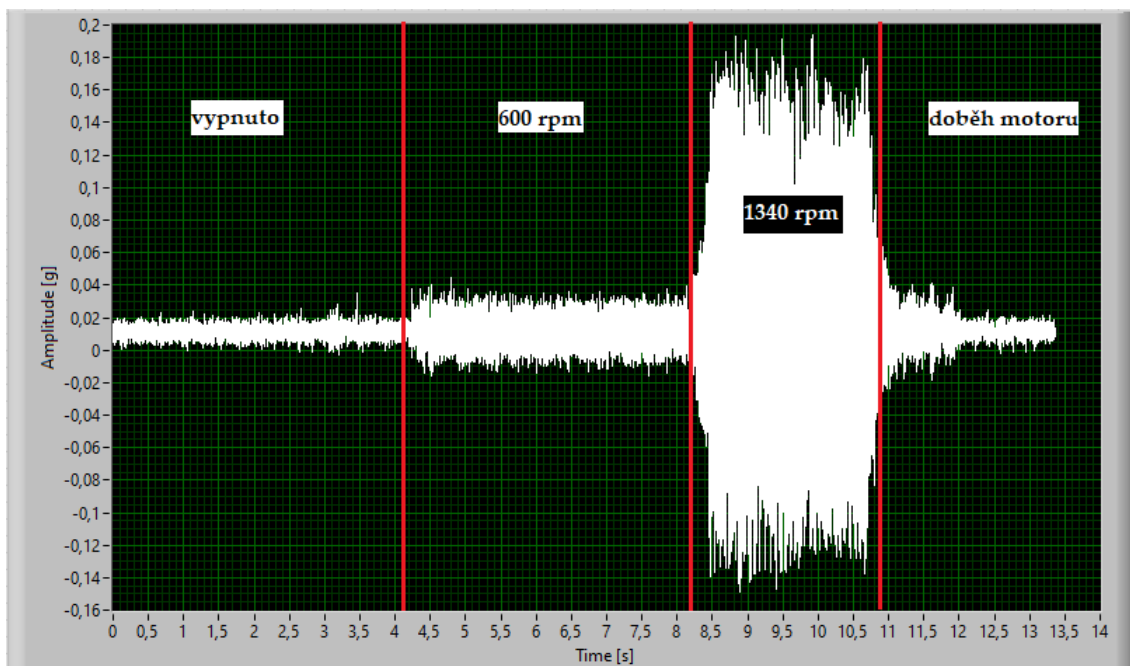
Pro účely testování byl navržen přípravek na hřídel motoru, kterým je možné definovaně měnit míru nevyváženosti na hřídeli motoru, a tím i úroveň vibrací. Navržený přípravek (viz příloha A.1) byl následně vytisknut na FDM (Fused Deposition Modeling - aditivní tisk pomocí vrstvení roztaveného materiálu) 3D tiskárně. Přípravek se na hřídel motoru upevňuje pomocí metrického šroubu M6x20 mm a proti protáčení je zajištěn perem těsným (DIN6885A). Následně je možné do přípravku upevnit šrouby o definované váze a vzdálenosti od hřídele. Tím je možné definovaně měnit úroveň vibrací motoru. Přípravek na nevyváženost upevněný na motoru je na obrázku 4.6.



Obr. 4.6: Osazený přípravek na nevyváženost motoru

4.3.1 MPU6050

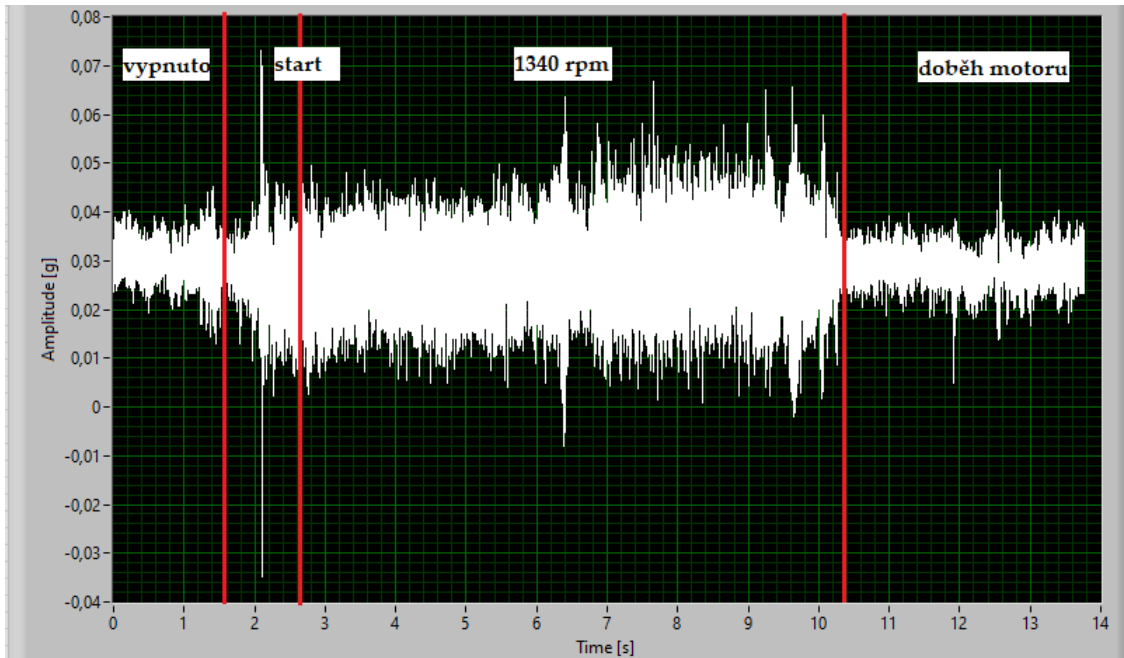
V následujícím odstavci bude popsán experimentální test tří-osého MEMS akcelerometru MPU6050 (měření zrychlení) kombinovaného s gyroskopem (měření úhlové rychlosti). V rámci experimentu je relevantní pouze akcelerometr, a proto budou následující řádky vztaženy právě k němu. Snímač MPU6050 komunikuje přes digitální sběrnici I2C, a má možnost změny měřicího rozsahu definovaně po krocích $\pm 2/4/8/16$ g. Experiment probíhal tím způsobem, že byly nastavovány různé otáčky motoru, a zároveň měřena odpovídající úroveň vibrací. Příklad naměřených dat z akcelerometru, při nastavené rozsahu ± 2 g a nainstalovaném závaží o hmotnosti 5 g ve vzdálenosti 25 mm od osy motoru, je na obrázku 4.7. Na grafu je zásadní především úroveň vibrací, která se liší pro jednotlivé rpm (Revolutions Per Minute - otáčky za minutu). Nejnižší úroveň vibrací přísluší klidovému stavu motoru (stav vypnuto), druhá (střední) úroveň vibrací náleží otáčkám přibližně 600 rpm a nejvyšší úroveň naměřeného signálu se vztahuje k nominálním otáčkám motoru 1340 rpm. Z naměřeného průběhu (obrázek 4.7) je patrné, že je signál ze snímače zatížen velkým šumem, avšak jeho citlivost je dostatečná pro určení úrovně vibrací.



Obr. 4.7: Měření vibrací pomocí snímače MPU6050 při nevyváženosti (při různých otáčkách motoru)

Další částí experimentu bylo otestovat, zdali při vyváženém rotoru (nic není na rotor připojeno - ideální stav), je možno určit aktuální provozní stav motoru (vypnuto/ zapnuto). Akcelerometr byl nastaven na nejcitlivější rozsah ± 2 g. Naměřená

data jsou na obrázku 4.8 a lze z nich teoreticky určit provozní stav (změna amplitudy vibrací v řádu 0,01 g). Vzhledem ke skutečnosti, že v reálné aplikaci motor nikdy nebude bez zátěže, a vibrace budou mít tedy vyšší úroveň než je klidová (předpoklad nemožnosti ideálního vyvážení zátěže), lze předpokládat, že je možné pomocí MEMS akcelerometru monitorovat provozní stav motoru.



Obr. 4.8: Měření vibrací při startu motoru bez zátěže pomocí snímače MPU6050

Finálním verdiktem je, že MEMS akcelerometr je možné použít k určení provozního stavu diagnostikovaného objektu (zapnuto/vypnuto), ale není možné ho vzhledem k jeho citlivosti a frekvenčnímu rozsahu (řádově do 1 kHz) použít pro citlivější aplikace (definováno níže). Nedostatečná citlivost snímače se také projevuje na parametru SNR (Signal to Noise Ration - poměr signál šum), který je příliš malý na detekování např. defektů drah ložisek. Proto je nutné průmyslový data koncentrátor doplnit o citlivější rozhraní pro měření vibrací (piezoelektrický princip). Zároveň s tímto stanoviskem však bylo zjištěno, že MEMS akcelerometr pro specifické aplikace dostačuje, a bude ho tedy možné připojit jako proprietární snímač přes komunikační rozhraní RS-485.

4.4 Měření teploty

Měření teploty je stejně jako měření vibrací jednou ze základních technických veličin pro danou aplikaci (odůvodněno v kapitole 3.2). V rámci výběru vhodných veličin

pro data koncentrátor nebylo nutné provádět žádný experiment, jelikož vhodnost jednotlivých principů teplotních snímačů, je obecně známa. Pro přibližný požadovaný teplotní rozsah -30 °C až 150 °C jsou vhodné všechny níže popsané principy (kromě KTY) teplotních snímačů. Základní principy snímačů, které byly při výběru zohledněny jsou v seznamu níže.

- RTD (Resistance temperature detector - odporový teplotní detektor).
- TC (ThermoCouple - termočlánek).
- Termistory (NTC, PTC).
- Křemíkové teplotní senzory (KTY).

Pro finální implementaci jsou nevhodnější snímače typu RTD a snímače termo-elektrické (termočláanky). Odporové snímače vynikají oproti termočláankům, vynikají svoji linearitou, větší citlivostí, a opakovatelností měření („méně stárnou“). Jejich typický teplotní rozsah je přibližně -200 °C až 850 °C . Zatímco termočláanky disponují větším teplotním rozsahem (přibližně -200 °C až 2300 °C), menší časovou konstantou (jsou rychlejší), větší mechanickou odolností a netrpí samoohřevem (není potřeba je napájet). Zároveň je u nich nutné kompenzovat teplotu studeného konce (měřit ji), což se projeví na složitější konstrukci rozhraní.[11]

Oba principy jsou pro danou aplikaci vhodné s tím, že pro finální řešení přes nesporné výhody obou řešení bylo zvoleno, pro jeho lepší linearitu, rozhraní kompatibilní s kovovými odporovými snímači (RTD). Podrobnější popis konstrukce, je v kapitole 5.9.

5 Obvodové řešení

Obvodové řešení je hlavní a nejdůležitější část práce, je zde sdružen návrh jednotlivých obvodových konstrukcí a příslušných realizací.

5.1 Požadavky

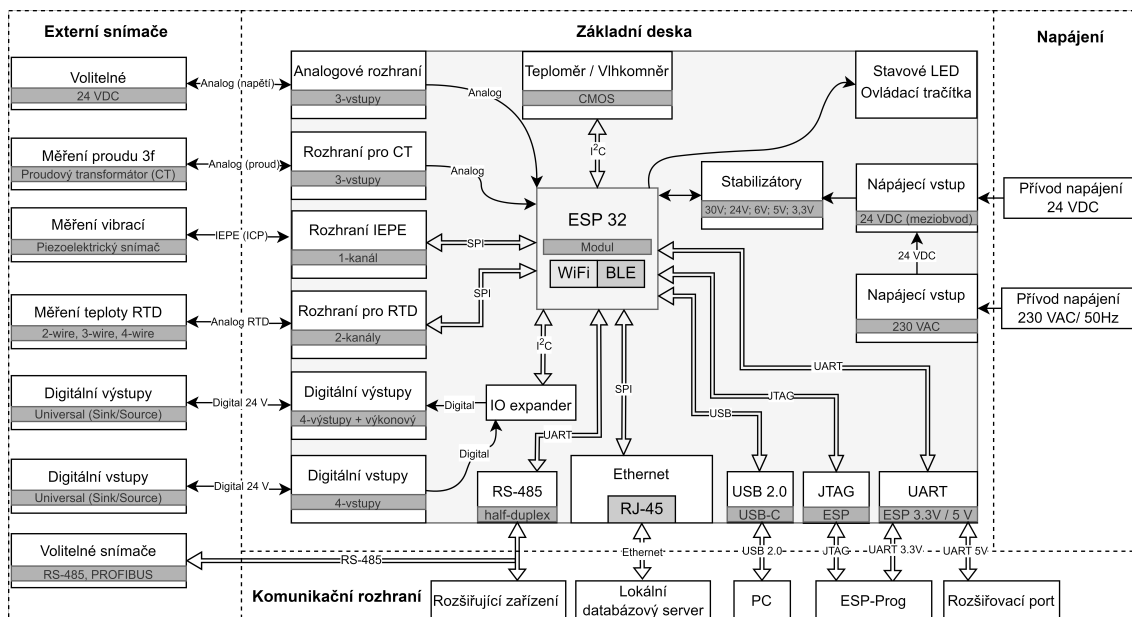
V minulých kapitolách byly zadefinovány obecné koncepční a funkční požadavky. Úkolem této kapitoly je zadefinovat požadavky na obvodové řešení koncentrátoru tak, aby jim odpovídalo a zároveň bylo schopno měřit zvolené diagnostické veličiny. Obvodové požadavky jsou shrnuty v seznamu níže.

- Napájení 24 VDC.
- Volitelné napájení 230 VAC.
- Bezdrátové komunikační rozhraní.
- Rozhraní IEPE určené pro měření vibrací.
- Dvoukanálové rozhraní RTD určené pro měření teploty.
- Tříkanálové rozhraní CT pro neinvazivní měření proudu.
- Galvanicky izolované digitální vstupy a výstupy.
- Analogové vstupy.
- Interní měření teploty a vlhkosti.
- Výkonové digitální výstupy (relé).
- Rozšiřující komunikační rozhraní RS-485.
- Kabelové komunikační rozhraní Ethernet (LAN).
- Osazení dostatečně výkonného MCU.
- Slučitelné se EMC standardy (zohledněno při návrhu zapojení).
- Vhodné pro testování obvodových konstrukcí.

5.2 Blokové schéma

V následující kapitole jsou hrubě popsány funkce jednotlivých funkčních bloků, ze kterých se průmyslový data koncentrátor skládá. Jejich vzájemné uspořádání a příslušné vazby jsou zakresleny v blokovém diagramu nacházejícím se na obrázku 5.1. Podrobná technická řešení a zapojení jsou následně diskutovány v navazujících kapitolách.

Blokový diagram je rozdělen na čtyři základní části, „externí snímače“, „komunikační rozhraní“, „napájení“ a „základní deska“. Nejdůležitější částí je „základní deska“, která popisuje samotné zařízení koncentrátoru, a tedy i periferie a vazby, které obsahuje navržené obvodové zapojení. Ostatní části pouze definují k jaké veličině či



Obr. 5.1: Blokový diagram průmyslového data koncentrátoru

funkci příslušné rozhraní náleží. Přesto jsou tyto části relevantní vzhledem k samotné konstrukci, jelikož odpovídají příslušným svorkám či konektorům, jaké se nacházejí na fyzickém zařízení. Samotný rozvod napájení, pro jednotlivé části diagramu, není v blokovém diagramu pro jeho složitost obsažen. Popis jednotlivých napájení je diskutován vždy u příslušné periferie.

Část „napájení“ popisuje dvě varianty napájení (24 VDC a 230 VAC). Každá z variant je na samotné desce zastoupena vlastním konektorem a obvodem, jehož konstrukce je detailněji popsána v kapitole 5.11. Možnost napájení pomocí 24 VDC obsahuje každá verze průmyslového data koncentrátoru, avšak napájení síťovým napětím 230 VAC /50 Hz je pouze volitelná část a závisí na tom, zdali je na desce koncentrátoru osazena.

Další částí je „komunikační rozhraní“ část, která sdružuje všechny možnosti připojení data koncentrátoru s externím zařízením přes komunikační sběrnice, kromě bezdrátových rozhraní (Wi-Fi, Bluetooth 5), jenž se nacházejí integrované v MCU (Micro-Controller Unit - jednočipový počítač). Podrobnější popis jednotlivých komunikačních rozhraní je v kapitole 5.4.

Část „externí snímače“ obsahuje jednotlivé typy externích snímačů, které data koncentrátor umožňuje připojit. Selektce podporovaných typů snímačů a příslušných diagnostických veličin proběhla v kapitole 4. Kromě samotných snímačů obsahuje tato část také DIO (Digital Input/Output - digitální vstupy/výstupy), výkonové výstupy a analogové vstupy. Význam jednotlivých periférií je popsán v navazujících kapitolách.

5.3 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér je nejdůležitějším prvkem v obvodovém zapojení data koncentrátoru. Tento předpoklad vychází ze způsobu, jakým byl data koncentrátor navrhnout (viz kapitola 5.2). Mikrokontrolér má totiž za úkol komunikovat s externími periferiemi, zpracovávat naměřená data, a ty následně odesílat na příslušný databázový server. Taková úloha je však velmi náročná, jak na samotný hardware, tak i na softwarovou implementaci. Proto bylo cílem zvolit mikrokontrolér dostatečně výkonný pro zvládnutí těchto požadavků a zároveň takový, který bude mít dobrou podporu v softwarové vybavenosti, tak aby nebylo nutné všechny obslužné programy vyvíjet nízkourovňové bázi.

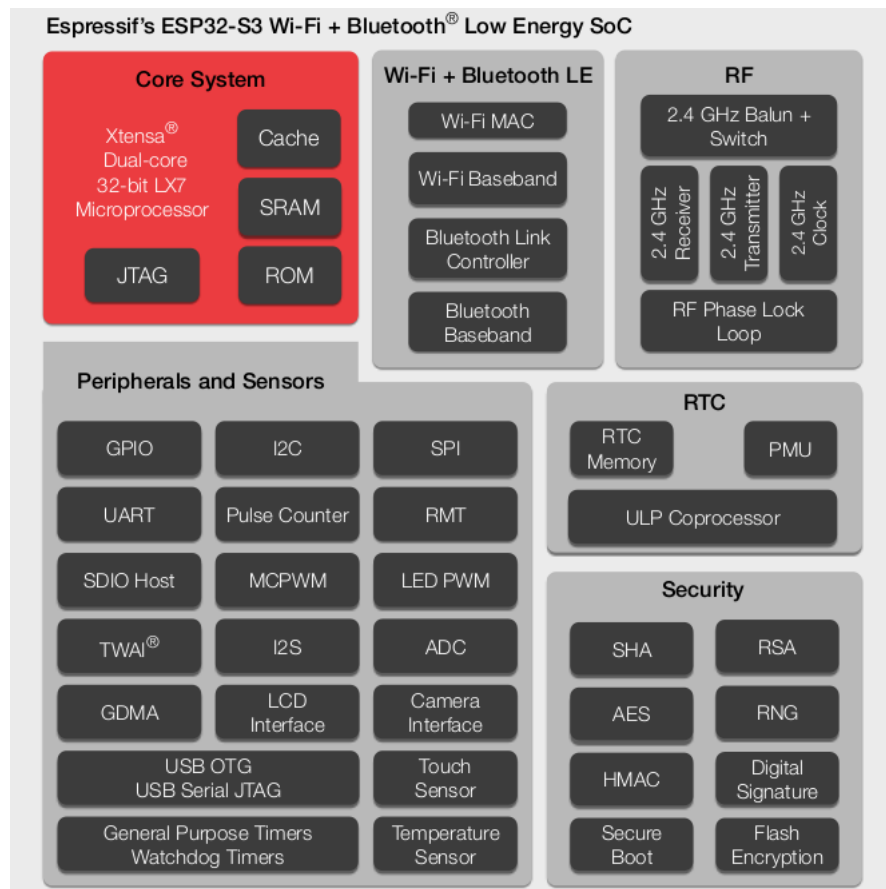
5.3.1 Výběr

Při výběru mikrokontroléru byly zahrnuty požadavky zmíněné v předchozím odstavci. Vzhledem ke koncepci zařízení nejvíce blíží se DAQ systému a požadavkem na zpracování měřených dat, by první logickou volbou bylo zvolit na místo mikrokontroléru DSP (Digital Signal Processor - digitální signálový procesor). Po průzkumu trhu však bylo zjištěno, že DSP jsou v porovnání s mikrokontroléry se srovnatelnými parametry několikanásobně dražší variantou. Například nejlevnější a současně dostupný dvoujádrový DSP z katalogu distributora „Mouser“ je obvod OMAPL137DZKB3 od výrobce Texas Instrument s cenovkou přibližně 579 Kč bez DPH (aktualizováno 14.5.2023). V porovnání s tím, dvoujádrový 32 bitový mikrokontrolér od výrobce Espressif ESP32-S3-WROOM-1U-N16R2 má katalogovou cenu přibližně 90 Kč bez DPH (aktualizováno 14.5.2023).

Mikrokontrolér má tedy kromě značné výhody v pořizovacích nákladech také výhodu v jeho rozšířenosti na trhu. Respektive vzhledem k častému použití při návrzích jsou dobře zdokumentovány jeho vady a má také dobrou softwarovou podporu (dostupnost již napsaných knihoven a aplikací). Vzhledem k tomu, že mikrokontrolér disponuje dedikovanými instrukcemi pro FFT (motýlkový algoritmus - butterfly computation) a autor práce má již s tímto mikrokontrolérem praktickou zkušenost, byl zvolen pro návrh právě ten. Příslušné interní (obvod, nacházející se uvnitř zvoleného modulu) blokové schéma mikrokontroléru je na obrázku 5.2.

Přípona U u modelové verze zvoleného mikrokontroléru (ESP32-S3-WROOM-1U-N16R), značí verzi kompatibilní s IPEX (micro SMA) anténou (standardně je anténa integrována na integrovaném DPS). Ta byla zvolena s ohledem na parazitní rušení v průmyslovém prostředí a tedy potřebou použít kovovou (stíněnou) mechanickou krabici, která zdroj bezdrátového signálu za normálních okolností odstíní. Signál bezdrátového vedení byl následně veden pomocí koaxiálního kabelu do SMA

konektoru, připevněného na zevní část krabice a na který bude možné připojit externí anténu s volitelnými parametry (více v kapitole 6.2).



Obr. 5.2: Blokové schéma MCU ESP32-S3-WROOM-1U-N16R2 [12]

Důležité parametry kontroléru pro aplikaci datového koncentrátoru jsou v seznamu níže.

- Dvou-jádrový procesor Xtensa® dual-core 32-bit LX7.
- Až 36 GPIO (General Purpose Input Output - univerzální vstupně výstupní pin).
- 384 kB ROM.
- 512 kB SRAM.
- 16 MB Flash paměti.
- Rozsah provozní teploty -40 až 85 °C.
- Dva 12 bit integrované ADC (multiplexováno až do 20 kanálů).
- Dvě TWI rozhraní.
- Čtyři SPI rozhraní.
- Tři UART rozhraní.

- Podpora IEEE 802.11 b/g/n.
- Podpora Bluetooth LE v5.0.

Jednotlivé interní periferie mikrokontroléru lze díky pokročilému multiplexoru namapovat na jakýkoliv GPIO pin (GPIO Matrix). Takové řešení má však nevýhodu v tom, že komunikační linky uvnitř mikropočítače vedou přes větší množství obvodů, které pak omezují propustnost komunikace. Proto jsou vybrané komunikační periferie a jejich linky připojeny přes tzv. IO-MUX, který vede linky „kratší“ cestou a podporuje plnou propustnost komunikace. Nevýhodou je, že linky vedené přes IO-MUX nelze namapovat na kterýkoliv pin mikrokontroléru a jsou pevně vázány na konkrétní piny mikrokontroléru. [13]

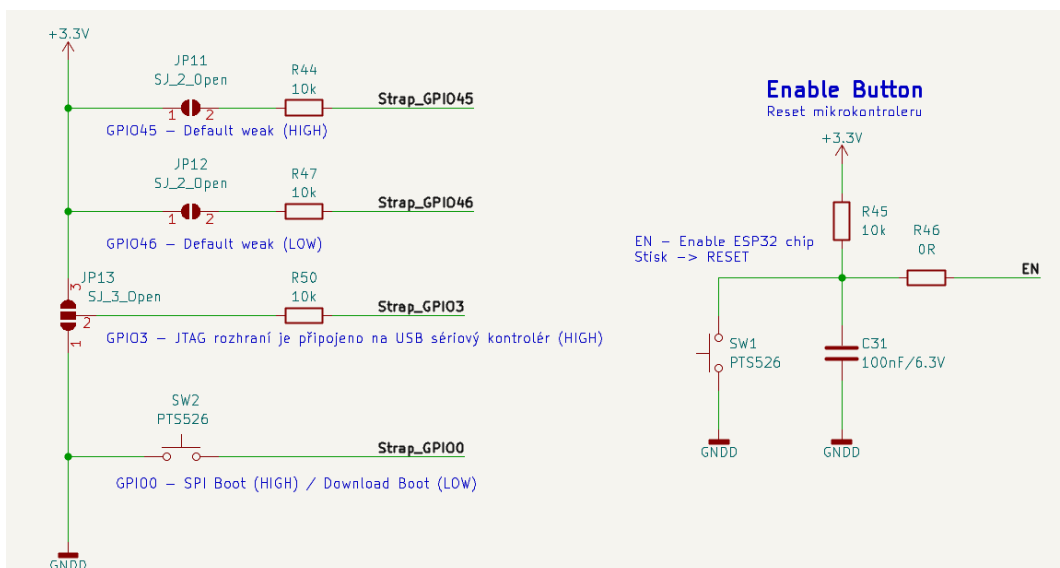
5.3.2 Konfigurace

Inicializační konfigurace elementárních funkcí mikrokontroléru ESP32-S3 je možná hardwarově pomocí výrobcem zadaných konfiguračních pinů (tzv. „strapping pinů“). Celý proces probíhá tím způsobem, že při resetu mikrokontrolér snímá napěťové úrovně na čtyřech konfiguračních pinech a podle jejich kombinace současně s kombinací softwarových konfiguračních registrů (eFuse_1, eFuse_2, eFuse_3) nastaví příslušné parametry (viz technický manuál [13]). Po dokončení resetu se chovají konfigurační piny jako piny standardní tak, aby zbytečně nesnižovaly efektivní počet pinů mikrokontroléru.

Na desce data koncentrátoru se pro zmíněnou možnost dají konfigurační piny připojit na logickou hladinu (jinou než je ve výchozím stavu) pomocí pájecích propojek („solder jumper“). Jedinou výjimkou je konfigurační pin GPIO0 který se ovládá tlačítkem „BOOT“, z důvodu častého použití při nahrávání firmwaru. Pokud je zmíněné tlačítko stisknuto během resetu, mikrokontrolér se přepne do režimu „download“, ve kterém je možné nahrávat uživatelský kód do flash paměti. Pokud je mikrokontrolér v standardním SPI módu, CPU si načte program z interní flash paměti. Reset mikrokontroléru je možné provést pomocí přidržení tlačítka „RESET“ na desce koncentrátoru. Zapojení všech konfiguračních pinů je ve schématu na obrázku 5.3.[13]

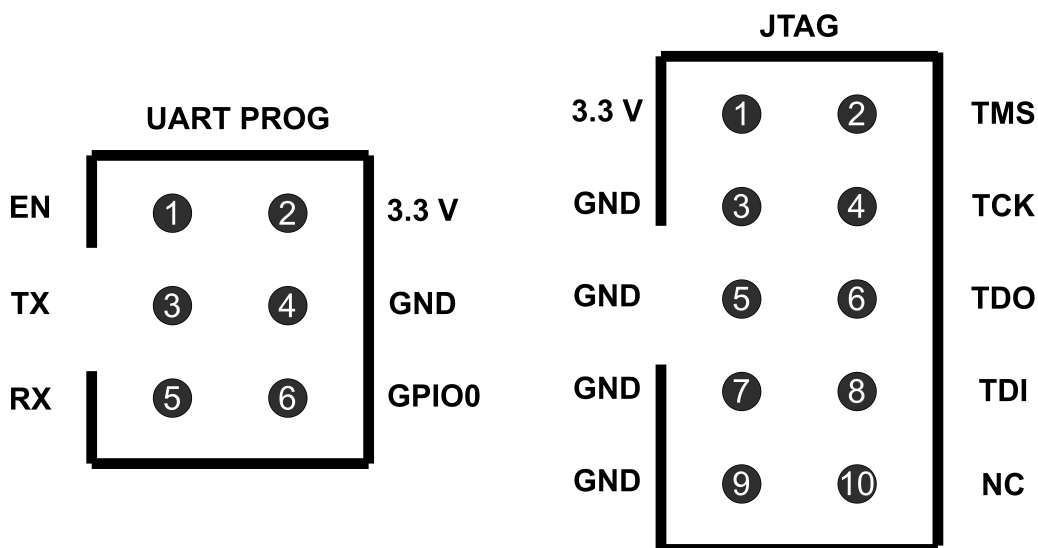
5.3.3 Programování

Programování MCU je možné dvěma způsoby, buď pomocí integrovaného USB (Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice) rozhraní, které je napojené na interní převodník USB serial/ JTAG (Joint Test Action Group - standardizované programovací/ladící rozhraní), a nebo pomocí externího programátoru „ESP Prog“. Ačkoli je možné zvolit pouze jednu z variant, v rámci obvodového zapojení byly realizovány



Obr. 5.3: Schéma zapojení konfigurační části MCU

obě. Pro připojení programátoru byly vyhrazeny dva konektory, a to UART Prog (podporuje flashování a logování konzole) a JTAG (podporuje ladění). Oba konektory jsou kompatibilní s napětím 3.3 V a jejich vývodové zapojení je na obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Vývodové zapojení konektorů UART Prog (nalevo) a JTAG (napravo)

Programovací konektor pro UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter - sériové asynchronní) je možné po fázi programování využít k připojení rozšiřujících periférií, avšak programovací konektor pracuje jak na komunikačních pinech (RX, TX), tak na pinech napájecích s napětovou úrovní 3.3 V. Proto aby bylo

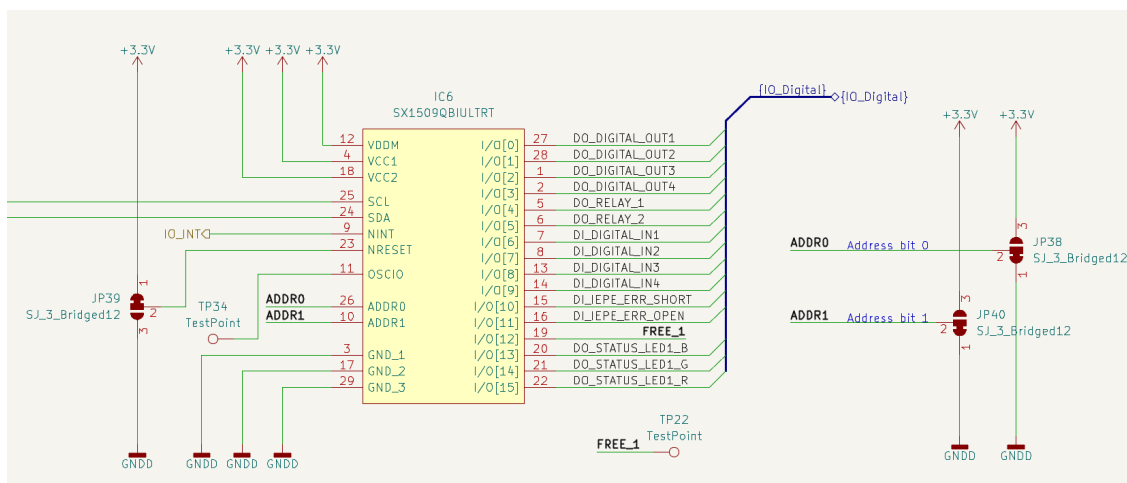
možné připojit zařízení pracující s TTL (Transistor-Transistor Logic - tranzistorově-tranzistorová logika) logikou, byl na stejnou periférii MCU (UART0) navrhnut pří-
způsobovač napětí (level shifter) právě pro TTL logiku (5 V) (obvod SN74LVC1G14).
Oba konektory tedy nelze používat současně. Aby bylo možné použít konektor
UART_PROG, je nutné ponechat přízpůsobovač napětí odpojený, jinak by mohlo
jít připojené zařízení do zkratu. To je možné pomocí dvojice pájecích propojek JP41
a JP42. Všechny výše diskutované varianty konektorů mají standardní rozteč pinů
2,54 mm.

5.3.4 IO expander

Jelikož mikrokontrolér nedisponuje potřebným počtem vstupů a výstupů pro ob-
sluhu celé desky data koncentrátoru, bylo nutné jej doplnit „rozšiřovač“ digitální
vstupů/výstupů. Takové řešení je možné realizovat pomocí posuvného registru (např.
SN74HCS595) a nebo obvodem pojmenovaným jako „IO Expander“, který podpo-
ruje pokročilé funkce. Typ shift registru pro zmíněnou aplikaci je vhodné zvolit jako
sériovo/paralelní, kdy do obvodu vstupuje sériová komunikace a obvod ji převede na
paralelní. Nevýhodou takového řešení je, že pracuje pouze v režimu digitálních vý-
stupů, což neodpovídá požadavkům, jelikož je potřeba obsluhovat i digitální vstupy.
Proto byl zvolen IO Expander SX1509QB od výrobce Semtech, který komunikuje
přes rozhraní I2C a obsahuje až 16 volitelně konfigurovatelných vstupně/ výstup-
ních pinů. Jeho výhodou je to, že obsahuje integrovaný LED (Light Emitting Diode
- elektroluminiscenční dioda) kontrolér a není potřeba například „blikání“ LED ře-
šit programově v MCU. Další pozitivní vlastností je možnost obsluhovat přerušování
u vstupů a zároveň provést debouncing (ošetření vstupů před zákmity). Při zazna-
menání logické úrovně na volitelném vstupu se nastaví do log.0 pin NINT, který
je spojen s MCU pinem GPIO46. Mikrokontrolér následně programově vyčte, jaký
vstup na IO Expanderu byl aktivován/ deaktivován.

Zapojení IO Expanderu bylo doplněno o trojici pájecích propojek (JP39, JP38,
JP40)¹. Pájecí propojkou JP39 se ovládá reset obvodu a pájecími propojkami JP38
a JP40 se konfiguruje fyzická adresa (viz technický list [14]) na I2C sběrnici. Při
výchozí konfiguraci pájecích propojek je fyzická adresa 0x0E. Jelikož je pro taktování
použit interní 2 MHz oscilátor, je možné pin určený pro připojení externího oscilátoru
použít jako standardní vstup/výstup (připojen na testovací kontakt TP34). Zapojení
IO Expanderu je na obrázku 5.5.[14]

¹Pozor na spojení kontaktů 1 a 3, v takovém případě by došlo ke zkratu napájení



Obr. 5.5: Schéma zapojení IO Expanderu

5.3.5 Ovládání

Jelikož při konstrukci vyvstaly požadavky na signalizaci stavu nebo uživatelský zásah do volby módu data koncentrátoru, byly v rámci jeho konstrukce integrovány základní signalizační a ovládací prvky.

Signalizační prvek tvoří jedna stavová RGB LED řízená IO Expanderem (odstavec 5.3.4), která za úkol signalizovat párovací či poruchové stavy (např. párovací mód data koncentrátoru, zkrat na IEPE nebo nepřipojený snímač k IEPE).

Uživatelské ovládání koncentrátoru je zajištěno čtveřicí tlačítek (RESET, BOOT, BUTTON_1, BUTTON_2). Tlačítko „BOOT“ a jeho funkce v roli inicializační konfiguraci byla již dříve popsána (kapitola 5.3.2). Po inicializační fázi je tlačítko možné použít k libovolné uživatelsky definované funkci.

5.3.6 USB 2.0

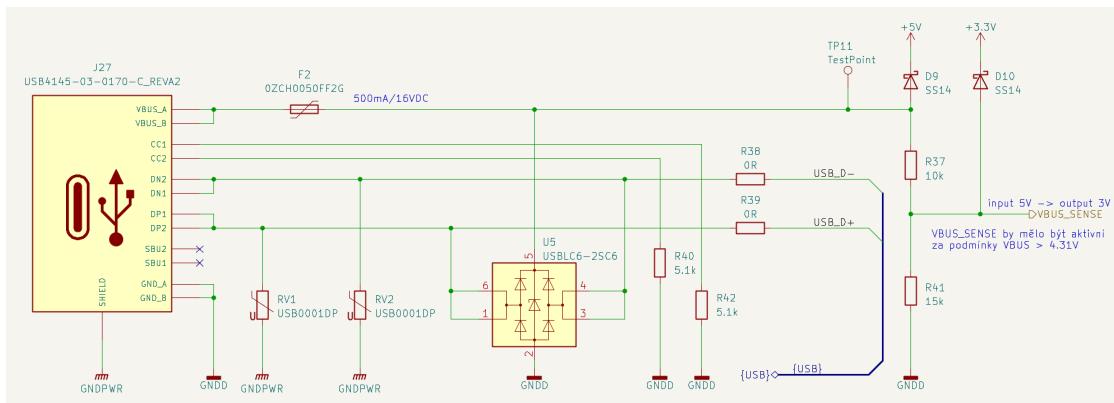
Rozhraní USB (jak již bylo nastíněno v kapitole 5.3.2) je u mikrokontroléru EPS32-S3 nativně podporováno. Kromě úlohy programování mikrokontroléru lze rozhraní USB použít i v režimu OTG (On The Go - specifikace umožňující USB zařízení použít v režimu hosta), ve kterém je k němu možné připojit např. externí paměťová zařízení.

Zapojení rozhraní (viz obrázek 5.6) je doplněno o ochranu proti ESD (Electrostatic Discharge - elektrostatický výboj). Samotnou ochranu v první části (blíže konektoru) zajišťuje dvojice polymerových vícevrstvých varistorů (MLV), které mají oproti standardním varistorům (např. MOV (Metal Oxid Varistor) nízkou parazitní kapacitu a hodí se tedy pro použití u zajišťující digitální komunikaci[15]. Zmíněné

varistorové ochrany omezí napětí přibližně na 120 V[16]. Standardně je zbývající energie odvedena integrovanými TVS (Transient Voltage Suppression - polovodičová ochrana před ESD) diodami, ale jelikož nebyla informace o instalaci na konkrétním vstupu MCU nalezena, byla tato ochrana zvolena externí (USBLC-6). Volba jednotlivých ochran je v souladu s obecnými návrhovými pravidly tak, aby při ESD výboji nebyly překročeny absolutně maximální limity chráněného obvodu (viz aplikační poznámka[17]). Důležité parametry pro selekci vhodné TVS ochrany:

- V_{RM} (Reverse Standoff Voltage - provozní napětí),
- V_{BR} (Reverse Breakdown Voltage - průrazné napětí),
- V_{CL} (Clamping Voltage - upínací napětí při špičkovém proudu),
- I_{PP} (Peak Pulse Current - špičkový proud).

Stínění konektoru a varistorové ochrany jsou připojeny k výkonové (poruchové) zemi, to umožní potenciální velký svodový proud odvést od citlivých obvodů. Zároveň ochrana pomocí TVS diod je připojena na digitální zem společně s mikrokontrolérem, a to tak, aby omezila napětí na vstupech obvodu a nezapočítávala superponované napětí vzniklé průchodem poruchového proudu přes zemní cestu.



Obr. 5.6: Schéma zapojení USB 2.0

Jelikož je při zapojení použit konektor typu USB-C, je nutné u konektoru připojit piny CC1 a CC2 pomocí rezistorů k zemi. Takto realizovaná konfigurace určuje, že je zařízení typu „Upstream-facing port“ a hraje tedy roli hosta na USB sběrnici. Dále tyto piny slouží pro definování hodnoty proudu, kterou může „hostitel“ do připojeného zařízení dodávat a také k identifikaci aktivního páru diferenciálních linek (DP1/DP2, DN1/DN2). Pro detekci připojeného zařízení je dle standardu USB nutné na linkách (VBUS_A, VBUS_B) sledovat napětí. V případě, kdy je splněna

podmínka $U_{VBUS} \geq 4,31 \text{ V}$, USB rozhraní detekuje přítomnost připojeného zařízení. Snímání napětí VBUS je realizováno pomocí integrovaného ADC v MCU a napěťového děliče s přenosem $A_u = 0.6$ vzhledem k velikosti snímaného napětí a 3,3 V toleranci vstupů mikrokontroléru. Zapojení je doplněno o ochranu diodu D10, která v případě většího napětí, než je napájecí napětí MCU, odvede přebytečnou energii do napájecího zdroje.

Rozhraní obsahuje vratnou polovodičovou pojistku PTC (Positive Temperature Coefficient - termistor s pozitivním teplotním koeficientem) dimenzovanou na proud 500 mA (parametr „Hold Current“), která funguje na principu samoohřevu. Princip samoohřevu je takový, že s narůstajícím proudem roste výkonová ztráta na součástce, ta se zahřívá a zvýšení teploty se kladně projeví na vlastním odporu, což implikuje opětovné zvýšení tepelné ztráty na součástce (kladná zpětná vazba).

5.4 Komunikační rozhraní

Následující kapitola popisuje dvě komunikační rozhraní RS-485 a Ethernet, které jsou určeny pro drátové spojení s externími snímači popřípadě se sítí LAN. Obě konstrukce jednotlivých rozhraní jsou popsána v odstavcích níže a vychází z koncepčních požadavků nastavených v kapitole 2.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.3, zařízení disponuje také bezdrátovými rozhraními, ty však nebudou v rámci kapitoly obsaženy.

5.4.1 RS-485

Rozhraní standardu RS-485 bylo vybráno pro funkci připojení externích snímačů. Důvod jeho volby je především robustnost vůči rušení (diferenciální princip), rozšířenost v průmyslových aplikacích a jednoduchá implementace. Další výhodou je, že RS-485 tvoří hardwarovou vrstvu pro řadu průmyslových protokolů např. ModBus RTU nebo Profibus.

Výběr

Cílem bylo najít obvod transceiver (vysílač a přijímač), který převádí standardní UART na RS-485. Důležitým požadavkem při výběru bylo, aby bylo rozhraní galvanicky izolované od data koncentrátoru (vznik parazitních zemních smyček). Pro komunikaci bylo stanoveno, že dostačuje režim half-duplex.

Vzhledem k požadavku na galvanické oddělení je nutné transceiver z izolované strany napájet. Jelikož je však navrhované zařízení primárně určeno v rámci komunikace jako „MASTER“ je předpokládáno, že napájení pro zařízení na sběrnici bude

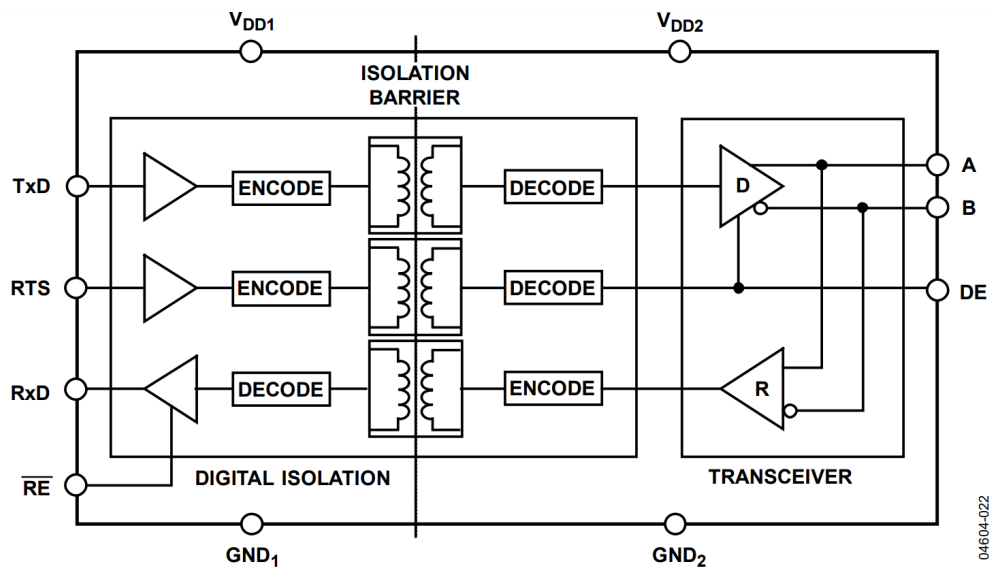
poskytovat právě ono. Nabízí se proto dvě konstrukční varianty. První varianta integruje izolovaný zdroj přímo v obvodu transceiveru. Varianta druhá počítá externím izolovaným zdrojem (v rámci jedné DPS).

S ohledem na konstrukční náklady byla prvně zvolena první varianta, obvod ISOW1432BD od Výrobce Texas Instrument. Pro obvod bylo navrženo kompletní rozhraní, ale během návrhu ostatních obvodových řešení se obvod stal nedostupným (nebyl u žádného dodavatele na skladě) a bylo nutné rozhraní přepracovat.

V druhé iteraci návrhu rozhraní bylo vybráno druhé koncepční řešení diskutováno výše, v závislosti na nedostupnosti vhodných obvodů. Tentokrát byl vybrán obvod od výrobce Analog Device ADM2486, který je použit ve finálním návrhu rozhraní.

Konstrukce

Schéma zapojení rozhraní je na obrázku 5.8. Vybraný obvod ADM2486 je galvanicky izolovaný (technologie iCoupler) transceiver, který náleží do kategorie half-duplex transceiverů. Jeho blokové schéma je na obrázku 5.7. Obvod podporuje PROFIBUS a dosahuje přenosových rychlostí až 20 Mbps.



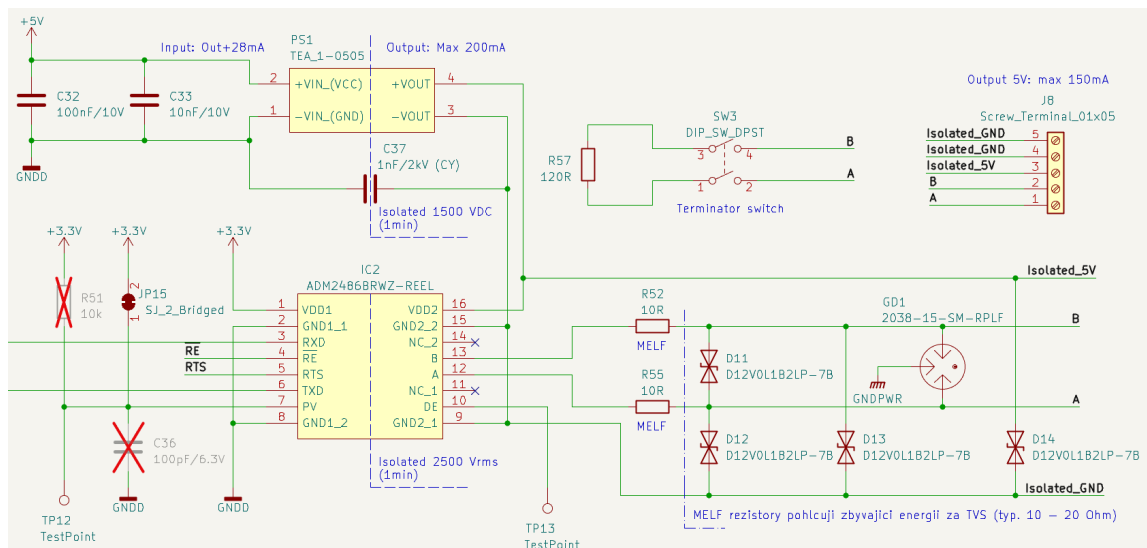
Obr. 5.7: Blokový diagram RS-485 transceiveru ADM2486 [18]

Jak bylo diskutováno v minulých odstavcích, obvod potřebuje doplnit o galvanicky izolované napájení, pro tento účel byl vybrán DC/DC převodník (converter) TEA 1-0505 od výrobce Traco Power, který převádí vstupní napětí 4,5 VDC až 5,5 VDC na výstupní napětí o úrovni 5 VDC. Maximální proudová zatížitelnost je určena výrobcem na 200 mA a její překročení hlídá interní proudová pojistka [19]. Paralelně k DC/DC převodníku mezi galvanicky oddělenou a neoddělenou část byl

umístěn odrušovací kondenzátor C37 o kapacitě 1 nF. Kondenzátor tvoří pro vysokofrekvenční rušení zkrat a odvede ho do země na izolované části zdroje. Výstupní izolované napětí je přivedeno na izolovanou stranu transceiveru a zároveň je vyvedeno na výstupní svorky pro RS-485 rozhraní. Takové řešení bylo zvoleno vzhledem k tomu, že se počítá s napájením externích snímačů (připojených zařízení). Proudový odběr transceiveru na výstupní straně byl výrobcem určen (dle katalogového listu[18]) při rychlosti 20 Mbps na 58 mA. Zbývající rezervu 140 mA lze využít pro napájení externích zařízení.

Na vstupy obvodu transceiveru byly implementovány následující typy ochran. Ochrana proti přepětí GDT (Gas Discharge Tube - bleskojistka) GD1 omezující napětí vůči poruchové zemi na přibližně 150 V a ochrany proti ESD (TVS diody D11, D12, D13, D14). Dle doporučení v literatuře[15] byly za TVS diody přidány rezistory o nominální hodnotě odporu 10 Ω, které pohltí zůstatkovou energii za TVS diodami. Rezistory byly zvoleny v pouzdře MELF, jelikož je jejich jmenovitý povolený ztrátový výkon větší (400 mA) oproti rezistorům ve standardním SMD (Surface Mount Device - zařízení určené pro povrchovou montáž) pouzdře.

Výstupní rozhraní je také doplněno o dedikovanou svorku pro stínění. Svorka je označena nápisem „SHIELD“ na DPS průmyslového data koncentrátoru.

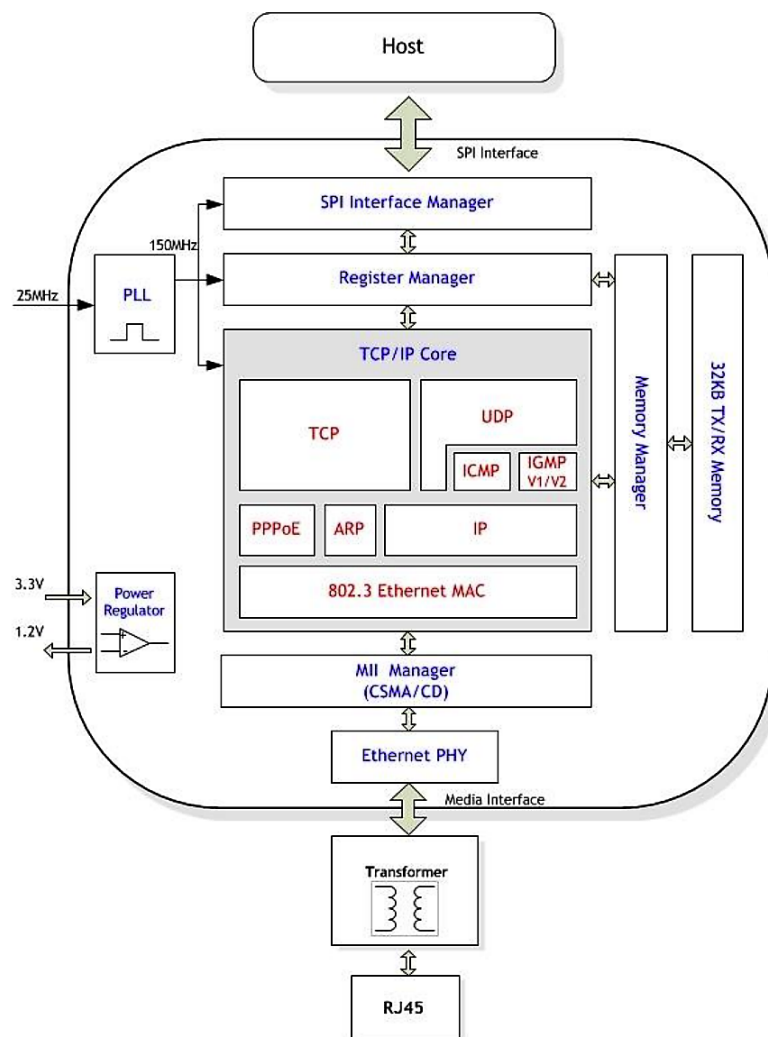


Obr. 5.8: Schéma zapojení rozhraní RS-485

5.4.2 Ethernet

Úkolem rozhraní Ethernetu je zprostředkovat připojení průmyslového data koncentrátoru (mikrokontroléru ESP32-S3) do vnější sítě.

Volba komponent v rámci rozhraní vychází především z faktu, že zvolený mikrokontrolér (ESP32-S3) nedisponuje žádným ze standardně používaných rozhraní (MII, RMII, GMII) pro připojení fyzické vrstvy Ethernet PHY (Physical layer - fyzická vrstva) s vrstvou linkovou (dle ISO/OSI). V závislosti na tom byl vybrán fast ethernet kontrolér (100BASE-TX) od společnosti WIZnet W5500 (blokový diagram viz obrázek 5.9), který se připojuje přes rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface - sériové periferní rozhraní) a nahrazuje celý řetězec od vrstvy fyzické až po vrstvu transportní. Nevýhoda zmíněného řešení je, že transport dat přes ethernetový kontrolér má v porovnání se zmíněnou konstrukcí zvýšenou latenci a omezenou přenosovou rychlost. Důvodem je, že kontrolér data, která nestihne zpracovat, uloží do interní paměti (32 kB), ze které se následně data se zpožděním zpracovávají[20].



Obr. 5.9: Blokový diagram obvodu W5500[20]

Kompletní schéma zapojení Ethernetového rozhraní je z důvodu velikosti zapo-

jení v příloze C.9.

Zapojení tvoří dva základní prvky, kontrolér W5500 a konektor RJ45 (Abracon ARJM11C7-009) s integrovaným magnetickým modulem (galvanická izolace). Součástí konektoru je také zakončovací obvod typu „Bob Smith“, který pomáhá potlačit rušení, sníží impedanci kabelu a vyváží zakončovací impedance jednotlivých diferenciálních párů. Uvnitř konektoru (viz obrázek 5.10) ho reprezentují čtyři rezistory o hodnotě 75Ω [21]. Dále je konektor vybaven dvěma symetricky proudově kompenzovanými tlumivkami (common mode choke), které tlumí souhlasné rušení, které je při diferenciálním vedení vodičů umocněno[15].

Propojení RJ45 konektoru a Ethernetovým kontrolérem je realizováno dle katalogového listu[20]. Zapojení je pouze navíc doplněno o čtveřici unipolárních TVS diod integrovaných v jednom pouzdře (D23), určených právě pro zmíněnou aplikaci.

Pro vynucení volby rychlosti připojení má Ethernetový kontrolér tři fyzické konfigurační piny (PMOD0, PMOD1, PMOD2). Ve výchozím stavu jsou interně připojeny na pull-up rezistory, proto byl každý z pinů ve schématu doplněn o volitelně osaditelné pull-down rezistory (R83, R84, R85), které jsou ve schématu označeny „přeskrtnutím“ za pomoci červeného kříže. Takové označení v celém schématu značí, že součástka nebyla osazena, ale byla zařazena do návrhu DPS. Pokud není žádný s konfiguračních rezistorů osazen, hladiny konfiguračních pinů jsou automaticky nastaveny na hladiny výchozí (log.1), díky kterým je nastaven mód pro automatickou detekci komunikační rychlosti.

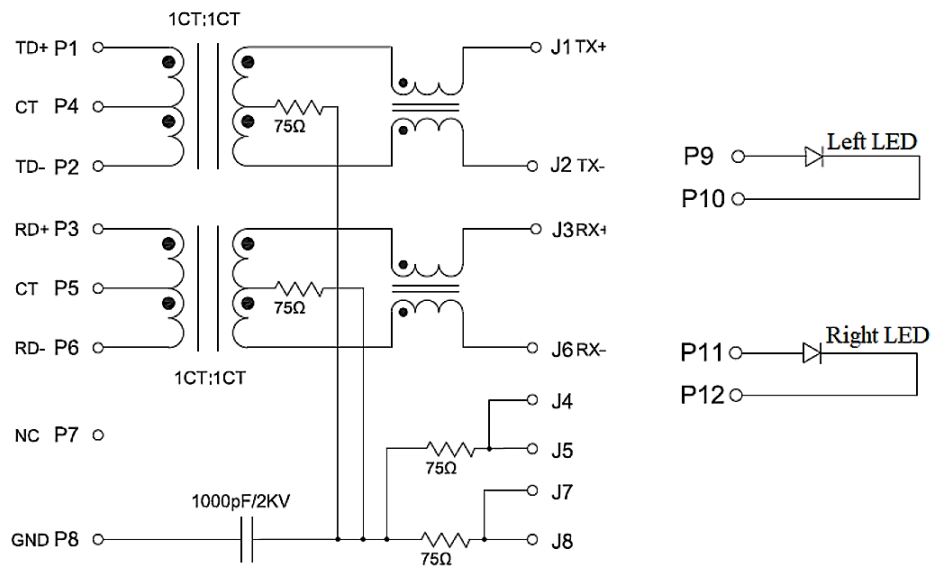
Připojení Ethernetového mikrokontroléru s MCU je realizováno za pomoci sběrnice SPI2, která je společná s IEPE rozhraním, z důvodu kompatibility s větší komunikační frekvencí (20 MHz). Dále je připojen vodič přerušení ET_INT (GPIO46) a vodič určen pro reset Ethernet kontroléru ET_RESET (GPIO6).

5.5 Interní snímač teploty a vlhkosti

Interní snímač teploty a vlhkosti byl implementován specificky za účelem monitorování teploty a relativní vlhkosti uvnitř mechanické konstrukce.

Monitorování teploty je vhodné pro teplotní kompenzaci teplotního driftu citlivých součástí data koncentrátoru jako je např. napěťová reference ADC. Další nespornou výhodou je hlídání provozní teploty zařízení a určení, jestli se zařízení nachází v prostoru mimo povolený provozní teplotní rozsah stanovený na interval $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ až $85 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokud provozní teplota překročí stanovenou mez, je možné, aby to zařízení signalizovalo a případně vypnulo některé periferie.

Monitorování vlhkosti bylo zvoleno s ohledem na použití zařízení v nízkých teplotách, které se při oteplení obvodů projeví kondenzací vody, jenž může způsobit oxidaci kontaktů a následné zničení celého data koncentrátoru. Pokud by se v reálné



Obr. 5.10: Zapojení RJ45 konektoru ARJM11C7-009 [21]

aplikaci ukázalo, že je kondenzace vody problém, je možné to zohlednit při návrhu a zařízení doplnit o instalaci vyhřívacího článku. V praxi se takové řešení realizuje pomocí výkonových rezistorů (nejčastěji drátových) a nebo se v jedné interní vrstvě DPS natáhne dlouhá vodivá cesta, která vytvoří odporový drát. Cestu je dobré navrhnu tak, aby tvořila tzv. „bifilární vinutí“ a zabránilo se tedy případnému indukovaní parazitního signálu.

Pro úlohu monitorování teploty a vlhkosti byl zvolen polovodičový snímač HTU21D od výrobce TE connectivity. Snímač komunikuje s MCU pomocí komunikačního rozhraní I2C0. Při výběru snímače je možné volit mezi dvěma verzemi. Rozdíl mezi verzemi je absence PTFE filtru, který je instalovaný na okénku pro snímač vlhkosti a brání vniku nečistot. Jelikož je snímač nainstalován uvnitř krytu zařízení, byla zvolena verze bez ochranného filtru. Teplotu snímač dokáže měřit v rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ s maximálním rozlišením $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesností $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Parametry snímače vlhkosti jsou: rozsah RH (Relative Humidity - relativní vlhkost vzduchu) 0 % až 100 %, rozlišení 0,04 % RH, přesnost 2 % RH.[22]

5.6 Digitální vstupy a výstupy

Tato kapitola se zabývá návrhem digitálních rozhraní pro průmyslový data koncentrátor. Kapitola obsahuje částečná schémata zapojení vzhledem k jejich velikosti. Celková schémata jsou obsažena v příloze. Všechny digitální periferie jsou ovládány pomocí IO Expanderu, popis jeho konstrukce a zapojení je v kapitole 5.3.4.

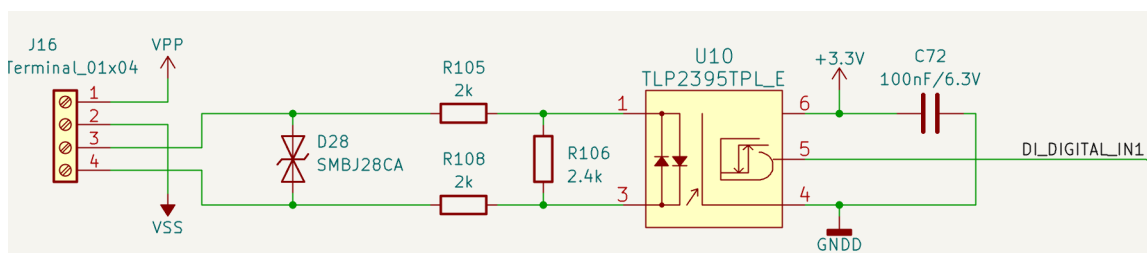
5.6.1 Digitální vstupy

Požadavkem na digitální vstupy bylo, aby podporovaly standardní průmyslové snímače s digitálním výstupem, zaručovaly kompatibilitu s 24 VDC systémem a byly galvanicky izolované. V průmyslu se dle zvyklosti dělí I/O na typ „sink“ a „source“. Tato zvyklost určuje, na jaké polaritě (pólu) zdroje se snímač spíná, respektive jaká svorka je společná (pro snímač a digitální vstup). Pro vstup typu „sink“ je společný záporný pól zdroje a snímač v aktivním stavu spíná na digitální vstup kladnou svorku napájecího zdroje. U zvyklosti typu „source“ je popsána logika opačná.

V případě digitálních vstupů PLC (Programmable Logic Controller - programovatelný logický automat) je volba zvyklosti pro celou kartu jednotná a čtenější zastoupení má vstup typu „sink“. Jelikož byl při definování požadavků na data koncentrátor kladen důraz na modularitu, navržené rozhraní je pro každý vstup nezávislé a je možné použít oba popsané principy.

Pro realizaci univerzálních digitálních vstupů byl vybrán obvod TLP2395 od výrobce Tohiba (optočlen s integrovaným výstupním bufferem a Schmittovým obvodem). Výrobce tento obvod klasifikuje jako vhodný pro aplikaci PLC, jejichž konstrukci se modul digitálních vstupů snaží přiblížit. Na vstupu optočlenu se nacházejí dvě antiparalelně zapojené diody, díky nimž nezávisí na polaritě přiváděného signálu.[23]

Vstup obvodu je následně doplněn o ESD a přepětovou ochranu tvořenou bipolární TVS diodou a o napěťový dělič nezávislý na polaritě napětí. Napěťový dělič byl doložen pro vhodné nastavení pracovního bodu volt-ampérové charakteristiky dle příslušné aplikační poznámky výrobce (viz aplikační poznámka[24]). Schéma zapojení pro jeden ze čtyř vstupů je na obrázku 5.11. Kompletní schéma zapojení digitálních vstupů je v příloze C.12.



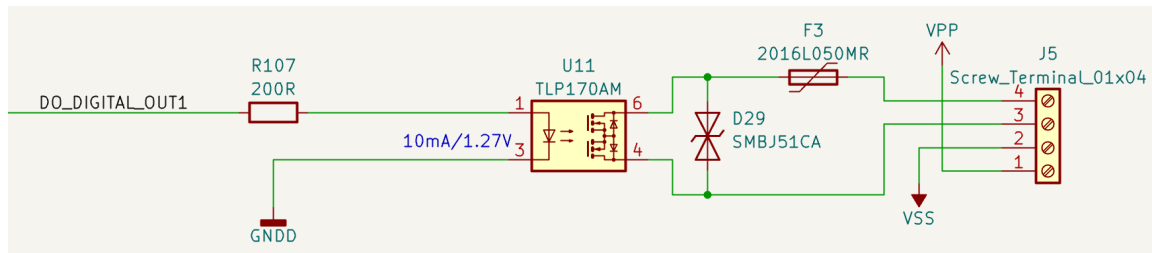
Obr. 5.11: Schéma zapojení digitálních vstupů

5.6.2 Digitální výstupy

Rozhraní digitálních výstupů je primárně určeno pro signalizaci akčních zásahů (vysoká úroveň vibrací), avšak je možné ovládat i přes webové rozhraní.

Stejně jako v kapitole 5.6.1 je zde požadavek na univerzalitu. Proto byl pro implementaci zvolen obvod TLP170AM, který funguje jako foto-relé (nezávisí na přivedené polaritě zátěže). Zapojení pro první výstup je na obrázku 5.12. Kompletní zapojení všech výstupů je poté v příloze C.12.

Proto aby nebyl přesažen maximální proudový limit (700 mA) výstupního tranzistoru, byla do obvodu přidána polovodičová pojistka (diskuse nad vhodnou volbou proběhla již v kapitole 5.3.6).[25]



Obr. 5.12: Schéma zapojení digitálních výstupů

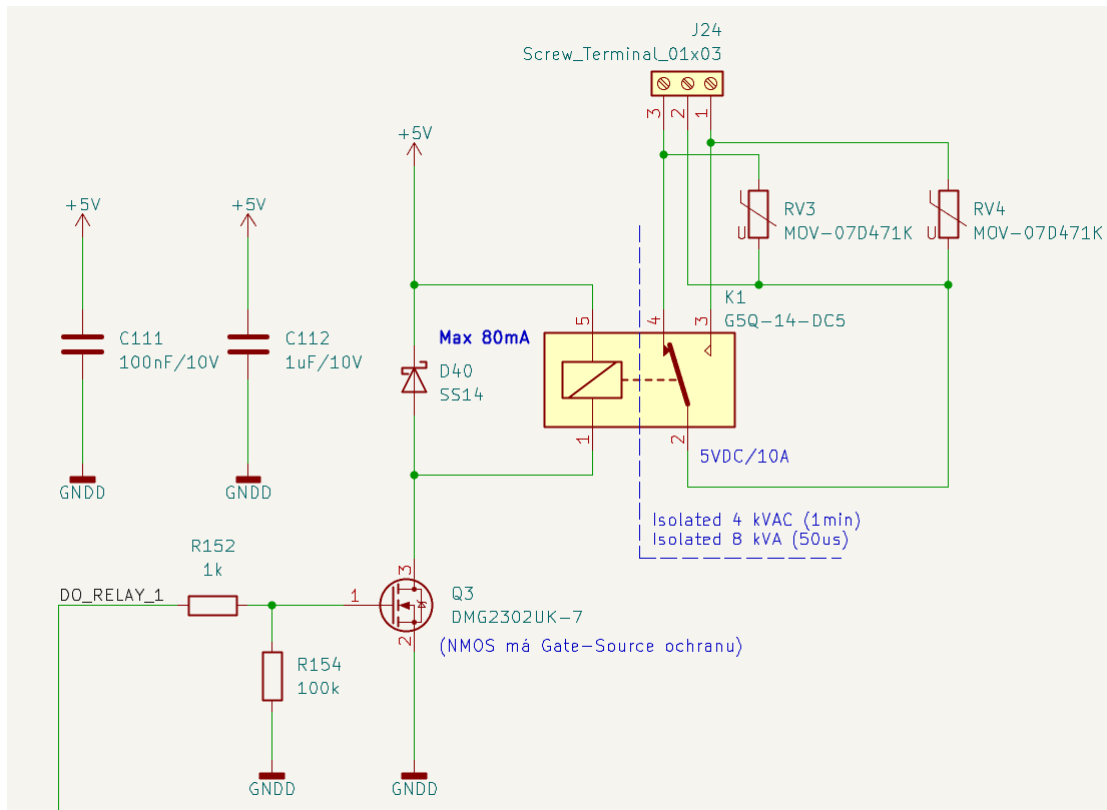
5.6.3 Výkonové výstupy

Dvojice výkonových výstupů je primárně určena pro spínání střídavé zátěže. Hlavní akční prvek tvoří standardní mechanické relé G5Q-14-DC5 s přepínacím kontaktem typu SPDT. Výstup relé je určen pro maximální trvalý proud 5 A. Pro případ, kdy by byla k výstupu připojena buď stejnosměrná a nebo induktivní zátěž, jsou výstupní kontakty chráněny proti oblouku a opalování kontaktů pomocí MOV, které zvýšené napětí kontaktech svede. Spínání relé zajišťuje NMOS tranzistor, (tranzistor řízený elektrickým polem) který je proti proražení přechodu Drain-Source vysokým napětím (při odepnutí cívky od napájení) chráněn „flyback diodou“, která napěťový impulz pohltí. Schéma zapojení je na obrázku 5.13.

5.7 Analogové vstupy

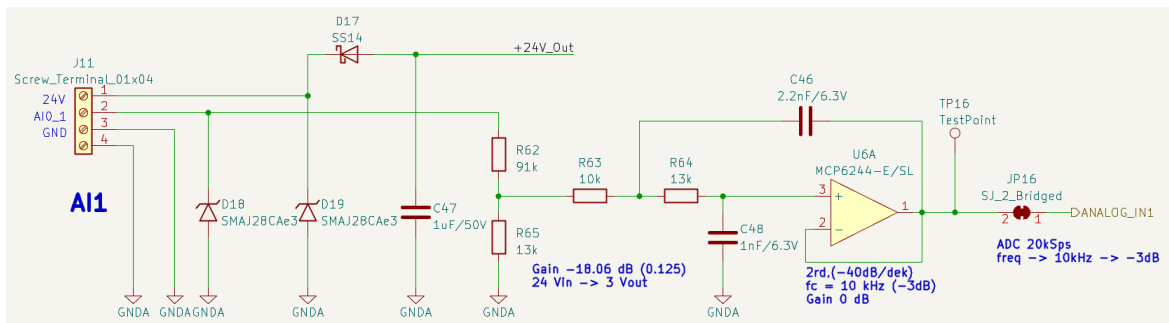
Analogové vstupy jsou primárně určeny pro připojení proprietárních snímačů (např. snímač otáček s Hallovým snímačem 4.1.2). Schéma zapojení pro jeden kanál ze tří je na obrázku 5.14.

Všechny vstupní analogové rozhraní jsou připojena na integrovaný ADC typu SAR (Successive Approximation - postupná aproximace) v MCU. V souladu s počtem analogových vstupů připojených k převodníku a jeho maximální vzorkovací



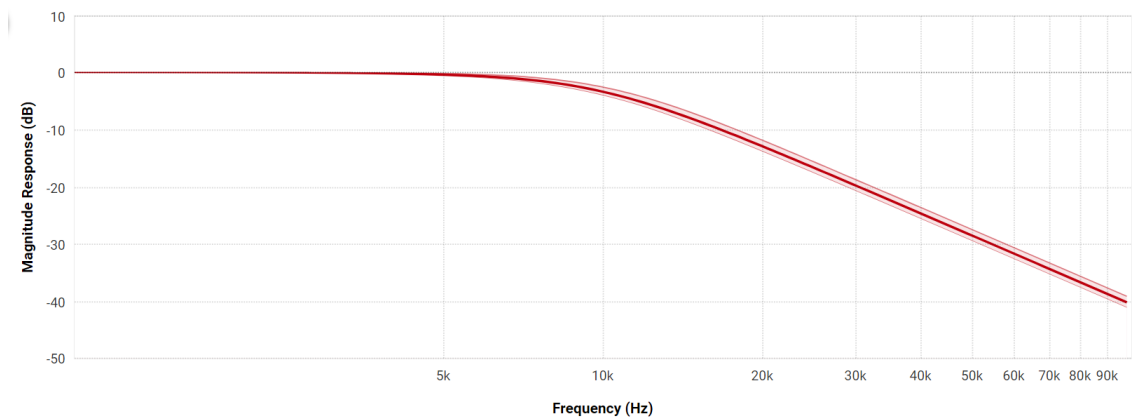
Obr. 5.13: Schéma zapojení výkonových výstupů

frekvenci (100 kSps) (RTC kontrolér, před multiplexorem) byla maximální vzorkovací frekvence pro jedno analogové vstupní stanovena na 20 kSps. Jelikož není integrovaný ADC opatřen anti-aliasing filtrem, bylo nutné ho implementovat dedikovaně. Filtr byl implementován jako aktivní (operační zesilovač MCP6244) a byla zvolena topologie „Sallen-Key“. Tato topologie umožňuje pomocí jednoho operačního zesilovače zkonstruovat filtr druhého řádu (dolní propust). Návrh proběhl v programu „Filter Design Tool“ od Texas Instrument.



Obr. 5.14: Schéma zapojení analogových vstupů

Jak již bylo zmíněno, pro jeden analogový vstup je vyhrazena vzorkovací frekvence maximálně 20 kSps. Proto, aby nedocházelo k aliasing efektu, musí být splněn Nyquistův-Shannonův vzorkovací teorém, tedy musí být splněna podmínka $f_{vz} \geq 2f_{max}$, ze které vychází $f_{max} \leq 10\text{kHz}$. Analogový filtr byl navržen dle požadavků: propustné pásmo $F_c = 10\text{ kHz}$ (při útlumu -3 dB), filtr druhého řádu s útlumem -40 „dB/dek“, zesílení 1. Výsledná navržená logaritmická amplitudová frekvenční charakteristika (LAFCH) v programu Filter design Tool je na obrázku 5.15. Na obrázku je také vidět Monte-Carlo analýza vlivu změny parametrů filtru při 5 % (E24) toleranci pasivních prvků v zapojení na výstupní charakteristiku.



Obr. 5.15: LAFCH navrženého anti-aliasing filtru

Externí zapojení neumožňuje měnit programově útlum vstupního rozhraní, to je ale možné pomocí integrovaného attenuátoru v MCU. Ten je v MCU integrován z důvodu volby nemožnosti připojit externí referenci ADC. Mikrokontrolér místo toho obsahuje referenci integrovanou o referenčním napětí přibližně 1,1 V. Hodnota je brána jako „přibližná“, jelikož se kus od kusu MCU mírně liší a výrobce ji deklaruje pouze pomocí statistického ukazatele (mediánu). Výrobce proto doporučuje pro přesné měření kalibraci reference, jejíž postup je popsán viz referenční manuál[13]. Možnosti nastavení attenuátoru a odpovídající vstupní napěťový rozsah je v tabulce 5.1.

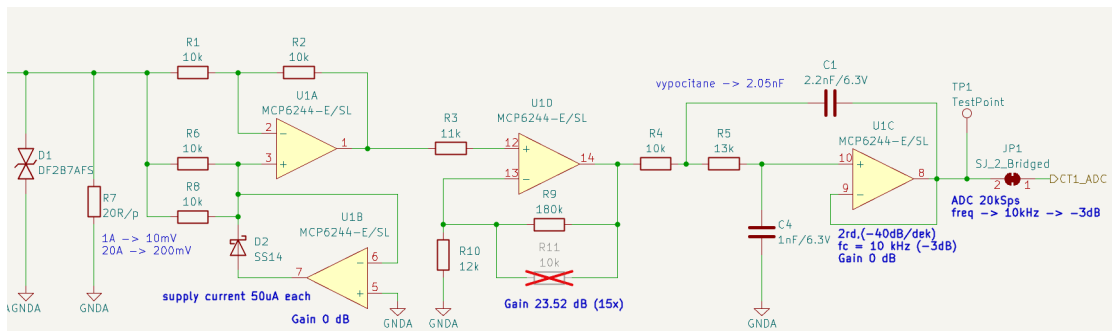
5.8 Měření proudu

Kapitola se zabývá problematikou implementace rozhraní pro proudové transformátory. Rozhraní se skládá ze tří nezávislých kanálů tak, aby bylo možné měřit proud třífázově. Následující popis principu, obvodového zapojení a součástek se vztahuje

Tab. 5.1: Volitelné útlumy integrovaného ADC (viz programová příručka [26])

Makro registru (ESP-IDF)	Útlum [dB]	Napětový rozsah ADC vstupu [mV]
ADC_ATTEN_DB_0	0	0 ~ 950
ADC_ATTEN_DB_2_5	2,5	0 ~ 1250
ADC_ATTEN_DB_6	6	0 ~ 1750
ADC_ATTEN_DB_11	11	0 ~ 3100

ke kanálu CT1. Ostatní kanály jsou identické, avšak obsahují jiné reference na součástky. Kompletní schéma zapojení je obsaženo v příloze C.2.



Obr. 5.16: Schéma zapojení pro proudový transformátor

Prvně je signál (proudového charakteru) z proudového transformátoru převeden na napětí pomocí „burden“ rezistoru R7, ten je volen s ohledem na maximální výstupní napětí a ve většině případů je doporučen výrobcem proudového transformátoru v katalogovém listu. Následuje precizní usměrňovač, který má za úkol zdvojnásobit dynamický rozsah snímače. Potřeba zvětšit dynamický rozsah vychází z požadavku na přesnější hodnotu efektivního proudu vzhledem k omezenému rozlišení v MCU integrovaném ADC. Efektivní hodnota (RMS (Root Mean Square - efektivní hodnota) proudu je v MCU přepočítána pomocí standardního vzorce pro výpočet efektivní hodnoty:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_k^2}$$

kde:

I_{ef} je efektivní hodnota proudu,

I_k je k-tá hodnota proudu navzorkovaného diskrétního signálu,

N je celkový počet vzorků.

Efektivní hodnotu je této v aplikaci nutno dopočítávat z důvodu použití VFD, který nemusí mít vždy výstupní sinusový průběh (v závislosti na typu modulace). V takovém případě by po vynásobení naměřené střední hodnoty činitelem tvaru nemusela vypočtená hodnota odpovídat skutečnosti.

Při volbě finálního návrhu obvodového zapojení bylo bráno v potaz také zapojení s trueRMS převodníkem. To se však ve finální verzi nerealizovalo z důvodu vysokých pořizovacích nákladů na převodníky. Nejlevnějším dostupným převodníkem RTS/DC byl obvod (AD737JRZ) od výrobce Analog Devices s cenovkou 293 Kč bez DPH za kus (Mouser, aktualizováno 14.5.2023). Výhoda měření usměrněného průběhu proudu oproti řešení s trueRMS převodníkem je, že může být průběh hodnoty proudu v čase vizualizován.

To, proč byl v zapojení použit precizní usměrňovač s operačním zesilovačem je, že při standardním zapojení s diodovým usměrňovačem je v naměřeném průběhu viditelná „typická“ nelinearita (VA charakteristika diody). Jelikož data koncentrátor nedisponuje záporným napájecím napětím vhodným pro napájení operačních zesilovačů, bylo pro precizní usměrňovač zvoleno zapojení doporučené v knize „The Art of Electronics“ [27].

Realizované zapojení precizního usměrňovače (viz obrázek 5.16) funguje na principu změny operačního módu operačního zesilovače (invertující/neinvertující). V případě, kdy je napětí na vstupu kladné „připínací“ obvod tvořen operačním zesilovačem U1B a diodou D2 nijak nereaguje a operační zesilovač U1A pracuje v módu napěťového sledovače, pokud ale napětí na svorkách změní svoji polaritu, „připínací obvod“ na neinvertující vstup zesilovače U1A přivede kladné napájecí napětí a změní jeho mód na invertující zapojení.

Z důvodu, jelikož jsou operační zesilovače napájeny asymetrickým napětím, je nutné je vybrat typu rail-to-rail (MCP6244). Precizní usměrňovač má zesílení 0 dB, proto byl za něho zařazen neinvertující zesilovač s volitelným zesílením. Celá kaskáda rozhraní proudového transformátoru je zakončena o anti-aliasing filtr druhého řádu (-40 dB/dek) topologie Sallen-Key. Návrh anti-aliasing filtru byl již popsán v kapitole 5.7.

Funkčnost navrženého zapojení byla před finální implementací nasimulována v programu Micro-Cap 12 a ověřena fyzickým zapojením na nepájivém kontaktním poli.

5.9 Měření teploty

Rozhraní pro pření teploty je navrženo tak, aby bylo kompatibilní s teplotními snímači typu RTD. Důvody pro zvolení odporového principu byly diskutovány v kapitole 4.4.

Pro realizaci dvoukanálového rozhraní pro RTD snímače bylo zvoleno integrované řešení od výrobce Maxim Integrated ve formě chipu MAX31865. Pro každý z kanálů teplotního rozhraní byl dedikován jeden obvod. Zvolený obvod disponuje komunikačním rozhraním SPI, které je použito pro připojení s MCU.

Schéma zapojení je na obrázku 5.17 a vychází z doporučeného zapojení v technickém listu [28]. Kompletní schéma zapojení (pro oba kanály) je obsaženo v příloze C.7.

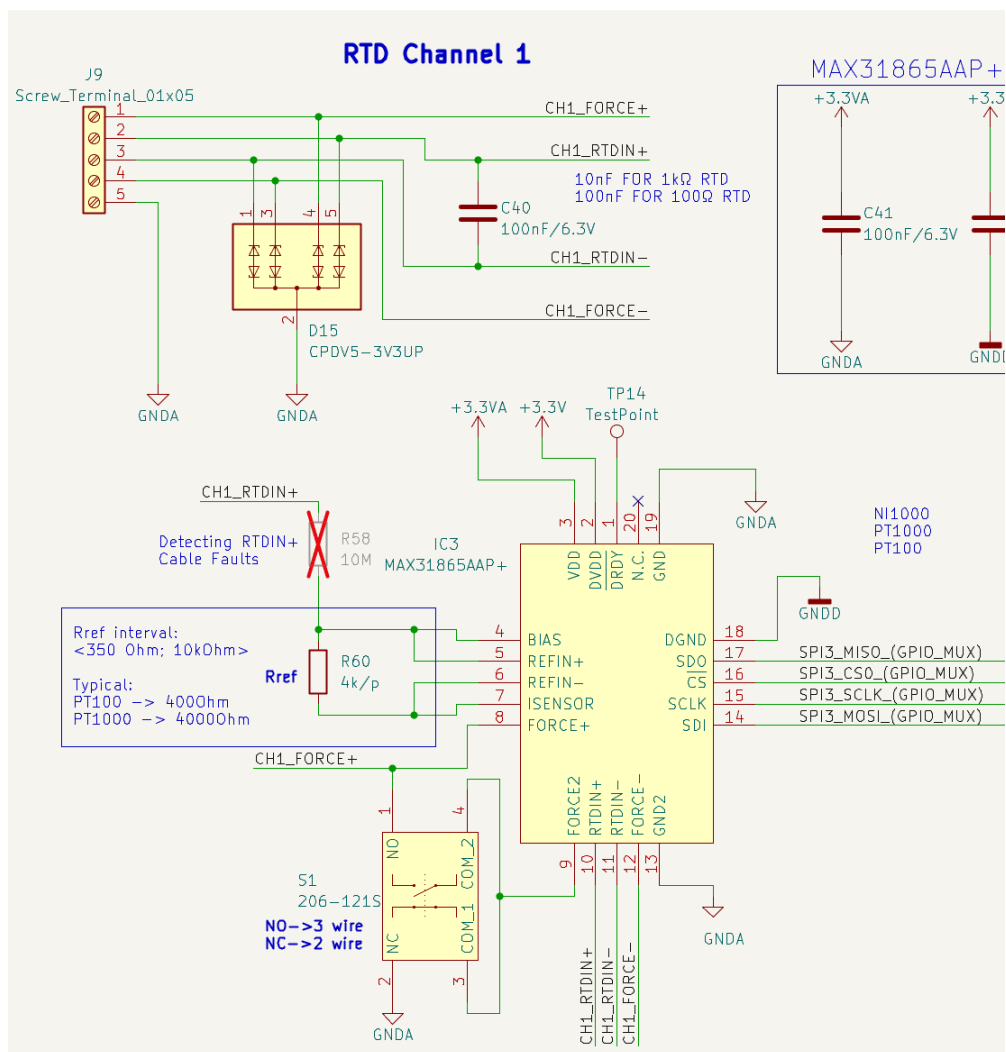
Zvolený obvod má v sobě integrovaný 15 bitový sigma-delta ADC, který mu umožňuje dosáhnout nominálního rozlišení až $0,03125\text{ }^{\circ}\text{C}$ (v závislosti na nelinearitě PTC snímače). Celková přesnost při zahrnutí všech operačních podmínek je $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0,05\%$ z celého rozsahu)[28].

Obvod podporuje připojení snímače pomocí dvou, tří a čtyřvodičového zapojení. Volba mezi dvou/čtyř vodičového a třívodičového zapojení je podmíněna přepnutím dip-switchu S1 a S2. Obvod kromě odporových snímačů nabízí také možnost připojit snímače, které v závislosti na teplotě mění svůj vnitřní odpor, např. PTC a NTC.

5.9.1 Princip

Úloha přesného měření teploty pomocí RTD snímačů závisí do značné míry na úloze přesného měření odporu. Zvolený obvod proto odpor odporového snímače teploty měří pomocí čtyřvodičové Kelvinovy metody. Tato metoda potlačuje parazitní odpor přívodního vedení ke snímači. Další důležitou částí pro nepřímé měření odporu je přesná znalost proudu tekoucího snímačem. V praxi by to bylo možné provést přesným sériově řazeným ampérmetrem. Takové řešení by však bylo pro integraci v měřicím rozhraní velmi nákladné. Proto obvod měří neznámý odpor snímače pomocí srovnávací metody. Obvodově je to uděláno tak, že obvod obsahuje diferenciální ADC, jehož diferenciální reference je připojena na referenční rezistor (v realizovaném obvodovém řešení rezistor o hodnotě $4\text{ k}\Omega$), na kterém se měří úbytek napětí a rozdíl následně porovnává s napětovými diferenciálními vstupy, které měří napětí na snímači. Výsledkem měření je poměrový rozdíl hodnoty odporu referenčního rezistoru a snímače. Proud snímačem se volí co nejmenší tak, aby se zabránilo samohřevu snímače. Další výhodou diferenciálního zapojení je odolnost vůči souhlasnému rušení.[28]

V závislosti na zvolené velikosti referenčního rezistoru, nutné softwarově nakonfigurovat registr „RTD Resistance Registers“, jehož hodnota odpovídá právě poměru referenčního rezistoru a nominálního odporu snímače. Volba referenčního rezistoru o hodnotě $4\text{ k}\Omega$ umožňuje programově přepínat mezi snímači PT100 a PT1000.



Obr. 5.17: Schéma zapojení RTD rozhraní

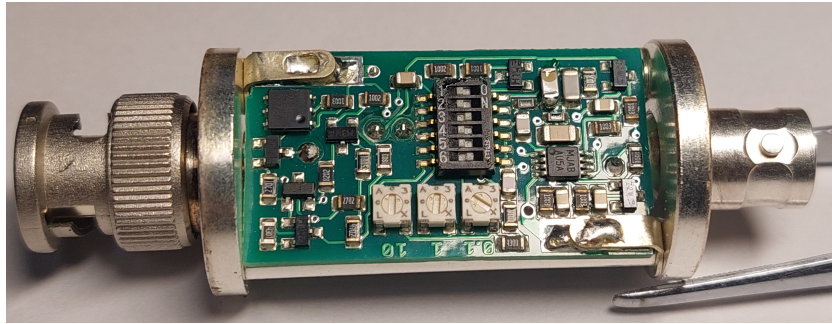
5.10 Měření vibrací

Kapitola se zabývá návrhem rozhraní IEPE rozhraní určeného pro měření vibrací pomocí snímačů pracujících na piezoelektrickém principu.

Měření vibrací je nejdůležitější technickou veličinou, kterou datový koncentrátor umožňuje měřit. Následující kapitola se proto zabývá návrhem obvodového zapojení pro rozhraní podporující piezoelektrické snímače vibrací.

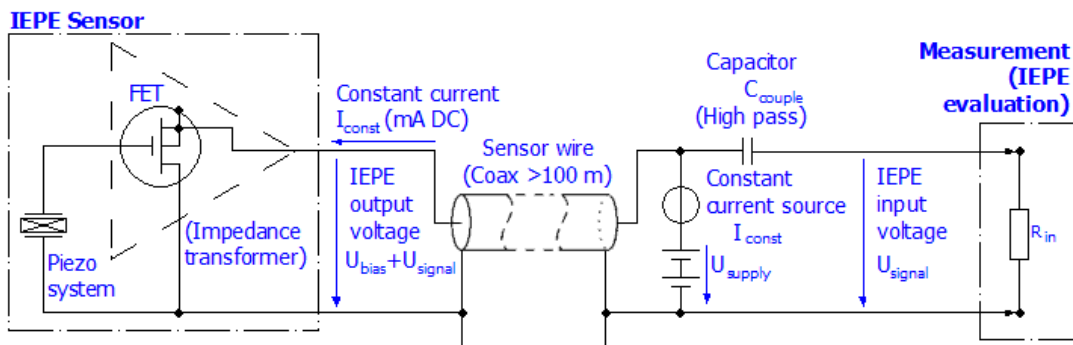
Rozhraní je možné implementovat dvěma základními způsoby. První z možností je vytvořit rozhraní kompatibilní přímo s nábojovým výstupem snímače. Druhou možností je použít snímače se standardním IEPE (ICP) výstupem. Obvod který převádí nábojový výstup z piezoelektrického elementu na standart IEPE může být buď integrovaný přímo ve snímači, nebo může být použit externí převodník (viz

obrázek 5.18).



Obr. 5.18: Externí převodník IEPE100

Výhoda použití standardu IEPE je v tom, že výstup z převodníku je nízkoimpedanční. Díky tomu je možné pro přenos signálu použít standardní koaxiální kabely. Zároveň je přenos signálu oproti nábojovému výstupu odolnější vůči rušení a triboelektrickému jevu. Proto byl tento princip prohlášen za realizační. Principiální schéma zapojení je na obrázku 5.18.

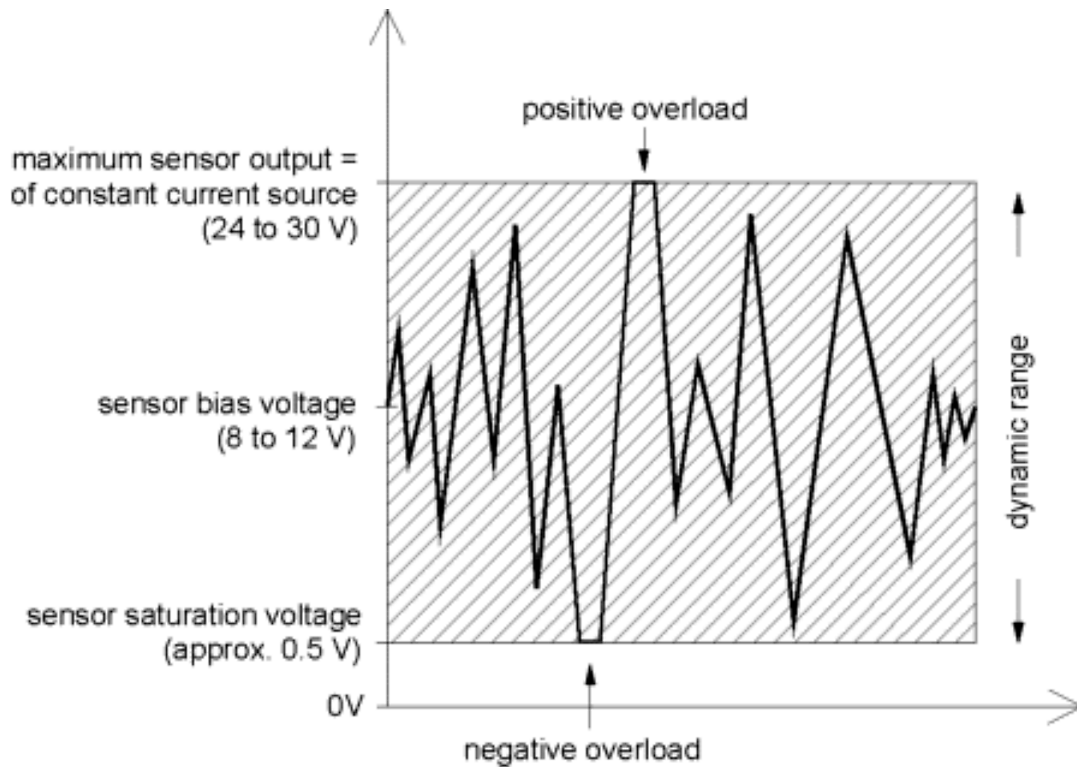


Obr. 5.19: Principiální schéma zapojení IEPE [29]

5.10.1 Princip

Obecný princip na kterém IEPE rozhraní funguje je následující. Na výstupu IEPE převodníku je připojen FET tranzistor, jehož Gate je spojena s výstupem piezoelementu. Při změně působení síly (vlivem zrychlení) na piezoelement dojde k jeho deformaci, což implikuje vznik náboje, který je přiveden na FET tranzistor. Tranzistor potom úměrně podle velikosti náboje „otevívá/zavírá“ přechod Drain-Source, to je doprovázeno změnou odporu zmíněno přechodu a úměrnému úbytku napětí při působení konstantního proudu přiváděného z měřicího rozhraní.

Z popsaného principu vyplývá, že je nutné IEPE rozhraní na straně snímače proudově vybudit standardně v rozsahu 2 - 20 mA. V závislosti na velikosti zvoleného proudu se mění výstupní napěťový offset, který je typicky v intervalu 8 - 12 V. Užitečný signál odpovídající úrovni vibrací je následně na tento napěťový offset superponován. Grafické zobrazení výstupního signálu je na obrázku 5.20.[30]



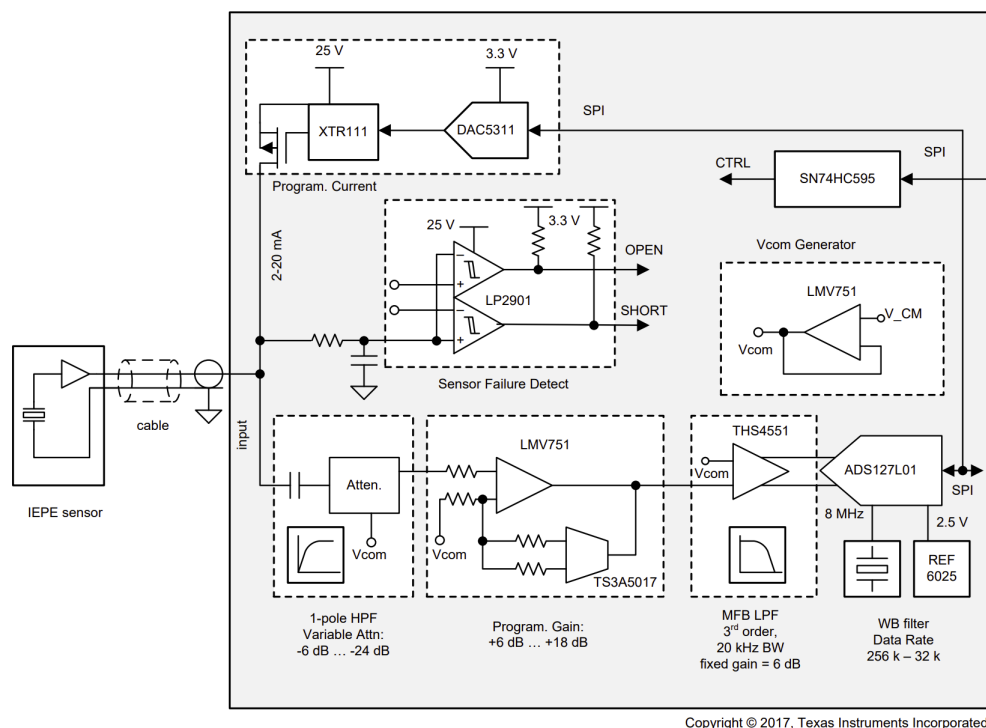
Obr. 5.20: Grafické zobrazení signálu IEPE [30]

5.10.2 Zapojení

Z důvodu kladeného požadavku na velkou variabilitu kompatibilní snímačů bylo IEPE rozhraní zkonstruováno tak, aby podporovalo širokou škálu snímačů. Pro splnění zadaných požadavků bylo jakožto předloha zvoleno referenční zapojení TIDA-01471 od výrobce Texas Instrument[31]. Blokový diagram referenčního zapojení je na obrázku 5.21.

Zapojení bylo následně částečně upraveno dle dostupnosti obvodů. Podrobný popis návrhu rozhraní je diskutován v technické referenci [31].

Implementované rozhraní se skládá z programovatelně nastavitelného zdroje proudu v intervalu 2 až 20 mA s napěťovým omezením do 30 VDC. To zajišťuje obvod XTR111, který funguje v režimu CC v závislosti na vstupním napětí z obvodu



Obr. 5.21: Blokové zapojení IEPE rozhraní dle TIDA-01471 [31]

DAC5311. Vstup je doplněn o kontrolu rozpojeného a zkratovaného obvodu pomocí dvou komparátorů.

Signál je následně zbaven stejnosměrné složky pomocí vazebního kondenzátoru, a přiveden do atenuátoru tvořeného rezistorovou sítí, která poskytuje útlumy -6 dB, -12 dB, -18 dB a -24 dB přepínatelné pomocí pájecích propojek. Změnu přenosu atenuátoru není možné programově měnit, proto byl doplněn od neinvertující zesilovač s programově proměnným zesílením 6 dB, 12 dB, 15 dB a 18 dB (změna hodnoty zpětnovazebního rezistoru je možná pomocí programovatelného analogového multiplexeru TS3A5017DR).

Signál dále postupuje do diferenciálního AAF filtru, který poskytuje větší odolnost oproti souhlasnému rušení než zapojení standardní. Zapojení je typu Sallen-Key a je doplněno o standardním pasivní filtr typu dolní propust. Výsledný filtr je třetího řádu, a jeho frekvenční pásmo je omezeno na hodnotu 20 kHz (-3 dB).

Výstup filtru je dále připojen na 24-bit sigma-delta ADC AD7768 s vzorkovací frekvencí až 1024 kS/s. Ve finálním řešení je vzorkovací frekvence omezena tak, aby bylo navzorkováno dvacet vzorků na periodu, což odpovídá požadované vzorkovací frekvenci převodníku 400 kS/s. Taková rezerva je více než dostatečná pro implementaci (v budoucím návrhu) druhého kanálu, který bude sdílet stejný převodník

s kanálem prvním, akorát do obvodu bude zařazen analogový multiplexor.

Vyčítání dat z převodníku probíhá programově přes sběrnici SPI. Převodník je také doplněn od napětovou referenci REF6025 s nominálním výstupním napětím 2,5 V a nízkým teplotním driftem 5 ppm/°C. Převodník je taktován externím oscilátorem 16,384 MHz.

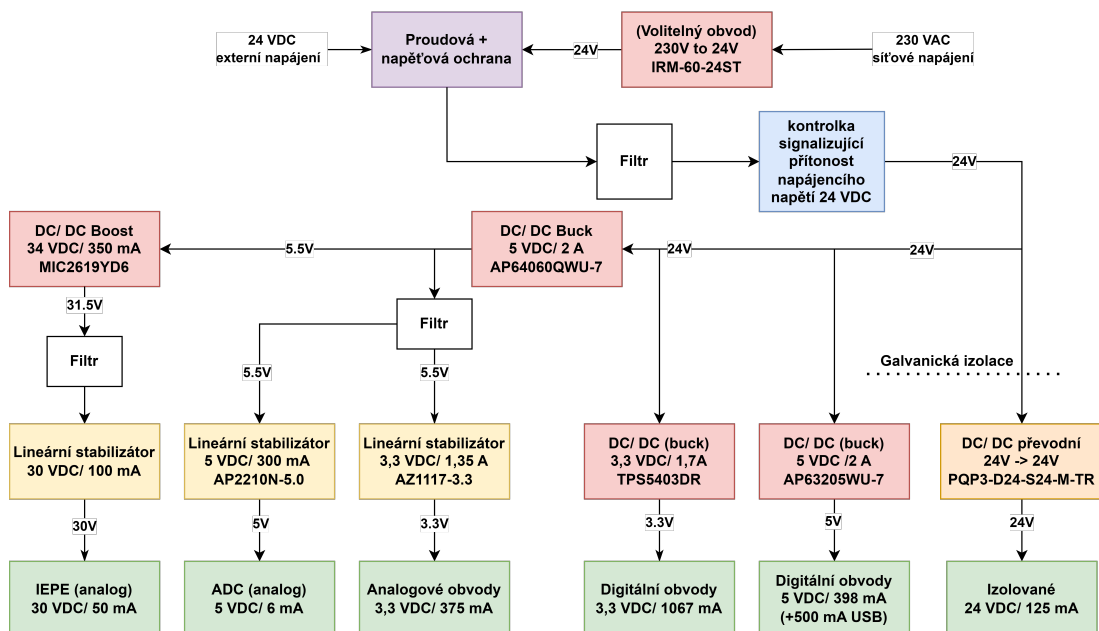
Upravená a kompletní schémata IEPE rozhraní jsou obsažena v přílohách C.13, C.14, C.15 a C.21.

5.11 Napájení

Konstrukce napájení odpovídá proudovým požadavkům a kompatibilním napětím v rámci obvodového schéma. Bližší uspořádání napájecích obvodů je popsáno níže. Dopočtená proudová zatížitelnost pro jednotlivé větve a obvody je označena přímo ve schématu. Kompletní schémata zapojení jsou v přílohách C.3, C.22 a C.23.

5.11.1 Blokové uspořádání

Blokové schéma je kaskádového uspořádání, hlavní snahou bylo oddělit od sebe analogové a digitální obvodové části. Současně byl kladen důraz na omezení šíření rušení po napájecích linkách. Kompletní blokové schéma je na obrázku 5.22.



Obr. 5.22: Blokové uspořádání napájecích obvodů

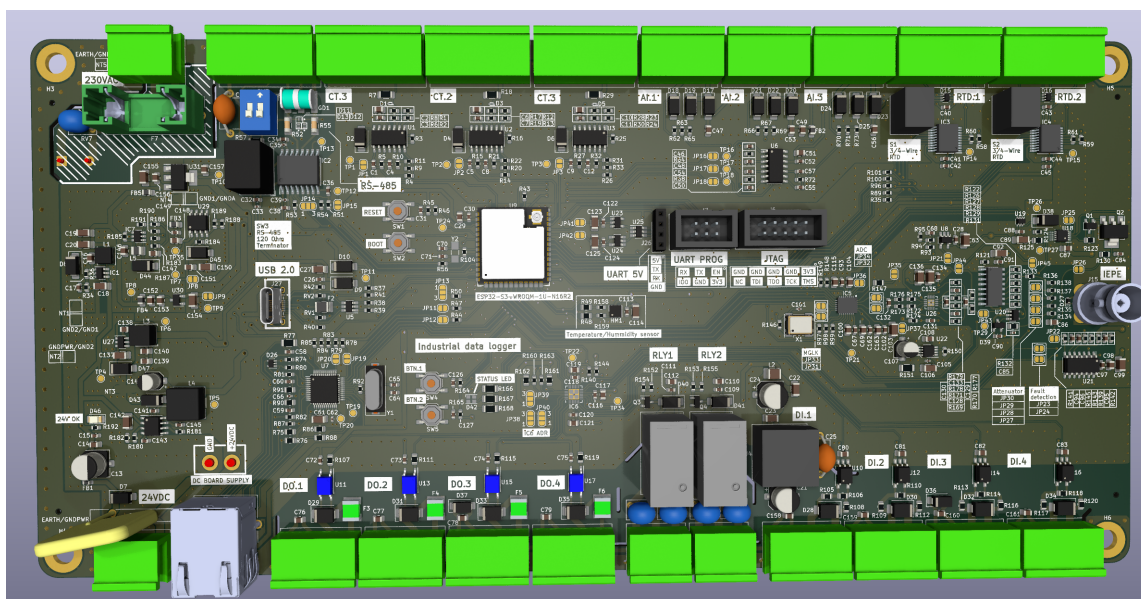
6 DPS/mechanická konstrukce

Kapitola sdružuje část návrhu desky plošného spoje a mechanické konstrukce.

6.1 Deska plošného spoje

Deska plošného spoje byla navržena tak, aby odpovídala potřebám ladění obvodových zapojení (testovací verze). Pro tuto možnost byla zvolena varianta desky dvouvrstvé, která umožňuje v případně chybném obvodovém zapojení přerušit vodičovou cestu a provést nápravu. Velikost desky není striktně omezena, a její velikost je tedy odvozena od minimální velikosti dostačující pro umístění všech konektorů (terminal bloků) a volitelného napájecího zdroje osazeného na spodní straně DPS.

Při návrhu se počítalo s profesionální výrobou DPS u firmy JLCPCB, proto je deska navržena tak aby odpovídala DRC (Design Rule Check - kontrola plošného spoje) definovaných výrobcem pro dvouvrstvý plošný spoj.



Obr. 6.1: 3D vizualizace DPS (vrchní pohled)

Při návrhu byly pro jednotlivé součástky a jejich „footprity“ navrženy nebo vybrány příslušné 3D modely. Důvodem pro vytvoření 3D modelu desky bylo následné zjednodušení návrhu mechanické konstrukce. Vizualizace návrhu 3D modelu DPS je na obrázku 6.1.

6.1.1 Umístění obvodových prvků

Umístěním obvodových prvků je myšlen soubor pravidel, který je při umísťování jednotlivých komponent respektován.

Blokovací kondenzátory

Blokovací kondenzátory (bypass capacitors) jsou kondenzátory, které mají za úkol vyrovnat výkyv napájení při proudových špičkách. Ty vznikají hlavně při spínání rychlými digitálními obvody. Příčinou těchto výkyvů jsou hlavně parazitní odpory a indukčnosti přírodních cest k obvodům. Takový jev se projevuje hlavně při rychlé změně odebíraného proudu obvodem. Aby se zmíněný jev eliminoval, je nutné umístit blokovací kondenzátory co nejbližší vstupu obvodu.[15]

Skupinové blokovací kondenzátory

Při proudově náročnějších obvodech nebo obvodech citlivých na výkyvy napájení jsou použity tzv. „skupinové blokovací kondenzátory“, které se umísťují na vstupy obvodů po skupinách. To se dělá hlavně z důvodu různého ESR (Equivalent Series Resistance - ekvivalentní sériový odpor) a parazitní indukčnosti, které se propisují na výsledné impedanci. Proto byla na desce u skupinových blokovacích kondenzátorů zvolena různá pouzdra od velikosti 0402 (nejbližší blokovanému obvodu) až po 1206 (nejdále).

Veškeré blokovací kondenzátory na DPS jsou typu MLCC (Multi Layer Ceramic Capacitors - vícevrstvý keramický kondenzátor) s dielektrikem X7R.

6.1.2 Osazení

Z výroby byla deska částečně osazena (některé pasivní součástky). Proto ji bylo nutné osadit ručně metodou „pájení na měkko“ a částečně metodou „reflow soldering“. Při návrhu bylo s ručním osazováním desky počítáno, proto byly do chladících podložek QFN footprintu přidány prokovené otvory přes které je možné spodní část součástky nahřát a následně osadit. Prokovené otvory jsou ze spodní strany DPS orámovány bílým kruhem pro snazší orientaci. Vrchní strana osazené desky je na obrázku 6.2 a spodní strana na obrázku 6.3.

6.1.3 Země

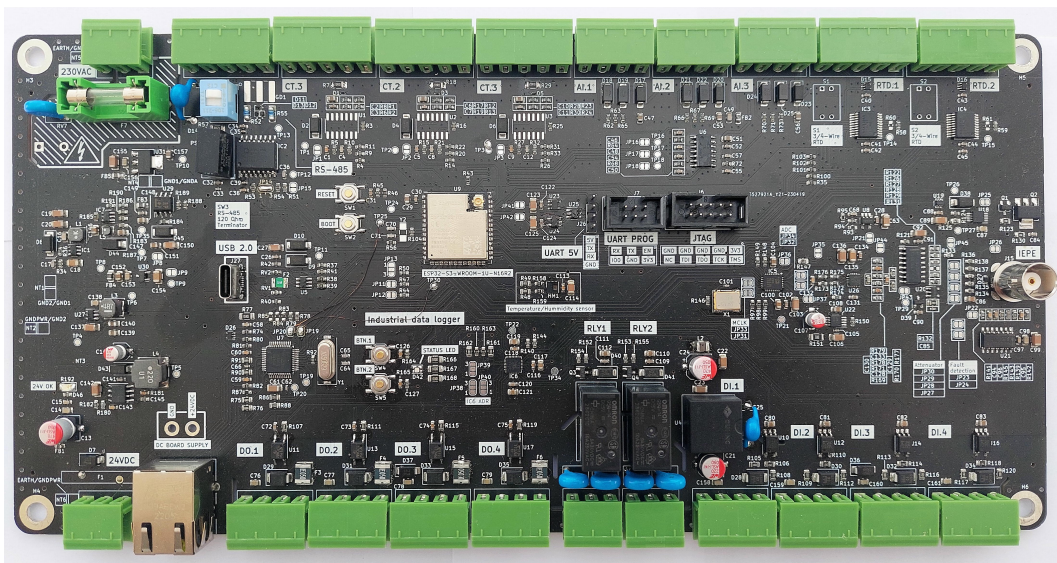
Návrh desky kombinuje jak analogové tak digitální části. Proto bylo nutné zemnění rozdělit na dvě hlavní části, analogovou zem (GNDA) a digitální zem (GNDD). Klíčem je zajistit, aby digitální proud nevedl stejnou cestou jako napájecí cesta

pro analogový obvod. Při nedodržení této zásady by digitální rušení pronikalo do analogových obvodů. Implementován byl tedy jednobodový zemnicí systém, kdy pro každou ze dvou částí, je vyhrazena vlastní zem, která je spojena v jednom bodě. Dále byla konstrukce doplněna o zem poruchovou, ke které jsou připojeny vstupní ochranné prvky a stínění konektorů tak, aby při případné poruše byl vzniklý proud odveden mimo elektroniku koncentrátoru.

Spojení jednotlivých zemí je na DPS označeno symbolem NT (NetTie). Soupis spojení jednotlivých zemí je následující:

- NT1 spojení zemí GND1 (meziobvod 5,5 VDC) a GND2 (vstupní zem 24 VDC)
- NT2 spojení zemí GNDPWR (poruchová) a GND2
- NT3 spojení zemí GND2 a GNDD (digitální zem)
- NT4 spojení zemí GND1 a GNDA (analogová zem)

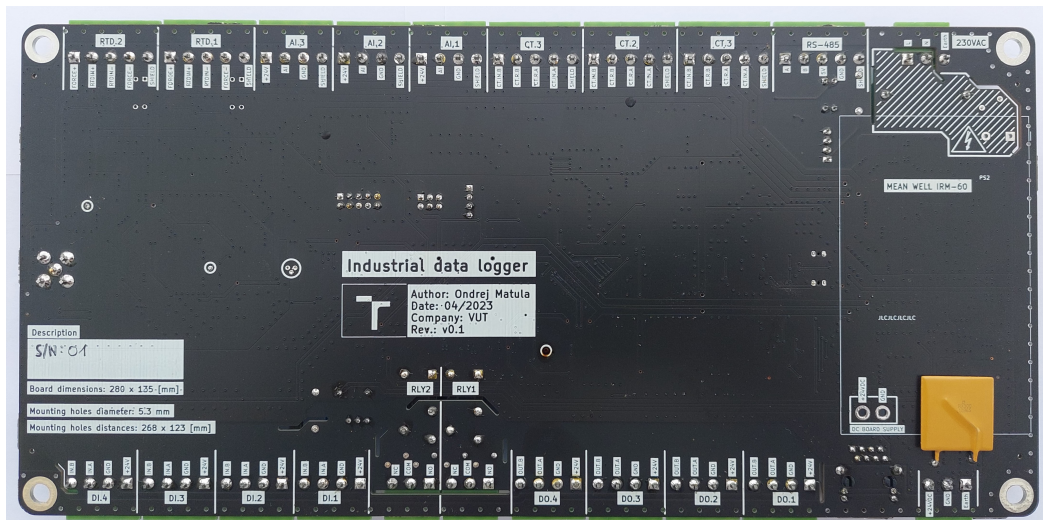
Na DPS jsou jednotlivé země rozlity v polygonech odpovídacím analogové nebo digitální části. Jediné místo kde bylo rozlité země vynecháno je oblast IEPE rozhraní. To bylo provedeno z důvodu eliminace parazitní kapacity vůči signálovým cestám a možnému omezení frekvenčního pásma rozhraní.



Obr. 6.2: Osazená DPS (vrchní pohled)

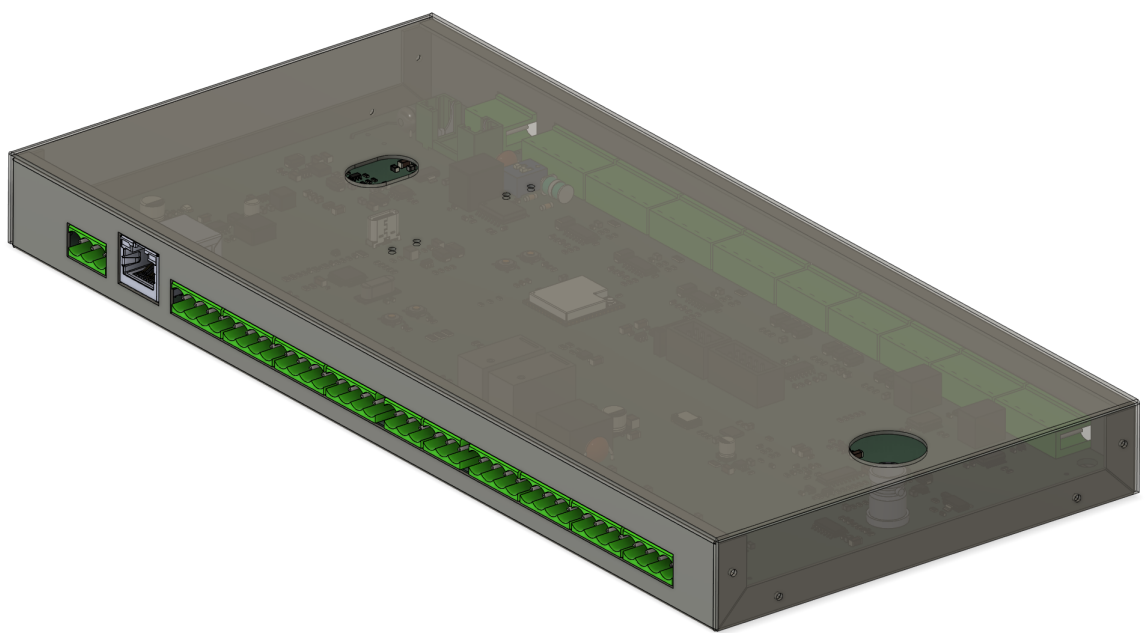
6.2 Mechanická konstrukce

Kapitola zabývající se mechanickým návrhem krytu pro DPS.



Obr. 6.3: Osazená DPS (spodní pohled)

Požadavkem na kryt bylo, že musí být kovový a musí být uzpůsoben rozložení DPS. Požadavek na kovový materiál vyvstal z potřeby odstínění citlivých částí obvodů od externího rušení a zároveň eliminoval potenciální rušení vyzařované do okolí. Díky 3D modelu (viz obrázek 6.1) DPS bylo možné kryt navrhnout s ohledem na rozměry každé součástky. Pro jednoduchou konstrukci byla vybrána metoda „skládání“. Tu je možné metodou ohýbání plechu složit do požadovaného tvaru. Pro konstrukci byl zvolen kovový plech o šíři 1 mm. Vizualizace kovového krytu je na obrázku 6.4.



Obr. 6.4: Vizualizace skládaného plechového krytu

7 Programové vybavení

Ze softwarového pohledu se práce zabývá návrhem firmwaru. Jeho základní funkcí je ovládat interní a externí periferie tak, aby byla zajištěna požadovaná funkce koncentrátoru.

7.1 Vývojové prostředí

Pro potřeby programování mikropočítače poskytuje výrobce Espressif framework pojmenovaný jako ESP-IDF (IoT Development Framework). Jako vývojová a ladící platforma byl použit editor zdrojového kódu Visual Studio Code v kombinaci s rozšířením Espressif IDF. Firmware byl potom napsán v jazyce C a pro automatizaci překladu použit CMake. Tento open-source nástroj je primárně určen pro zjednodušení úlohy sestavení jednotlivých částí projektu.

7.2 Bootloader

Mikrokontroléry z rodiny ESP32 používají pro svoji inicializační konfiguraci nativně bootloader. Což je inicializační program umístěn v paměti ROM mikrokontroléru. Bootloader pracuje tím způsobem, že pokud je kontrolér v módu SPI (viz kapitola 5.3.2), tak ihned po resetu mikrokontroléru, nastaví základní interní periferie jako jsou watchdog, hodinový signál nebo velikost interní flash paměti v závislosti na verzi MCU. Následně načte uživatelský kód z flash paměti. Pro konfiguraci bootloADERu je ve vývojovém frameworku obsažen grafický nástroj nazvaný jako „menuconfig“ (obrázek 7.1). Parametry obsažené ve zmíněném nástroji je možné programově upravovat v konfiguračním souboru „sdkconfig“. Výhodou bootloADERu je především to, že umožňuje uživatelsky aktualizovat firmware přes komunikační rozhraní nebo z externího úložiště.

7.3 Ladění

Jako jeden z téměř nezbytných nástrojů při vývoji firmwaru je brán „debugger“. Ten je v rámci vývoje embedded zařízení realizován za pomoci externího zařízení připojeného k mikrokontroléru (ESP Prog) a dovoluje vývojovému prostředí převzít kontrolu nad mikropočítačem a například volitelně pozastavit vykonávání programových instrukcí nebo načíst aktuální hodnoty registrů. Pro spojení mezi debuggerem (fyzickým zařízením) a mikrokontrolérem je standardně používáno komunikační rozhraní JTAG. Softwarový protokol který je kompatibilní s daným mikropočítačem

```

(Top)
Espressif IoT Development Framework Configuration
SDK tool configuration --->
Build type --->
Application manager --->
Bootloader config --->
Security features --->
Serial flasher config --->
Partition Table --->
Example Configuration --->
Compiler options --->
Component config --->
Compatibility options --->

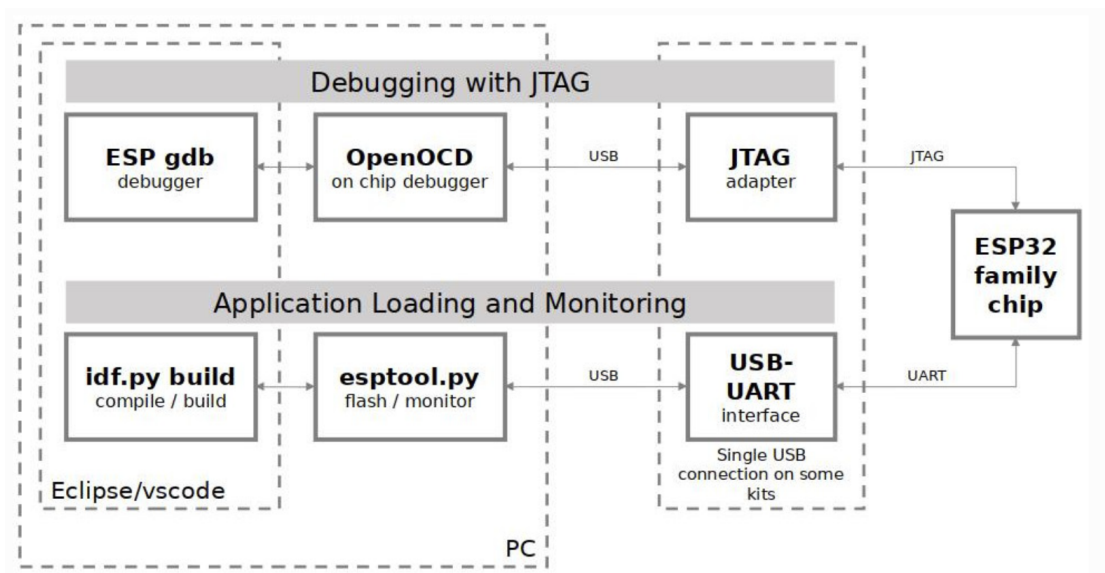
[Space/Enter] Toggle/enter [ESC] Leave menu [S] Save
[O] Load [?] Symbol info [/] Jump to symbol
[F] Toggle show-help mode [C] Toggle show-name mode [A] Toggle show-all mode
[Q] Quit (prompts for save) [D] Save minimal config (advanced)

```

Obr. 7.1: Vizuální podoba konfiguračního nástroje menuconfig (ESP-IDF)

se ve většině případů v závislosti na výrobci liší. Espressif pro tuto úlohu používá open-source nástroj nazvaný OpenOCD (Open On-Chip Debugger). Před započítím úlohy ladění se v jeho případě musí nejprve nastartovat tzv. „OpenOCD server“.[33]

Řetězec ladění, používající mikrokontroléry řady ESP32, je na obrázku 7.2.



Obr. 7.2: Blokové schéma ladícího řetězce pro MCU ESP32[33]

Tab. 7.1: Vyvedení pinů externích periférií

Periferie	Obvod	Rozhraní	Názvy pinů rozhraní	Piny MCU	Názvy pinů periferie	Piny periferie
IO expander	SX1509QB	I2C0	SCL	GPIO48	SCL	25
			SDA	GPIO47	SDA	24
			IO int	GPIO46	NINT	9
Interní snímač teploty a vlhkosti	HTU21D	I2C0	SCL	GPIO48	SCK	6
			SDA	GPIO47	DATA	1
RTD kanál 1	MAX31865	SPI3	MOSI	GPIO40	SDI	14
			SCLK	GPIO41	SCLK	15
			CS0	GPIO39	CS	16
			MISO	GPIO42	SDO	17
RTD kanál 2	MAX31865	SPI3	MOSI	GPIO40	SDI	14
			SCLK	GPIO41	SCLK	15
			CS1	GPIO38	CS	16
			MISO	GPIO42	SDO	17
Ethernet	W5500	SPI2	MOSI	GPIO11	MOSI	35
			MISO	GPIO13	MISO	34
			SCLK	GPIO12	SCLK	33
			CS2	GPIO8	SCS	32
			ET_RESET	GPIO6	RST	37
IEPE DAC	DAC5311	SPI2	ET_INT	GPIO46	INT	36
			MOSI	GPIO11	DIN	3
IEPE ADC	AD7768	SPI2	SCLK	GPIO12	SCKL	2
			CS1	GPIO9	SYNC	1
			MOSI	GPIO11	SDI	11
			MISO	GPIO13	DOUT	9
			SCLK	GPIO12	SCLK	10
			CS0	GPIO10	CS	12
ADC_DRDY	GPIO35	DRDY	19			
ADC_RESET	GPIO36	RESET	1			

7.4 Knihovny pro periferie

Následující kapitola stručně popíše základní problematiku programování knihoven (komponent) pro externí periferie. Pro interní periferie (integrované v MCU) nebylo nutné knihovny navrhovat, jelikož jsou již součástí ESP-IDF. Některé knihovny pro externí periferie, které byly ve firmwaru použity, jsou poskytnuty od třetích stran. V takovém případě jsou jak hlavičkové tak zdrojové soubory v rámci knihovní funkce opatřeny hlavičkou s odkazem na zdroj.

Výčet jednotlivých externích periférií pro které bylo nutno vytvořit knihovny je obsažen v tabulce 7.1. Součástí tabulky jsou také příslušné rozhraní externích periférií, která odpovídají namapovaným rozhraním na pinech mikrokontroléru.

7.4.1 Konfigurace periférií MCU

V této části je popsán obecný postup konfigurace interních periférií mikrokontroléru které zprostředkovávají komunikaci s perifériemi externími (např. SPI, I2C). Konfigurace je relevantní pouze vzhledem k ESP-IDF frameworku. Postup obecného principu konfigurace je řazen chronologicky a nachází se v seznamu níže:

1. vytvoření konfigurační struktury pro kontrolér periferie,
2. inicializace rozhraní pomocí vytvořené konfigurační struktury a pomocí přiřazeného hosta (zvoleného kontroléru pro rozhraní),
3. přidání zařízení na sběrnici pomocí jména hosta, bližší konfigurace přidávaného zařízení (CS pin, komunikační rychlost atd.) a identifikátoru sběrnice (handlu),
4. samotné komunikační příkazy pro sběrnici které vždy obsahující identifikátor sběrnice.

7.5 Postup konfigurace

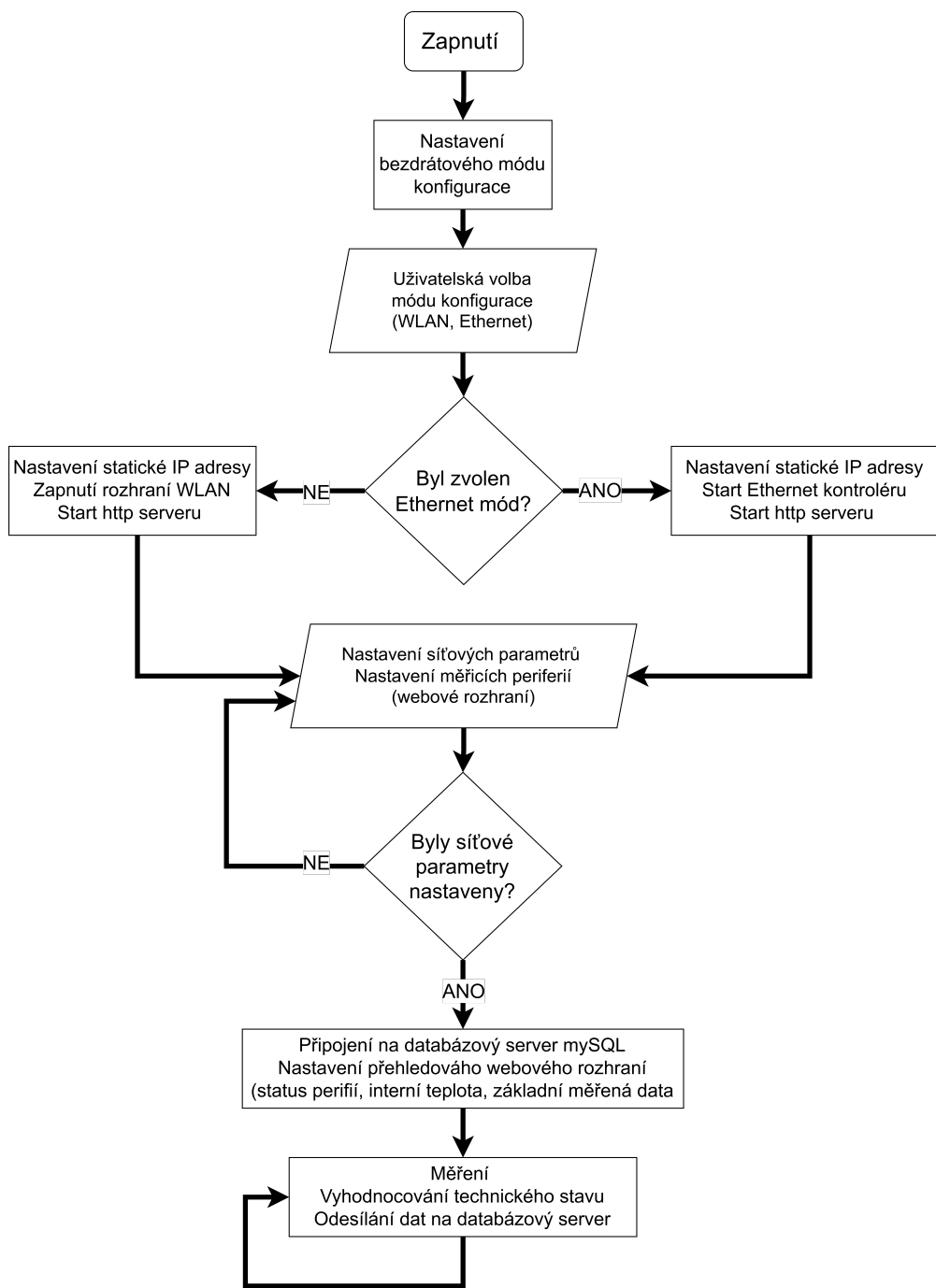
Kapitola má za cíl popsat postup konfigurace data koncentrátoru přes webové rozhraní v návaznosti na zvolenou konfigurační koncepci. Ta je popsána vývojovým diagramem na obrázku 7.3.

Samotná koncepce vypadá tak, že technik který zařízení instaluje, před připojením zařízení do LAN nakonfiguruje základní síťové parametry jakou jsou: statická IP adresa, adresa od DHCP serveru, výchozí brána nebo maska podsítě. To může učinit technik dvěma způsoby, buď bezdrátovým připojením prostřednictvím Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n 2.4 GHz) a nebo drátově za pomoci Ethernetového kabelu. Volba způsobu, který bude pro konfiguraci použit je možná pomocí tlačítka BTN1. Změna stavu metody konfigurace je vizuálně doprovázena stavovou LED.

Při prvotní konfiguraci je zařízení v módu statické adresy, rozhraní konfiguračního nástroje (např. notebooku nebo smartphonu) je tedy nutné nastavit na odpovídající síťový rozsah. Pokud však zařízení nenabízí možnost tuto volbu uživatelsky měnit, je možné data koncentrátor přepnout do režimu, ve kterém převezme roli DHCP serveru. To je možné za pomoci tlačítka BTN2.

Po úspěšném připojení k zařízení je možné načíst konfigurační webovou stránku, ve které lze nakonfigurovat základní parametry (jak již bylo diskutováno výše). V rámci konfigurační stránky je možné také nastavit parametry potřebné pro připojení ke vzdálenému databázovému MySQL serveru. Pro připojení k databázovému serveru je potřeba nastavit jeho IP adresu nebo doménové jméno a port (standardně 3306). Dále je potřeba znát autentifikační údaje (uživatelské jméno a heslo).

Následně jsou data ze zařízení odesílána na databázový server přímo pomocí PHP scriptu, což není vhodné řešení. Důvod je takový, že komunikace s MySQL serverem je velmi náročná na systémové prostředky. Proto je zde druhá varianta, u které je komunikace s databázovým serverem zprostředkována prostředníkem (webovým serverem), na který jsou data odesílána v podobě http requestů.



Obr. 7.3: Vývojový diagram webové konfigurace

Závěr

V rámci diplomové práce jsem se zabýval komplexním návrhem průmyslového data koncentrátoru.

V první části práce (kapitola 1) byly při konzultaci s vedoucím práce stanoveny cíle práce. Současně se stanovením cílů byl vypracován postup, jakým je zařízení vhodné navrhnout, aby navržené a zkonstruované zařízení dávalo smysl. Dle vypracovaného pracovního postupu byla práce následně postupně navržena.

Po stanovení cílů práce bylo nutné zadefinovat obecnou koncepci zařízení tak, aby splňovalo představu vedoucího práce. Ta je popsána v kapitole 2 současně se základními funkčními požadavky. Při definici koncepce však nastala nejasnost zdali je vhodnější zařízení navrhnout jako „multifunkční“ s integrovanými snímači a nebo jako DAQ systém.

Stanovené požadavky však neberou v potaz současný stav na trhu (zařízení která jsou již komerčně dostupná). Proto bylo nutné udělat rešerši v oblasti stávajících komerčních řešení. V rámci rešerše bylo zjištěno, že samotná představa o funkčnosti vypovídá spíše měřicím zařízením typu DAQ (např. Bently Nevada 2300), avšak kompletně zadefinované požadavky nespĺňuje žádné z aktuálně dostupných řešení. Z důvodu neexistence validního komerčního řešení bylo rozhodnuto datový koncentrátor navrhnout. Nejvíce podobná komerční zařízení byla jednotlivě analyzována v kapitole 3. Z analýzy jejich vlastností byla poté vytvořena porovnávací tabulka 3.1, ve které jsou zohledněny relevantní parametry vzhledem ke konstrukci data koncentrátoru.

Součástí další kapitoly bylo tedy vybrat diagnostické veličiny a principy senzorů, které budou ve finálním řešení figurovat, porovnat jejich vlastnosti a vhodnost pro implementaci v rámci data koncentrátoru. Proto byly v kapitole 4 experimentálně odzkoušeny jednotlivé varianty. Vše již probíhalo na vývojovém kitu ESP-WROVER-kit v4.1 tak, aby se ověřila skutečná funkčnost. V rámci experimentů byly navrženy a vytištěny přípravky na FDM 3D tiskárně a naměřena testovací data, která byla následně zpracována v programu NI LabVIEW 2022. Technické dokumentace jednotlivých přípravků jsou v přílohách A.1 až A.4.

Následující a nejobsáhlejší částí diplomové práce byl samotný návrh obvodového zapojení průmyslového data koncentrátoru (kapitola 5). Návrh se zabýval volbou vhodných obvodových konstrukcí, principy a návrhem obvodů. Výsledkem této části je schéma zapojení průmyslového data koncentrátoru. Kompletní schéma je v příloze C.

V návaznosti na návrh obvodového zapojení byla navržena deska plošných spojů. Návrh desky odpovídá první iteraci a tedy testovací verzi data koncentrátoru. Proto byl návrh realizován na dvouvrstvé desce plošného spoje a zároveň byla přijata opat-

ření, díky kterým je možné jednotlivé části desky testovat a ladit. Deska plošného spoje byla následně částečně ručně osazena a ověřena její funkčnost. Finální vzhled osazené desky je na obrázku 6.2 a klíčová návrhová řešení jsou v kapitole 6.1.

Po úspěšném oživení desky byl navrhnout kovový kryt skládané konstrukce z plechu o šířce 1 mm. Návrh kovového krytu byl i přes první iteraci desky velmi důležitý, jelikož je nutné zařízení umístit do blízkosti diagnostikovaných objektů. Náčrty skládané konstrukce jsou v příloze B. Model kovového krytu je na obrázku 6.4.

Poslední částí bylo navrhnout programovou část data koncentrátoru. Programovou částí je myšlen zejména firmware průmyslového data koncentrátoru. V první části byly implementovány knihovny pro obsluhu externích periférií mikrokontroléru. Současně s touto fází byla ověřena základní funkčnost obvodových zapojení. Následně byla implementována a ověřena funkčnost konfigurace zařízení přes webový server a to jak přes WLAN tak přes kabelové Ethernetové spojení.

Finální návrh se však neobešel bez chyb. Jako jednu z nich lze uvést špatné zapojení převodníku napětové úrovně U24, který šel při připojení napájení do zkratu. Tato chyba byla pomocí metody měření malých odporů nalezena a opravena. Všechny chyby, které se při návrhu vyskytly jsou ve finálním návrhu opraveny.

Celé zařízení bylo úspěšně oživeno a vybaveno firmwarem který umožňuje ovládat obsažené periferie. Na práci lze navázat úlohou implementace zpracování dat a integrace komunikace do systému s databázovým serverem.

Literatura

- [1] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SPOLEHLIVOST II: Vibrodiagnostika*. Ostrava, 2020.
- [2] VSE152: Diagnostic Eleketronics. *IFM* [online technický list]. Essen: ifm electronic, 2022 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/de/en/product/VSE152?tab=details>
- [3] Diagnostic electronics. *IFM* [online]. Friedrichstrasse 1: IFM, c2011 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: https://www.ifm.com/de/en/category/200_040_010_010#/best/1/100
- [4] *FLIR SV87-KIT: Vibration monitoring solution* [online uživatelský manuál]. Wilsonville: FLIR systems, c2021 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.flir.com/products/SV87-KIT/>
- [5] *FLIR SV87-KIT: Vibration monitoring solution* [online katalogový list]. Wilsonville: FLIR, c2020 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.flir.com/products/SV87-KIT/>
- [6] Simotics connect 400: Technical datasheet. *Technical datasheet SIMOTIC CONNECT 400* [online katalogový list]. Erlangen: Siemens, 2021 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:36e91c37-de7a-4af1-8997-54d07ce8b748/dimc-b10048-00-7600dbsimoticsconnect400-en-300.pdf?ste_sid=92cc8542c398072642617b691f561e4f
- [7] *Simotics connect 400: Connectivity module* [online katalogový list]. Nuremberg: Siemens, 2019 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/915/109766915/att_982766/v1/simotics_connect_400_US.pdf
- [8] 2300/20 and 2300/25 2300 Vibration Monitors: Bently Nevada Machinery Condition Monitoring. *Dam.bakerhughes* [online katalogový list]. Nevada: Baker Hughes, c2022 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://dam.bakerhughes.com/m/2d9d8ca049d0e898/original/2300-Series-Vibration-Monitors-Datasheet-105M0340.pdf>
- [9] *2300 Vibration Monitor Series: Bently Nevada* [online katalogový list]. Houston: GE company, c2019 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://dam.bakerhughes.com/m/73b2b3d8ebc3ae2f/original/2300-Vibration-Monitor-Fact-Sheet-GEA31447-pdf.pdf>

- [10] ESP-WROVER-KIT V4.1 Getting Started Guide. *ESP-IDF Programming Guide* [online]. Shanghai: Espressif Systems, c2016-2023 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-wrover-kit.html#get-started-esp-wrover-kit-v4-1-board-front>
- [11] RIPKA, Pavel, Stanislav ĎAĎO, Marcel KREIDL a Jiří NOVÁK. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3123-3.
- [12] ESP32-S3. *ESP Product Selector* [online]. Maharashtra 411045,: Espressif Systems, c2015-2023 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://products.espressif.com/#/product-selector?names=>
- [13] ESP32-S3 Technical Reference Manual. *Espressif* [online]. Shanghai: Espressif Systems, c 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_technical_reference_manual_en.pdf
- [14] SX1508QB/SX1509QB. *Semtech* [online]. Camarillo: Semtech Corporation, 2011 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Semtech%20PDFs/SX1508_09QB.pdf
- [15] VRBA, CSC., prof. Ing. Kamil a Ing. Pavel HANÁK, PHD. *Konstrukce elektronických zařízení* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2021/05 [cit. 2021-05-16]. ISBN 978-80-214-5957-1.
- [16] USB Series: Low Capacitance Multilayer Varistors. *Mouser* [online]. South Carolina: A KYOCERA GROUP COMPANY, 2020 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/40/usb-776459.pdf>
- [17] HOW TO SELECT A TVS DIODE FOR MAXIM'S IO-LINK DEVICES. *Analog Devices* [online]. United States: Maxim Integrated Products, c 2014 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/how-to-select-a-tvs-diode-for-maxims-iolink-devices.pdf>
- [18] High Speed, Half-Duplex iCoupler Isolated RS-485 Transceiver: ADM2486. *Analog Devices* [online]. Norwood: Analog Devices, c2004-2013 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adm2486.pdf>

- [19] DC/DC converter TEA 1 series, 1 Watt. *Traco Power* [online]. Baar: Traco Power, c2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.tracopower.com/int/tea1-datasheet>
- [20] Block Diagram. *W5500_ds_v100e* [online]. Lampertheim: WIZnet, c2013 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: https://docs.wiznet.io/img/products/w5500/W5500_ds_v100e.pdf
- [21] RJ45, Single Port, 10/100/1G/5G Base-T Magnetics Module. *ARJM11 Series* [online]. Spicewood: Abracon, 2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/3/ARJM11-1775072.pdf>
- [22] HTU21D(F) RH/T SENSOR IC. *Mouser* [online]. Schaffhausen: TE Connectivity, 2017 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/418/5/NG_DS_HPC199_6_A1-1128627.pdf
- [23] TLP2395. *Mouser* [online]. Minato: Toshiba Corporation, x2015 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/408/TLP2395_datasheet_en_20151221-2298231.pdf
- [24] Photocoupler Application Note: The design guide for 24V Digital Input Modules for PLCs by using high-speed communication photocouplers. *Toshiba semicon storage* [online]. Minato: Toshiba Electronic Devices and Storage Corporation, c2021 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://toshiba.semicon-storage.com/info/TLP2395_application_note_en_20210325_AKX00763.pdf?did=70620.pr
- [25] TLP170AM. *Mouser* [online]. Minato: Toshiba Electronic Devices and Storage Corporation, c2020-2021 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/408/TLP170AM_datasheet_en_20210524-1858967.pdf
- [26] ESP-IDF Programming Guide: Analog to Digital Converter (ADC). *Espressif* [online]. Shanghai: Espressif Systems, c2016-2021 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.4/esp32s3/api-reference/peripherals/adc.html>
- [27] HOROWITZ, Paul a Winfield HILL. *The art of electronics*. Third edition. New York: Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-0-521-80926-9.
- [28] RTD-to-Digital Converter: MAX31865. *Componentsearchengine* [online]. San Jose: Maxim Integrated Products, c2015 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://componentsearchengine.com/Datasheets/1/MAX31865AAP+.pdf>

- [29] Basic principles of IEPE technology: IEPE output. *Beckhoff information Systems* [online]. Verl: Beckhoff Automation, c2023 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: <https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/ep3632/4015720203.html>
- [30] IEPE Standard. *MMF* [online]. Radebeul: Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul, c2022 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: https://www.mmf.de/iepe_standard.htm
- [31] TI Designs: TIDA-01471: IEPE Vibration Sensor Interface Reference Design for PLC Analog Input. *TI* [online]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, c2017 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/pdf/tidud62>
- [32] ESP-IDF Programming Guide: Bootloader. *Espressif* [online]. Shanghai: Espressif Systems, c2016-2023 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-guides/bootloader.html>
- [33] ESP-IDF Programming Guide. *JTAG Debugging* [online]. Shanghai: Espressif Systems, c2016-2023 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-guides/jtag-debugging/index.html>

Seznam symbolů a zkratek

- DPS** Deska Plošných Spojů
- DAQ** Data Acquisition - sběr dat
- LAN** Local Area Network - lokální síť
- EMC** Electromagnetic Compatibility - elektromagnetická kompatibilita
- SNR** Signal to Noise Ration - poměr signál šum
- CPU** Central Processing Unit - centrální procesorová jednotka
- FFT** Fast Fourier Transform - rychlá Fourierova transformace
- LED** Light Emitting Diode - elektroluminiscenční dioda
- RTOS** Real Time Operating System - operační systém reálného času
- I/O** Input Output interface - vstupní a výstupní rozhraní
- DIN** Deutsche Industrie Norm - německá průmyslová norma
- IEPE** Integrated Electronics Piezo Electric - integrované rozhraní pro piezoelektrický senzor
- OPC** Online Platform Communications - standardizovaná specifikace komunikačního rozhraní
- VFD** Variable Frequency Drive - frekvenční měnič
- USB** Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice
- I2C** Inter Integrated Circuit - dvouvodičová sběrnice
- MEMS** Micro Electro Mechanical Systems - mikroelektromechanická součástka
- ADC** Analog To Digital Converter - analogově digitální převodník
- CT** Current Transformer - proudový transformátor
- rpm** Revolutions Per Minute - otáčky za minutu
- FDM** Fused Deposition Modeling - aditivní tisk pomocí vrstvení roztaveného materiálu
- RTD** Resistance temperature detector - odporový teplotní detektor

TC ThermoCouple - termočlánek

MCU MicroController Unit - jednočipový počítač

DSP Digital Signal Processor - digitální signálový procesor

GPIO General Purpose Input Output - univerzální vstupně výstupní pin

USB Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice

JTAG Joint Test Action Group - standardizované programovací/ladící rozhraní

UART Universal Asynchronous Receiver/Transmitter - sériové asynchronní

SMD Surface Mount Device - zařízení určené pro povrchovou montáž

TTL Transistor-Transistor Logic - tranzistorově-tranzistorová logika

I/O Input/Output - vstup/výstup

OTG On The Go - specifikace umožňující USB zařízení použít v režimu hosta

ESD Electrostatic Discharge - elektrostatický výboj

MOV Metal Oxid Varistor

TVS Transient Voltage Suppression - polovodičová ochrana před ESD

PTC Positive Temperature Coefficient - termistor s pozitivním teplotním koeficientem

GDT Gas Discharge Tube - bleskojistka

PHY Physical layer - fyzická vrstva

SPI Serial Peripheral Interface - sériové periferní rozhraní

RH Relative Humidity - relativní vlhkost vzduchu

LDO Low Dropout Regulator - regulátor s nízkým úbytkem

DIO Digital Input/Output - digitální vstupy/výstupy

IoT Internet of Things - Internet věcí

PLC Programmable Logic Controller - programovatelný logický automat

SAR Successive Approximation - postupná aproximace

RMS Root Mean Square - efektivní hodnota

ESR Equivalent Series Resistance - ekvivalentní sériový odpor

MLCC Multi Layer Ceramic Capacitors - vícevrstvý keramický kondenzátor

DRC Design Rule Check - kontrola plošného spoje

V_{RM} Reverse Standoff Voltage - provozní napětí

V_{BR} Reverse Breakdown Voltage - průrazné napětí

V_{CL} Clamping Voltage - upínací napětí při špičkovém proudu

I_{PP} Peak Pulse Current - špičkový proud

U_{VBUS} Napětí na lince VBUS

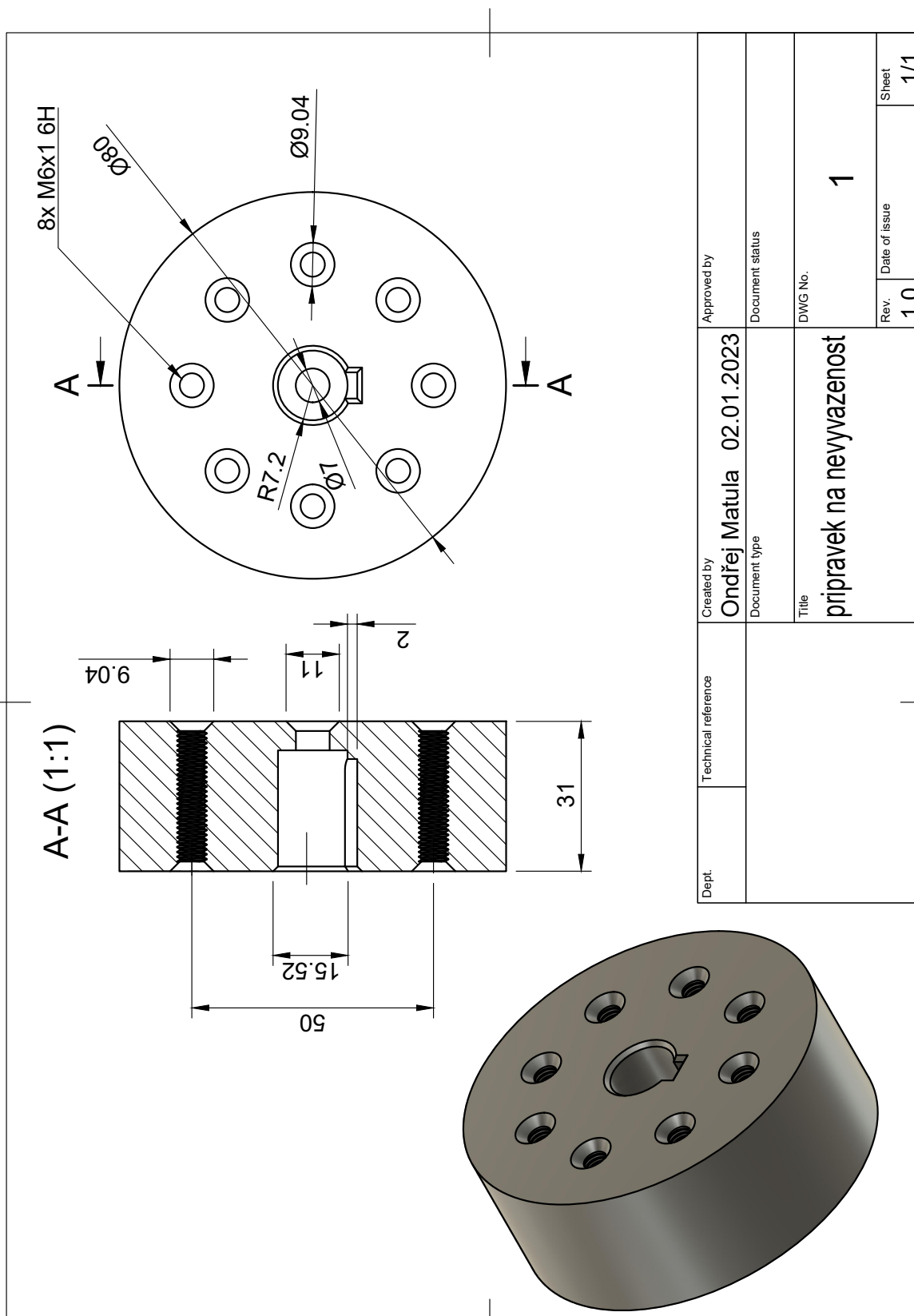
Seznam příloh

A	Náčrty přípravků pro 3D tisk	80
A.1	Přípravek na nevyváženost	81
A.2	Držák magnetu na rotoru motoru	82
A.3	Základna pro snímač otáček	83
A.4	Držák pro snímač otáček	84
B	Náčrty plechové krabičky skládané konstrukce	85
B.1	Skládaná krabička z plechu - vrchní díl	86
B.2	Skládaná krabička z plechu - spodní díl	87
C	Schémata zapojení	88
C.1	Přehledové schéma včetně MCU	89
C.2	Rozhraní pro CT	90
C.3	Napájení	91
C.4	Rozhraní USB 2.0	92
C.5	HW konfigurace MCU	93
C.6	Rozhraní RS-485	94
C.7	Rozhraní RTD	95
C.8	Rozhraní analogových vstupů	96
C.9	Rozhraní Ethernet	97
C.10	IEPE kompletní schéma	98
C.11	Mikrokontrolér	99
C.12	Rozhraní DIO	100
C.13	IEPE 1	101
C.14	IEPE 2	102
C.15	IEPE 3	103
C.16	Výkonové výstupy	104
C.17	Interní snímač teploty a vlhkosti	105
C.18	IO expander	106
C.19	Rozhraní UART 5V	107
C.20	Tlačítka a LED	108
C.21	IEPE 4	109
C.22	Digitální napájení	110
C.23	Analogové napájení	111

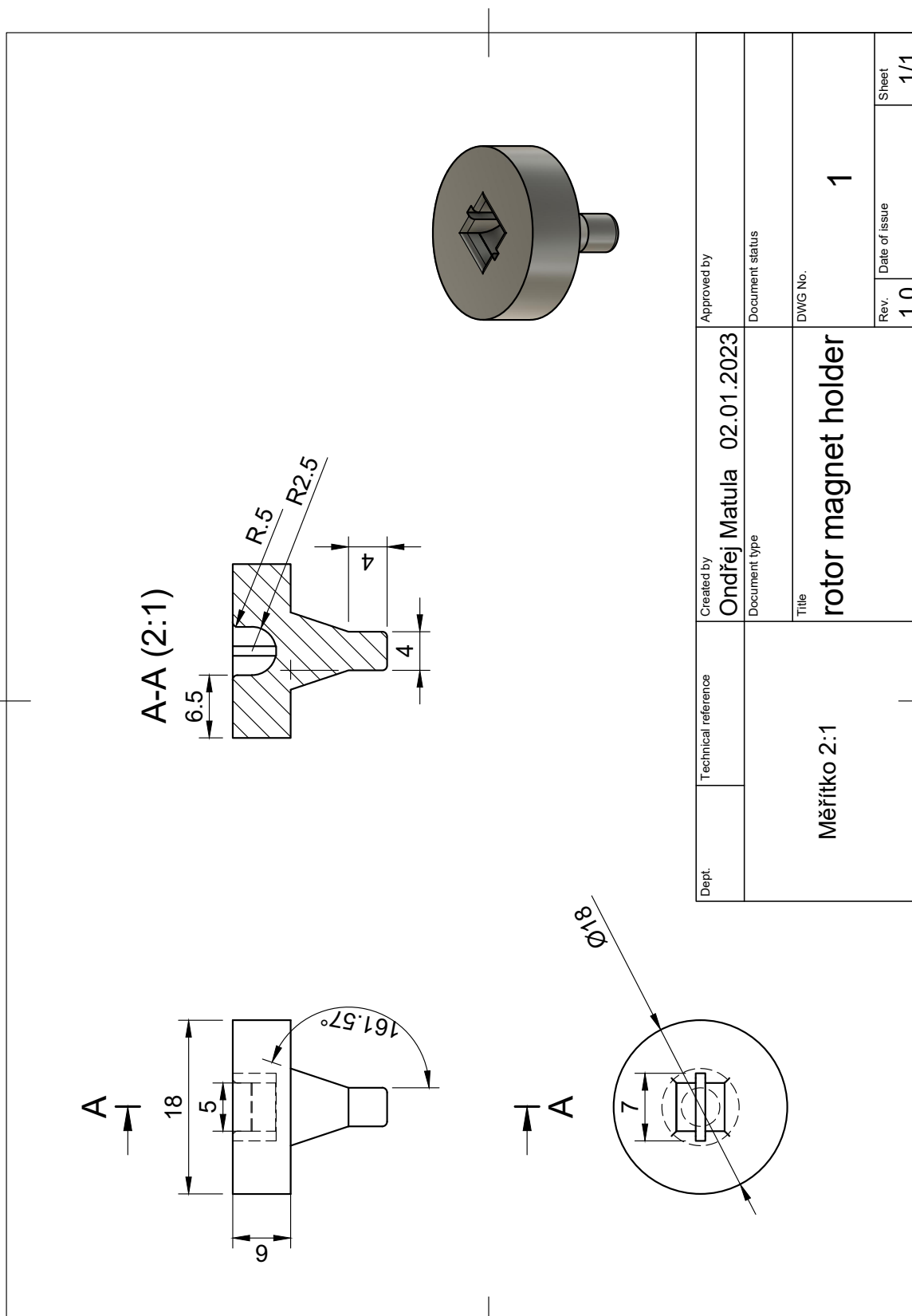
D	Obsah přiloženého CD	112
D.1	Projekt KiCad	112
D.2	Schéma ve formátu pdf	112
D.3	Výrobní podklady	112
D.4	Náčrty	112
D.5	Firmware	112
D.6	Adresářová struktura	112

A Náčrty přípravků pro 3D tisk

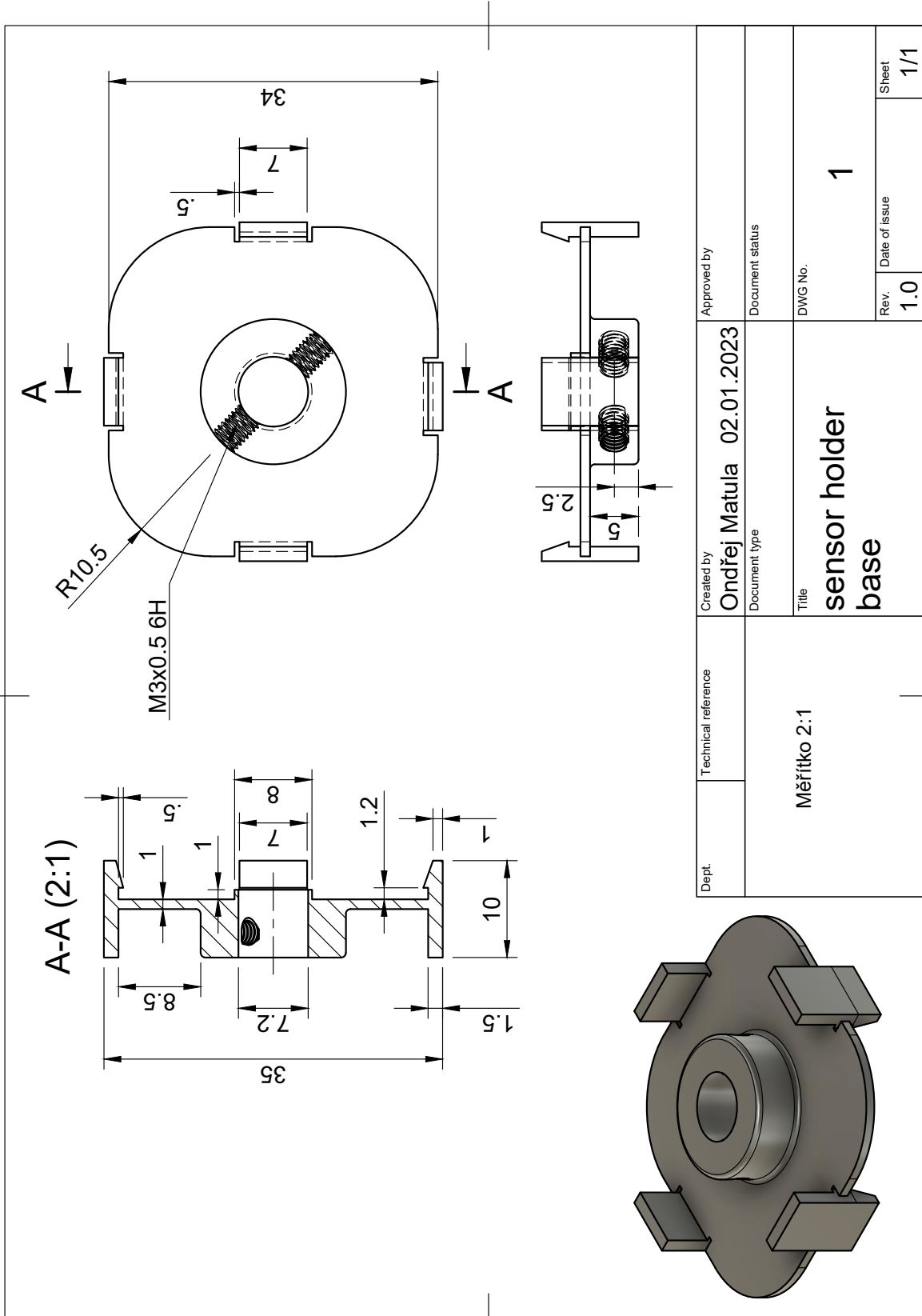
A.1 Přípravek na nevyváženost



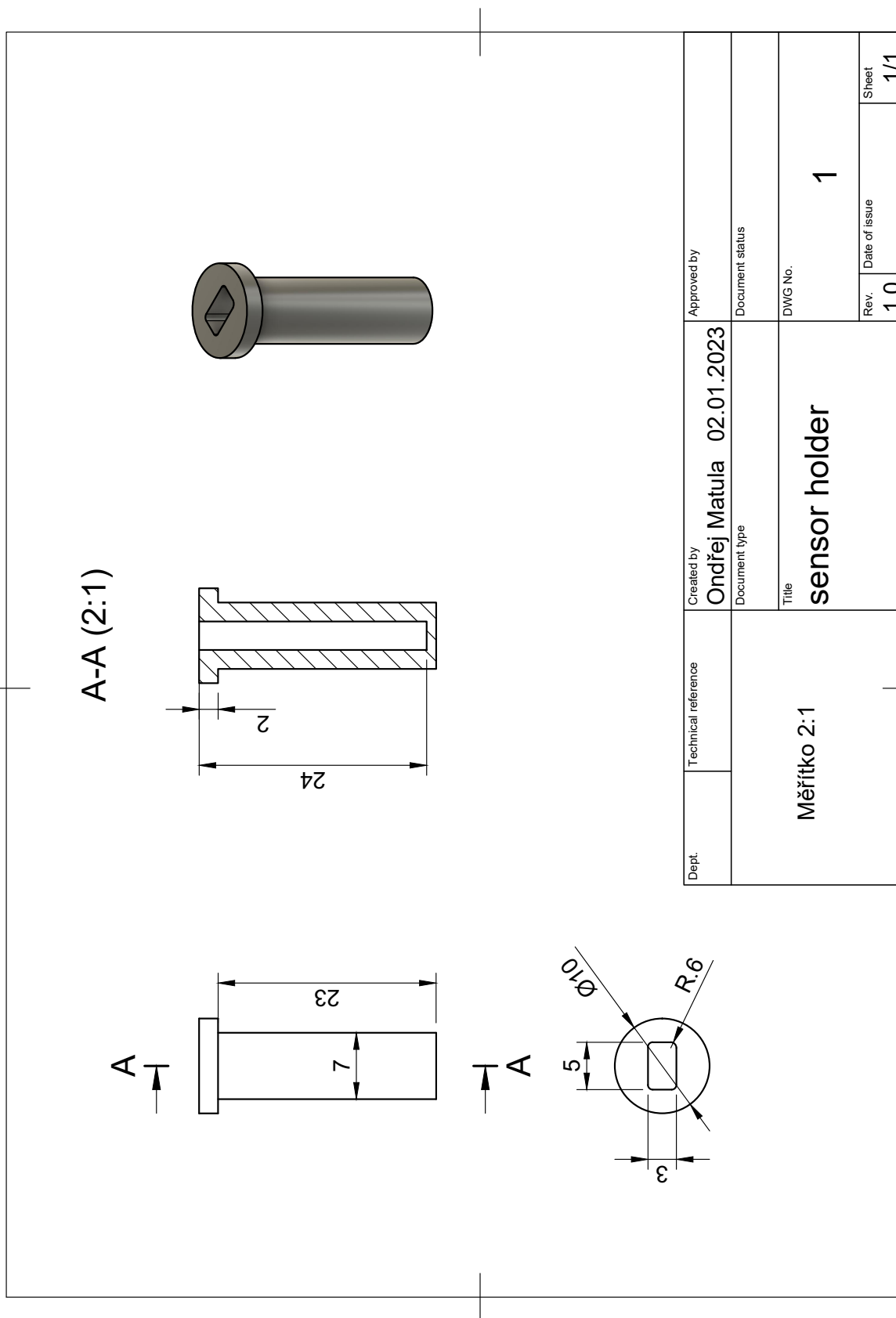
A.2 Držák magnetu na rotoru motoru



A.3 Základna pro snímač otáček

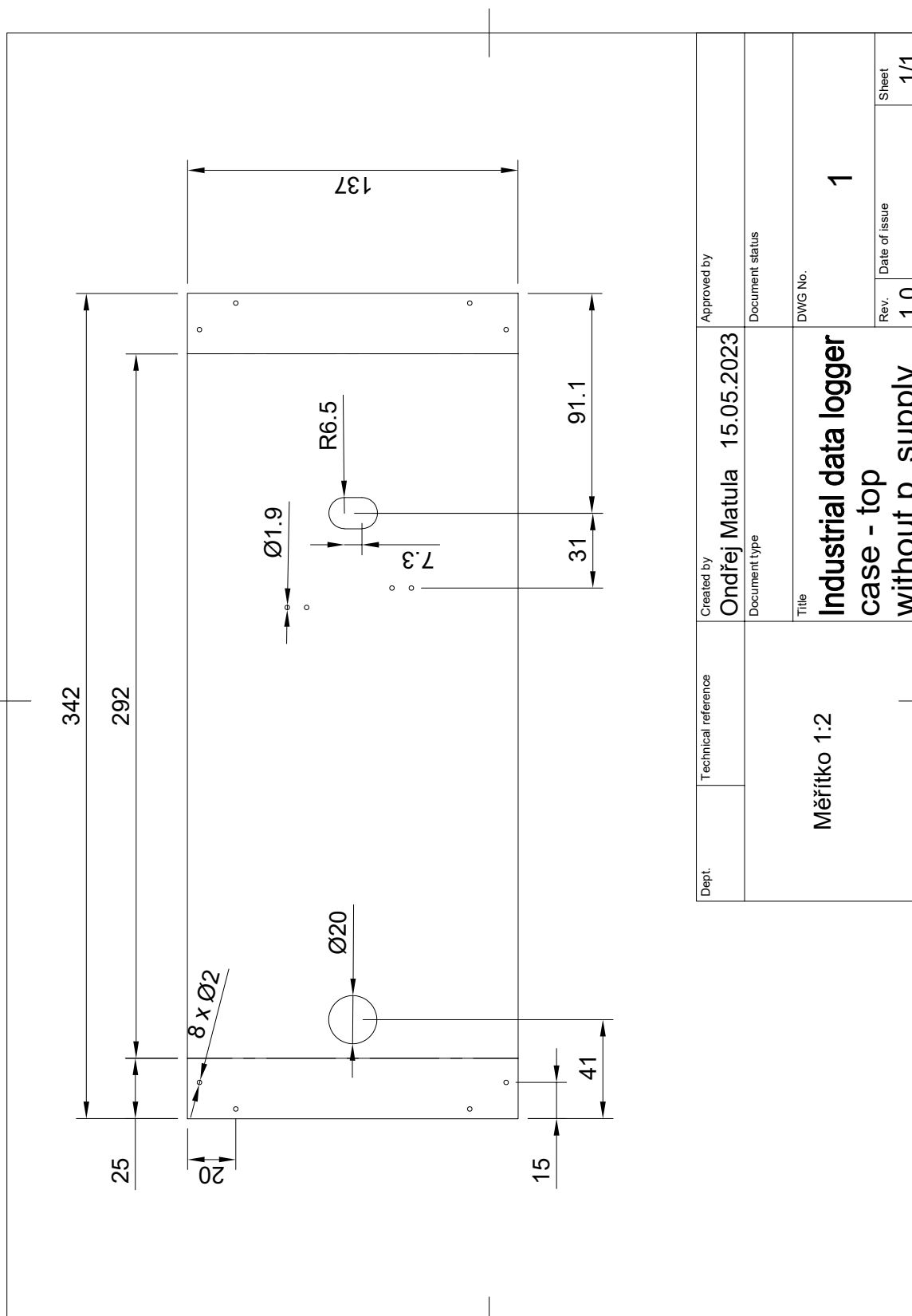


A.4 Držák pro snímač otáček

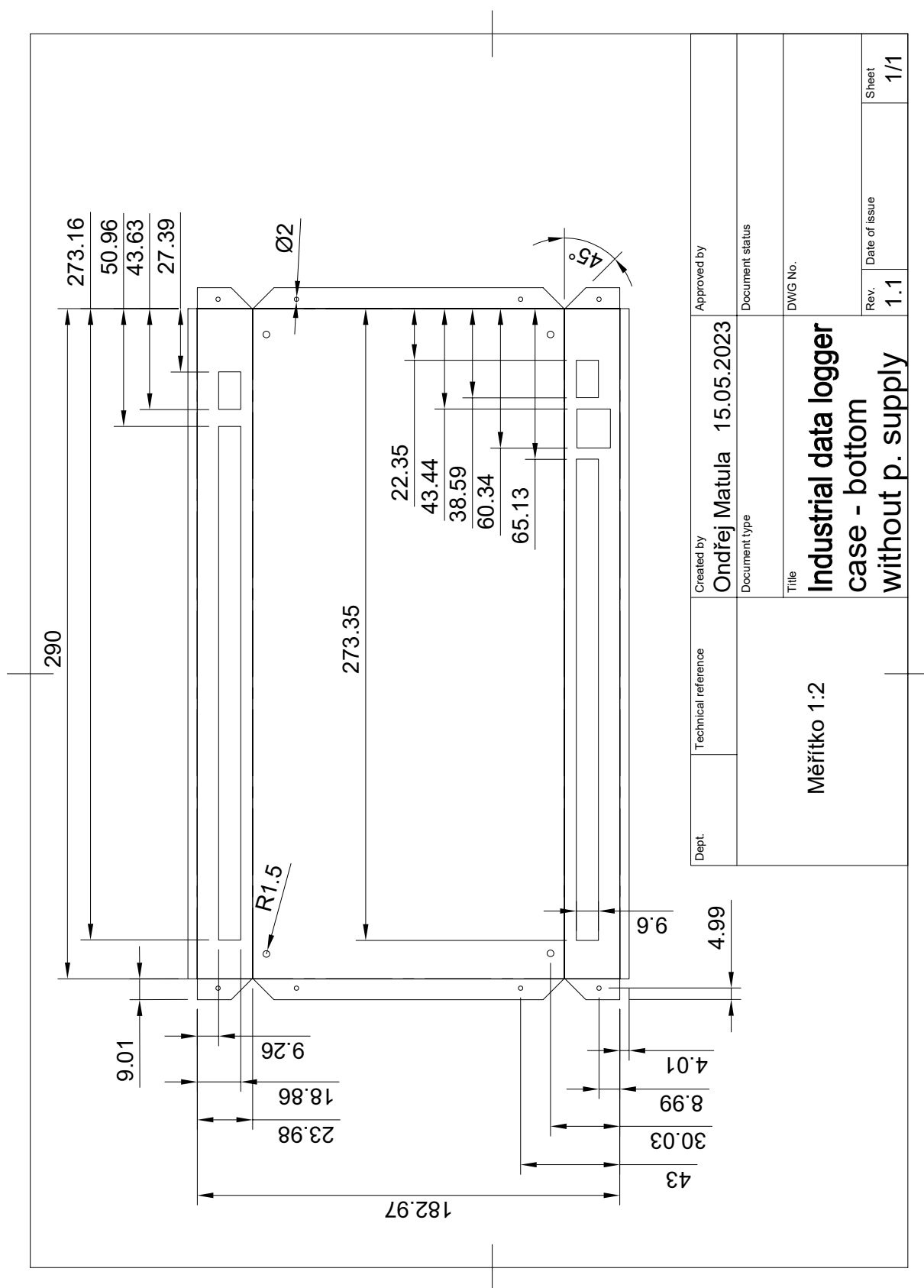


B Náčrty plechové krabičky skládané konstrukce

B.1 Skládaná krabička z plechu - vrchní díl

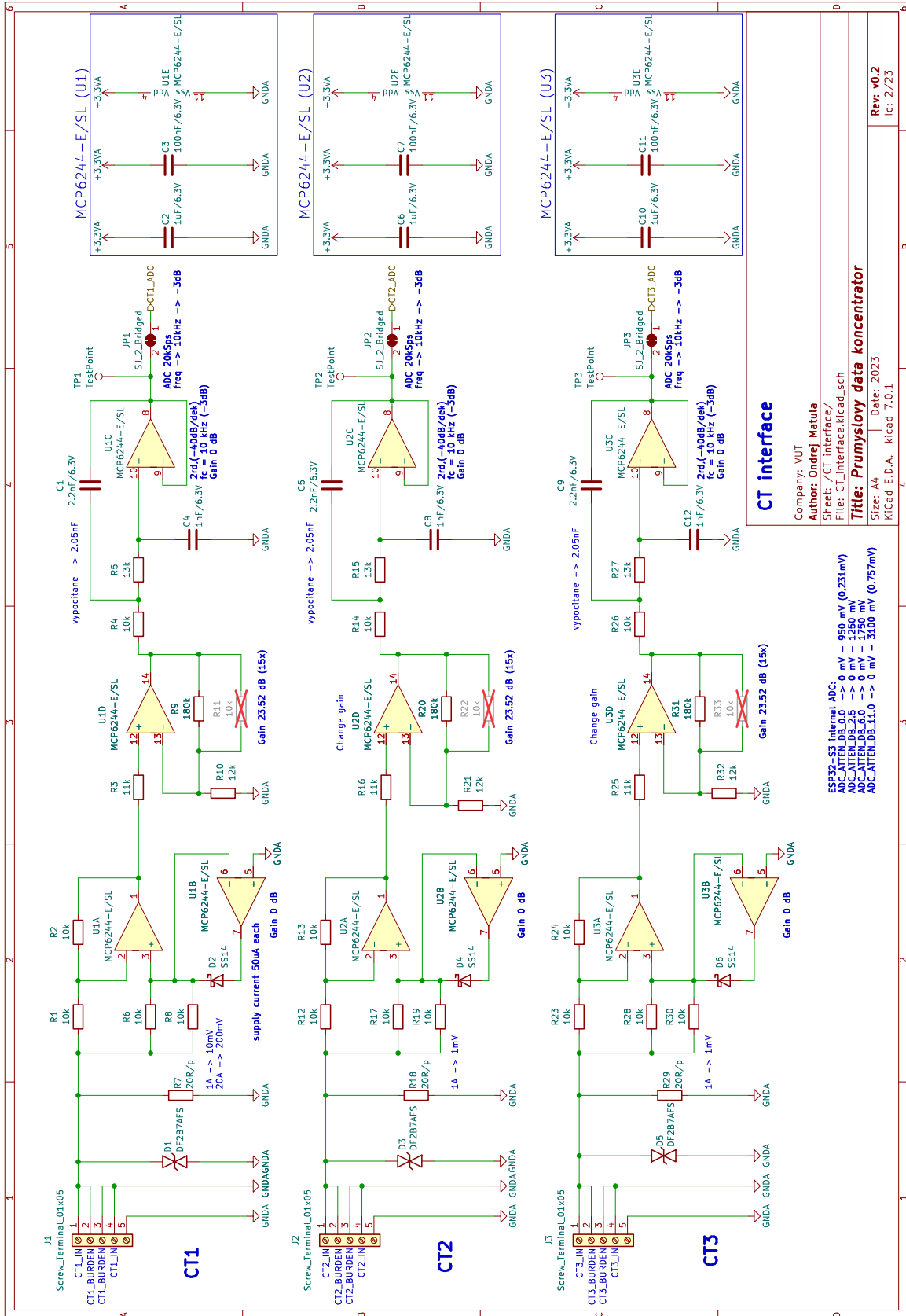


B.2 Skládaná krabička z plechu - spodní díl

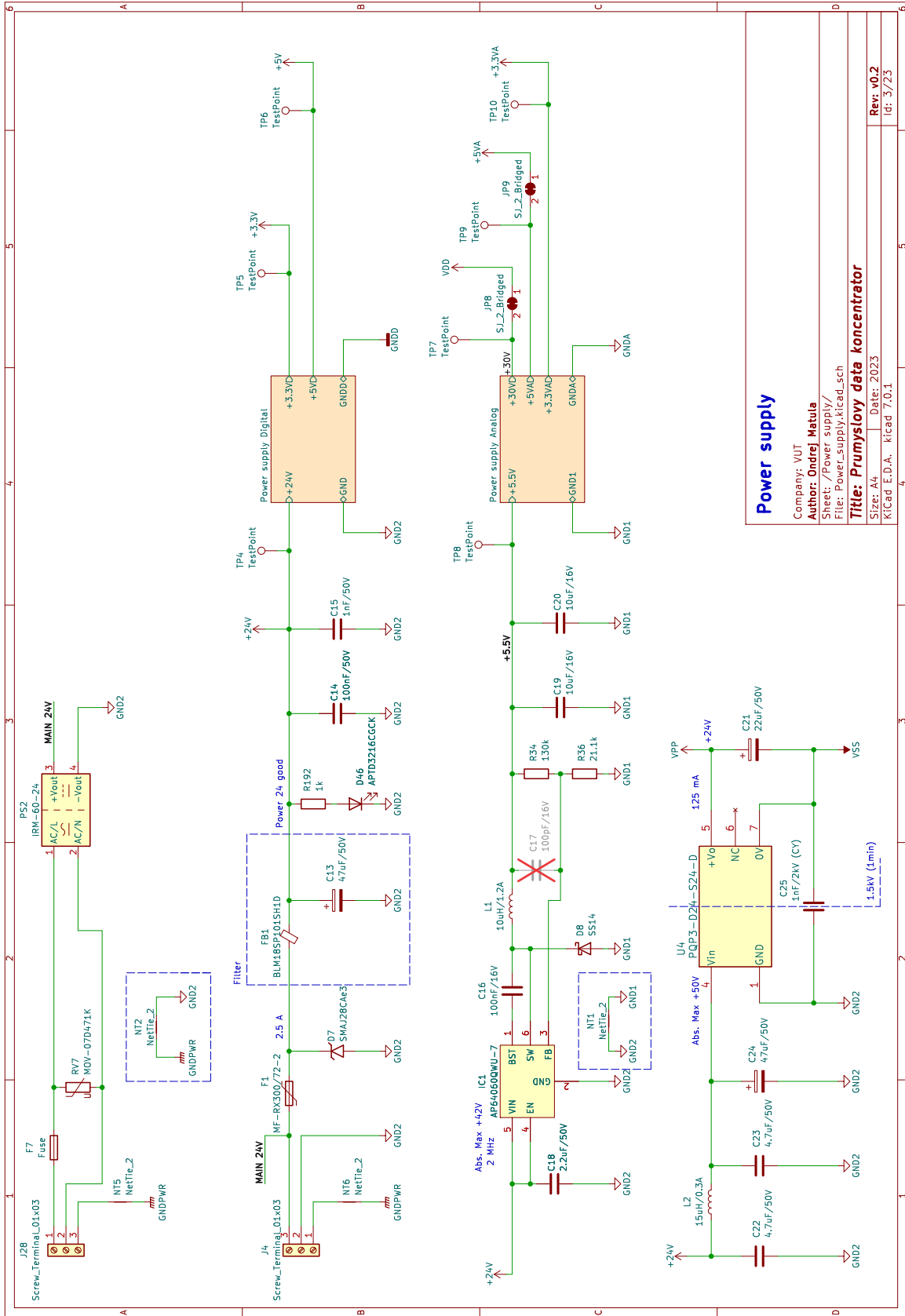


C Schémata zapojení

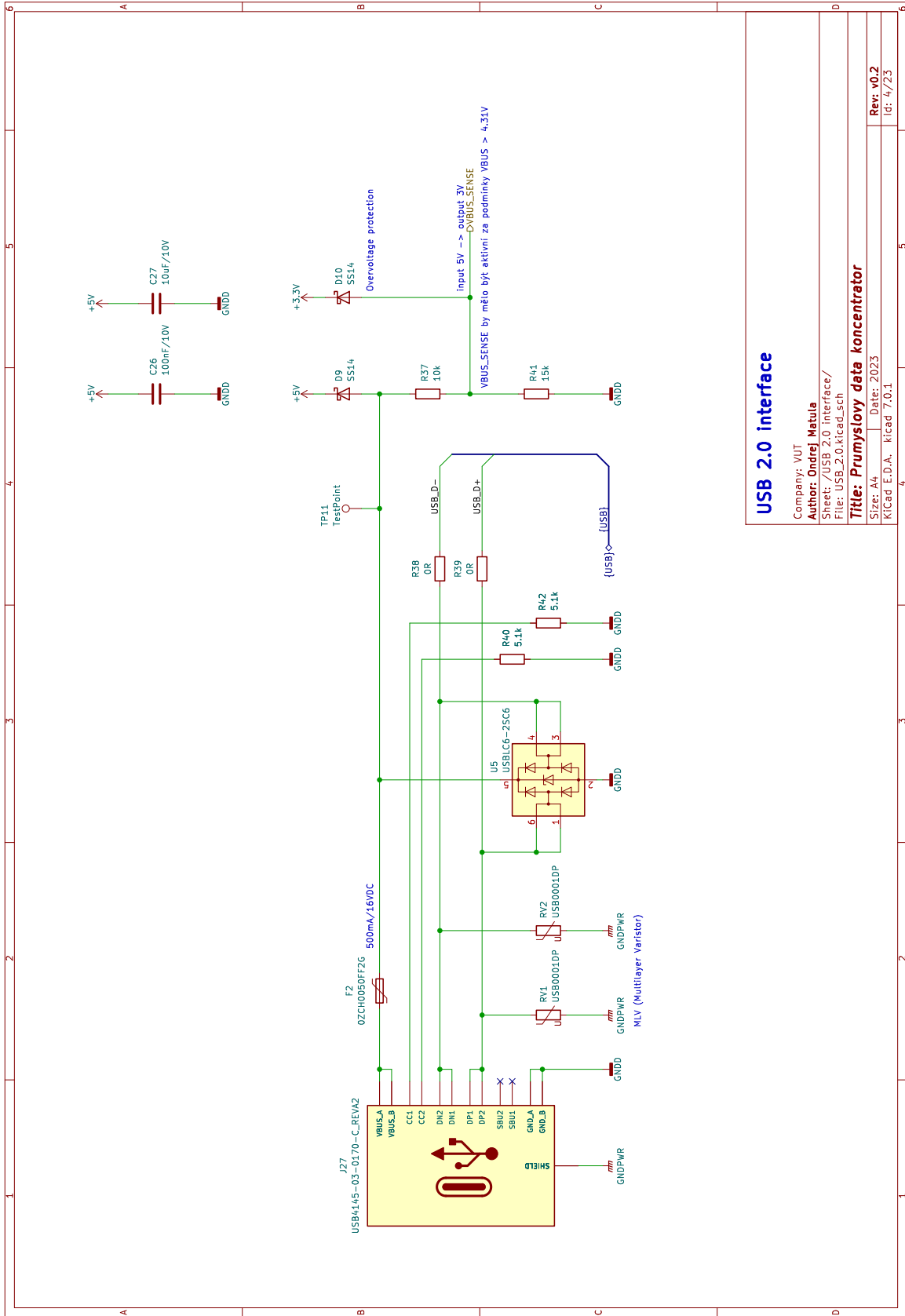
C.2 Rozhraní pro CT



C.3 Napájení

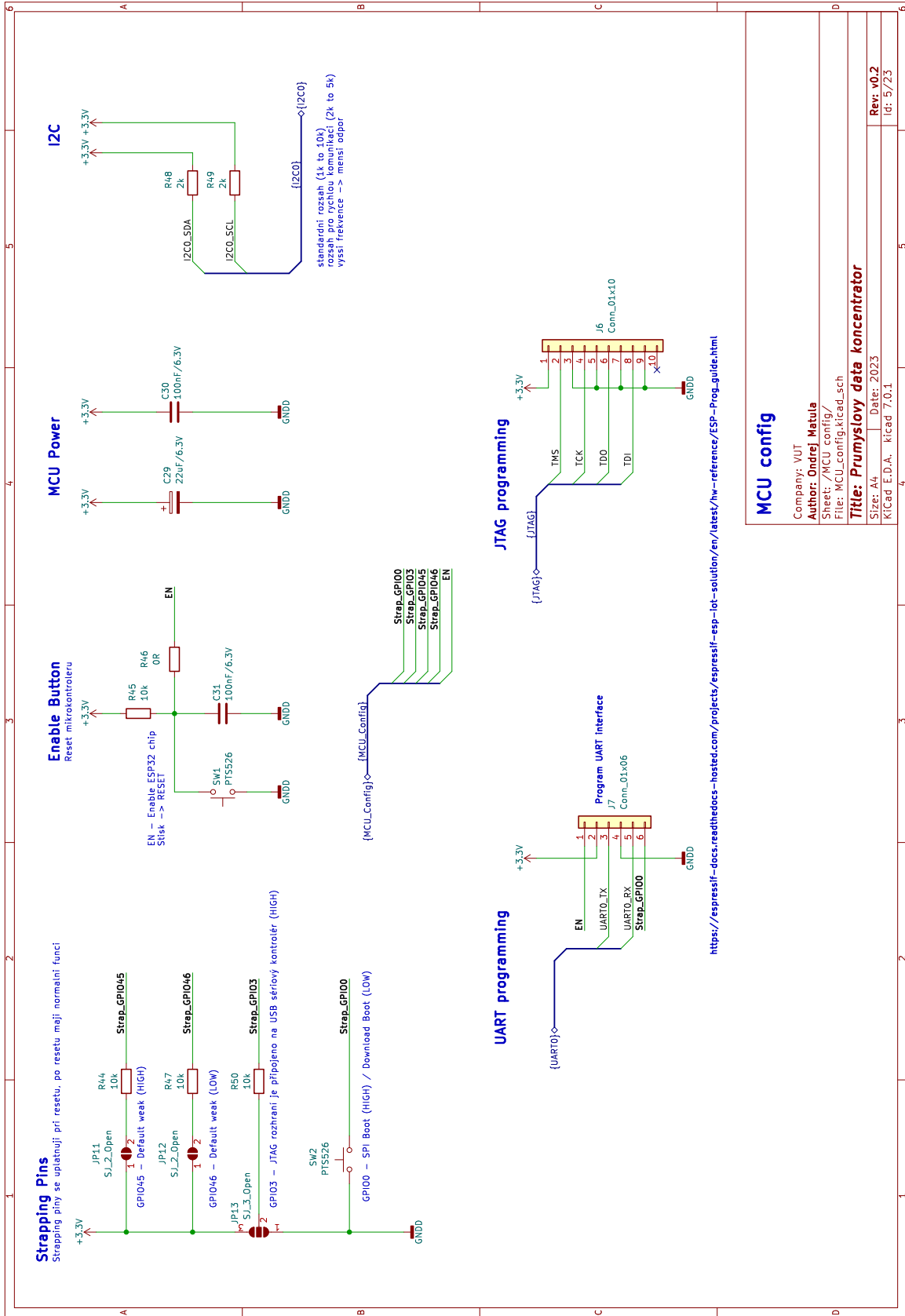


C.4 Rozhraní USB 2.0

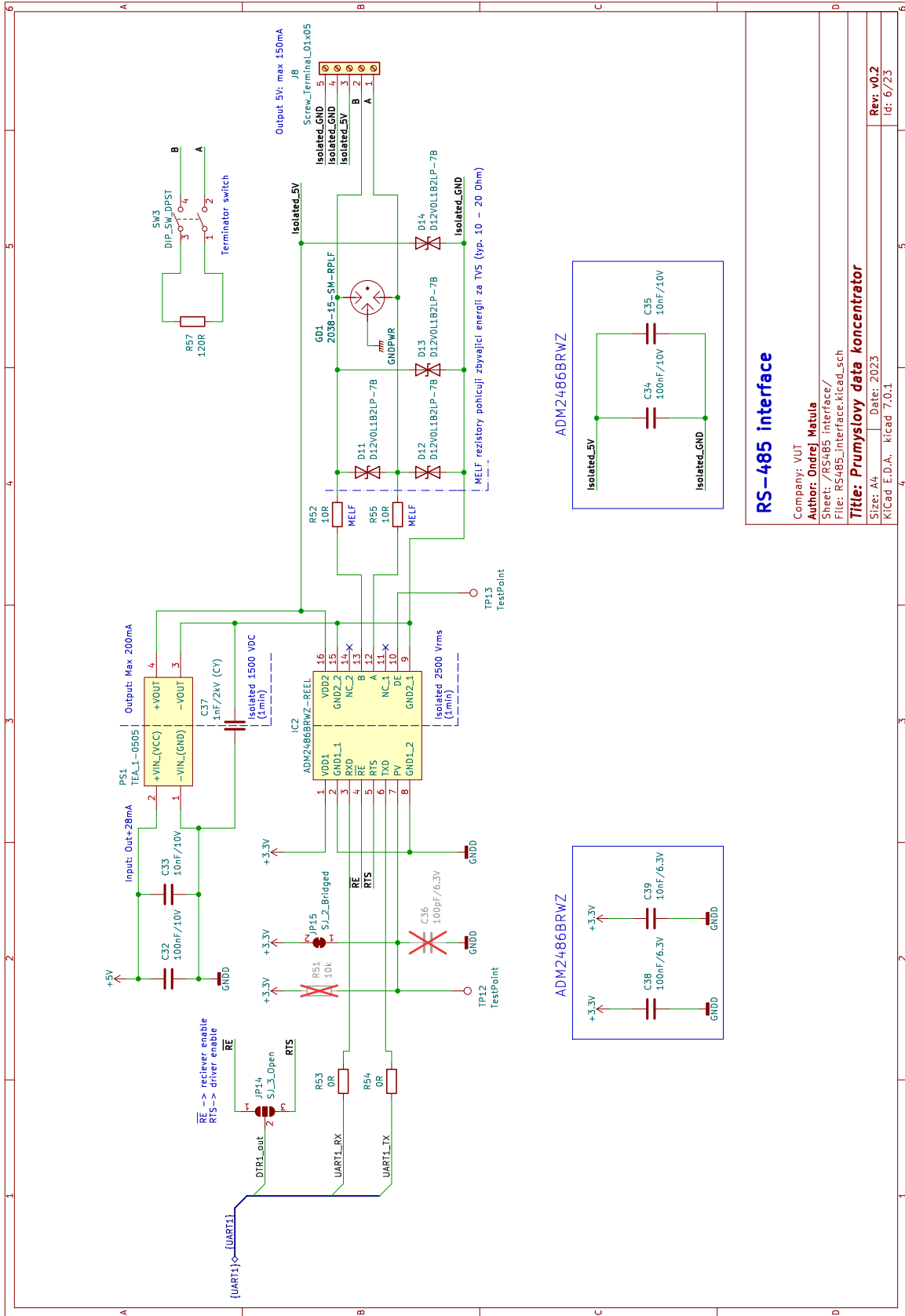


USB 2.0 interface	
Company:	VUT
Author:	Ondřej Matula
Sheet:	/USB 2.0 interface/
File:	USB_2.0.kicad.sch
Title: Průmyslový data koncentrátor	
Size:	A4
Date:	2023
KiCad:	E.D.A., kicad 7.0.1
Rev:	v0.2
Id:	4/23

C.5 HW konfigurace MCU



C.6 Rozhraní RS-485

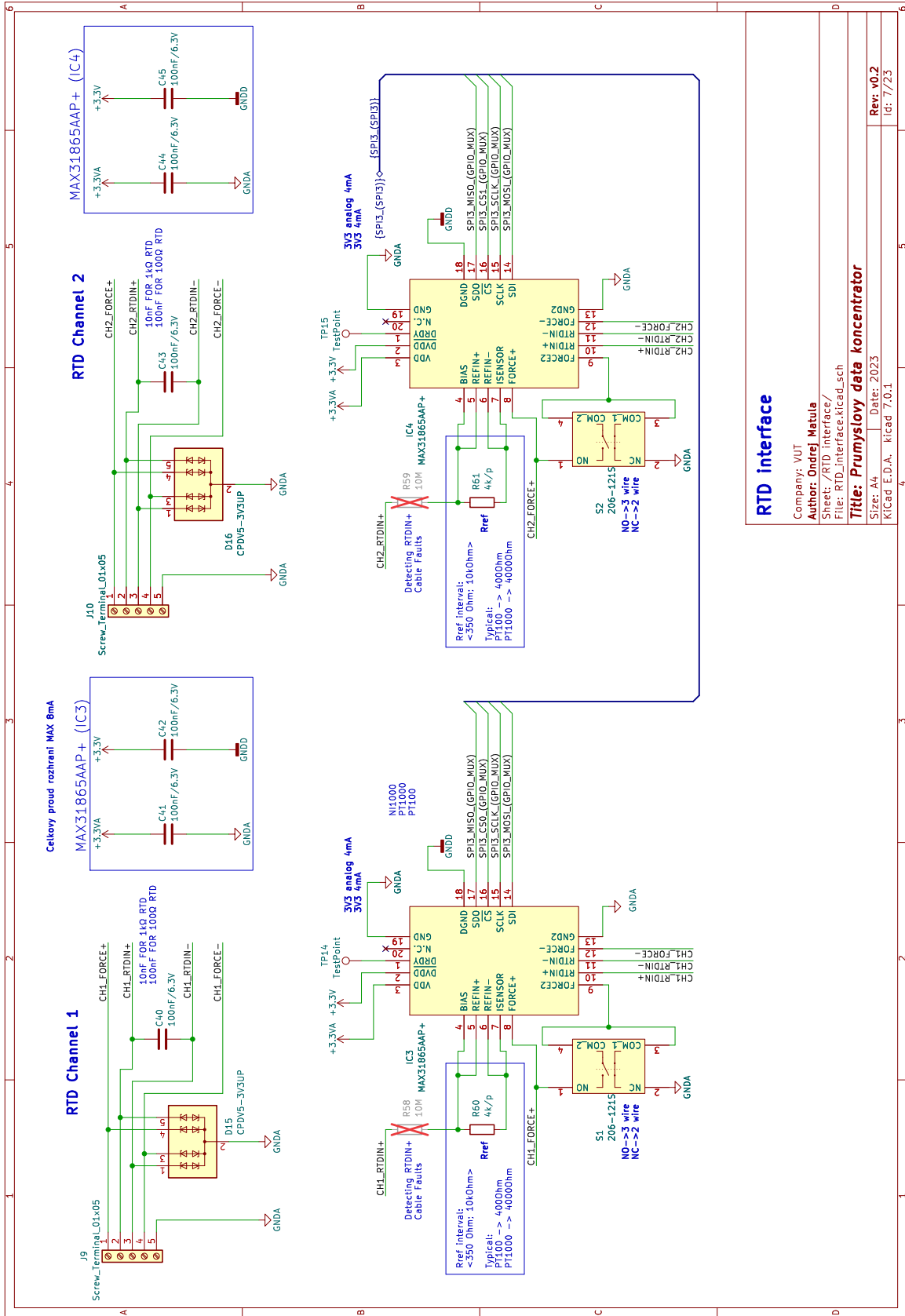


RS-485 interface

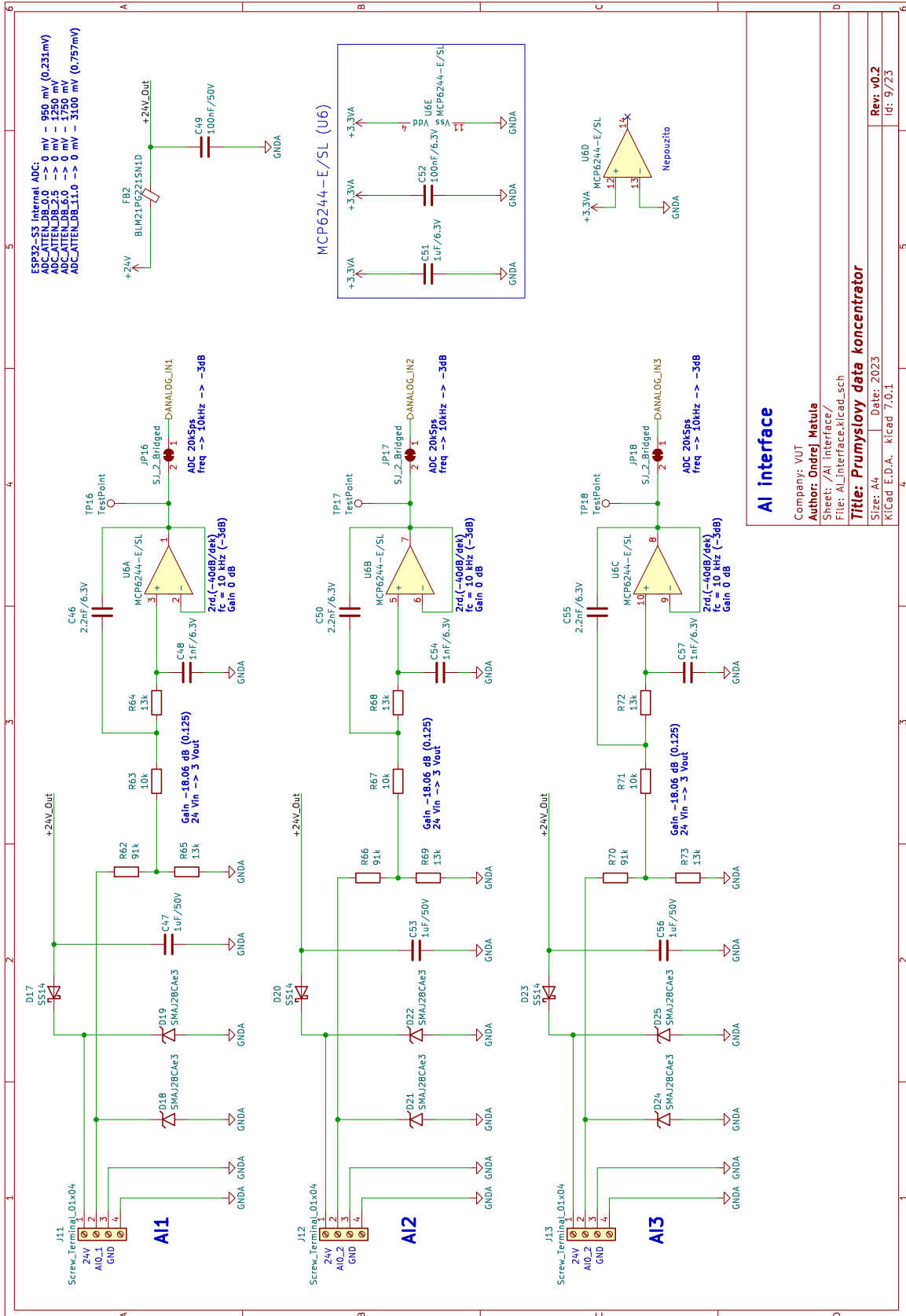
Company: VUT
 Author: Ondřej Matula
 Sheet: /RS485 interface/
 File: RS485_interface.kicad.sch
Title: Průmyslový data koncentrátor
 Size: A4 Date: 2023
 KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Rev: v0.2
 Id: 6/23

C.7 Rozhraní RTD



C.8 Rozhraní analogových vstupů

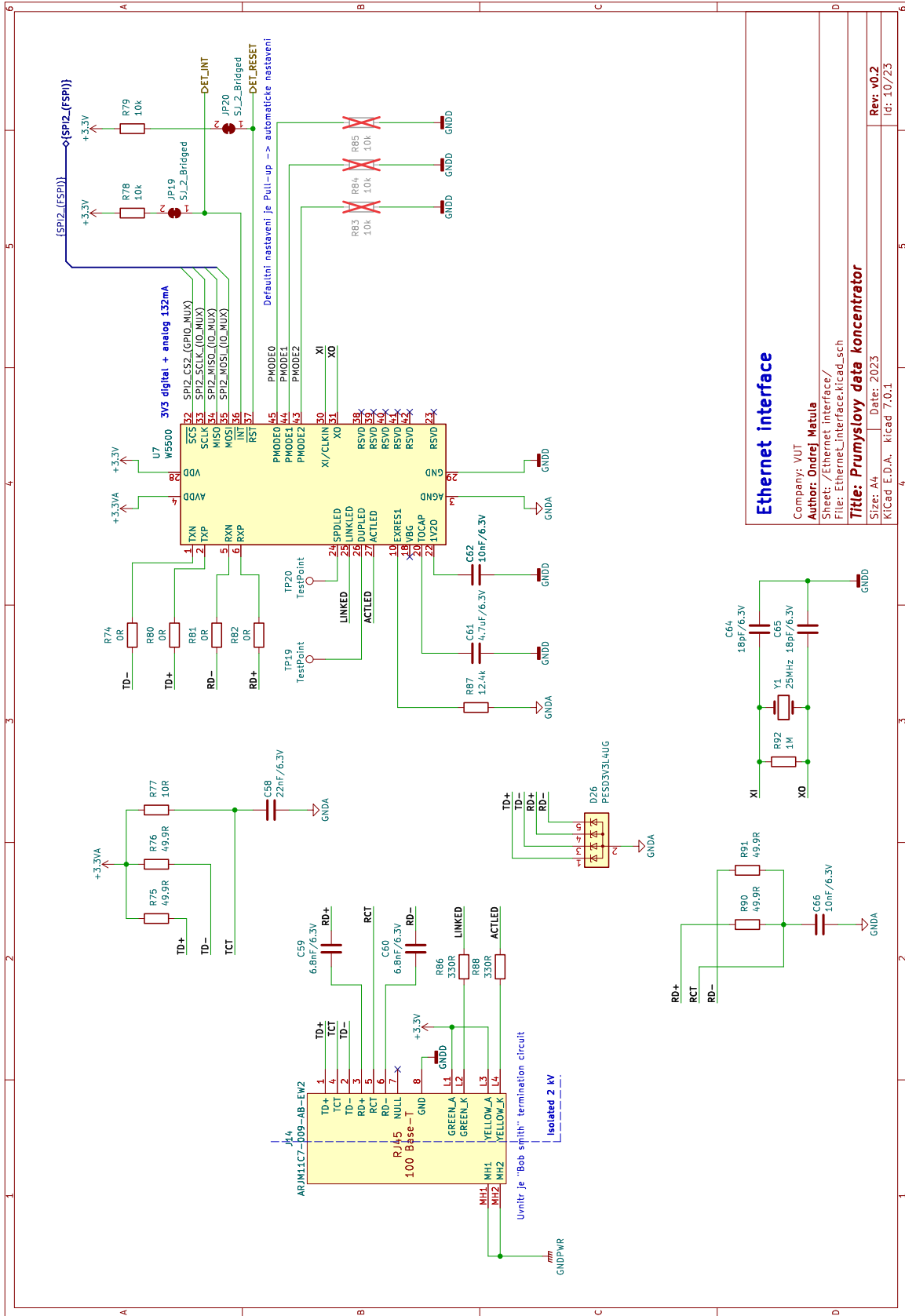


AI interface

Company: YUT
 Author: Ondrej Matula
 Sheet: AI interface/
 File: AIinterface.kicad.sch
Title: Prumyslový data koncentrátor
 Size: A4 Date: 2023
 Kicad: E.D.A., kicad 7.0.1

Rev: v0.2
 Id: 9/23

C.9 Rozhraní Ethernet



Ethernet interface

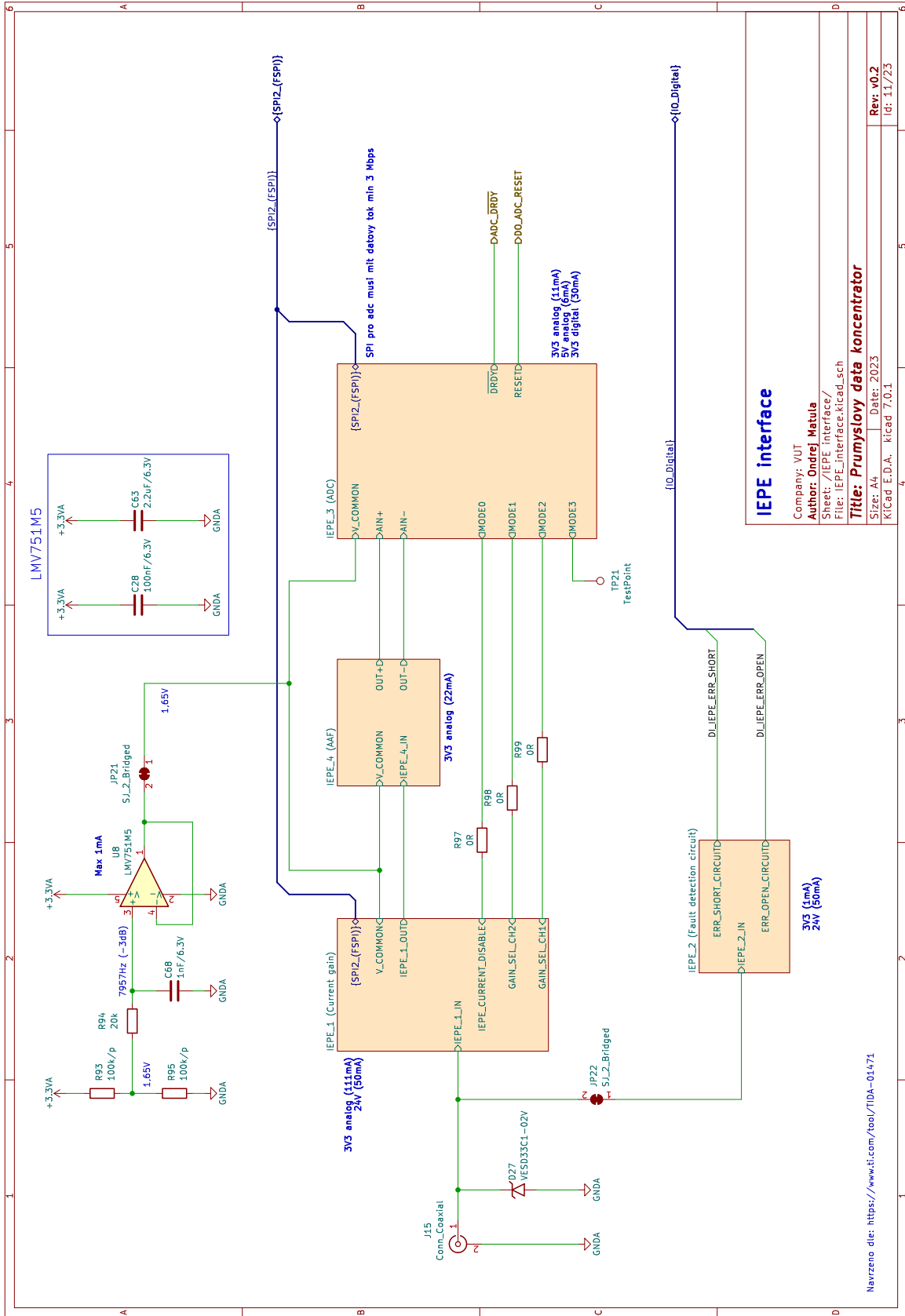
Company: VUT
 Author: Ondřej Matula
 Sheet: /Ethernet interface/
 File: Ethernet_interface.kicad.sch

Title: Průmyslový data koncentrator

Size: A4 Date: 2023
 KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Rev: v0.2
 Id: 10/23

C.10 IEPE kompletní schéma



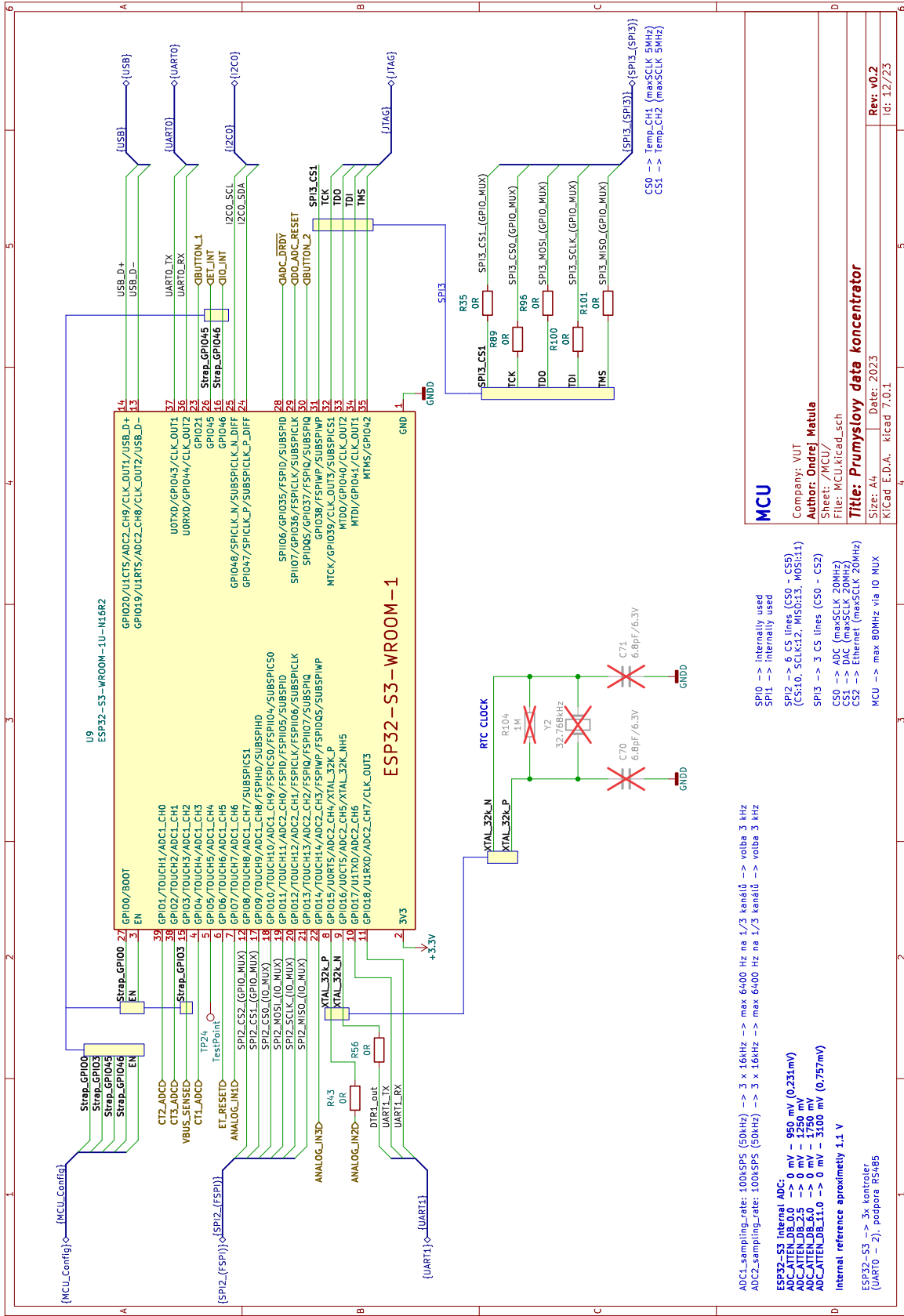
IEPE interface

Company: VUT
 Author: **Ondřej Matula**
 Sheet: //IEPE interface/
 File: IEPE_interface.kicad.sch
Title: Průmyslový data koncentrátor
 Size: A4 Date: 2023
 KiCad: E.D.A., kicad 7.0.1

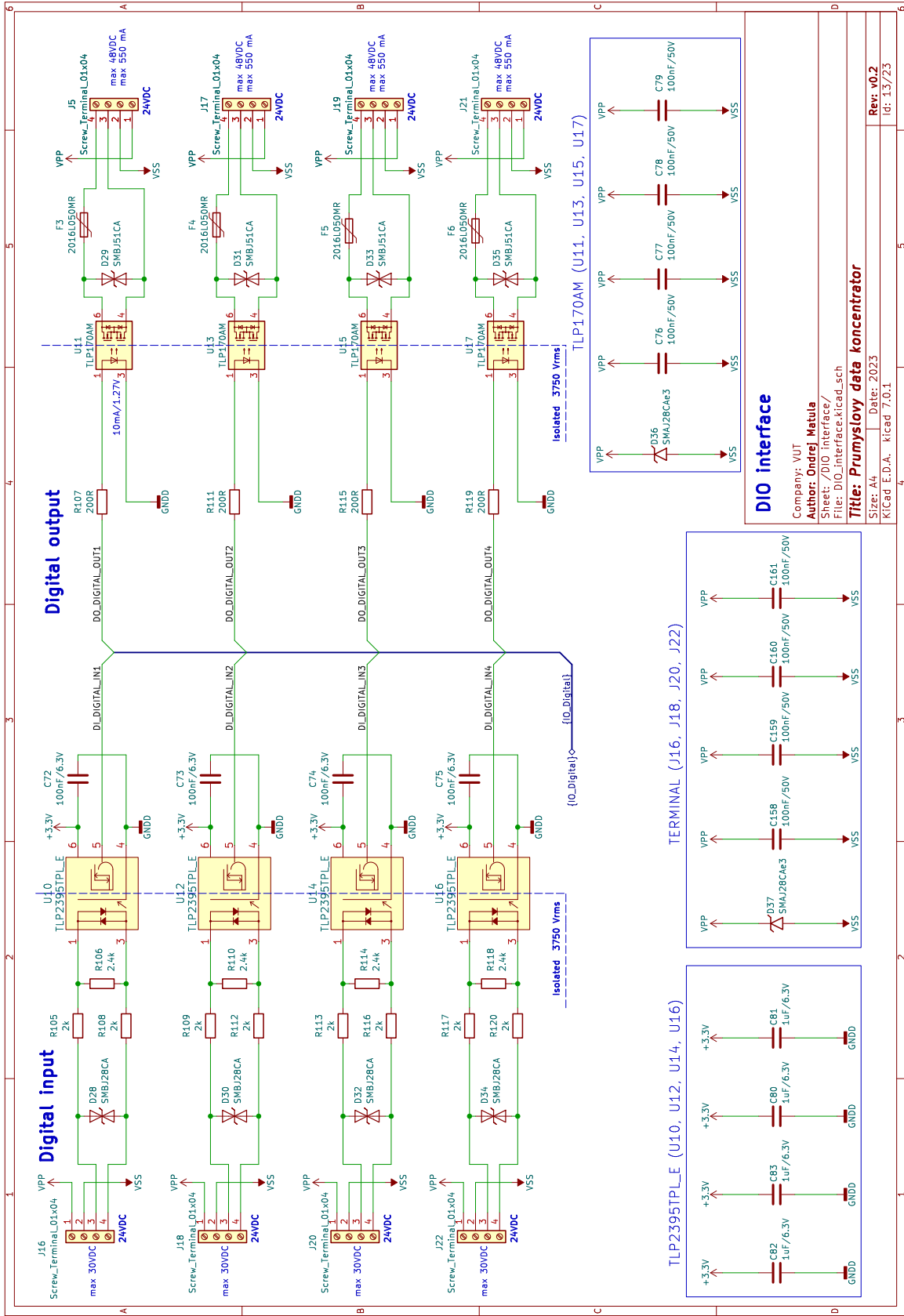
Rev: v0.2
 Id: 11/23

Navrženo dle: <https://www.ti.com/tool/TIDA-01471>

C.11 Mikrokontrolér



C.12 Rozhraní DIO



DIO interface

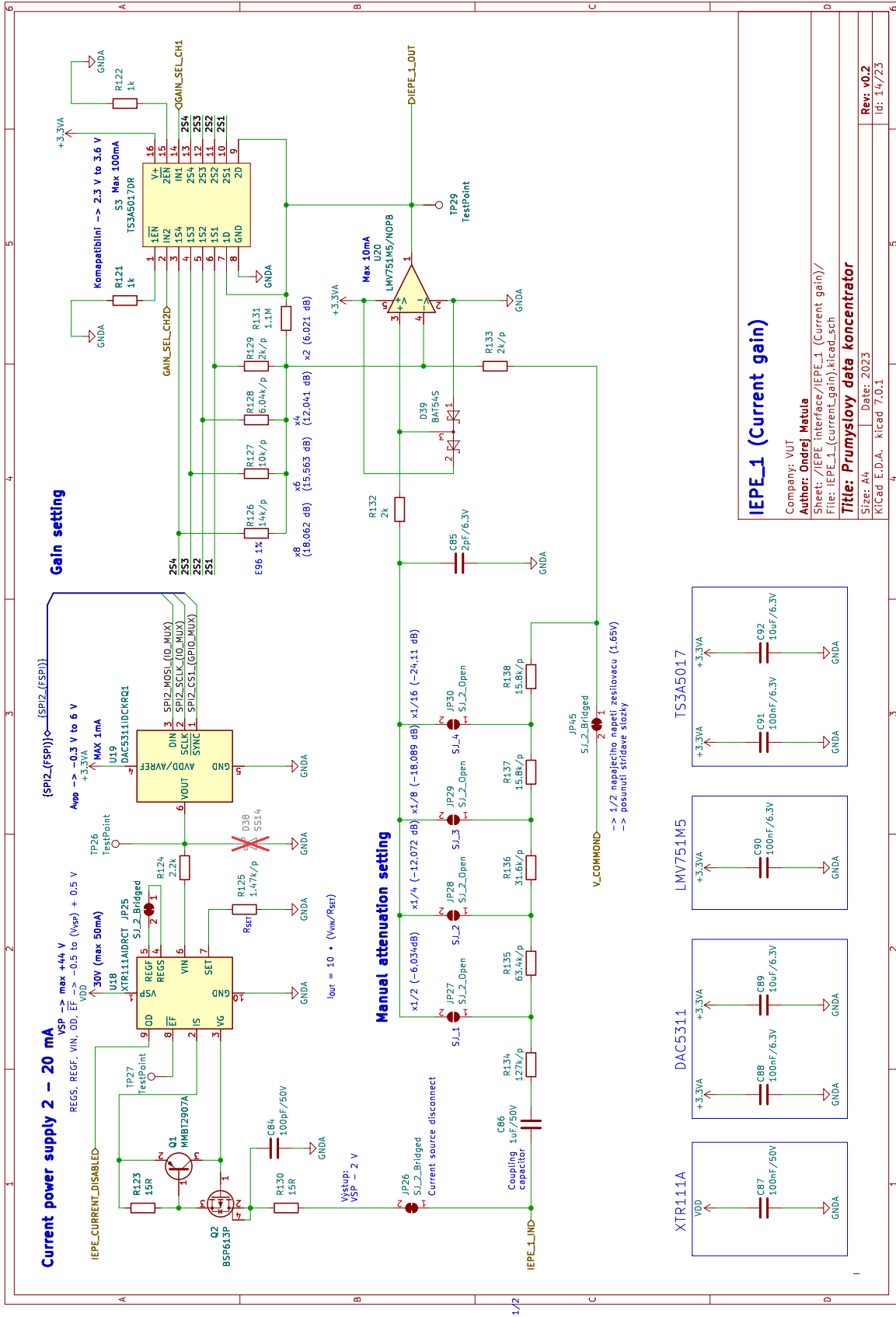
Company: YUT
 Author: Ondřej Matula
 Sheet: /DIO interface/
 File: DIO_interface.kicad.sch

Title: Prumyslový data koncentrator

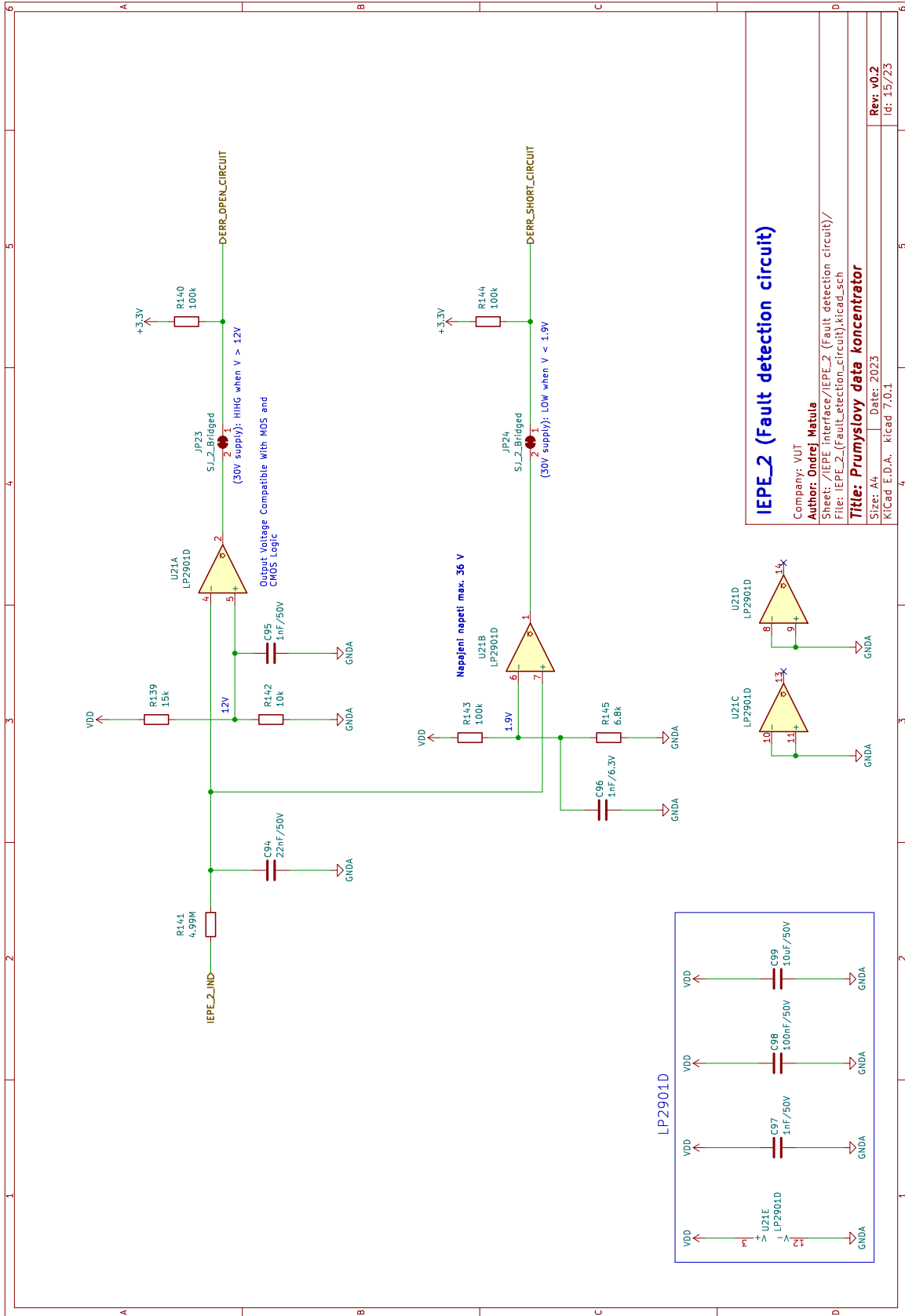
Size: A4 Date: 2023
 KiCad E.D.A. kicad 7.0.1

Rev: v0.2
 Id: 13/23

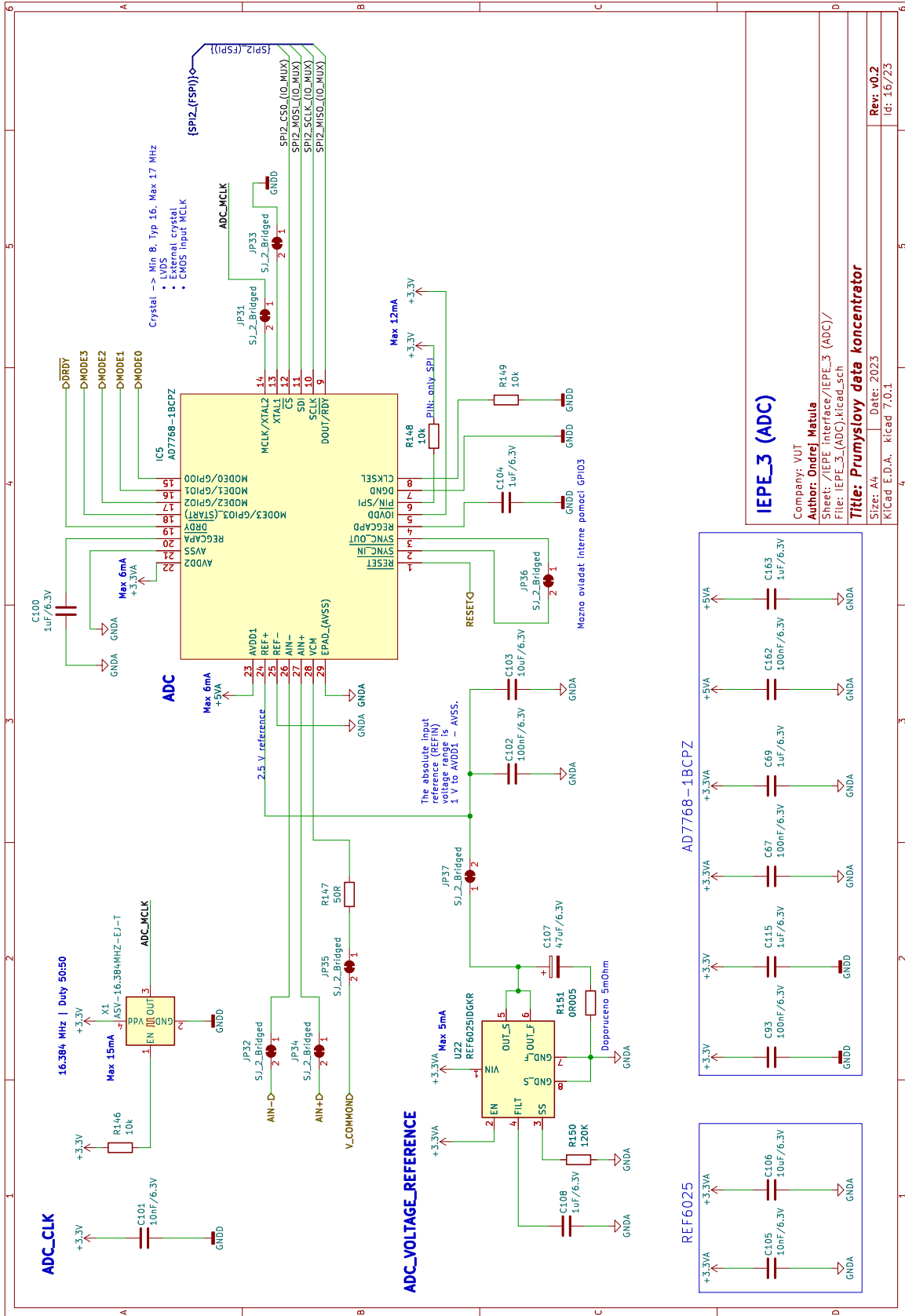
C.13 IEPE 1



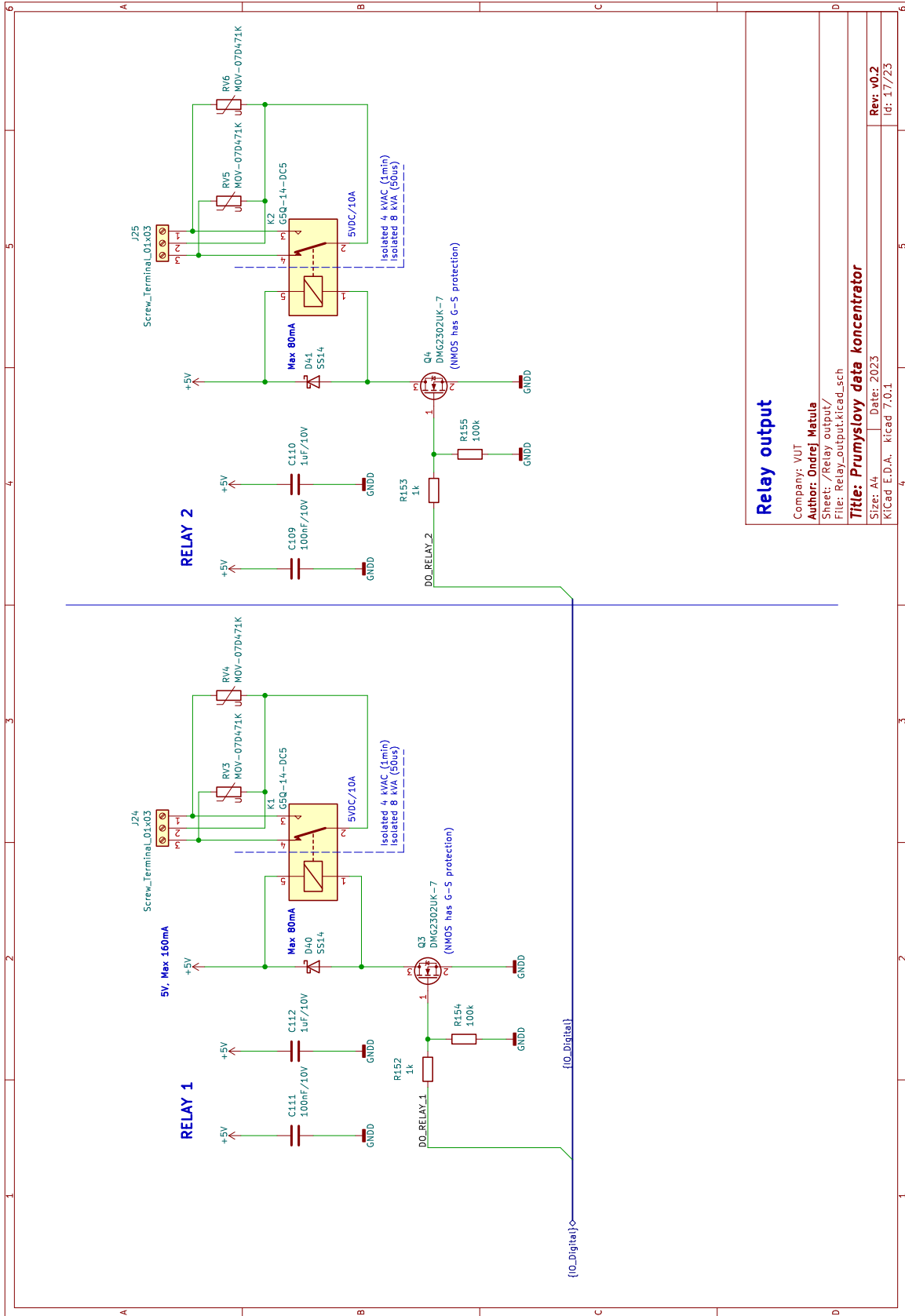
C.14 IEPE 2



C.15 IEPE 3



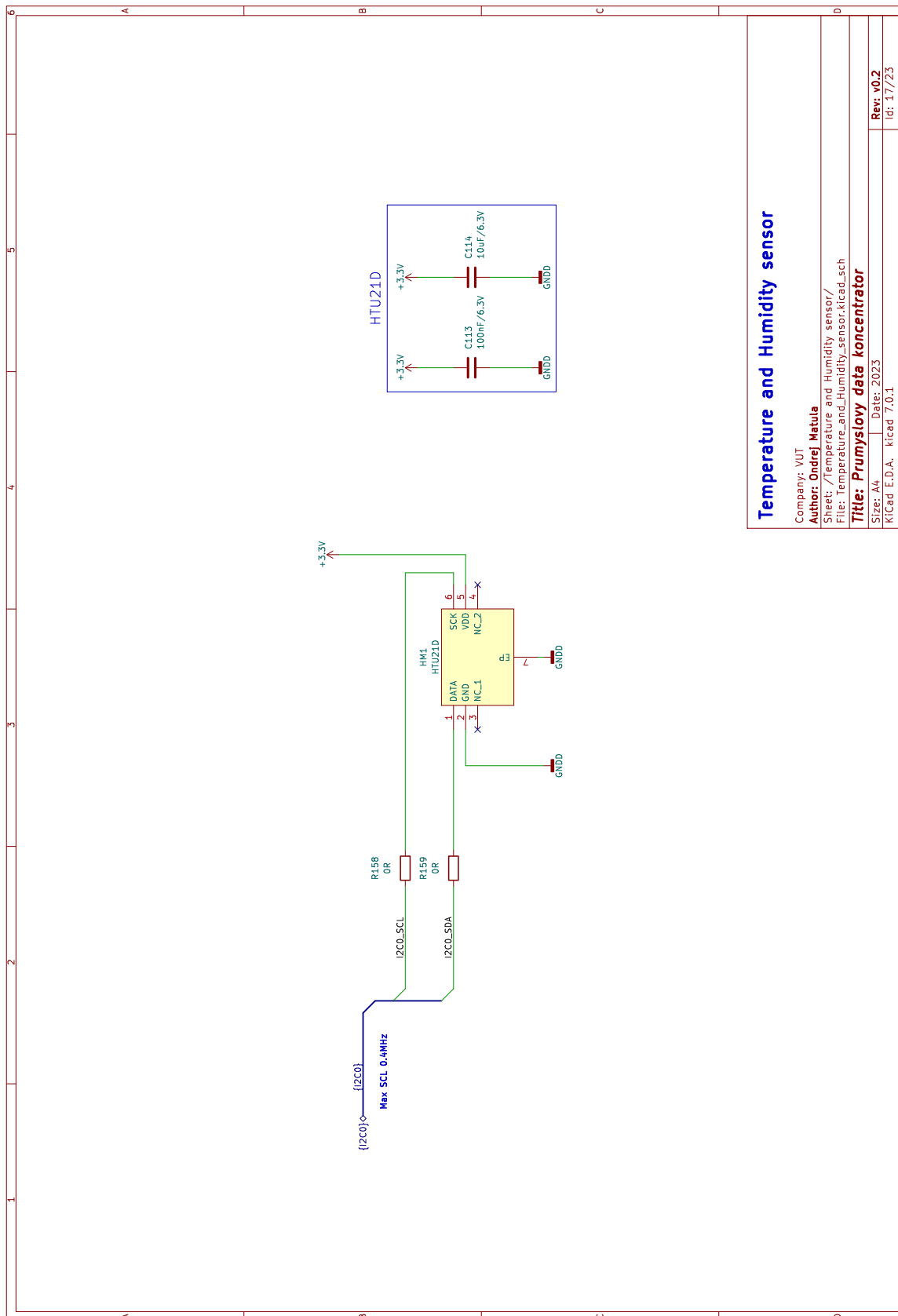
C.16 Výkonové výstupy



Relay output

Company:	VUT
Author:	Ondřej Matula
Sheet:	/Relay output/
File:	Relay_output.kicad.sch
Title:	Průmyslový data koncentrátor
Size:	A4
Date:	2023
KiCad:	E.D.A., kicad 7.0.1
Rev:	v0.2
Id:	1.7/2.3

C.17 Interní snímač teploty a vlhkosti



Temperature and Humidity sensor

Company: VUT

Author: Ondřej Matula

Sheet: /Temperature and Humidity sensor/

File: Temperature_and_Humidity_sensor.kicad.sch

Title: Průmyslový data koncentrátor

Size: A4

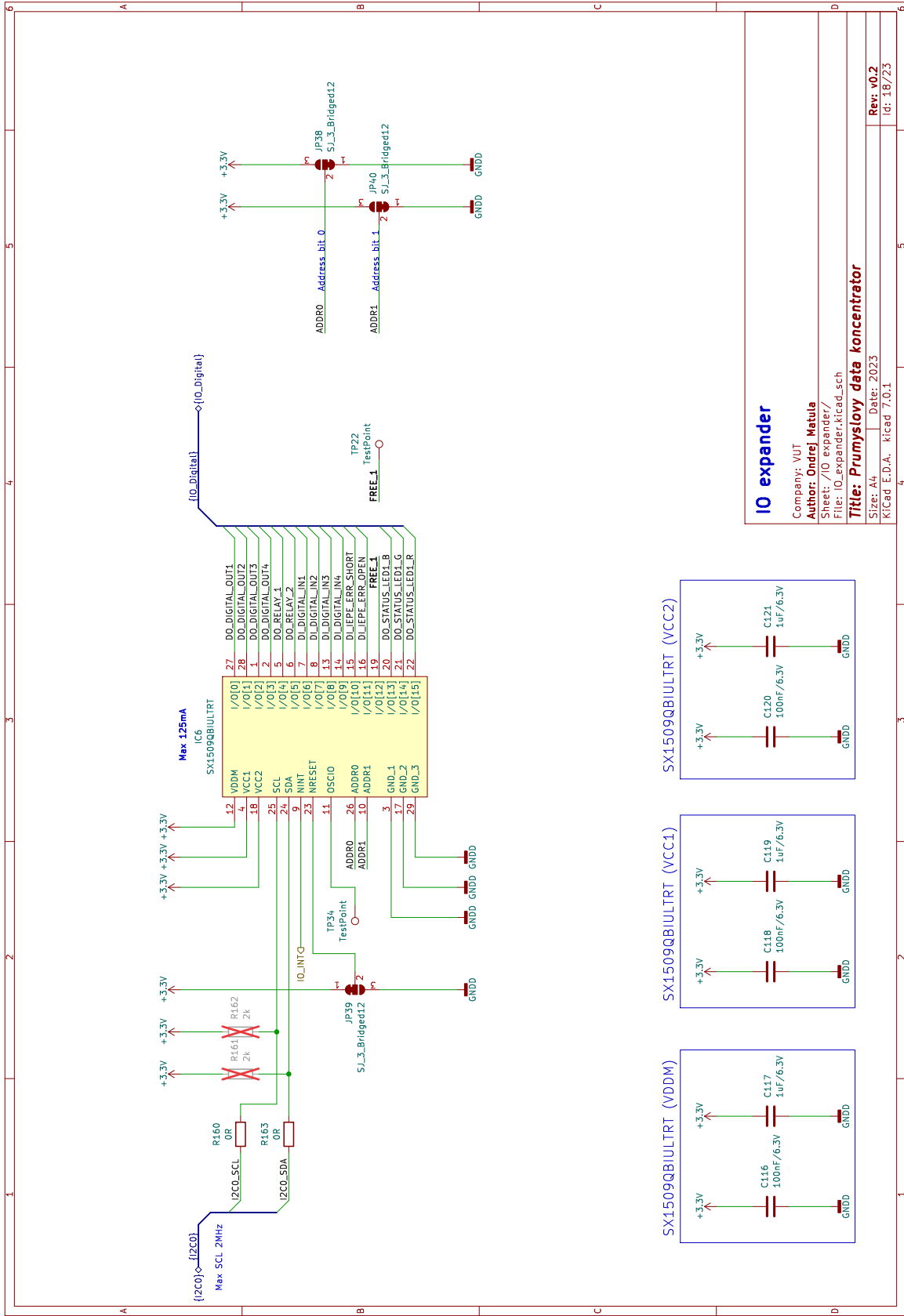
Date: 2023

KiCad E.D.A., kicad 7.0.1

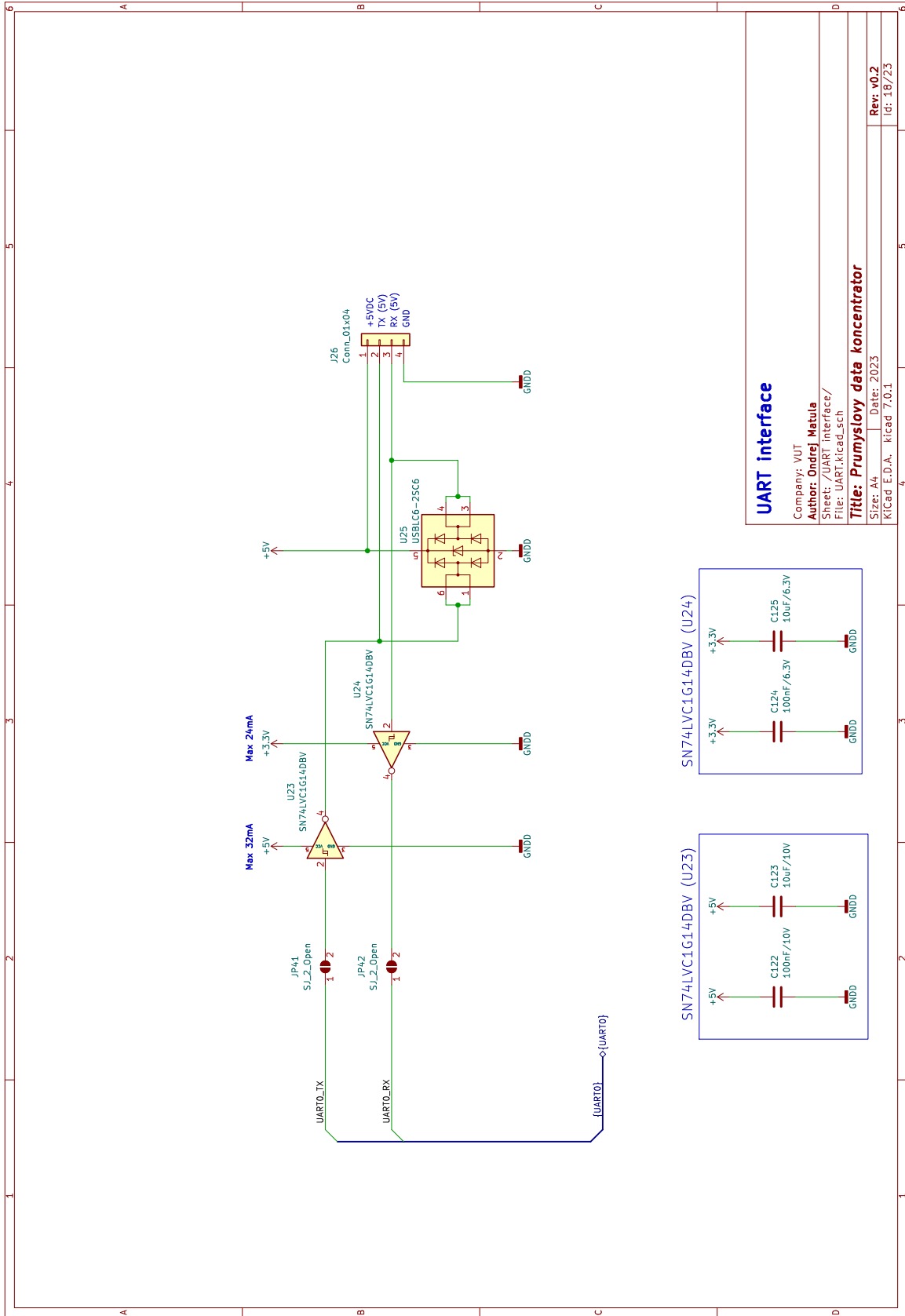
Rev: v0.2

Id: 1.7/2.3

C.18 IO expander

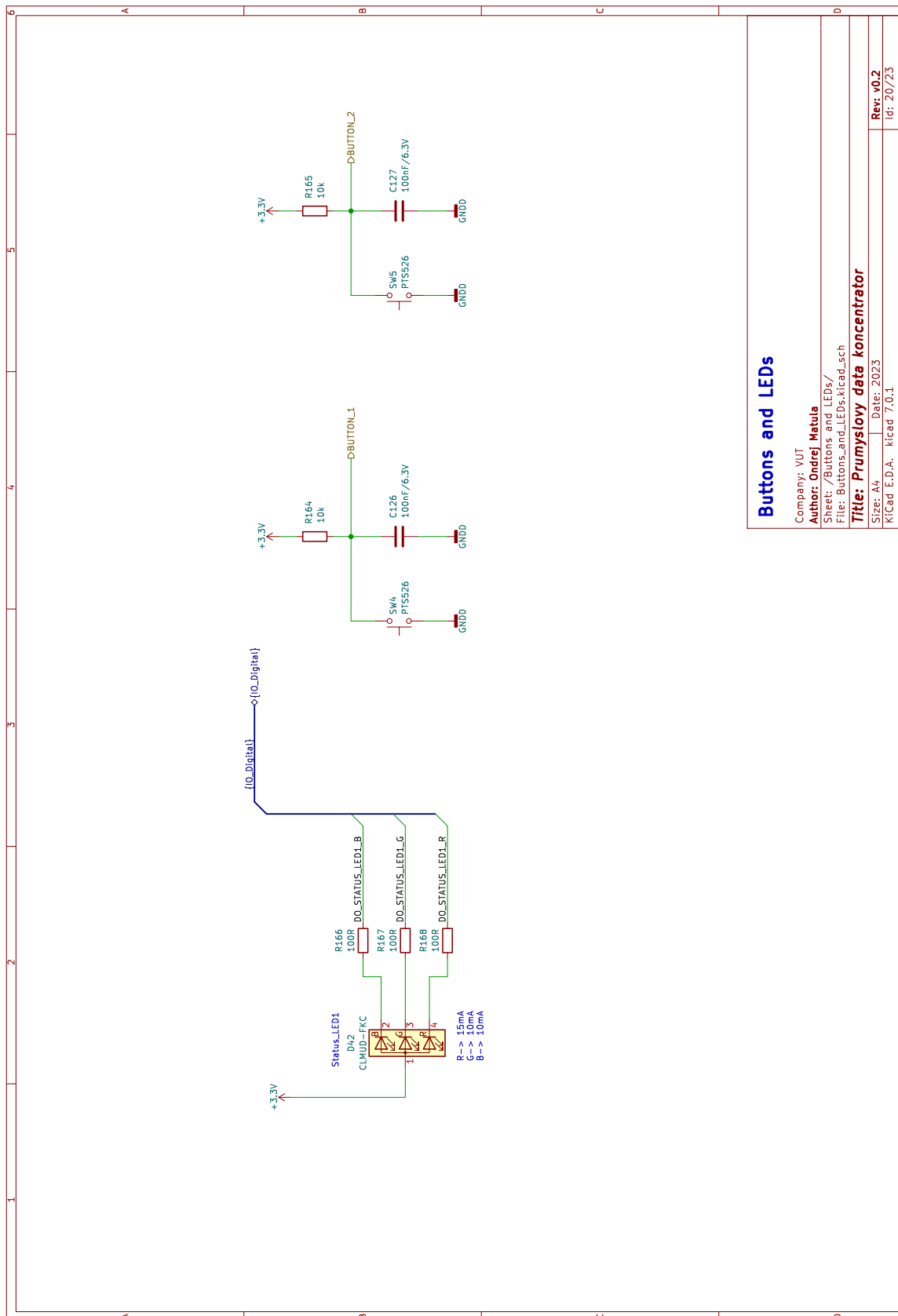


C.19 Rozhraní UART 5V



UART interface	
Company:	VUT
Sheet:	/UART interface/
Author:	Ondrej Matula
File:	UART.kicad.sch
Title: Prumyslovy data koncentrator	
Size:	A4
Date:	2023
KiCad:	E.D.A., kicad 7.0.1
Rev:	v0.2
Id:	18/23

C.20 Tlačítka a LED



Buttons and LEDs

Company: VUT

Author: Ondřej Matula

Sheet: /Buttons and LEDs/

File: Buttons_and_LEDs.kicad.sch

Title: Průmyslový data koncentrátor

Size: A4

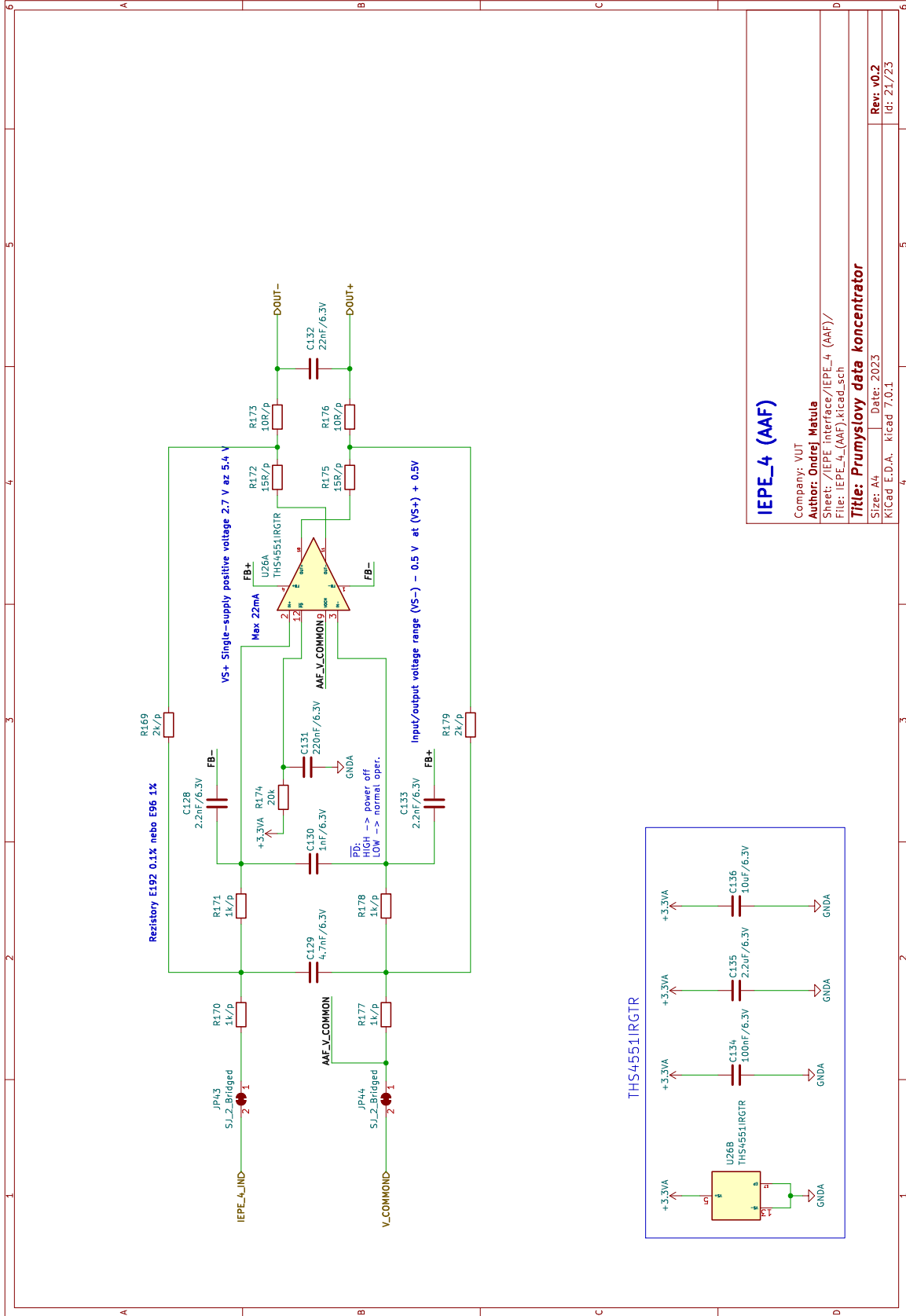
Date: 2023

KiCad E.D.A. - kicad 7.0.1

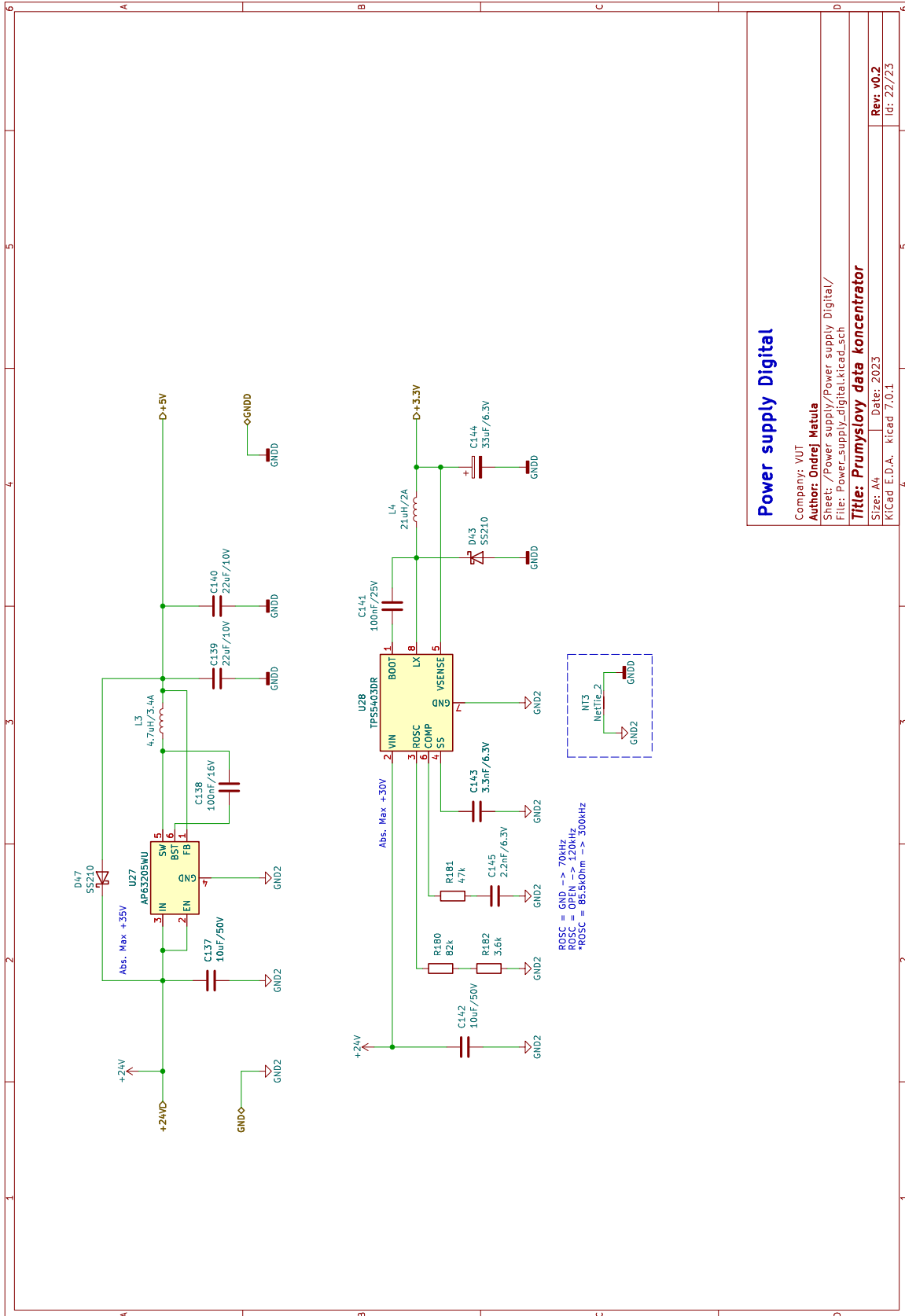
Rev: v0.2

Id: 20/23

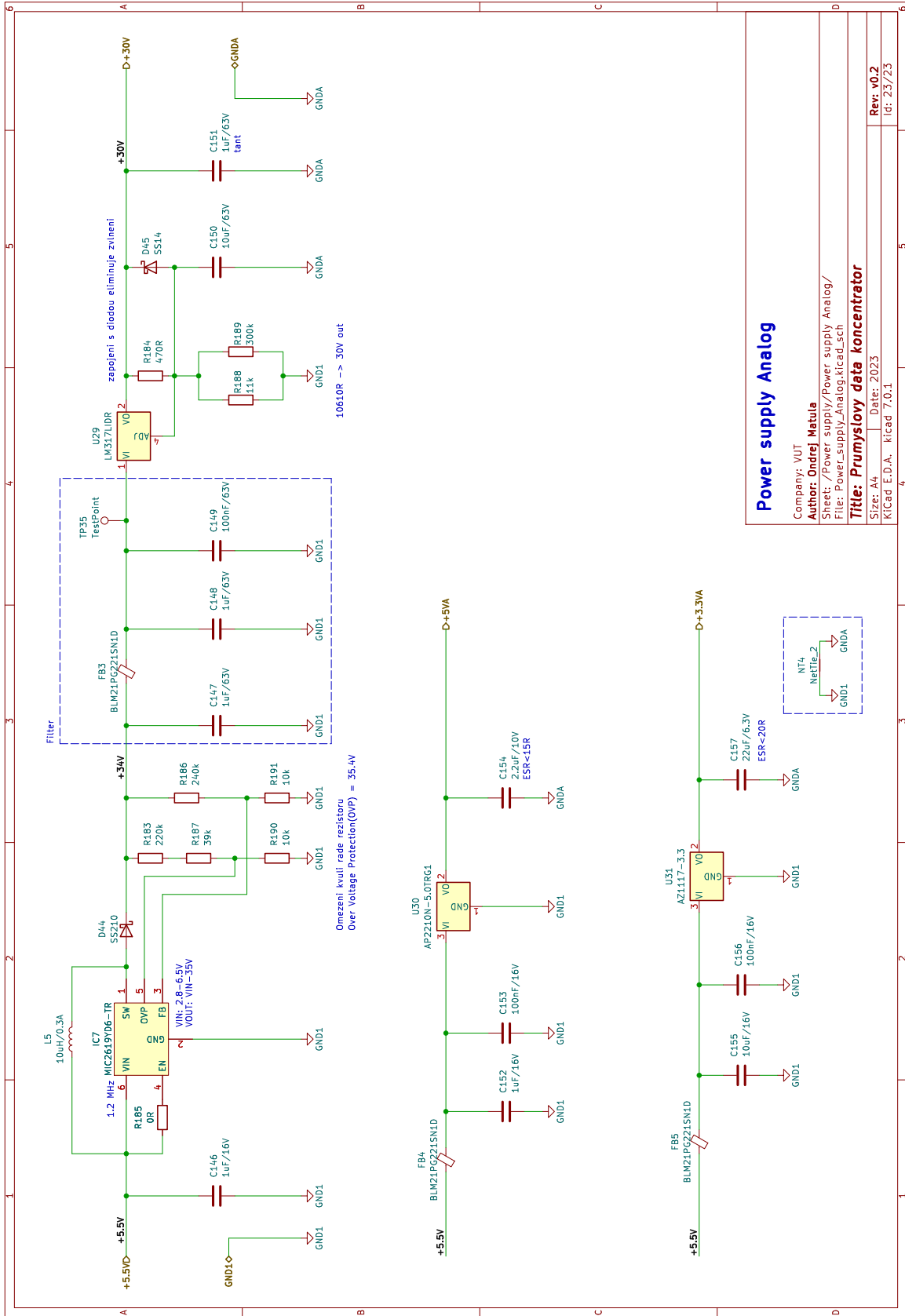
C.21 IEPE 4



C.22 Digitální napájení



C.23 Analogové napájení



D Obsah příloženého CD

Kapitola popisuje obsah přílohových souborů.

D.1 Projekt KiCad

Projekt obvodového zapojení v programu KiCad 7.0. Návrhová pravidla jsou kompatibilní s požadavky firmy JLCPCB na výrobu dvouvrstvého plošného spoje.

D.2 Schéma ve formátu pdf

Obsahuje schéma a DPS ve formátu pdf.

D.3 Výrobní podklady

Podklady potřebné pro výrobu DPS.

D.4 Náčrty

Náčrty mechanických součástí.

D.5 Firmware

Projekt firmwaru pro mikrokontrolér ESP32-S3 realizován pomocí frameworku ESP-IDF.

D.6 Adresářová struktura

Organizace adresářů na přílohovém CD

```

/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── D.1_projekt_KiCad
│   ├── Prumyslovy_data_koncentrator.kicad_pro
│   ├── Prumyslovy_data_koncentrator_pcb
│   ├── Prumyslovy_data_koncentrator.kicad_pro
│   ├── Prumyslovy_data_koncentrator.kicad_sch
│   └── ...
├── D.2_schema_pdf
│   └── Prumyslovy_data_koncentrator_schema.pdf
├── D.3_vyrobní_podklady
│   ├── Prumyslovy_data_koncentrator_bom.csv
│   ├── Prumyslovy_data_koncentrator_cpl.csv
│   └── Prumyslovy_data_koncentrator_gerber.zip
├── D.4_nacrty
│   ├── Mereni_otacek_drzak_magnetu.pdf
│   ├── Mereni_otacek_uchyceni_na_motor.pdf
│   ├── Mereni_otacek_drzak_hallova_snimace.pdf
│   ├── Pripravek_na_nevyvazenost.pdf
│   ├── Skladany_kryt_spodni_cast.pdf
│   ├── Skladany_kryt_vrchni_cast.pdf
│   └── Industrial_data_logger
├── D.5_firmware
│   └── Industrial_data_logger
└── ...

```