

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Modernizace dynamometru pro měření
stejnoseměrných motorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef VLÁŠEK**
Osobní číslo: **E16N0032K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Modernizace dynamometru pro měření stejnosměrných motorů**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Navrhněte elektroniku buzení dynamometru a proměnného odporu pro zátěž.
2. Vytvořte systém umožňující měřit úhel natočení dynamometru, otáček zatěžovaného motoru a příkonu motoru při zátěži.
3. Navrhněte řídicí elektroniku pro sběr dat z jednotlivých senzorů a přístrojů.
4. Navržené řešení realizujte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

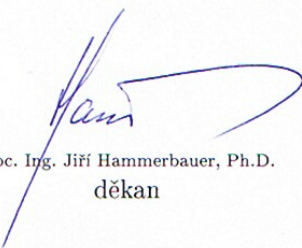
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Kamil Kosturik, Ph.D.


Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Diplomové práce se zaměřuje na modernizaci staršího dynamometru pro měření zatěžovacích charakteristik motorů. V práci je rozebrán výběr senzorů a komponent. V kapitole 2.2 naleznete podrobněji popsány výběr váhového senzoru pro měření momentu. Kapitola 3 se zabývá experimentálním zapojení se senzorem pro spotřební elektroniku. U zapojení byla provedena měření, která prokazují vhodnost a přesnost váhového senzoru. V poslední kapitole se nachází podrobný popis vytvořené ovládací elektroniky. Při návrhu elektroniky byl kladen důraz na modularitu celého systému, která je dosažena díky sériové komunikaci mezi moduly.

Klíčová slova

Dynamometr, váhový senzor, tenzometr, enkodér, mikroprocesor, převodník ADC, sigma-delta převodník

Abstract

This master thesis focuses on the modernization of an older dynamometer for the measurement of motor load characteristics. You will find the description of sensors and components at the beginning. Analysis of load cells was placed in Chapter 2.2. Chapter 3 is describing experiment with weight sensor into consumer electronic. With sensor was made measurement which tested the suitability and accuracy of the weight sensor. Last chapter is describing created control electronics. The main advantage is modularity of electronics thanks to the serial communications.

Key words

Dynamometer, weight sensor, load cell, strain gauge, encoder, microprocessor, ADC converter, Sigma-delta converter

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 22.5.2018

Josef Vlášek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval firmě Tesla Blatná a.s. za možnost vypracování a podporu při realizaci této práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 DYNAMOMETR.....	11
1.1 REŽIM MOTORU.....	12
1.2 REŽIM BRZDY.....	13
2 POPIS MODERNIZACE.....	14
2.1 SNÍMAČ OTÁČEK.....	15
2.2 VÝBĚR SENZORU MOMENTU.....	16
2.2.1 Princip odporového tenzometru.....	17
2.2.2 Čtvrtinový Wheatstoneův můstek.....	17
2.2.3 Poloviční Wheatstoneův můstek.....	18
2.2.4 Plný Wheatstoneův můstek.....	18
2.2.5 Vlastnosti hmotnostního senzoru.....	19
2.2.6 Vybraný tenzometrický snímač.....	21
2.2.7 Instalace snímače.....	22
2.3 TEPLOTNÍ SENZOR STATOROVÉHO VINUTÍ DYNAMA.....	23
2.4 TEPLOTNÍ SENZORY VÝKONOVÝCH KOMPONENT.....	24
2.5 POUŽITÉ ZATĚŽOVACÍ REZISTORY.....	25
3 TESTOVACÍ ZAPOJENÍ.....	26
3.1 TESTOVACÍ TENZOMETR.....	26
3.2 TESTOVACÍ PŘEVODNÍK.....	27
3.3 TESTOVACÍ ELEKTRONIKA MĚŘENÍ NA DYNAMOMETRU.....	29
3.4 TESTOVACÍ ELEKTRONIKA BUZENÍ DYNAMA.....	31
3.5 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ HYSTEREZE TESTOVACÍHO TENZOMETRU.....	32
4 POPIS VÝSLEDNÉ ELEKTRONIKY.....	33
4.1 MODUL MĚŘIDLA.....	35
4.1.1 Použitý mikrokontrolér.....	36
4.1.2 Napájení.....	37
4.1.3 Měření veličiny převodníkem ADC.....	38
4.1.4 Sériové rozhraní.....	38
4.1.5 Měření rychlosti.....	39
4.1.6 Měření momentu.....	39
4.1.7 Ovládání displeje.....	41
4.1.8 Popis programu.....	42
4.2 MODUL ŘÍZENÍ DYNAMA.....	43
4.2.1 Použitý mikrokontrolér.....	44
4.2.2 Napájení.....	44
4.2.3 Měření veličiny převodníkem ADC.....	45
4.2.4 Sériové rozhraní.....	46
4.2.5 Měření proudů.....	46
4.2.6 Obvody regulace proudu vinutím.....	47
4.2.7 Reléové ovládání.....	47
4.2.8 Ovládání displeje.....	48
4.2.9 Ovládací rozhraní.....	49
4.2.10 Ovládání ventilátorů.....	49
4.2.11 Popis programu.....	49
4.3 MODUL SBĚRU DAT.....	50
4.3.1 Sériové rozhraní.....	51
4.3.2 Komunikace po USB.....	51
4.3.3 Připojení micro SD karty.....	52
4.3.4 Popis programu.....	52
5 ZÁVĚR.....	53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	54
SEZNAM PŘÍLOH.....	56

Seznam symbolů a zkratk

g_{Praha}	[m/s^2]	Gravitační zrychlení v Praze
P_p	[W]	Příkon
R_{opt}	[Ω]	Předřadný odpor diody optronu
t	[$^{\circ}C$]	Teplota
T_{Pt100}	[$^{\circ}C$]	Teplota platinového senzoru Pt 100
T_{Pt1000}	[$^{\circ}C$]	Teplota platinového senzoru Pt 1000
T_{NTC}	[$^{\circ}C$]	Teplota termistoru
U_{ADC}	[V]	Napětí ADC převodníku
U_{ref}	[V]	Napětí reference
$U_{vstup_{MAX}}$	[V]	Maximální napětí vstupu měření rychlosti
v	[Ot/min]	Rychlost otáčení
3D	Trojrozměrný	
AC	Alternating Current	
ADC	Analog to digital converter	
ARM	Advanced RISC Machine	
CCRx	Capture compare register	
CNT	Counter register	
DC	Direct current	
DMA	Direct Memory Access	
DPS	Deska plošného spoje	
I2C	Inter integrated Circuit	
IDE	Integrated Development Environment	
MCU	Micro Controller Unit	
NTC	Negative Temperature Coefficient	
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale	
PID	Proporcionální, integrační a derivační regulátor	
PLL	Phase lock loop	
PMSM	Permanent magnet synchronous motor	
PS	Proporcionálně sumační regulátor	
PWM	Pulse width modulation	
RTC	Real time clock	
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	
SDHC	Secure Digital High Capacity	
SDIO	Secure Digital Input Output	
SMD	Surface Mount Device	
SPI	Serial Peripheral Interface	
TIM	Timer	
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter	
USB	Universal Serial Bus	

Úvod

Tato práce vznikla s cílem modernizovat měřicí vybavení v laboratoři vývoje elektroniky pro řízení motorů ve firmě Tesla Blatná a.s. Konkrétně se jedná o dva starší dynamometry vyrobené firmou MEZ Náchod. Cílem bylo digitalizovat měření a tím zjednodušit práci při měření motorů.

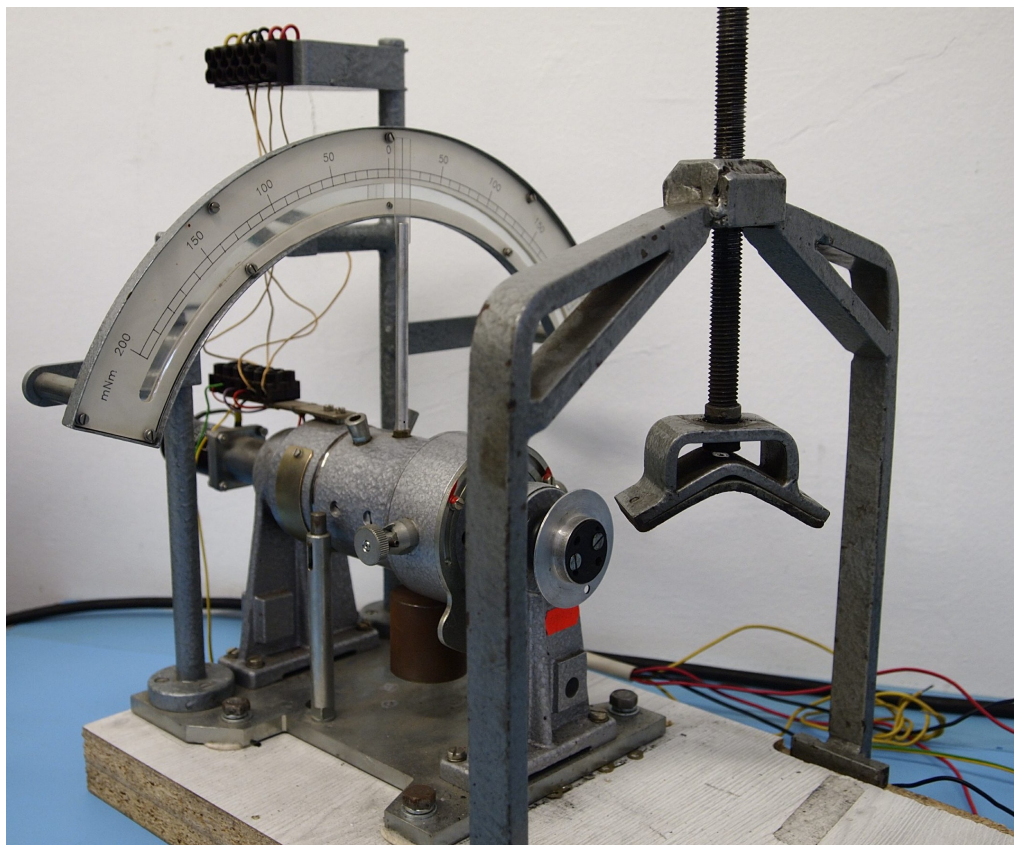
V době zpracování zadání této práce, bylo v úvahu použít lineární enkodér pro zjištění náklonu statoru a tím určit působící moment. Toto řešení vyžaduje od obsluhy prvotní nulování a správné nastavení závaží. Z těchto důvodů jsem se rozhodl hledat jiné řešení. Podařilo se najít jednobodové váhové snímače. Tyto senzory jsou cenově srovnatelné s řešením pomocí lineárního enkodéru ale nevyžadují dodatečnou obsluhu.

Pro měření otáček motoru je použit rotační enkodér. Pro měření příkonu DC motoru jsou použity dva multimetry, které mohou komunikovat s měřicí elektronikou prostřednictvím sériové linky. Toto řešení zajišťuje potřebnou přesnost měření a také umožňuje připojit i další vybavení. V budoucnu se plánuje zprovoznění komunikace s wattmetrem, pro měření motorů napájených ze sítě.

Na rozdíl od zmíněné práce jsem se rozhodl celou práci realizovat vlastní elektronikou. Za účelem zajištění modularity měřicí soustavy byly vyrobeny tři nezávisle na sobě fungující bloky. Byly rozloženy na měření otáček a momentu motoru, řízení dynamometru a komunikace s okolím. Moduly mezi sebou komunikují po sériové lince. Elektronika umožňuje manuální nebo automatické měření. V budoucnu by elektronika měla jít připojit k PC skrz USB a komunikovat například se SCADA programem Promotic.

Ačkoli výsledek práce je zaměřena na modernizaci dvou měřících přístrojů, dále bude popsáno pouze vylepšení pro větší typ.

1 Dynamometr



Obr. 1.1. Fotka malého dynamometru

Dynamometr je určen k měření průběhu točivého momentu, mechanických ztrát a oteplovacích zkoušek motorů. Přístroj může pracovat jak v režimu brzdy tak v režimu motoru.

Konstrukce je postavena na masivním litinovém podstavci, na nějž jsou připevněny dva přesné ložiskové stojany. Mezi nimi je umístěno samotné dynamo, jež je uchyceno v ložiscích za stator. Díky tomu se může stator naklánět a pomocí ručky ukazovat výchylku v obou směrech otáčení. Na spodní straně nalezneme závaží na závitové tyči. Hodnota a vzdálenost závaží kalibruje ukazovaný moment na stupnici a udává nulovou hodnotu. Pro změnu rozsahu je možné toto závaží změnit. Na statoru také nalezneme drážku s kolíkem, do které je možné zavěsit závaží a tím jednoduše až dvojnásobně zvýšit rozsah. Nevýhoda této konfigurace spočívá ve zvýšení rozsahu pouze v jednom směru otáčení a pro druhý směr se naopak úměrně snižuje. Rotor je standardně uložen v ložiscích ve statoru. Hřídel rotoru vystupuje v obou směrech. Na jedné straně vystupuje společně s hřídelí statoru na níž je upevněno tachodynamo pro měření otáček. Z druhé strany je vyvedena pouze hřídel rotoru na níž je upevněna spojka pro připojení měřeného objektu. Měřený předmět se umísťuje na posuvný upevňovací stůl, který umožňuje výškové nastavení objektu pro vycentrování. Celý mechanismus je umístěn na lineárním vedení, kterým je možné kompenzovat délku motoru. Pro zafixování pozice je možné stáhnout šrouby stůl k litinovému podstavci.

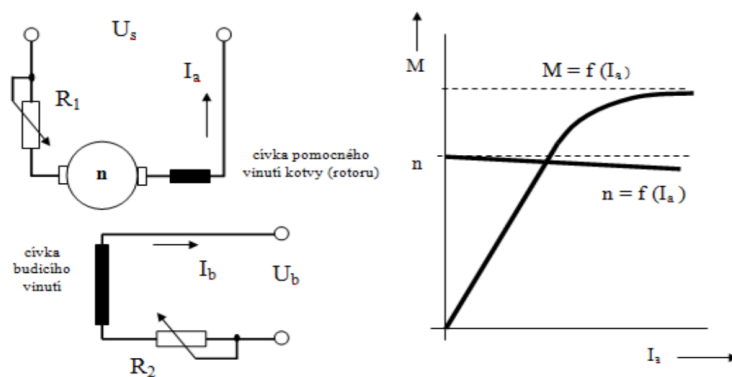
Na litinovém podstavci ještě nalezneme konstrukci která drží stupnici na níž je možné pomocí ručky a zrcátka odečíst hodnotu působícího momentu. Pro představu na Obr. 1.1 naleznete fotku malého dynamometru.

Dynamometr MEZ Náchod		
	Nominální hodnoty	Maximální krátkodobé
Moment [Nm]	3 Nm	-
Otáčky [ot/min]	3000	6000
Proud vynutíma [A]	5	10
Napětí na kartáčích [V]	300	-
Výkon [W]	925	-
Výstupní napětí v režimu generátoru [V / ot/min]	50 / 1500	
Třída přesnosti	1	

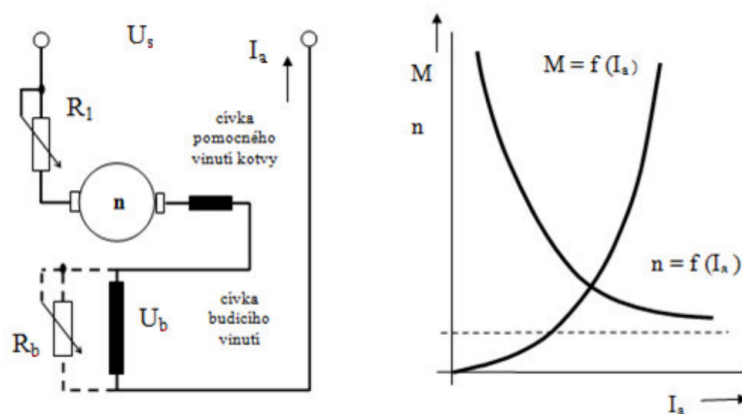
Tab. 1.1. Parametry dynamometru

1.1 Režim motoru

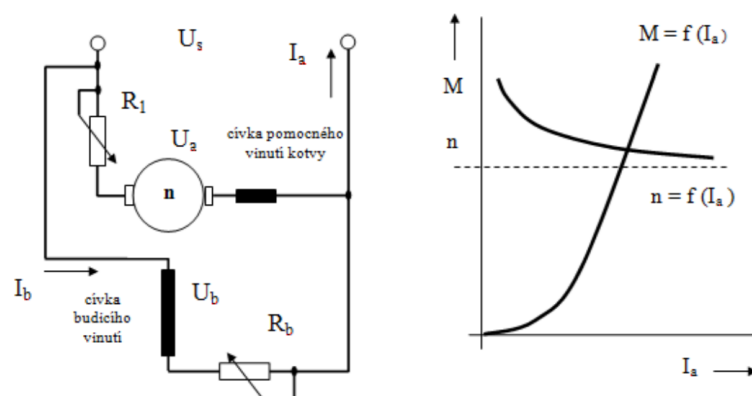
Měřidlo může pracovat jako kartáčový motor ve všech následujících zapojení viz Obr. 1.1.1 až Obr. 1.1.3. Zde jsou také vidět momentové charakteristiky. Tato možnost je díky vyvedenému vynutí statoru i rotoru. Funkce se může hodit při testování například alternátorů.



Obr. 1.1.1. Zapojení motoru s cizím buzením [2]



Obr. 1.1.2. Zapojení motoru se sériovým buzením [2]



Obr. 1.1.3. Zapojení motoru s derivačním buzením [2]

1.2 Režim brzdy

Režim je pro měření motorů podstatnější, jelikož umožňuje zjistit momentové charakteristiky měřeného motoru a tím stanovit jeho skutečný výkon.

Dynamo má za úkol působit nastaveným momentem proti smyslu otáčení motoru. Velikost působícího momentu se reguluje proudem do budicího vinutí statoru. Aby tento systém fungoval je zapotřebí připojit k vinutí rotoru patřičný zatěžovací odpor. Moment je také závislý na rychlosti otáček rotoru a proud do buzení musí být dle toho kompenzován. V obou vynutí nesmí proud překročit mezní parametry viz Tab. 1.1. V případě nízkých otáček a nárokům na vysoký moment může dojít k překročení těchto limitů. Na Obr. 1.2.1 je vidět principiální zapojení dynamu v režimu brzdy.

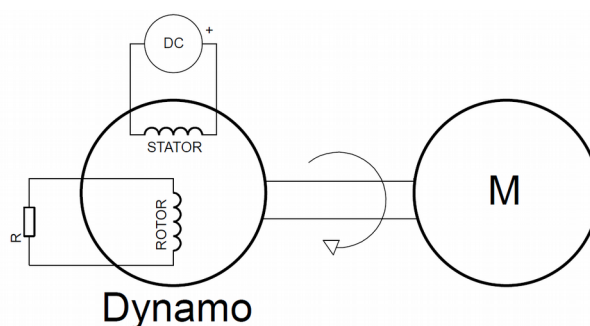
Výsledkem měření je průběh otáček na momentu. Ze kterého lze stanovit skutečný výkon motoru (1.1) a jeho účinnost (1.2). Pro výpočet závaží jímž můžeme posouvat rozsah momentu dynamometru použijeme vzorec 1.3. Hodnotu gravitačního zrychlení v Praze nalezneme ve vzorci 1.4.

$$P = \omega * M \quad [W] \quad (1.1)$$

$$\eta = \frac{P}{P_p} * 100 \quad [%] \quad (1.2)$$

$$m = \frac{M}{g * r * \sin \alpha} \quad [Kg] \quad (1.3)$$

$$g_{Praha} = 9,81373 \quad [m/s^2] \quad (1.4)$$



Obr. 1.2.1. Zapojení v režimu brzdy

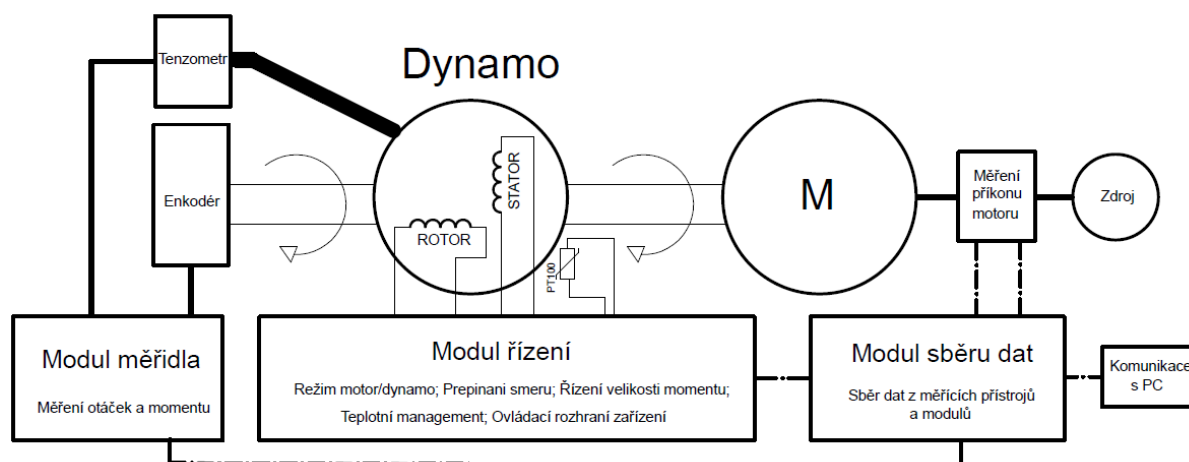
2 Popis modernizace

První úvahy modernizace dynamometru měli za cíl co nejvíce využít konstrukci zařízení a její principy. Tachodynamo bylo již nahrazeno přesným rotačním enkodérem a ručka měla být nahrazena lineárním enkodérem. Tento princip počítal s ručním nulováním pozice po zapnutí zařízení a také ručním přidáváním závaží. Tento způsob manipulace se mi jevil jako značně náchylný na chyby. Ovšem finančně celkem výhodný vzhledem k ceně enkodéru.

Podářilo se mi najít bakalářskou práci [1], ve které student modernizuje velmi podobný typ dynamometru. Zde byl vidět způsob aplikace váhového senzoru. Toto řešení je mnohonásobně lepší a hlavně nevyžaduje od obsluhy žádné referování při startu. U tohoto senzoru jsem si nebyl jistý zda bude pracovat v obou směrech působícího momentu. Proto jsem se rozhodl vytvořit experiment za pomoci levného váhového snímače a sigma-delta převodníku určeného pro Arduino. Tento převodník byl připojen k vývojovému kitu Nucleo ST, který uměl komunikovat i s rotačním enkodérem. Výsledek byl velmi překvapující. Nejenom že tenzometr uměl obě polarity momentu ale již toto řešení dokázalo zjednodušit a zpřesnit měření. Ve finální verzi je použit přesnější tenzometr, který je snímán modulem měření společně s otáčkami viz Obr. 2.1.

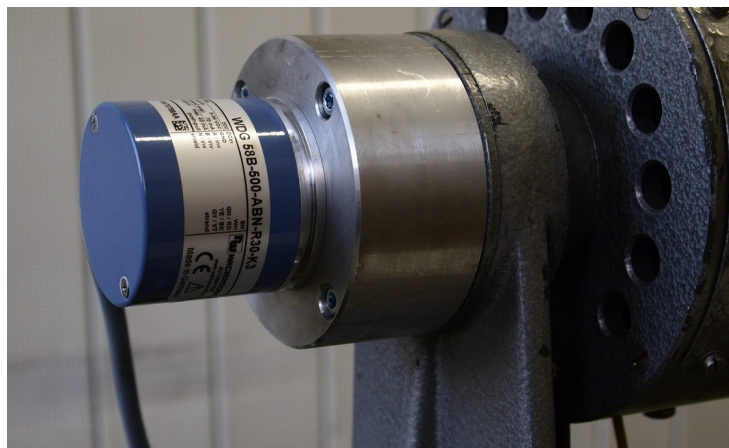
Pro buzení dynamu byl vytvořen modul řízení s proudový regulátorem místo původního lineárního zdroje. Zatěžovací odpor rotoru je možné volit pomocí pěti přepínatelných rezistorů a jednoho pevného. U obou těchto okruhů je měření proudu. Součástí desky je také měření teploty dynamu a výkonových prvků jako je usměrňovač nebo rezistory kotvy.

Pro měření příkonu motoru je vytvořena destička sběru dat po sériové komunikaci. K ní bude možné připojit voltmetr a ampérmetr pro DC motory nebo wattmetr pro AC motory.



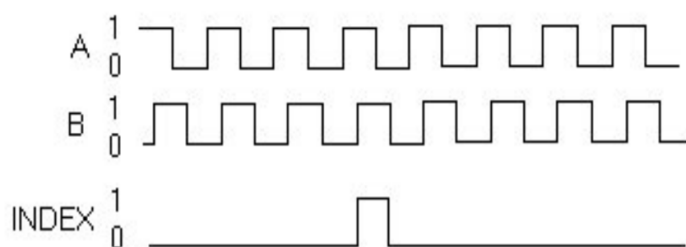
Obr. 2.1. Blokové schéma návrhu modernizace

2.1 Snímač otáček



Obr. 2.1.1. Nainstalovaný enkodér

Za tímto účelem kolega při předchozím plánech modernizovat dynamometr vybral enkodér viz Obr. 2.1.1 a dokumentace [3]. Jedná se o standardní provedení optického enkodéru používaného v automatizaci pro přesné hlídání pozice. Pro tuto aplikaci je nadstandardní. Díky počtu 500 pulzů na otáčku, které je možné při použití funkce XOR s fází A a B zdvojnásobit. Takový to počet pulzů na otáčku umožňuje elektronice měřit velmi pomalé rychlosti, nebo hlídat stabilitu rychlosti otáčení.



Obr. 2.1.2. Průběh fází enkodéru [4]

Senzor má také vyveden signál indikující průchod nulou. Označuje se jako Z nebo index a reprezentuje jednu celou otáčku hřídele. Díky němu je možné kontrolovat správnost výsledku z fází A a B. Další možnost kontroly nabízí inverzní fáze. V této aplikaci jsou nevyužity. Na Obr. 2.1.2 jsou vidět průběhy základních fází enkodéru. Důležité parametry tohoto snímače jsou v Tab. 2.1.1.

Enkodér WDG 58B	
Typ :	Optický
Napájecí napětí :	5 – 30 V DC
Mezní proud elektroniky :	100 mA
Mezní proud fáze :	40 mA
Maximální rychlost otáčení :	8000 Ot./min.
Počet pulzů na otáčku :	500
Výstupní fáze :	A ,B , Z, A inv. ,B inv. ,Z inv.

Tab. 2.1.1. Parametry vybraného enkodéru [3]

2.2 Výběr senzoru momentu

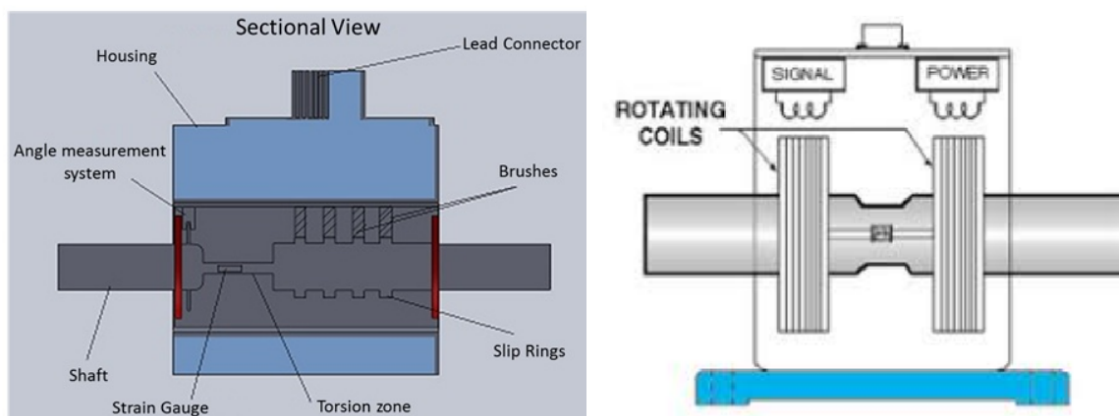
Volba vhodného tenzometru byla v této práci klíčová. Z tohoto důvodu bych jí rád popsal podrobněji.

Tenzometrické snímače se vyrábí v mnoha provedení a pro různé aplikace. V našem případě připadají v úvahu snímače tahové viz Obr. 2.2.1 nebo jednobodové viz Obr. 2.2.6.1.



Obr. 2.2.1. Tahový tenzometr [6]

Nabízely by se také senzory krouticího momentu statické. Zde nastává problém. Senzor se musí otáčet s hřídelí. A z toho důvodu by musel být koncipován jako bateriové zařízení s bezdrátovou komunikací. Nicméně existují také senzory krouticího momentu rotační viz Obr. 2.2.2. Tyto senzory umí přenášet signál jak pomocí kartáčů tak bezkontaktně. Díky tomu by byly do aplikace vhodné, ovšem omezovaly by délku připevněného motoru. Tato negativní vlastnost je dána nutností umístit je mezi motor a dynamo. Další jejich nevýhodou je pořizovací cena.



Obr. 2.2.2. Rotační senzory krouticího momentu [7] [8]

2.2.1 Princip odporového tenzometru

Jedná se o pasivní elektrickou součástku měřící mechanické napětí díky její deformaci. Výše zmíněné senzory využívají odporového principu. Jedná se o nalepené foliové tenzometry v místech ohybu materiálu. Základem takového tenzometru je obrazec vyleptaný v materiál s podobnými fyzikálními vlastnostmi jako má materiál senzoru. Tento obrazec je umístěn na nosné folii a shora přikryt krycí folií. Odsud vedou dva vodiče pro příslušné měřící zapojení.

Samotný princip měření ohybu spočívá ve změně geometrických rozměrů obrazce a tím dochází ke změně odporu dle vzorce 2.1.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (2.1)$$

- ρ vyjadřuje rezistivitu materiálu
- l je délka odporového obrazce
- S je průřez cesty

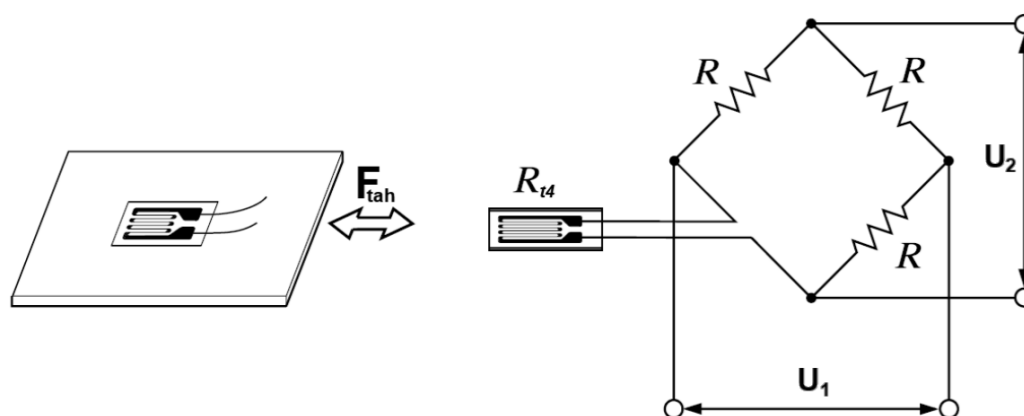
Ze zmíněného vzorce je zřejmá velmi malá změna odporu. Z tohoto důvodu je třeba použít vhodné zapojení pro měření velmi malých odporů. Pro tyto účely je ideální Wheatstoneův můstek, který dokáže odstranit některé parazitní vlivy.

Mezi tyto vlivy patří :

- Rušení okolním elektromagnetickým zářením, které se indukuje do přívodních vodičů.
- Změna teploty okolí jež působí změnu odporu vlivem tepelné roztažnosti.
- Parazitním namáháním jako reakce na nežádoucí deformaci těla snímače. Takovou deformací může být natahování, torze nebo ohyb. Měří se pouze jeden typ deformace.

2.2.2 Čtvrtinový Wheatstoneův můstek

S cílem ušetřit při výrobě snímače je možné se setkat se třemi zapojeními Wheatstonova můstku lišícími se počtem použitých tenzometrů. Základem je čtvrtinový můstek.

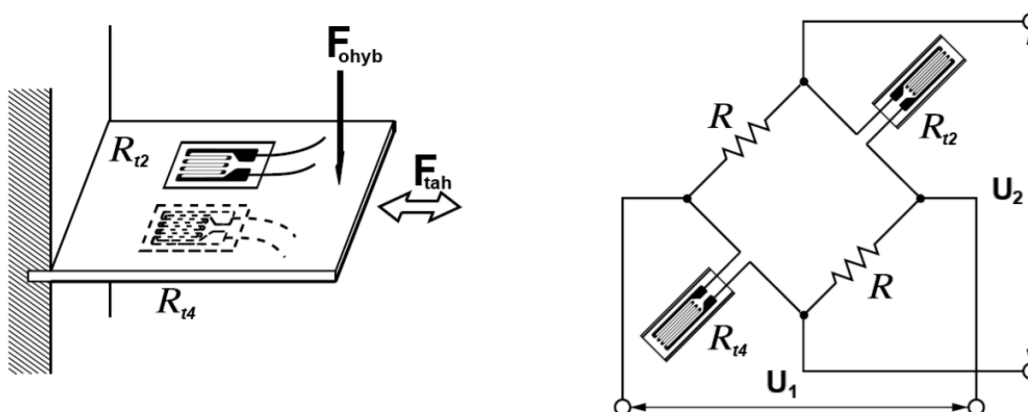


Obr. 2.2.2.1. Čtvrtinový Wheatstoneův můstek [9]

Tenzometr je doplněn třemi kompenzačními rezistory jež mají hodnotu odporu stejnou. Výhodou takového to zapojení je především cena. Nevýhodou nelinearita výstupního napětí a absence kompenzace parazitního namáhání či teploty. Zapojení s umístěním senzoru naleznete na Obr. 2.2.2.1.

2.2.3 Poloviční Wheatstoneův můstek

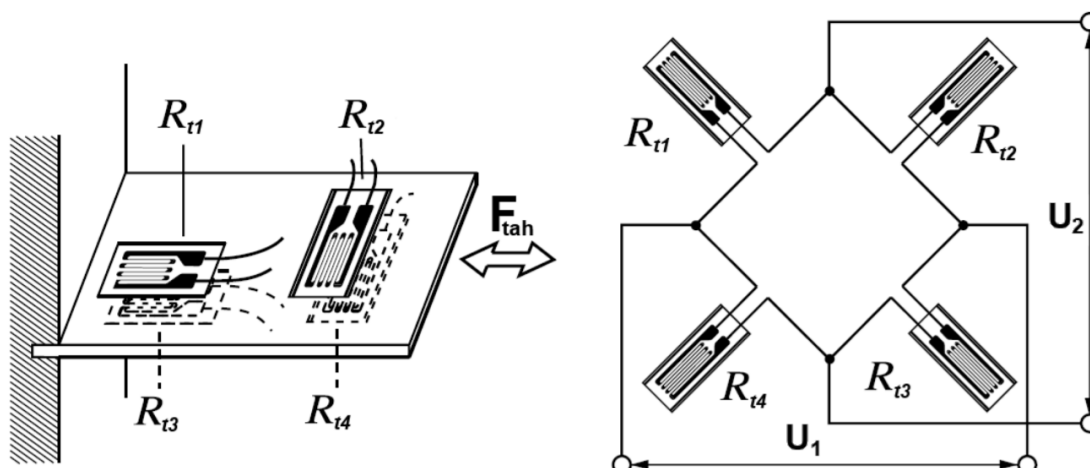
Oproti čtvrtinovému můstku toto zapojení získává kompenzaci parazitním namáháním. Tato vlastnost je díky umístění tenzometru na spodní a horní stranu těla snímače. Když dojde k deformaci jeden snímač zvýší svůj odpor a druhý jej naopak sníží. Díky můstku se tyto jevy anulují. Ostatní nevýhody zůstávají. Provedení je na Obr. 2.2.3.1.



Obr. 2.2.3.1. Poloviční Wheatstoneův můstek [9]

2.2.4 Plný Wheatstoneův můstek

Jedná se o nejpřesnější provedení s téměř lineárním výstupem. Jak je vidět na Obr. 2.2.4.1. všechny kompenzační odpory zmizely. Oproti polovičnímu můstku zde přibyly dva tenzometry ortogonálně umístěné vůči původním. Jejich význam je především v teplotní kompenzaci. Díky nim se odstraní až dvojnásobná chyba měření polovičního můstku.



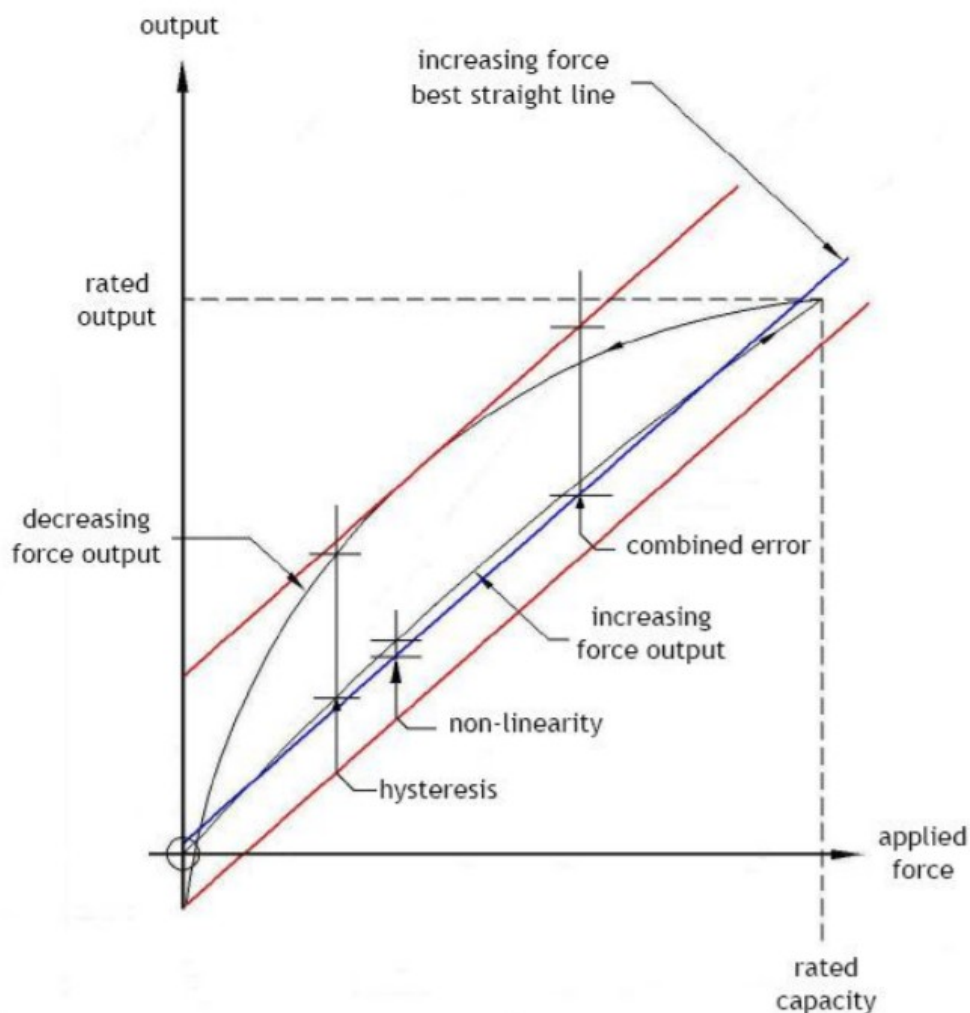
Obr. 2.2.4.1. Plný Wheatstoneův můstek [9]

2.2.5 Vlastnosti hmotnostního senzoru

Hmotnostní senzor je na Obr. 2.2.6.1. Tyto snímače používají zpravidla plný Wheatstoneův můstek viz Obr. 2.2.4.1 pro zajištění maximální přesnosti. Bohužel technologicky vyrobit přesný tenzometr je velmi náročný úkol. Pro to se senzory dělí do tříd přesnosti A až D dle OIML R60 [10], aby bylo možné vyrobit levnější méně přesné senzory. Běžné jsou třídy D1 až C2, které jsou vhodné pro spotřební elektroniku nebo pro vážení velkoobjemového materiálu jako je stavební materiál, voda a podobně. U těchto tříd nelze vyžadovat velkou přesnost výsledku. Pro obchodní nebo přesné procesní vážení se mnohem více hodí třídy C3 až C6. Které již disponují dostatečným rozlišením. Typická výstupní charakteristika se zakreslenými chybami je na Obr. 2.2.5.1.

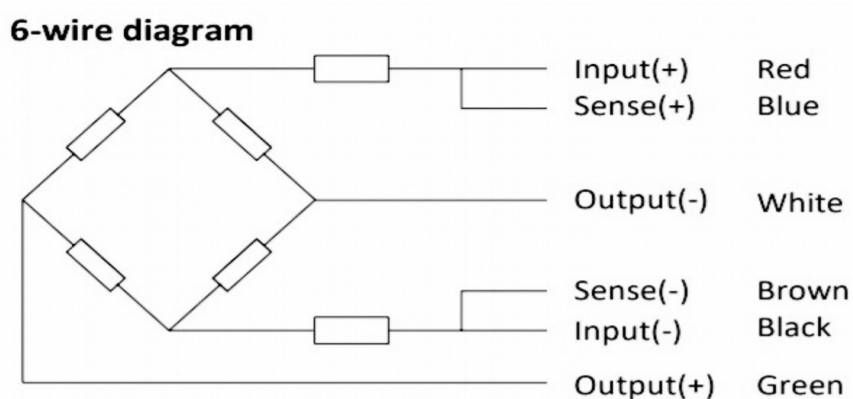
Mezi nejdůležitější parametry patří:

- **Výstupní citlivost**
 - Udává se v jednotkách mV/V.
 - Jednotka znamená. Pokud budeme napájet senzor napětím 5V a bude disponovat citlivostí 2mV/V. Pak při plném zatížení na jeho výstupu změříme napětí 10mV.
 - Běžně se tato hodnota pohybuje od 1mV/V do 4mV/V.
- **Přesnost**
 - Udává se v % nebo v třídách přesnosti (A až D).
 - Typicky 1 – 0,1 %.
 - Vztahuje se ke křivce nelinearity.
- **Odpor můstku**
 - Často rozdělený na vstupní a výstupní odpor.
 - Udává odpor nezátíženého můstku.
 - Běžné hodnoty odporu pod 1K Ω .
 - Tato hodnota ovlivňuje maximální napájecí napětí, které se vztahuje k maximálnímu ztrátovému výkonu na tenzometru.
- **Chyba offset**
 - Chyba při měření nuly.
 - Lze odstranit kalibrací.
- **Chyba z plného rozsahu**
 - Chyba rozdílu ideálního napětí a skutečného při měření plné zátěže.
 - Udává se v %.
- **Teplotní drift**
 - Změna výstupu s teplotou.
- **Nelinearita**
 - Udává se v %.
 - Určuje odchylku skutečné křivky od lineárního průběhu.
- **Hystereze**
 - Rozdíl mezi naměřenými hodnotami při stejné zátěži.



Obr. 2.2.5.1. Typická výstupní charakteristika senzoru [11]

V neposlední řadě přesnost měření ovlivňuje připojení senzoru k měřidlu. Na Obr. 2.2.5.2 je typické 6 vodičové připojení. Velmi často se používá stíněný přívodní kabel, který není zakreslen. Důvodem použití šesti vodičů je odstranění chyby odporu přívodních napájecích vodičů. Levné snímače určené pro spotřební elektroniku disponují pouze čtyřmi nezbytnými vodiči.



Obr. 2.2.5.2. Typické zapojení senzoru [5]

2.2.6 Vybraný tenzometrický snímač



Obr. 2.2.6.1. Použitý tenzometrický snímač [5]

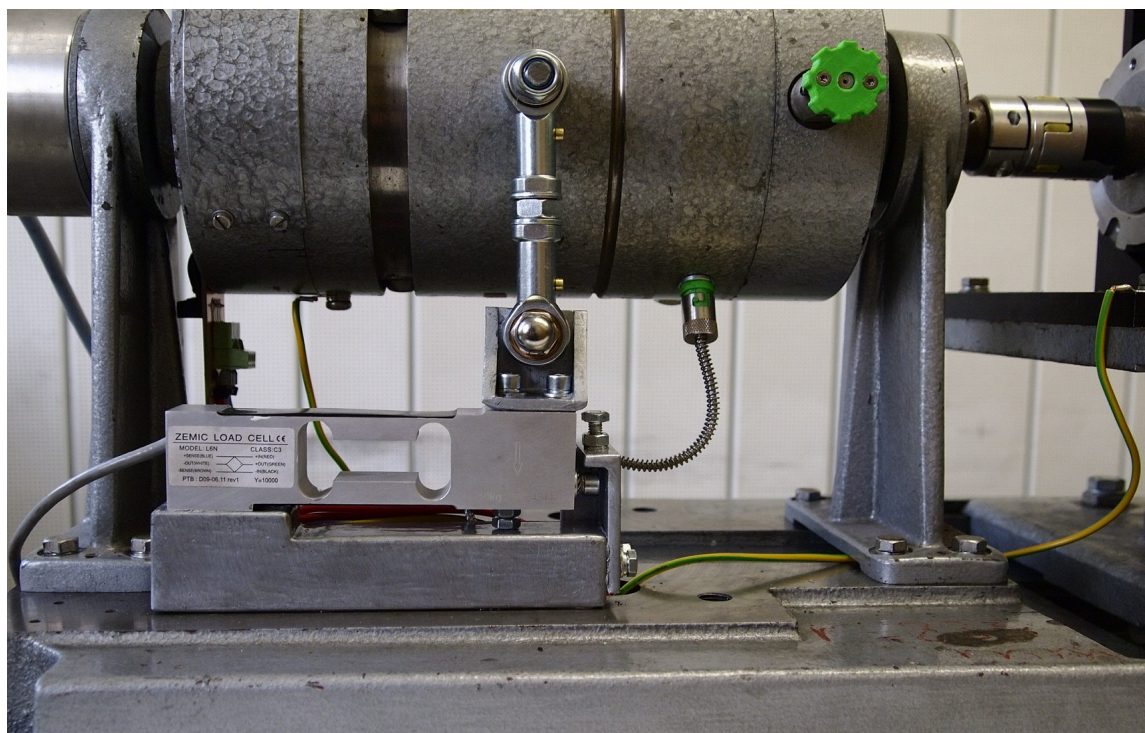
Dle předchozích parametrů jsem vybral snímač od firmy Zemic. Jedná se o typ L6N-C3-10kg-386. Jak z názvu vyplývá jedná se o třídu přesnosti C3, která je určena pro přesné vážení a procesní automatizaci. Hodnota 10 kg byla vybrána vzhledem k maximálnímu zatížení dynamu jež činí 6 Nm a rameno 95,6 mm. Po aplikaci vzorce 1.3 získáme hodnotu působící hmotnostní zátěže při plné výchylce dynamu. Výsledná hmotnost je 6,4 kg při působícím momentu 6 Nm. Námí vybraný snímač má hodnotu 10 Kg. Díky tomu dokáže měřit moment až 9,381 Nm.

Připojení snímače je dle Obr. 2.2.5.2 se stíněným kabelem. V dokumentaci není stínění zakreslené stejně jako přítomností pěti pinového XLR konektoru.

Zemic L6N-C3-10kg-386	
Třída přesnosti :	C3
Výstupní citlivost :	2mV/V
Kombinovaná chyba :	< ±0,023 % z plného rozsahu
Vstupní odpor :	409 ± 6 Ω
Výstupní odpor :	350 ± 3 Ω
Doporučené napájecí napětí :	5 až 12V
Teplotní kompenzace :	-10 až 40 °C
Bezpečné přetížení :	150 %
Maximální přetížitelnost :	300 %

Tab. 2.2.6.1. Vybraný snímač momentu [5]

2.2.7 Instalace snímače



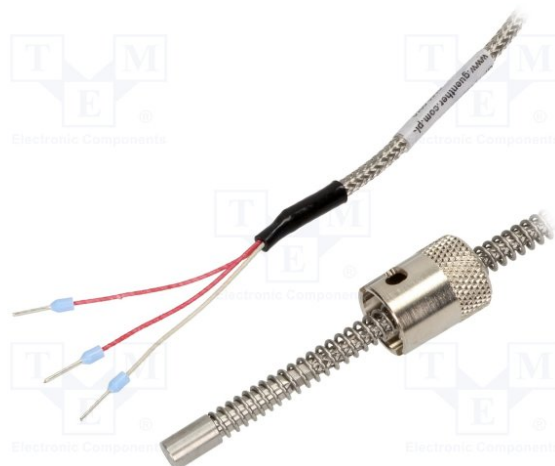
Obr. 2.2.7.1. Fotka nainstalovaného senzoru

Na obrázku Obr. 2.2.7.1 je vidět nainstalovaný snímač. Dle doporučení výrobce jsem jej doplnil na spodní straně o šroub se zajišťovací maticí. Tento mechanismus slouží k nastavení maximální zátěže, jež bude působit na senzor. V případě překročení síly se šroub opře o konstrukci a snímač nebude více namáhán. Tento mechanismus by měl být nastaven maximálně na přetížení 15Kg. Vzhledem k namáhání senzoru v obou směrech. Je nainstalován mechanismus na stejném principu pro opačný směr.

Dále zde jsou vidět dvě kloubová ložiska JAF 10 s vnitřním závitem. Pro možnost nastavení správné rozteče spojovacího prvku, jsou ložiska spojeny závitovou tyčí. Použitím těchto ložisek se značně snižuje torze působící na snímač, při zatížení dynamu a jeho následného naklápění. Naopak do měření momentu vnáší chybu v podobě změny délky ramene síly. Ovšem tato změna je značně malá. A lze předpokládat, že tato chyba je mnohem menší než chyba vzniklé torze.

Spojovací prvek dynamu s tenzometrem je u obou částí přichycen pomocí závitové tyče. Toto upevnění umožňuje nastavit správnou pozici ložisek. Zatím postačuje nastavení pozice pouhým vypodložením. V případě potřeby přesnějšího nastavování bude třeba použít v mechanismu nízké matice. Díky tomu bude možné nastavovat pozici plynule. Nastavení pozice je důležité kvůli určení ramene síly a ortogonálnímu směru působení síly.

2.3 Teplotní senzor statorového vinutí dynama



Obr. 2.3.1. Provedení vybraného senzoru [12]

Jako teplotní senzor vynyutí dynama bylo vybráno Pt 100 od firmy Guenther. Jedná se o platinový odporový senzor. Na rozdíl od termistoru je jeho výstupní charakteristika téměř lineární viz Obr. 2.3.2. Parametry jsou v Tab. 2.3.1. Pomocí vzorců 2.1 až 2.3 lze spočítat jeho odpor při dané teplotě. Provedení senzoru je určené pro vstřikovací stroje. To zajišťuje výborné mechanické vlastnosti díky kovovému opletení se skelnou izolací. Samotný senzor je umístěn v kovovém válečku 6x10 mm. Pro snadnou instalaci je tento váleček doplněn pružinou a bajonetovou maticí. Provedení je vidět na Obr. 2.3.1.

Způsob instalace senzoru je na Obr. 2.2.7.1. Zde je vidět vytvořený bajonetový protikus na 3D tiskárně, jelikož nebylo možné tento prvek sehnat se závitem M10x1,5 mm. Výhoda tohoto řešení spočívá v tepelném oddělení teploty čidla od pláště dynama. Tím se dostáváme i k chybě kterou toto řešení má. V běžné aplikaci je bajonetový protikus kovový a je nainstalován na válci s podobnou teplotou jako má měřený bod. Tímto se docílí velkého snížení tepelného přenosu mezi čidlem a pružinou či opletením. V naší aplikaci měřená teplota působí pouze na čelo senzoru. Z toho lze předpokládat chybné měření a nutnost nastavit teplotní hranice níže než je mezní teplota vinutí.

Vzorec pro výpočet odporu libovolného platinového senzoru pro teplotu t nižší jak 0°C :

$$R_t = R_0 * (1 + At + Bt^2 + C * (t - 100) * t^3) \quad [\Omega] \quad (2.2)$$

Vzorec pro výpočet odporu libovolného platinového senzoru pro teplotu t vyšší jak 0°C :

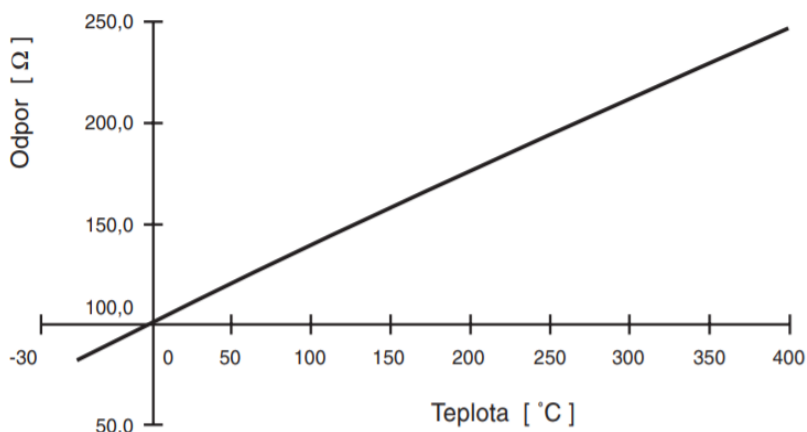
$$R_t = R_0 * (1 + At + Bt^2) \quad [\Omega] \quad (2.3)$$

Koeficienty platinového senzoru :

$$\begin{aligned} A &= 3,9083 * 10^{-3} & [^{\circ}\text{C}^{-1}] \\ B &= -5,775 * 10^{-7} & [^{\circ}\text{C}^{-2}] \\ C &= -4,183 * 10^{-12} & [^{\circ}\text{C}^{-4}] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Guenther 60-TE Pt 100-3L	
Typ senzoru :	Platinový
Nominální odpor při 0°C :	100Ω
Teplotní rozsah :	-200 až 400°C
Třída přesnosti :	A (±0.15°C)
Připojení :	Tři vodičové

Tab. 2.3.1. Teplotní senzor vynutí rotoru [14]



Obr. 2.3.2. Charakteristika odporu Pt 100 [13]

2.4 Teplotní senzory výkonových komponent



Obr. 2.4.1. Platinové čidlo Pt 1000 [15]

Pro účely měření teploty usměrňovacího můstku a zátěžových rezistorů. Byly použity teplotní senzory od firmy Tesla Blatná. Konkrétně typ Pt1000, který je možné vidět na Obr. 2.4.1.

Jedná se o platinový rezistor vyrobený technologií tenkých vrstev na korundové keramice. Pro zajištění přesné hodnoty je senzor trimován laserem. Pro ochranu před mechanickým nebo chemickým poškozením je pokryt dielektrickou pasivační vrstvou. Parametry senzoru jsou v Tab. 2.4.1. Pro výpočet odporu při dané teplotě platí stejné

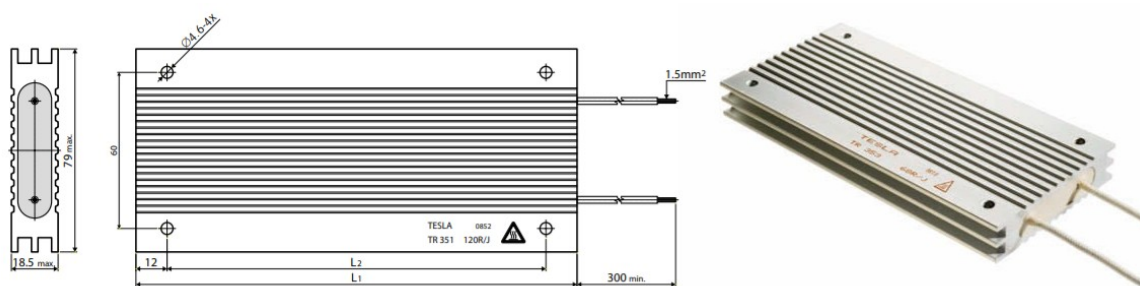
vzorke jako v kapitole 2.3. Ze vzorce vyplývá i stejná závislost odporu na teplotě jako na Obr. 2.3.2. Jen hodnoty odporu jsou desetkrát větší.

Instalace senzoru je provedena za pomoci dvousložkového lepidla, kdy je senzor vlepen na žebra chladiče. Pro zajištění maximální vypovídající hodnoty je snaha senzor umístit co nejvíce k jádru chladiče.

Tesla Blatná Pt 1000	
Typ senzoru :	Platinový
Nominální odpor při 0°C :	1000Ω
Teplotní rozsah :	- 200 až 400°C
Třída přesnosti :	F 0,3 (±0.3 °C)
Samo zahřívání :	0,4 K/mV při 0°C
Měřicí proud :	0,1 až 0,3 mA

Tab. 2.4.1. Parametry senzoru Pt 1000 [15]

2.5 Použité zatěžovací rezistory



Obr. 2.5.1. Použitý výkonový rezistor řady TR35x [16]

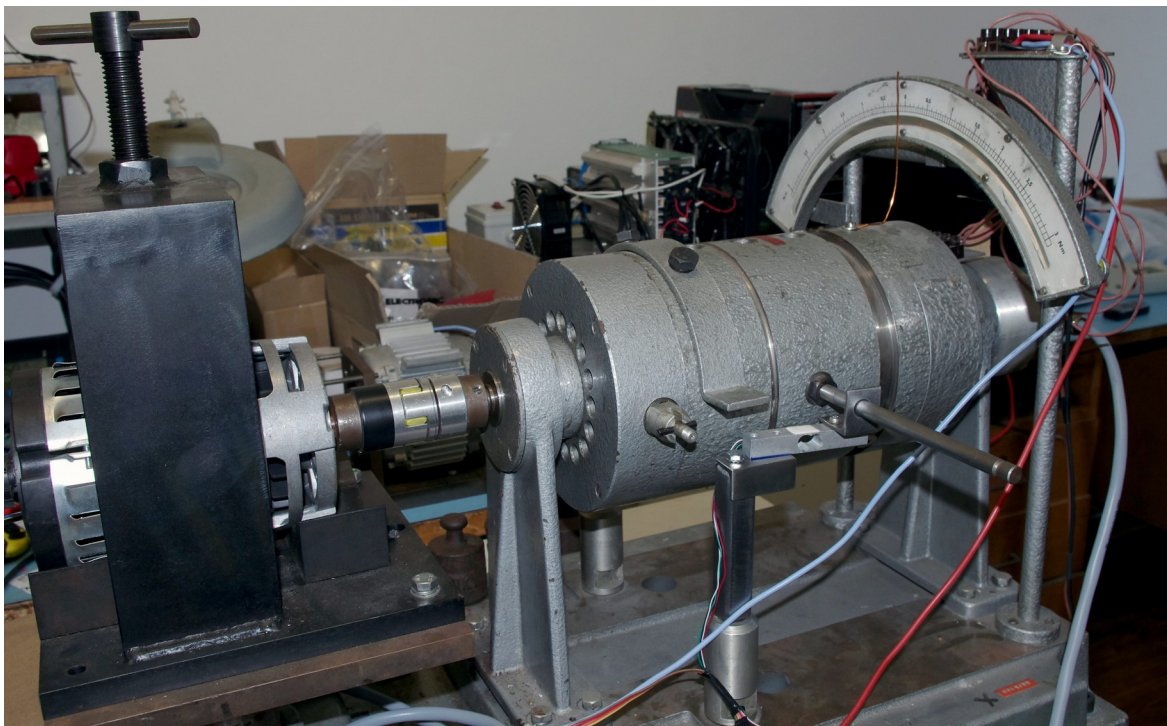
I v tomto případě jsem využil zdrojů firmy Tesla Blatná. Jedná se o drátový rezistor v hliníkovém pouzdře řady TR35x. Jak je vidět na Obr. 2.5.1 v hliníkovém pouzdře jsou vytvořeny žebra. Díky tomu není nutné na rezistory montovat chladič a stačí je umístit do proudu vzduchu. Maximální teplota pouzdra je 250 °C viz Tab. 2.5.1.

Rezistory budou nainstalovány v racku společně s řídicí elektronikou. Měly by být umístěny na výšku a chlazeny alespoň dvěma 80mm ventilátory.

Tesla Blatná TR 354	
Typ rezistoru :	Výkonový drátový v Al pouzdře
Nominální teplota při 0°C :	60 Ω
Maximální přetěžovací napětí :	1000 V
Maximální zatížitelnost na vzduchu :	200 W
Maximální teplota povrchu rezistoru :	250 °C

Tab. 2.5.1. Vybraný výkonový rezistory [16]

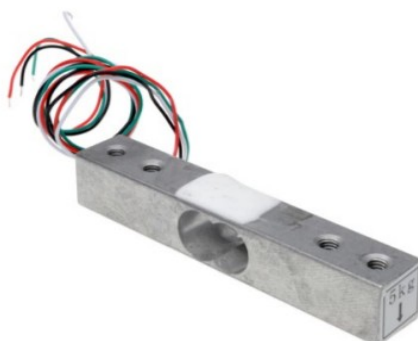
3 Testovací zapojení



Obr. 3.1. Fotka dynama při prvních pokusech s tenzometrem

Jak již bylo řečeno v úvodu kapitoly 2. Nejprve jsem zhotovil demonstrační aplikaci jež měla prakticky ověřit funkčnost dynamometru s tenzometrem viz Obr. 3.1. Tato aplikace dokázala měřit otáčky motoru a zároveň působící moment motoru. Pro možnost buzení dynama byl použit jednoduchý spínaný proudový regulátor.

3.1 Testovací tenzometr



Obr. 3.1.1. Testovací tenzometr [17]

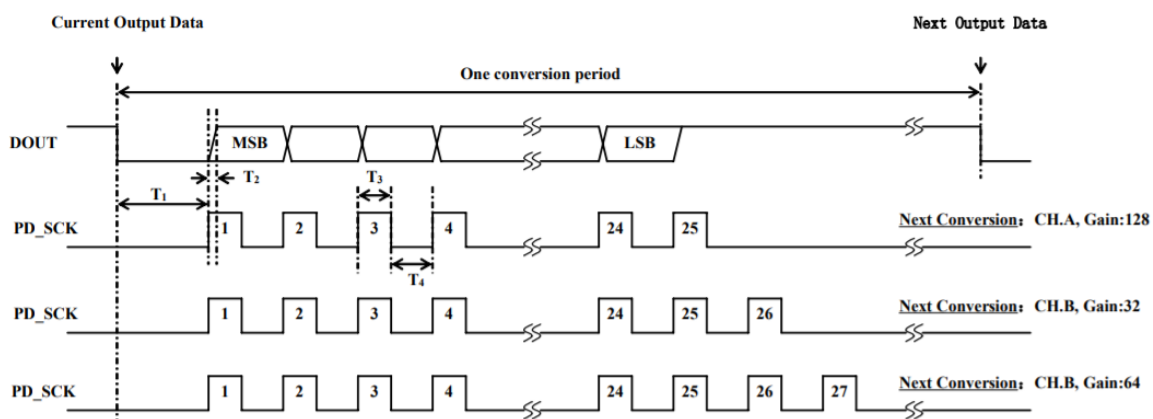
Pro první pokusy jsem se rozhodl sehnat levný 5 kg tenzometr viz Obr. 3.1.1. Jedná se o snímač určený pro kuchyňské váhy. Jeho parametry oproti vybranému tenzometru jsou podstatně horší. Mezi nejzásadnější patří výstupní rozlišení, které je pouhých 1 mV/V. Ostatní parametry lze nalézt v Tab. 3.1.1. Ovšem pokud vezmeme v úvahu cenu, která činí pár set korun tak se jedná o velmi zajímavý senzor.

převodník už často nabídne 24b rozlišení. Chyby zesilovače jsou značně eliminovány díky vytvoření na jednom čipu.

Pro potřeby testu se mi podařilo najít destičku pro Arduino a podobné vývojové kity, která byla osazena převodníkem určeným přímo pro váhové senzory. Kromě samotného čipu se na desce nachází i nezbytné diskrétní součástky viz Obr. 3.2.1. U této desky je velice překvapivá cena, která je třetinová oproti vybranému převodníku ADS1232 do výsledné elektroniky.

Základem desky je sigma delta převodník s HX711, který disponuje dvěma přepínatelnými vstupy. Vybraný vstupní signál se následně zesiluje v měřícím zesilovači. Zesílení je možné volit ze tří hodnot. Zesílená hodnota je měřena sigma delta převodníkem, který umožňuje dvě vzorkovací rychlosti 10 nebo 80 vzorků za sekundu. Výsledek je přenášěn do MCU prostřednictvím sériové komunikace viz Obr. 3.2.2. Jak je vidět z průběhů, režim převodníku se volí pomocí počtu pulzů hodinového signálu. Tyto průběhy jsou pro režim běhu. V případě potřeby uspání převodníku je třeba hodinový signál nastavit na logickou jedničku. Výstupní formát dat je ve dvojkovém doplňku.

Pro správnou funkci má převodník integrovanou logiku, oscilátor a band gap referenci. Zajímavostí tohoto obvodu je přítomnost lineárního nastavitelného stabilizátoru, který umí odpojit tenzometr od napájení v případě uspání obvodu. Parametry převodníku jsou v Tab. 3.2.1.

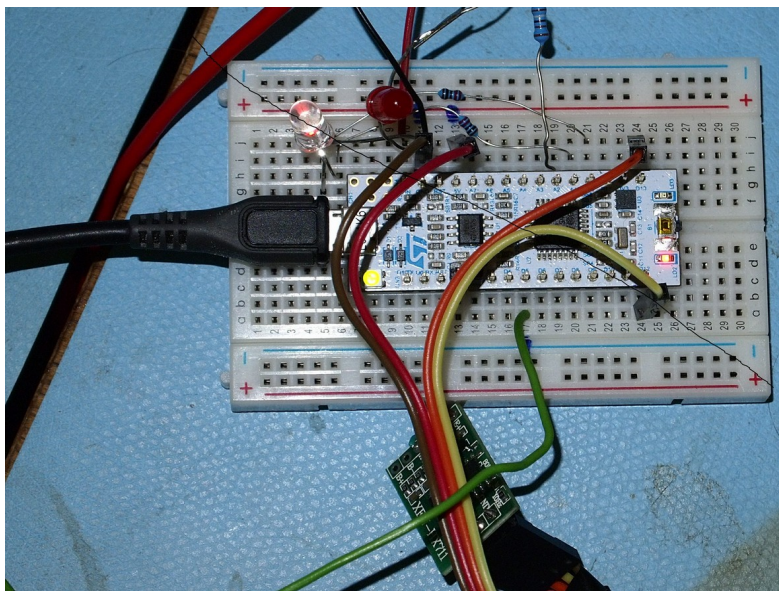


Obr. 3.2.2. Sériová komunikace s převodníkem HX711 [18]

Sigma delta převodník HX711	
Napájecí napětí :	2,7 – 5,5V
Rozlišení :	24 bitů
Vzorkovací rychlosti (pomalá / rychlá) :	10 / 80 vzorků/s
Zesílení PGA v krocích :	32, 64, 128
Teplotní drift vstupního offsetu (Pro zesílení 128) :	±6 nV/°C
Teplotní drift zesílení (Pro zesílení 128) :	±5 ppm/°C
Odstup signál šum :	100 dB

Tab. 3.2.1. Základní parametry převodníku HX711 [18]

3.3 Testovací elektronika měření na dynamometru

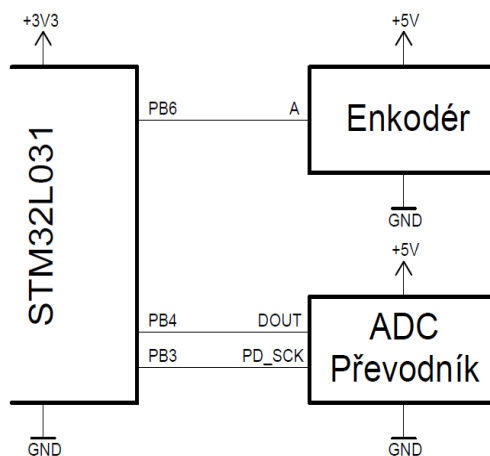


Obr. 3.3.1. Fotka testovací desky

Pro testování byla využita Nucleo desička s STM32L031 viz Obr. 3.3.1. Jedná se o celkem malou desku, kterou lze snadno posadit do malého nepájivého pole. Na desce je integrován debugger/programátor ST-Link, který lze snadno propojit s PC pomocí micro USB kabelu. Tento převodník také disponuje emulátorem sériového portu.

Srdcem desičky je 32 bitový nízko příkonový mikroprocesor od firmy ST electronic. Je postaven na architektuře ARM Cortex M0+. Maximální taktovací kmitočet je 32 MHz. Vzhledem k tomu že se jedná o malé MCU je vybaven pouze základními perifériemi. Nesmí zde chybět 12 bitový ADC převodník nebo čtyři 16 bitové časovače. Také po stránce komunikace je vybaven dvěma UART jednotkami, SPI nebo I2C periférií. V neposlední řadě výhodou je ve zpětné 5 V toleranci všech vyvedených pinů. Pro testovací aplikaci je tento vývojový kit dostačující.

Na Obr. 3.3.2 je vidět blokové schéma propojení MCU se senzory. Obě čidla byla napájena z 5 V. Díky tomu nebylo třeba řešit převodníky úrovní. Aplikace využívá časovač TIM21 v režimu „input capture“ pro měření rychlosti. Tato periférie po každém



Obr. 3.3.2. Blokové zapojení elektroniky měření

náběžné hraně od fáze A enkodéru vyvolá přerušení. V tomto přerušení se zaznamená současná hodnota registru CCR1. Následně je vypočten rozdíl od předchozí hodnoty registru CCR1. Na základě znalosti děličky časovače TIM21 lze určit rychlost otáčení dle vzorce 3.1.

Komunikace s ADC převodníkem HX711 je prostřednictvím softwarové sériové komunikace. Důvodem tohoto řešení složitá až nemožná implementace skrz SPI. To je způsobené pohyblivým počtem pulzů pinu PD_SCK, kterým se zadávají příkazy převodníku. Běžný hardware SPI umí poslat 8 nebo 16 bitové slovo. Ovšem nevím jak by udělal počet pulzů libovolný. Naštěstí převodník je značně pomalý. Při vzorkovací frekvenci 10 vzorků za sekundu, je třeba minimálně dosáhnout frekvence komunikace 270 Hz.

Komunikace je realizována prostřednictvím časovače TIM2, který generuje přerušení s frekvencí 32 kHz. Na základě něj se volá obsluha komunikace, která dokáže generovat poloviční frekvenci signálu PD_CLK. Na základě režimu čtení dat nebo čekání konce převodu se odesílají data. O odeslání dat vždy informuje datový pin spádovou hranou. Výsledek se vždy pošle s odeslaným posledním bitem PD_CLK. Výpočet působící síly je podle vzorce 3.2. Tento výpočet je bez korekce chyby linearizace. Ve vzorce 3.3 je vidět princip kalibrace. Pro určení převodního koeficientu je třeba tenzometr zatížit dvěma odlišnými závažími. A následně podělit rozdíl hodnoty převodníku s rozdílem působících sil. Přesnost tohoto výsledku linearizace bude růst s velikostí rozdílů závaží.

Poslední část této demo aplikace je vizualizace měřených parametrů prostřednictvím STM studio. Tento nástroj využívá rozhraní ST-Link a je možné jím vyčítat libovolnou proměnou z programu v reálném čase. Proměnou lze zobrazit jak do grafu se závislostí na čase tak na jiné hodnotě. Dokonce software umožňuje zobrazení sloupcového grafu. Tento nástroj byl využit pro zobrazování aktuálních otáček a momentu.

$$v = \frac{f_{MCU} * 60}{prsc * n * x} \quad [Ot/min] \quad (3.1)$$

- prsc - Hodnota děličky daného časovače
- n - Počet pulzů na jednu otáčku
- x - Hodnota získaného vzorku

$$F = \frac{(Result - Zero_{point})}{scale} \quad [N] \quad (3.2)$$

$$scale = \frac{Result_{F_2} - Result_{F_1}}{F_2 - F_1} \quad (3.3)$$

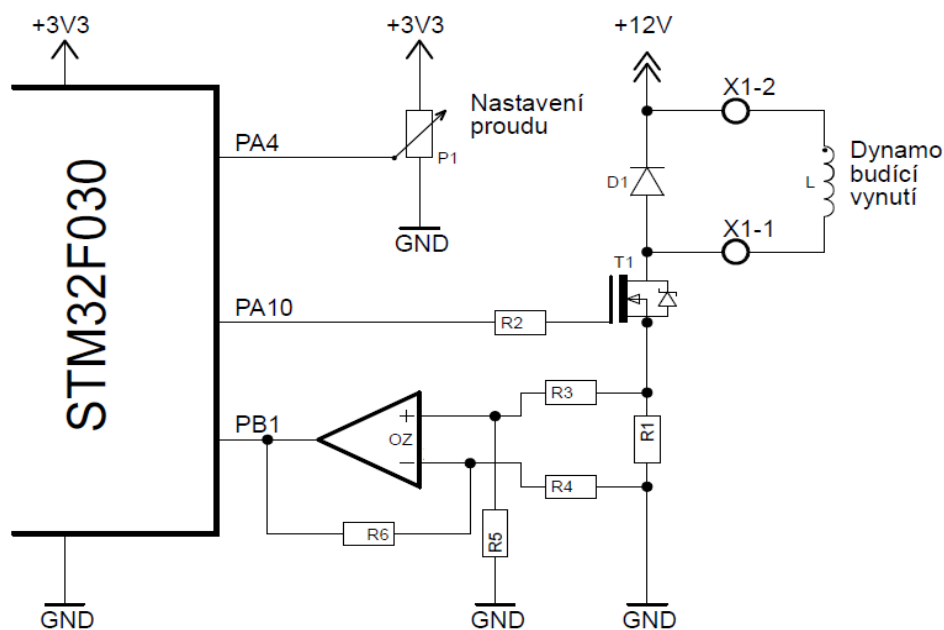
- *Result* - Aktuální hodnota ADC převodníku
- *Zero_{point}* - Výsledek převodu nezatíženého dynamometru
- *F₁* a *F₂* - Dvě rozdílné působící síly za předpokladu $F_1 < F_2$

3.4 Testovací elektronika buzení dynama

Za tímto účelem jsem předělal prototypový vzorek elektroniky, který disponoval výkonovým unipolárním tranzistorem a měřením proudu. Základem této desky je 32 bitový mikrokontrolér STM32F030 s jádrem Cortex M0. Jedná se o nízko cenový MCU vhodný do aplikací řízení motorů. Najde uplatnění jak v jednoduchém řízení DC motoru tak ve složitém vektorovém řízení třífázových synchronních motorů PMSM. Ve srovnání s předchozím mikropočítačem nabídne více periférii. Přibyli především časovače, kterých může být až osm. Mezi nimi vyniká časovač pokročilého ovládání TIM1, který je určený především k ovládání motorů. Dále nalezneme jeden 12 bitový ADC převodník, až pět USART jednotek, dvě SPI a dvě I2C rozhraní. Maximální rychlost tohoto kontroléru je 48Mhz.

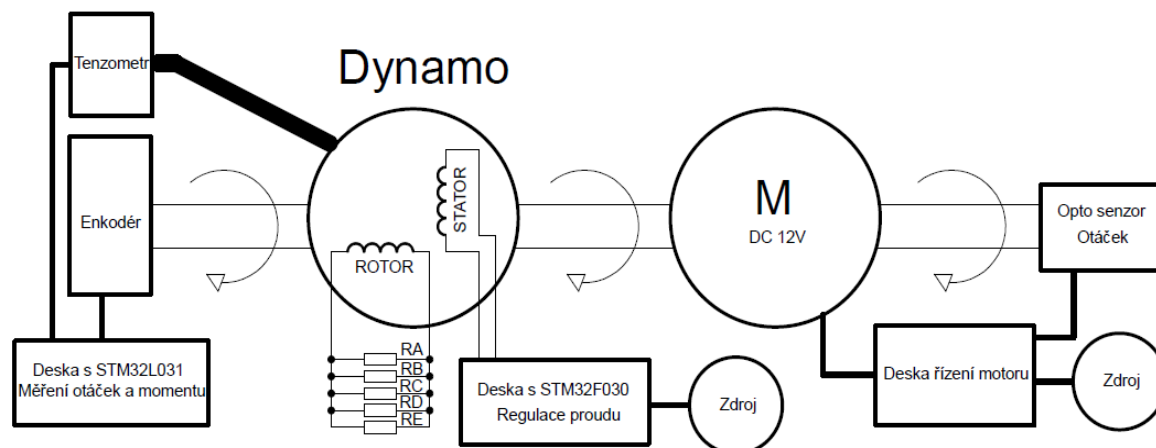
Principiální zapojení lze vidět na Obr.3.4.1. V aplikaci je naprogramován PS regulátor, který ovládá hodnotu šířky výstupní PWM modulace. Tato modulace je tvořena časovačem TIM1. Signál z PWM je přiveden na výkonový tranzistor T1, který reguluje proud skrz budící vynutí dynama. Měření proudu je realizováno měřením napětí na rezistorech R1 o hodnotě 5 mΩ. Toto napětí je následně zesíleno diferenciálním zesilovačem OZ se zesílením 30,3 krát. Výstup OZ je propojen se vstupem ADC převodníku. Pomocí potenciometru P1 je získán požadavek hodnoty proudu v rozmezí 0 až 10A. Tato hodnota je následně v PS regulátoru porovnávána se změřeným proudem. Dle rozdílu těchto hodnot regulátor ovlivní šířku PWM modulace.

Pro měření hystereze senzoru bylo upraveno zadávání nastaveného proudu, jelikož nešlo pozicí potenciometru správně stanovit nastavený proud vynutím. Pro to jsem využil přístupu do paměti za pomoci programátoru. Konkrétně v prostředí IAR Embedded Workbench jsem aktivoval funkci Live watch, která umožňuje měnit hodnoty proměnné za běhu programu.



Obr.3.4.1. Principiální schéma zapojení obvodu regulace proudu

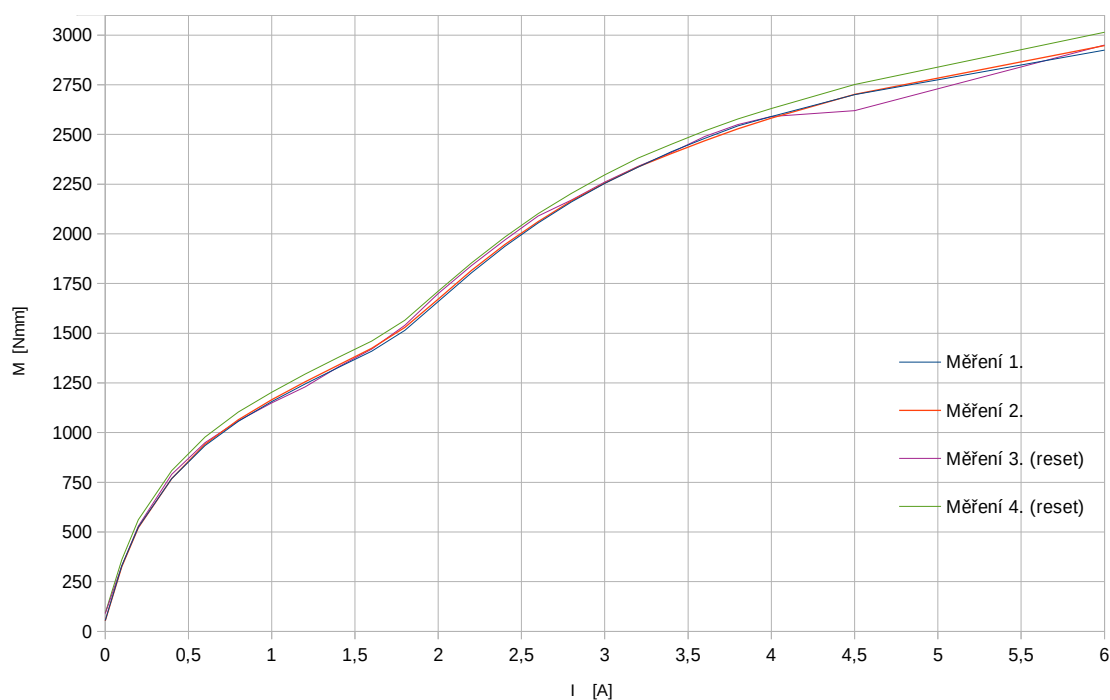
3.5 Praktické měření hystereze testovacího tenzometru



Obr. 3.5.1. Blokové schéma měřicí sestavy

Výsledkem testovacího zapojení tenzometru je měření jeho hystereze. Měření proběhlo za pomoci komponent jež jsou v této kapitole rozebrány výše. Aby bylo možné měření provést. Zapojení se neobešlo bez pěti paralelně spojených rezistorů z kapitoly 2.5. Nezbytnou částí byl 12 V motor společně s ovládací elektronikou, která uměla řídit otáčky motoru.

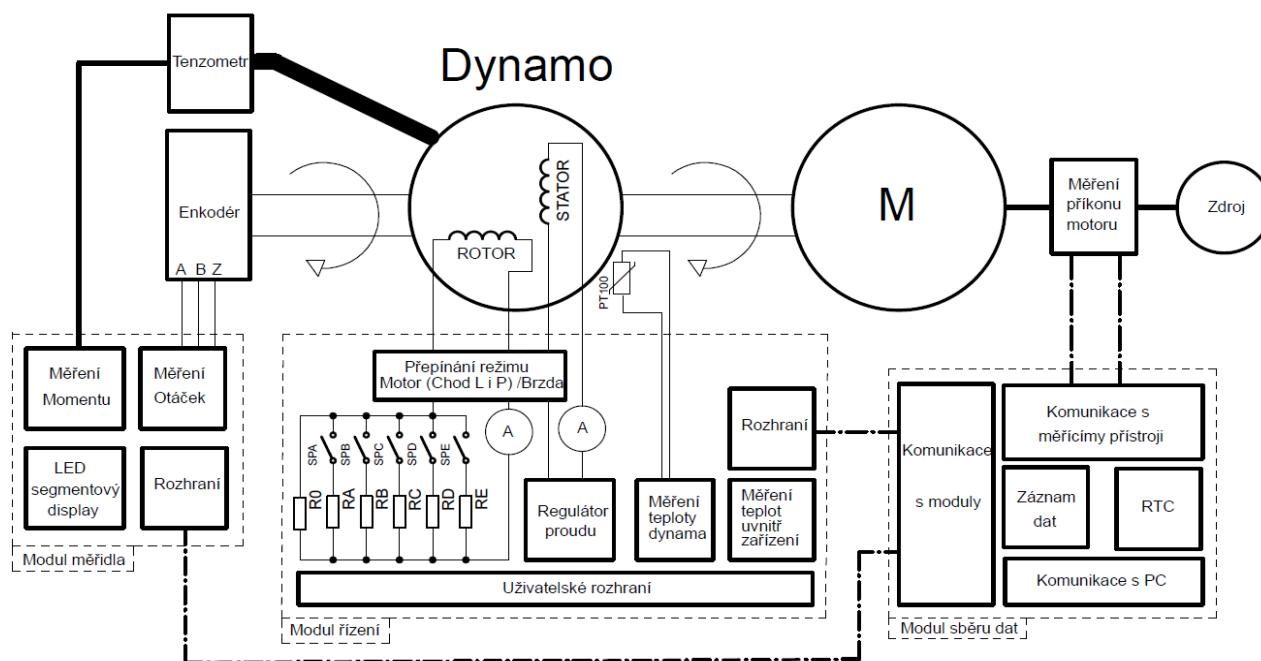
Cílem měření bylo určit chování senzoru momentu při opakovaném zatížení. Měřená soustava je vidět na Obr. 3.5.1. Princip měření spočívá v nastavení konstantních otáček motoru za pomoci elektroniky regulátoru otáček motoru. Zátěžný moment je dán proudem buzení dynama. Tento proud byl regulován za pomoci elektroniky z kapitoly 3.4. Proud byl kontrolován pouze za pomoci ampérmetru zdroje. Měření momentu a kontrola otáček proběhla pomocí elektroniky popsané v kapitole 3.3 a vizualizačního nástroje STM Studio.



Obr. 3.5.2. Změřený graf opakovaného měření momentu při stejném proudu

Výsledné měření je zpracováno do grafu viz Obr. 3.5.2. Zde jsou vidět čtyři měření. První dvě proběhly po sobě a druhé dvě s restartem MCU. Po startu programu proběhlo vždy získání nulové hodnoty momentu. První a druhé měření má minimální odchylku. Maximální rozdíl mezi křivkami činil 22 Nmm s průměrnou hodnotou rozdílu 8,3 Nmm. Porovnání 2. a 3. měření dopadlo hůře. Zde se maximum rozdílu vyšplhalo na 82 Nmm s průměrem 16,95. Jako poslední jsem porovnával 3. a 4. měření. Zde se objevil největší rozdíl 131 Nmm s průměrem 36,75. Zvýšené rozdíly mohli být dány chybou převodníku HX711, který se špatně zkalibroval. Také mohlo dojít k chybě regulace proudu buzením. Asi nejvyšší chyba je v bodě 4,5 A. V ostatních hodnotách mají křivky stejný tvar, z toho usuzuji že by mohla být také chyba offsetu. Pokud vezmu v úvahu pouze 1. a 2. měření tak se jedná o výborné výsledky, které odpovídají použitému senzoru. Dokonce si dovoluji tvrdit že už toto řešení dokáže zpřesnit a zjednodušit měření. Zároveň jsem přesvědčen, pokud by se více vyladil software měřiče tak by takové odchylky ve 3. a 4. měření nevznikly.

4 Popis výsledné elektroniky



Obr. 4.1. Blokové schéma výsledné elektroniky

Na základě požadavku Tesly a výsledků měření, byly navrženy a vyrobeny tři moduly. Blokové schéma výsledného zapojení je na Obr. 4.1. Při návrhu byl dbán důraz na možnost jednotlivé moduly použít nezávisle na sobě. Tato možnost samozřejmě bude s omezenou funkcí. Ovšem stále by měla být zachována možnost propojení každého modulu s PC. K tomu by mělo přispět sériové rozhraní RS232 jímž jsou desky propojeny (viz čerchovaná čára). Jako komunikační protokol byl zvolen Modbus. Díky tomu by mělo být možno propojit desky se SCADA systémem.

Modul měřidla má jako primární úkol měřit otáčky, moment a tyto hodnoty zobrazovat na LED sedmi segmentovém displeji. Sekundárním úkolem je tyto hodnoty posílat skrz sériové rozhraní. Jeho konfigurace by měla jít bez programátorů

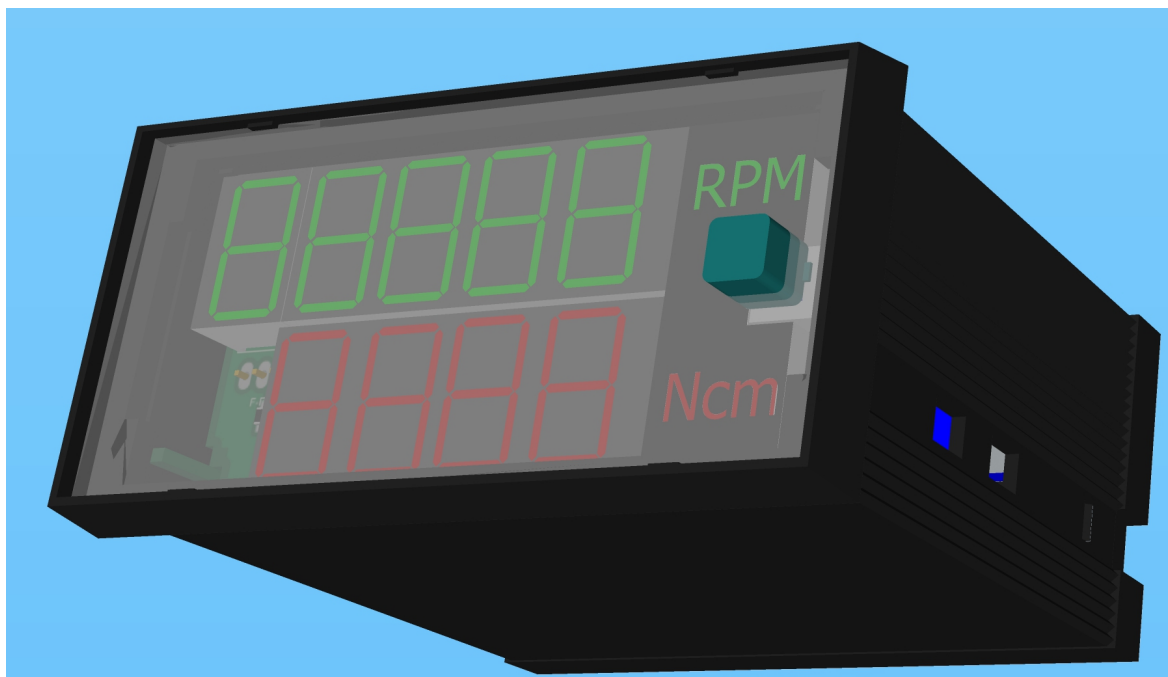
prostřednictvím třech tlačítek vzadu na krabičce nebo pomocí SCADA programu. Měřidlo je v krabičce do panelu, která se běžně používá například pro průmyslové PID regulátory. Díky tomu je jí možné umístit jak do hlavního panelu, tak například místo současné stupnice dynamometru za pomoci drobných mechanických úprav.

Modul řízení dynama umožňuje přepínat mezi motorem a brzdou. V režimu motoru je také umožněn změnit směr otáčení. Řízení probíhá pomocí regulátoru proudu. V případě potřeby nastavit daný moment nebo otáčky je nezbytná komunikace s měřidlem dynama. Deska sleduje teplotu vynutí dynama ale také výkonové komponenty uvnitř skříně. Velmi významná je také část ovládacího rozhraní. Skládá se ze 4 řádkového alfanumerického displeje, tří tlačítek a enkodéru. Díky ním je možné nastavovat parametry tohoto modulu. Zároveň by mělo jít tímto prostředkem v budoucnu nastavovat a ovládat i ostatní moduly.

Posledním modulem je sběr dat. Tento modul má za úkol sbírat data z předchozích modulů a multimetrů. Tyto data by měl umět zpracovat a z nich vytvořit výstupní charakteristiku. Za tímto účelem je vybaven slotem pro micro SD kartu. Pro zaznamenání data měření je aktivován modul reálného času. Pro další rozšiřování je vyvedeno osm portů mikrořadiče na interní konektor. Tato deska je zároveň vyrobena jako vývojová vzhledem k možnému budoucímu vylepšování. Díky tomu jsem se rozhodl elektroniku využít více účelově. V druhém režimu umí fungovat jako převodník dat s RS232 na USB. Tento režim se aktivuje přestavbou propojek na desce. Převodník se hodí pro navázání komunikace ostatních modulů s PC.

Návrh plošných spojů jsem dělal u desky měřidla a sběru dat. Doladění vlastností knihoven Eaglu a přiřazení inventárního čísla měl na starosti kolega návrhář DPS. Zároveň také navrhl plošný spoj desky řízení. Desky byly vyrobeny profesionálně ve firmě Čemebo. Osazení provedl kolega osazovač prototypových DPS.

4.1 Modul měřidla

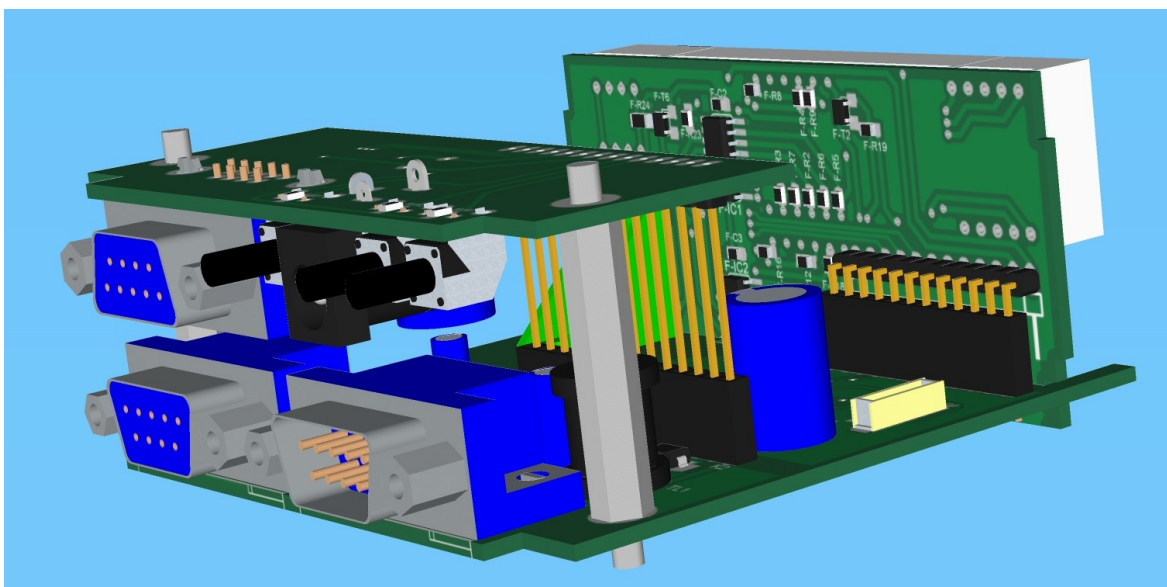


Obr. 4.1.1. Model měřidla

Jak už bylo řečeno tento modul slouží k měření momentu a otáček dynama. Může samostatně fungovat nebo může tyto informace posílat dalším modulům prostřednictvím sériového rozhraní. 3D model umístěný v krabičce lze vidět na Obr. 4.1.1 a na Obr. 4.1.2 se nachází vytažená elektronika z krabičky. Schéma celé elektroniky lze nalézt v příloze A.

Na Obr. 4.1.1 lze vidět čelní panel, kterému dominuje sedmi segmentový LED display o rozměru znaku 14,2 mm. První řádek je realizovaný pěti znaky zelené barvy. Ukazuje rychlost v otáčkách za minutu s jedním desetinným místem. Moment je zobrazován na čtyř znakovém displeji červené barvy. Hodnota je v Ncm s možností pohyblivé desetinné tečky. Díky tomu je teoreticky možné zobrazit moment od 0,01 Nmm až po 99,99 Nm. Na panelu se nachází tlačítko určené k nulování momentu a změně zobrazovaných hodnot. Je možné zobrazit nejenom aktuální hodnoty ale také minima a maxima.

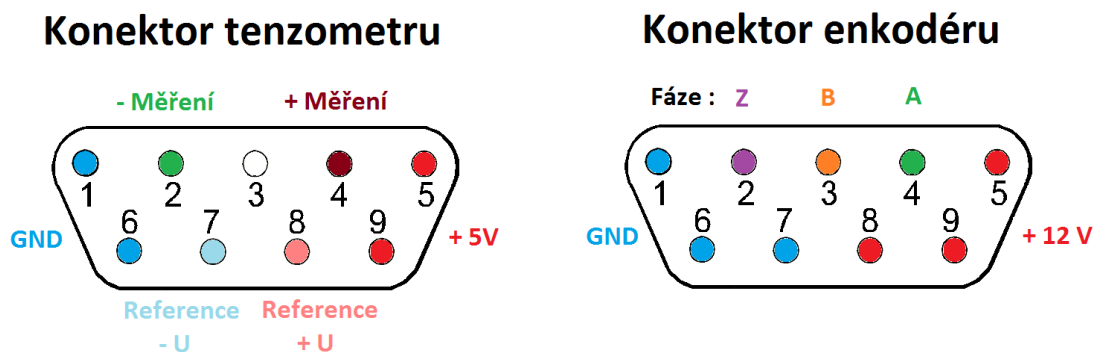
Na Obr. 4.1.2 se nachází zadní pohled na elektroniku. Zde jsou vidět tři konektory D-Sub 9. Samec je určen pro sériovou komunikaci standardu RS232. Zbylé konektory jsou pro připojení čidel. Význam jednotlivých pinů lze vidět na Obr. 4.1.3. Vzhledem k mechanické záměnnosti konektorů bylo třeba zajistit elektrickou kompatibilitu. Ta je zajištěna díky možnosti provozování obou čidel na napětí 12V. Propojení pinů šestého se sedmým, respektive osmého s devátým pinem nevádí. Zbylé piny dva až čtyři jsou vždy vstupní. Díky tomu by nemělo dojít k jejím poškozením ani k poškození senzorů. Nicméně tento stav není doporučené dlouhodobě používat. Při připojení tenzometru do konektoru enkodéru dojde k napájení tenzometru napětím 12V, které je maximální doporučené. Toto napětí způsobí na odporech můstků tepelné zatížení. Toto zatížení bude zvýšeno díky napájení vstupů fází A a Z, které obsahují diodu optopřevodníku. Takovéto dlouhodobé zatížení může poškodit tenzometr. Připojení enkodéru do konektoru tenzometru by nemělo nic způsobit.



Obr. 4.1.2. Pohled zezadu na rozebrané měřidlo

Ještě bych se rád zastavil u možností připojení váhového senzoru. Jak bylo zmíněno v kapitole 2.2. Sensory disponují různým typem připojení, které je většinou odvozeno od ceny a přesnosti senzoru. Díky tomu se můžeme setkat se čtyř vodičovým zapojením (viz Obr. 3.2.1) se šesti vodičovým (viz Obr. 2.2.5.2) nebo šesti vodičovým se stínícím opletením. Na všechny tyto možnosti je zařízení připraveno.

- **Čtyř vodičové zapojení:** Je nezbytné propojit piny 6 a 7, 8 a 9.
- **Šesti vodičové zapojení:** Dle Obr. 4.1.3.
- **Šesti vodičové zapojení se stíněním:** Stínění se připojí k pinu 1 nebo 6



Obr. 4.1.3. zapojení konektorů čidel

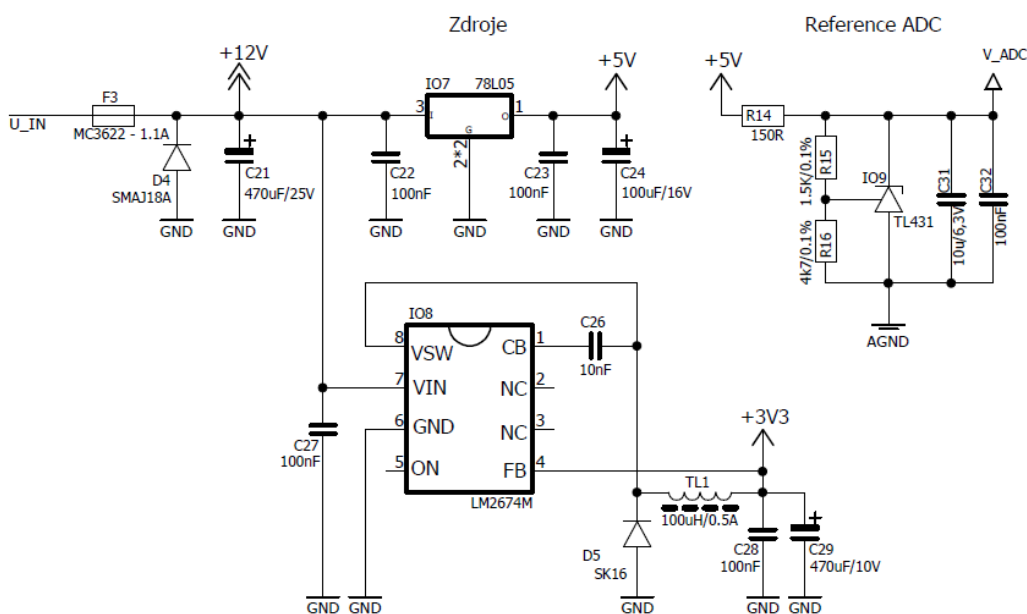
4.1.1 Použitý mikrokontrolér

Základ elektroniky tvoří mikrokontrolér STM32F100, který realizuje většinu funkcí tohoto modulu. Jedná se o 32 bitové MCU s architekturou ARM Cortex M3. Maximální taktovací kmitočet činí 24 MHz. Vzhledem k aplikaci měřící čas. Byl použit externí

krystalový oscilátor s taktem 8 MHz. Tento kmitočet je vydělen dvěma a následně pomocí PLL vynásoben šesti na maximálních 24 MHz.

Mezi periferiemi nesmí chybět 12 bitový ADC převodník, několik časovačů a bohatá výbava komunikace jako je SPI, I2C a USART. V elektronice byl použit typ STM32F100C8T6B v pouzdře LQFP48. Tento typ má velikost paměti programu 64 KB a pro data 8 KB viz datový list [19]. Nejedná se o maximum co tato řada nabízí, ovšem pro potřeby dané aplikace jsou tyto hodnoty zcela dostatečné.

4.1.2 Napájení

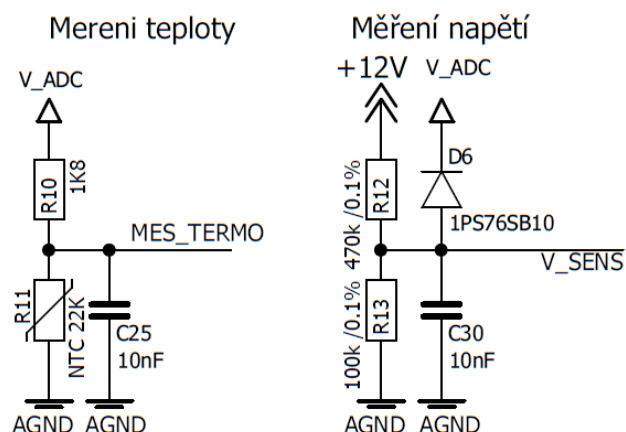


Obr. 4.1.2.1. Schéma napájení měřidla

Elektronika je napájena z externího zdroje 12 V. Vstup je chráněn vratnou pojistkou 1,1 A a transilem D4 s mezním napětím 18 V. Tento prvek ochraňuje elektroniku před přepětím i před špatnou polaritou napájení. Dále je toto napětí vyhlazeno kondenzátorem C21 a následně je přivedeno na lineární stabilizátor IO7 s obvodem 78L05 a spínaný regulátor LM2674M. Lineární stabilizátor má za úkol napájet obvod MAX232, převodník tenzometru a také zdroj reference pro ADC převodník. Předpokládá se nízký odběr těchto komponent a také nutnost stabilního napětí. ADC reference je tvořena obvodem TL431, který má za úkol zajistit přesné a stabilní napětí 3,3 V pro měřicí obvody. Volba rezistorů zpětné vazby R15 a R16 byla provedena dle vzorce 4.1. Větev tvořena spínaným step-down regulátorem LM2674M má za úkol napájet MCU a LED zobrazovač napětím 3,3 V.

$$U_{ADC} = U_{ref} * \left(1 + \frac{R_{15}}{R_{16}}\right) = 2,495 * \left(1 + \frac{1500}{4700}\right) = 3,29 \quad [V] \quad (4.1)$$

4.1.3 Měření veličiny převodníkem ADC

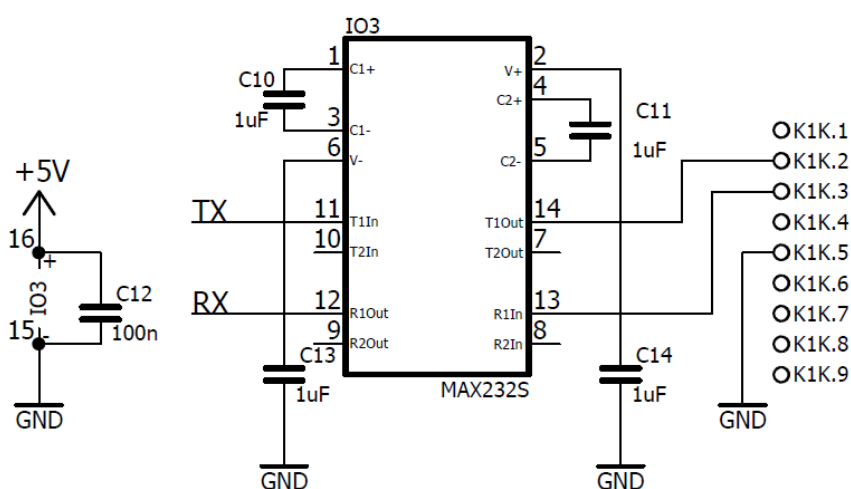


Obr. 4.1.3.1. Schéma měřících obvodů

ADC převodník měří vstupní a výstupní napětí. Význam tohoto měření je pouze diagnostický. V případě překročení těchto hodnot elektronika pouze vyhlásí daný alarm. Není schopna tuto situaci řešit a je třeba se spolehnout na ochrany daných obvodů. Zapojení je vidět na Obr. 4.1.3.1. Výpočet teploty je dán linearizační rovnicí 4.2 získanou z výpočtů v Excelu. Maximální změřitelné napětí je dáno odporovým děličem R12 a R13. Napětí na R13 by nemělo překročit napětí reference ADC převodníku. Jako ochranný prvek je zde schottkyho dioda D6. Hodnota maximálního změřitelného napětí je 15,5 V.

$$T_{NTC_{22K}} = -54,127 * U_{R11} + 189,757 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.2)$$

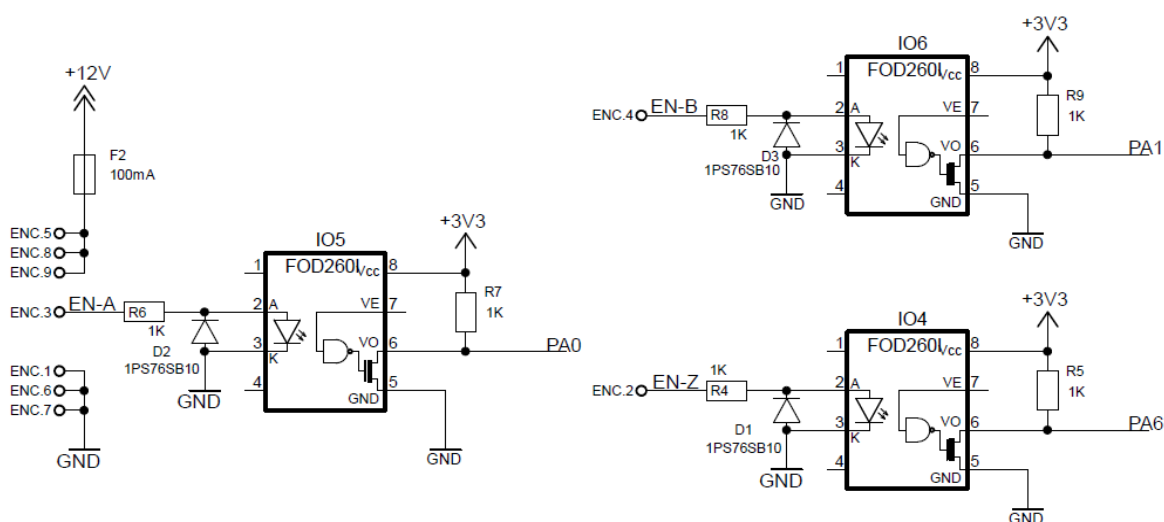
4.1.4 Sériové rozhraní



Obr. 4.1.4.1. Zapojení MAX232

Slouží pro převod úrovně 3,3 V jednotky USART na napětí ± 15 V, které je standardem RS232. Obvod je realizován dle datového listu [20] viz Obr. 4.1.4.1.

4.1.5 Měření rychlosti



Obr. 4.1.5.1. Schema zapojení vstupních obvodů měření rychlosti.

Měření rychlosti je realizováno pro všechny výstupní fáze enkodéru viz schéma Obr. 4.1.5.1. Fáze A a B jsou připojeny ke vstupům časovače TIM 2, který umožňuje provést logickou funkci XOR se vstupy. Díky tomu lze dvojnásobně zvýšit počet pulzů na jednu otáčku. Fáze Z je připojena k časovači TIM 3. Tato fáze slouží pouze pro kontrolní měření. Vstupy jsou realizovány vysokorychlostním logickým optopřevodníkem FOD260I, který lze použít do rychlosti přenosu dat 10 Mbit za sekundu. Vstup je díky diodě ochráněn před přepolarizováním. Velikost odporu se spočte dle vzorce 4.3. Maximální napětí které je možné na vstup aplikovat se spočte dle vzorce 4.4. Předpokládá se že proud nepřesáhne mezních 50 mA. Díky tomu je jediným limitem ztrátový výkon na SMD pouzdru 1210 předřadného rezistoru.

$$R_{opt} = \frac{U_{vstup} - U_{LED}}{I_{opt}} = \frac{12 - 1,4}{0,01} = 1060 \quad [\Omega] \quad (4.3)$$

$$U_{vstup_{max}} = \frac{P_{max}}{\sqrt{\frac{P_{max}}{R_{opt}}}} + U_{LED} = \frac{0,75}{\sqrt{\frac{0,75}{1000}}} + 1,4 = 28,8 \quad [V] \quad (4.4)$$

4.1.6 Měření momentu

Na Obr. 4.1.6.1 je vidět zapojení sigma-delta převodníku s obvodem ADS1232 od firmy Texas Instrument. Jedná se o kvalitnější převodník než je výše zmíněný HX711 v kapitole 3.2. Spolu sdílí mnoho společných rysů. Jako je 24 bitové rozlišení převodu. Vzorkovací rychlosti 10 a 80 vzorků za sekundu. Maximální zesílení kanálu 128 krát nebo možnost vzorkovat dva kanály. Více lze najít v Tab. 4.1.6.1 nebo v datovém listu [21].

Komunikace s převodníkem je také velmi podobná. Liší se pouze obsahem zprávy. Rozdíl je zde v konceptu. Na rozdíl od HX711 zpráva neobsahuje volbu kanálu či velikosti zesílení. Tyto parametry se volí prostřednictvím vstupů převodníku viz Pin descriptions

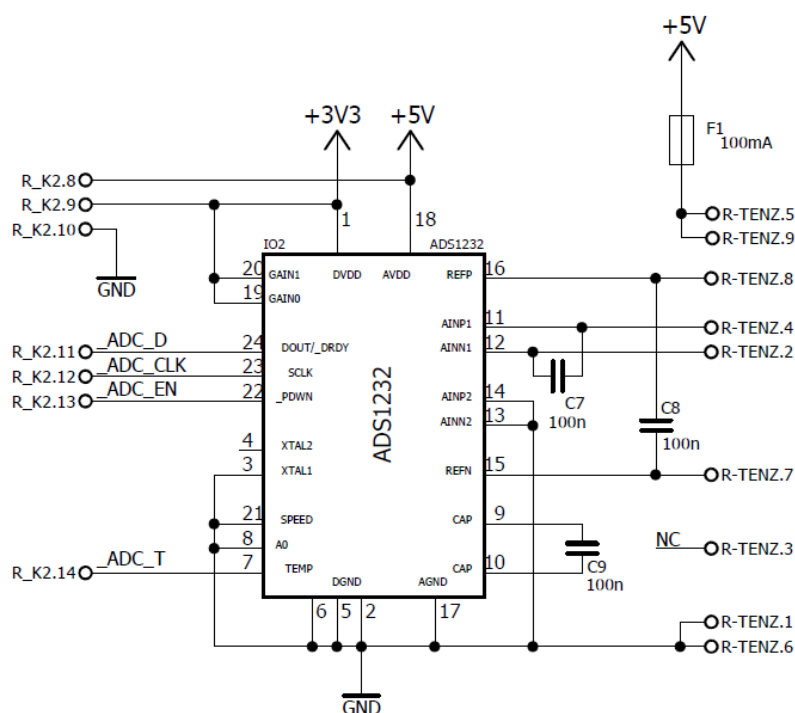
v datovém listě [21]. Obsahem zprávy je pouze volba režimu převodníku. Základním režimem je vzorkování, kdy se odešle 24 nebo 25 bitů prostřednictvím SCLK. Tento počet definuje chováním oznámení konce převodu. V případě odeslaných 25 bitů je vždy signál DOUT ve vysoké úrovni. Po skončení převodu spadne na 0. V případě 24. bitového příkazu není definován stav DOUT a konec je oznámen pulzem.

Sigma-delta převodník ADS1232	
Napájecí napětí :	2,7 – 5,3V
Rozlišení :	24 bitů
Vzorkovací rychlosti (pomalá / rychlá) :	10 / 80 vzorků/s
Zesílení PGA v krocích :	1, 2, 64, 128
Teplotní drift vstupního offsetu (Pro zesílení 128) :	± 10 nV/ $^{\circ}$ C
Teplotní drift zesílení (Pro zesílení 128) :	$\pm 2,5$ ppm/ $^{\circ}$ C
Odstup signál šum :	Až 130 dB s externím oscilátorem

Tab. 4.1.6.1. Základní parametry ADS1232 [21]

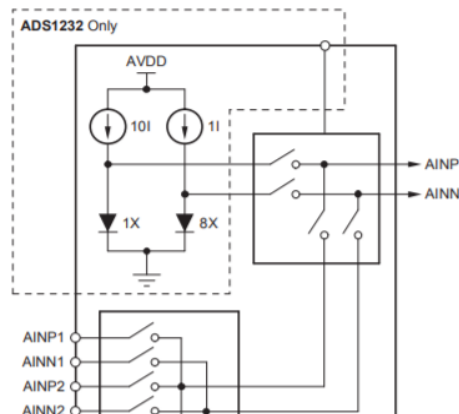
Dále převodník umožňuje kalibraci offsetu prostřednictvím vlastní band gap reference. Ta se provede při odeslání 26 bitů. Existuje také možnost odeslat 25 bitů a 26. bit pouze nastavit na logickou 1. V takovém to režimu je převodník uspán a po nastavení SCLK do logické 0 dojde ke kalibraci offsetu a změření hodnot. Úsporný režim funguje i pro čtení dat bez kalibrace, kdy stačí odeslat pouze 24 bitů.

Zajímavou funkcí převodníku je také možnost monitorovat teplotu převodníku. To se může hodit při velkých nárocích na přesnost měření. Aktivace probíhá prostřednictvím vstupu TEMP, který je třeba nastavit na logickou jedničku. Po té dojde k odpojení měřicích kanálů od zesilovače a k připojení teplotního senzoru viz Obr. 4.1.6.2. Senzor je tvořen dvěma diodami, které jsou napájeny dvěma proudovými zdroji. Poměr proudů a velikosti diod je 1/80. Tato konfigurace vytvoří diferenční napětí 379 μ V/ $^{\circ}$ C.



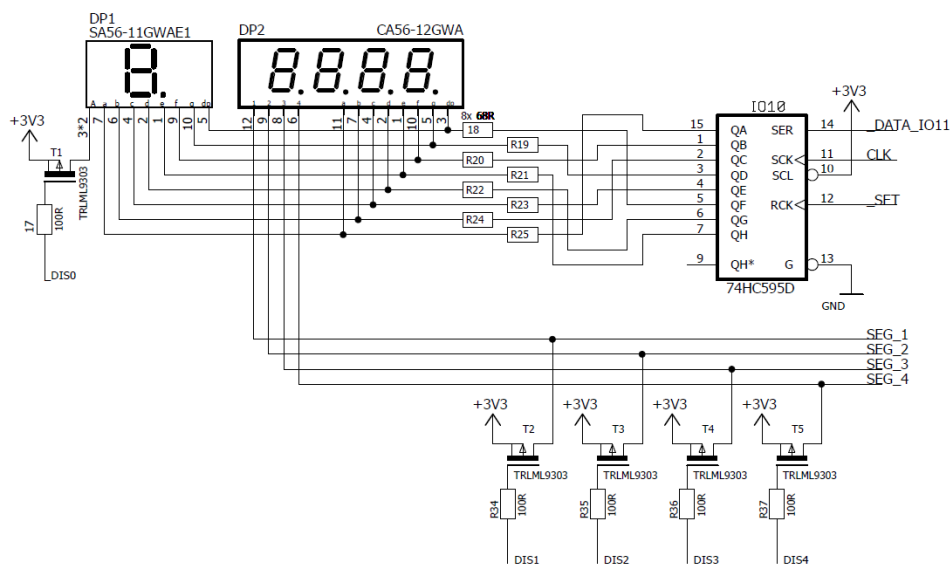
Obr. 4.1.6.1. Zapojení převodníku tenzometru

Výsledné zapojení převodníku lze vidět na Obr. 4.1.6.1. pro měření bylo zvoleno nejvyšší zesílení a je měřeno pouze na prvním kanále. Do budoucna je připraven bit pro možnost aktivace měření interní teploty převodníku.



Obr. 4.1.6.2. Princip měření teploty ADS1232 [21]

4.1.7 Ovládání displeje



Obr. 4.1.7.1. Schema ovládání části displeje

Displej je realizován pěti znakovým zelenými LED displejem, který zobrazuje rychlost a čtyřmi znaky červeného LED displeje pro zobrazení momentu. Mimo nich je na pravé straně umístěna dvojice led barů, na které je umístěna nálepka reprezentující měřenou veličinu v barvách segmentu. Displeje jsou se společnou anodou.

Nastavování displeje je provedeno prostřednictvím dvojice posuvných registrů 74HC595, které jsou zapojeny za sebou. Na Obr. 4.1.7.1 lze vidět část ovládání pro displej zobrazující rychlost. Princip nastavení je celkem jednoduchý. Do registrů IO10 a IO11 se načte 16 bitové slovo, které má význam nastavených LED segmentů na obou displejích. Znak se zvolí pomocí tranzistorů T1 až T5. Po krátké časové pauze je třeba poslat data pro další dvojici znaků. Tento děj je třeba provádět cyklicky a dostatečně rychle aby lidské oko vidělo stabilní obraz. V aplikaci byla zvolena obnovovací frekvence 200 Hz.

4.1.8 Popis programu

Program při startu nejprve vyčte konfigurační data z flash paměti. Data se nachází v šedesáté bance. Jedna banka má u daného MCU velikost 1 Kilobyte. Následně dojde ke kontrole navázání komunikace. V případě neúspěchu lze dál pokračovat stiskem čelního tlačítka do režimu běhu.

V režimu běhu se vzorkuje teplota a napětí na desce. Rychlost vzorkování je dána taktem časovače TIM 4, který vyvolává událost každých 10 mS. Po vyvolání události jsou prostřednictvím převodníku ADC1 na vzorkovány oba kanály. K ukládání dat do paměti je využita periferie DMA1. Po načtení všech dat vyvolá DMA1 přerušování, ve kterém se zprůměrují a zároveň přepočtou měřené hodnoty. Tento princip velmi ulehčuje procesoru.

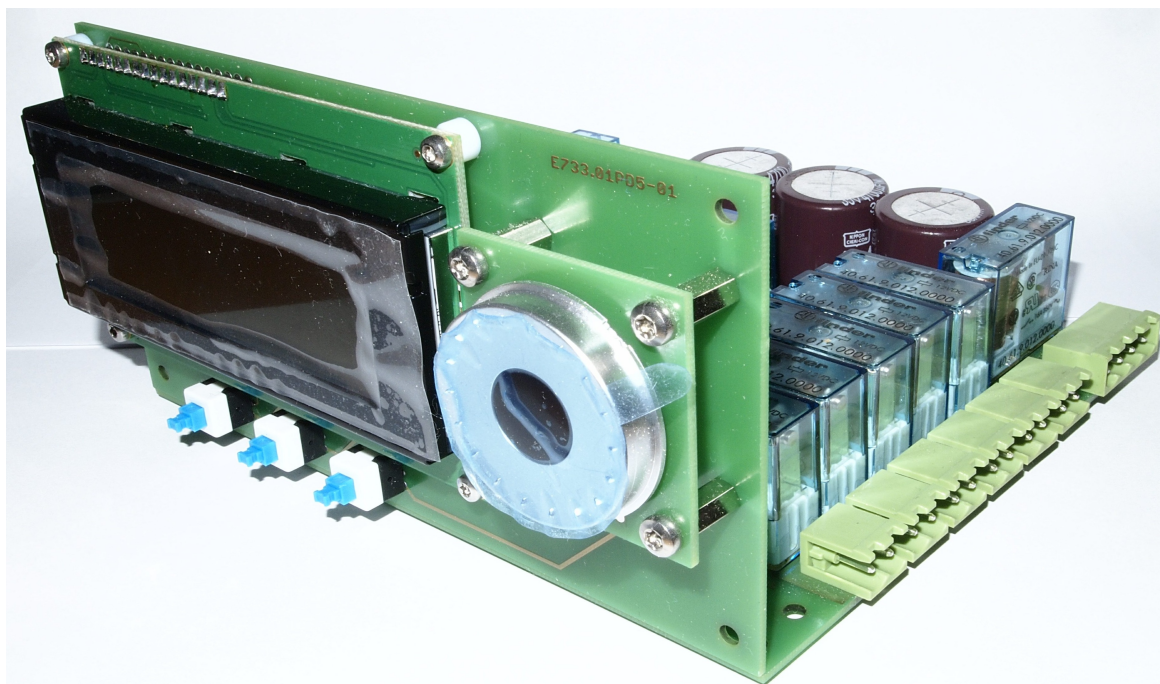
Další smyčka je ovládání LED displeje. Časovač TIM7 vyvolává každou 1 ms přerušování a volá obslužný program displeje. Ten vždy prostřednictvím SPI1 odešle 16 bitová data do posuvných registrů. Následně se aktivuje tranzistor pro danou dvojici znaků. Vždy se aktivuje znak jak na horní řádce tak na spodní. Díky tomu se ušetřil počet ovládacích výstupů a zároveň zrychlí vykreslovací frekvence displeje. Fyzicky jsou displeje rozděleny na 5 segmentů i přes absenci jednoho ve spodním řádku. Výsledná vykreslovací frekvence je 200 Hz.

Komunikace s převodníkem je realizována softwarově pomocí časovače TIM6. Ten generuje přerušování o frekvenci 6 kHz. Pro generování obdelníkového signálu jsou třeba dvě tyto přerušování. Tím je dána maximální komunikační frekvence 3 kHz, která je zcela dostačující. Po vygenerování signálu je zde stavový automat, který rozlišuje mezi režimem běhu. Implementovány jsou kalibrace, standby a vzorkování. Následuje další stavový automat, který řeší vlastní komunikaci se senzorem a udává režim posílání signálu SCLK a čekání na výsledek převodu. Vzhledem k jednoduchosti jsem použil 25 bitovou zprávu, kdy stačí pouze testovat zda bit DOUT je ve vysoké úrovni. Na konci převodu se vždy data zprůměrují a vyhodnotí. Kalibrace a výpočet velikosti momentu je stejný jako v kapitole 3.

Měření rychlosti je realizováno pomocí vstupů časovače TIM2 v režimu input capture. Byl využit vstup CH1 a CH2, které umožňují použít logickou funkci XOR vstupů k zdvojnásobení počtu impulzů. Tímto časovačem se vzorkuje pouze fáze A a B. Pomocí časovače TIM3 na kanálu CH1 se vzorkuje signál Z. Vždy po přijetí náběžné hrany pulzu se vygeneruje přerušování. Program vypočte rozdíl mezi předchozí a aktuální hodnotou příslušného registru CCRx a následně uplatní dříve zmíněnou rovnici 3.1.

Jako poslední je systémová smyčka, která je volána každých 100 mS prostřednictvím časovače TIM16. V ní se kontrolují stavy tlačítek, zadává se zobrazovaný obsah displeje nebo zadávají příkazy jednotlivým periferiím. Je zde stavový automat, který definuje stav zařízení jako celku. Mezi nejdůležitější úkoly patří načtení konfiguračních dat při startu zařízení, kontrola komunikace, běžný běh a chybové stavy.

4.2 Modul řízení dynama



Obr. 4.2.1. Fotka elektroniky řízení dynama

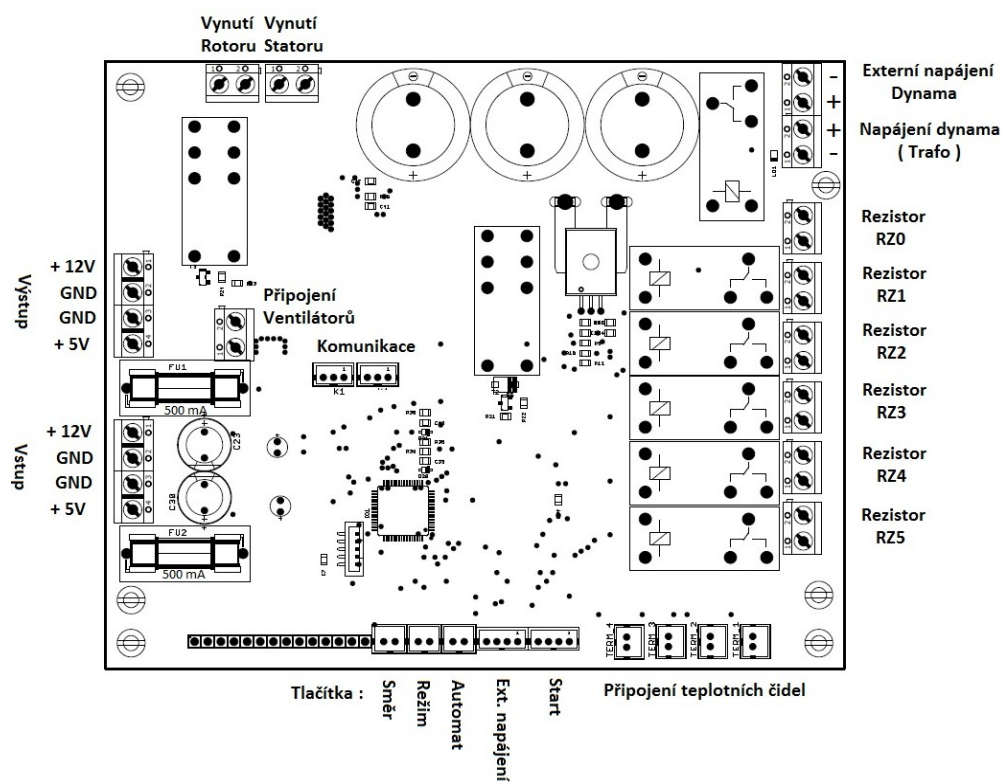
Fotka modulu řízení je na Obr. 4.2.1 a zapojení konektorů na Obr. 4.2.2. Schéma zapojení naleznete v příloze B. Deska umožňuje ovládat dynamometr jak v režimu motoru tak v režimu brzdy. Ovládání probíhá prostřednictvím spínaného proudového regulátoru a několika relétek. V případě brzdy relé připínají až pět zátěžových odporů dle požadavku. V režimu motoru rezistory nejsou připojeny a relé pouze mění polaritu připojeného rotorového vinutí.

Napájení modulu je ze dvou zdrojů se společnou nulou. První zdroj je pro dynamo, který je primárně realizován toroidním transformátorem 24 V / 25 A. V případě potřeby je možné využít externí zdroj. Volba zdroje probíhá prostřednictvím vstupního relé. Napájení logiky je řešeno spínaným průmyslovým zdrojem s napětími 5 V a 12 V. Tato napětí jsou chráněna pojistkami 500 mA a je možno je vyvést pomocí konektoru pro napájení dalších částí v rackové krabici. Pro chlazení výkonových komponent je k dispozici výstup pro větráčky s regulací pomocí PWM. Externí platinové senzory teploty lze připojit ke čtyřem konektorům.

Hlavní ovládání tvoří pět tlačítek, které se připojují do konektoru za deskou displeje. Ty mají za úkol ovládat hlavní stavy zařízení. Volí se s nimi režim běhu, směr otáčení, automatický nebo manuální režim, připojení externího napájení či startování automatického režimu. Tlačítka jsou kolébková do panelu. Externí napájení a startovací tlačítko mají jako jediná stavovou LED diodu.

Dále k ovládání slouží vizualizační část. Skládá se ze čtyř řádkového, dvaceti znakového alfanumerického displeje, který zobrazuje aktuální hodnoty systému. Pro možnost ovládání menu je doplněn ve spodní části o tři tlačítka. V pravé části se nachází rotační enkodér se středovým tlačítkem.

Deska je vybavena dvěma konektory, který slouží pro sériovou komunikaci. Oba mají podporu standardu RS232. Jeden lze pomocí propojek připojit přímo na USART mikrokontroléru. Tato funkčnost se může hodit v budoucích vylepšeních.



Obr. 4.2.2. Zapojení svorkovnic a konektoru desky ovládání

4.2.1 Použitý mikrokontrolér

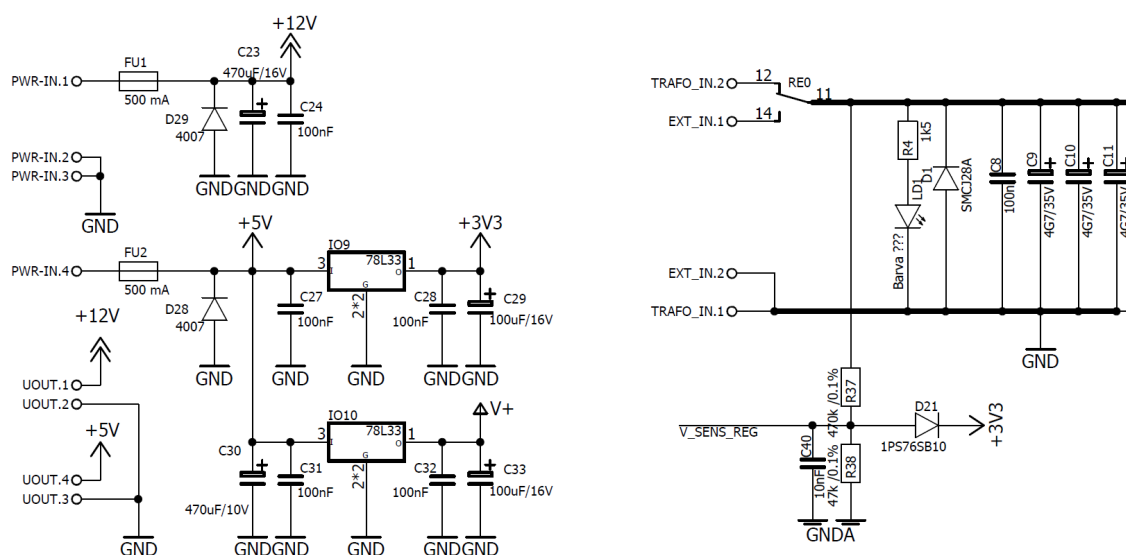
Základem tohoto modulu je mikrokontrolér STM32F205RCT6. Je postavený na 32 bitové ARM architektuře Cortex M3. Na rozdíl od předešlého STM32F100 se jedná o plně vybavený Cortex M3 s podporou ART Accelerátoru. Maximální taktovací frekvence jádra činí 120 MHz. Mezi perifériemi nechybí tři 12 bitové ADC převodníky, 17 časovačů či podpora dříve zmiňovaných sériových rozhraní. Naopak přibyly rozhraní jako USB, CAN nebo kontrolér pro zápis na SD karty. Více v dokumentaci [22].

Vybraný typ disponuje velikostí paměti programu 256 kB a velikostí paměti dat 96 kB. Takové to hodnoty jsou pro danou aplikaci velmi nad dimenzované. Mohly by se hodit v budoucnu při realizaci vylepšení například s komunikací po wi-fi.

4.2.2 Napájení

Je tvořeno dvěma zdroji. Jeden napájí logiku a druhý dynamo viz Obr. 4.2.2.1. Napájení dynama je možné pomocí interního transformátoru s usměrněním 24 V/ 25 A nebo pomocí externího zdroje. Mezi nimi je přepínání realizováno relém. Pro oba vstupy platí ochrana transilem 28 V a indikace stavu pomocí LED. Na tomto vstupu také mikrokontrolér měří úroveň vstupního napětí.

Napájení logiky se spoléhá na externí průmyslový spínaný zdroj s napětími 5 V a 12 V. U obou vstupů je pojistka 500 mA a ochrana proti přepolarizování. Větev 12 V je použita pro ovládací napětí relé a k napájení ventilátorů. Napětí se hlídá pouze v této větvi. Větev 5 V se používá k přímému napájení převodníků sériového rozhraní MAX232. Toto napětí je dále použito pro referenci ADC převodníku s TL431 a dvěma lineárními stabilizátory 3,3 V (IO9 a IO10). IO9 slouží k napájení mikrokontrolérů a periferií. IO10 má za úkol napájet externí teplotní senzory. Toto řešení má za úkol omezit možnost zničení mikrokontroléru poruchou na čidlech teploty.

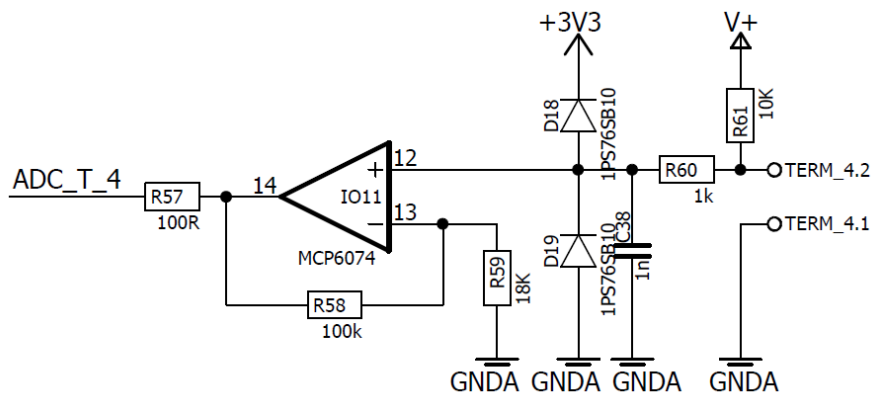


Obr. 4.2.2.1. Obvody napájení (Vlevo napájení logiky, vpravo napájení dynamy)

4.2.3 Měřené veličiny převodníkem ADC

Jak již bylo zmíněno modul měří napájecí napětí dynamy a 12 V větve logiky. Dále má za úkol monitorovat teplotu výkonového tranzistoru pomocí SMD NTC termistoru. Disponuje čtyřmi analogovými vstupy pro měření platinových teplotních čidel a speciální úlohu tvoří měření proudů.

Zapojení měření napětí 12 V větve a interního termistoru je shodné s Obr. 3.1.1. Stejně tak rovnice 2.4 je zde také použita. Měření napětí na vstupu dynamy je vidět na Obr. 4.2.2.1. Na Obr. 4.2.3.1 je vidět zapojení obvodu měření platinových čidel. Pro obě



Obr. 4.2.3.1. Jeden ze vstupů pro čidlo teploty Pt 1000

čidla bylo použito stejného zesílení 6,55 krát. Díky tomu stačí změnit pouze rezistor R61. V případě Pt100 se osazuje hodnota 1 K Ω v případě Pt1000 10 K Ω . Použité vzorce pro výpočet teploty jsou pro Pt100 v 4.5 a pro Pt1000 v 4.6. Všechny zmíněné hodnoty jsou vzorkovány převodníkem ADC2.

$$T_{Pt100} = 157,162 * U_{Pt100} - 316,036 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.5)$$

$$T_{Pt1000} = 156,062 * U_{Pt1000} - 308,625 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.6)$$

4.2.4 Sériové rozhraní

Tento modul disponuje dvěma sériovými výstupy podporující standart RS232. U jednoho z nich je možnost přepájet propojky a vyvést na konektor 3,3 V USART. Tato možnost by se mohla hodit při budoucích pokusech.

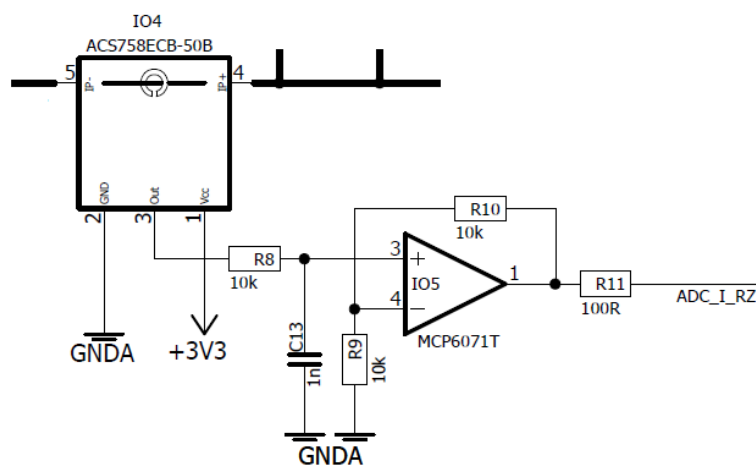
K realizaci stačil jeden obvod MAX232. Zapojení je obdobné jako zapojení jednoho kanálu v kapitole 4.1.4. Celé zapojení naleznete v příloze B.

4.2.5 Měření proudů

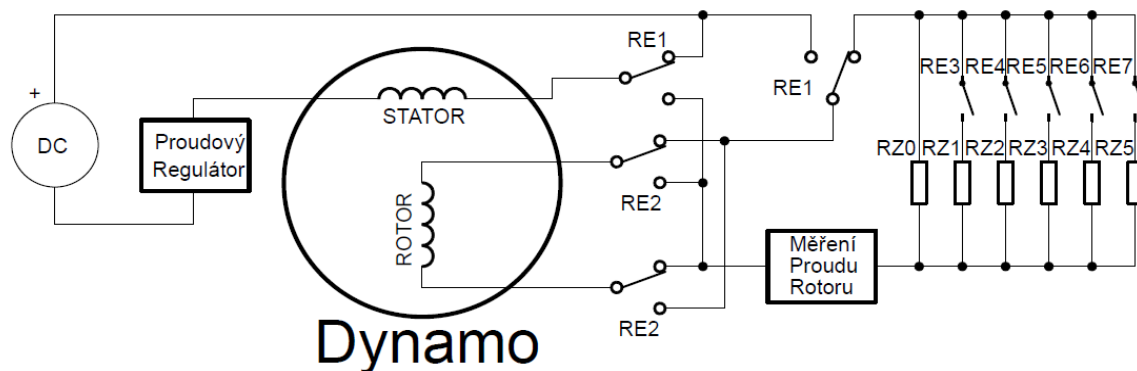
Měření proudu je určené pro hlídání proudů ve vinutí dynama. Skládá se ze dvou obvodů. První měří na snímacím odporu a je použito jako zpětná vazba proudového regulátoru. Slouží k hlídání proudu statorem v režimu brzdy. V režimu motoru hlídá proud oběma vinutími. Druhé měření je bezkontaktní pomocí hallova jevu. Jedná se o měření proudu rotoru v režimu brzdy.

Pro měření proudu rotorem byl použit senzor ACS758ECB-50B od firmy Allegro viz dokumentace [23]. Jedná se o lineární senzor na principu hallova jevu měřící do proudu 50 A. Jeho výhoda v tomto zapojení spočívá v galvanickém oddělení od obvodu. Tato vlastnost je výhodná vzhledem k nutnosti unipolárního měření a také napěťovým úrovním rotorového obvodu v režimu brzdy.

Výstupem obvodu je napětí s rozlišením 40 mV/A s nulovou hodnotou odpovídající Vcc/2. Pro odstranění rušení byl použit filtr typu dolní propust tvořený R8 a C13. Vzhledem k možnosti zesílit signál byl na výstup filtru umístěn neinvertující zesilovač zesilující dvakrát. Výsledek je vzorkován převodníkem ADC1.



Obr. 4.2.5.1. Měření proudu v obvodu rotoru

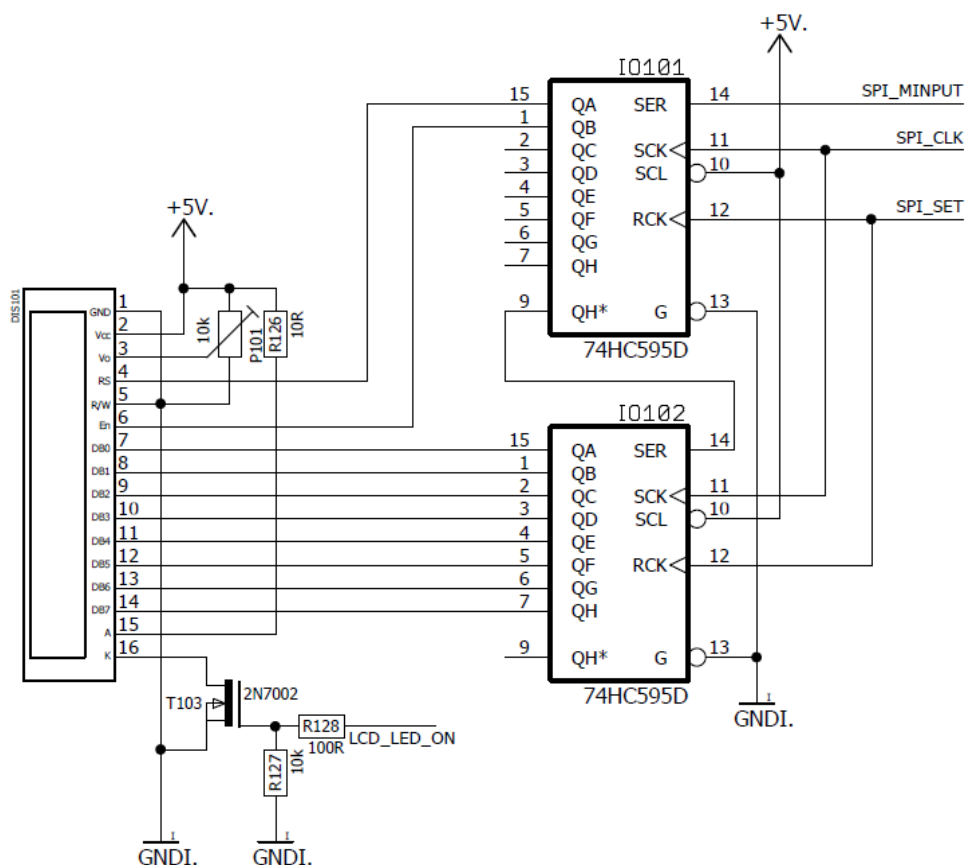


Obr. 4.2.7.1. Blokové zapojení relé řídicího modulu

4.2.8 Ovládání displeje

Jedná se o alfanumerický zobrazovač, který disponuje čtyřmi řádky. Na každí řádce lze zobrazit 20 znaků. Displej je osazen řadičem HD44780 s paralelní komunikací. Zapojení lze vidět na Obr. 4.2.8.1.

Displej je společně s tlačítky umístěn na druhé desce modulu. Pro minimalizaci počtu vodičů byl použit 16 bitový posuvný registr tvořený dvěma obvody 74HC595. Díky nim je možné displej řídit pomocí dvou ovládacích signálů a dvou signálů rozhraní SPI. Dále na desce nalezneme trimr P101, který slouží k nastavení kontrastu displeje. Pro ovládání podsvícení je použit tranzistor T103. Proudů podsvícením omezuje rezistor R126 v pouzdře 1210.



Obr. 4.2.8.1. Zapojení ovládání displeje

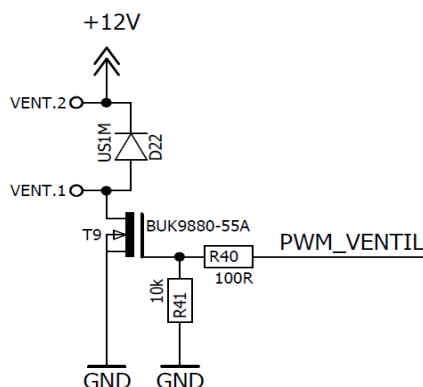
4.2.9 Ovládací rozhraní

Tento modul má za úkol vizualizovat data i ostatních jednotek. Za tímto účelem je vybaven výš zmíněným displejem a ovládacími prvky vizualizace. Prvky se skládají ze tří tlačítek umístěných pod displejem a rotačního enkodéru se středovým tlačítkem. Díky tomu je možné se pohybovat i ve složitější struktuře menu vizualizace. Všechny tyto prvky jsou na čelním panelu viz Obr. 4.2.1.

Pro potřeby přímého ovládání dynamometru je elektronika vybavena pěti konektory pro tlačítka do panelu. Dvě z nich umožňují indikaci stavu prostřednictvím LED diody. Tyto tlačítka jsou určena pro ovládání režimu (Motor/Brzda), směr (pouze režimu motoru), automatické/manuální ovládání, start měření a přepínání zdroje dynamu.

4.2.10 Ovládání ventilátorů

Pro ovládání ventilátorů byl využit výstup časovače TIM8, který generuje PWM signál. Zapojení lze vidět na Obr. 4.2.10.1. Jako výkonový prvek je použit N Mosfet tranzistor BUK9880-50A. Výhoda tohoto tranzistoru je v nízkém ovládacím napětí elektrody gate. Udávaná maximální velikost prahového napětí je 2 V. Díky tomu lze ovládat tranzistor přímo pomocí MCU. Nevýhoda tohoto řešení je ve vyšších spínacích ztrátách způsobených pomalým otevíráním tranzistoru. Pro ochranu obvodu je doplněna antiparalelní dioda na výstup.



Obr. 4.2.10.1. Obvod ovládání ventilátorů

4.2.11 Popis programu

Tento program se nepodařilo dostat do finální podoby. Momentálně se nachází v demoverzi, kdy komunikuje pouze s měřidlem. Program po startu inicializuje periférie. Následně dojde ke kontrole navázání komunikace. V případě neúspěchu lze dál pokračovat stiskem středového tlačítka enkodéru. V obou případech je umožněno pouze manuální ovládání.

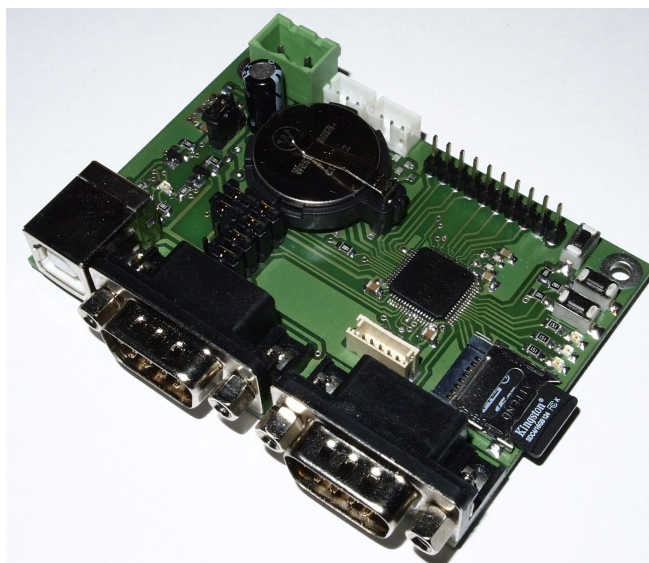
Přístroj v normálním běhu zjišťuje stavy monitorovaných parametrů prostřednictvím analogově digitálních převodníků. Pro pomalé vzorkování slouží ADC2 převodník, který je jako u předchozího modulu spřažen s časovačem TIM5 a DMA2. I v tomto případě vzorkují hodnoty po 10 mS. Měření proudů v obou obvodech probíhá pomocí převodníku ADC1, který je taktován od časovače TIM3. Časovač TIM 3 slouží ke generování signálu PWM pro výkonový tranzistor, který reguluje proud dynamem. Generování signálu probíhá v režimu „central alignment“ s frekvencí 4 kHz. Tento režim

generuje dvě přerušení. V bodě kdy je maximum na výstupu je měřen proud pro PS regulátor. V bodě kdy je minimum je měřen proud rezistory. Pro ovládání ventilátorů byl použit časovač TIM8, který je v režimu čítání vzhůru. Frekvence generované PWM je 16 kHz.

Ovládání displeje je řešeno pomocí SPI3. Enkodér se připojuje k časovači TIM4. Poloha enkodéru je reprezentována 16 bitovou hodnotou v registru CTN. Ta se v systémové smyčce přepočítává. Pro smyčku je použit časovač TIM14 s periodou 100 mS. V systémové smyčce je napsán stavový automat, který ovládá další bloky. Stavů jsou počáteční inicializace, čekání na spuštění ovládání dynama, běh dynama a chybové stavy. V chybových stavech se hlídají teploty, napětí, proudy a také moment pokud je připojen měřicí modul.

Do budoucna by mělo přibýt ovládání relé a komunikace s modulem sběru dat. Díky ní se budou moct data ukládat na SD kartu. Dále také by mělo jít zobrazit hodnoty kritických parametrů ostatních modulů.

4.3 Modul sběru dat



Obr. 4.3.1. Fotka desky sběru dat

Posledním vytvořeným modulem je sběr dat. Fotku vyrobeného modulu naleznete na Obr. 4.3.1 a celé zapojení v příloze C. Tento modul má za úkol zprostředkovat komunikaci mezi moduly a multimetry. Také umožňuje propojení s počítačem prostřednictvím USB rozhraní.

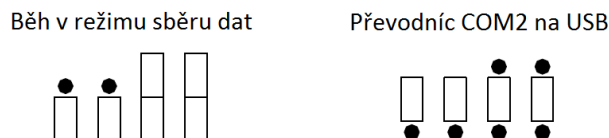
Měřená data jsou tímto modulem ukládána na SD kartu. Modul využívá RTC pro zajištění aktuálního data a času. Pro zálohu dat při odpojení napájení se na desce nachází baterie CR2032. Napájení je pomocí 5 V nebo 7 až 16 V dle polohy propojky. Pro další rozšiřování deska disponuje interním konektorem s osmi vyvedenými piny MCU.

Tento modul byl zhotoven jako testovací a předpokládá se možná výměna za jiný typ. Z toho důvodu byla u něj využita druhá možnost použití jako převodník RS232 na USB. Tato volba se provádí pomocí propojek.

Osazený mikroprocesor je schodný s deskou ovládání dynama. Hlídané hodnoty jsou napájecí napětí a teplota na stabilizátorech. Schéma zapojení je stejné jako u modulu měření viz Obr. 4.1.3.1.

USB_ON zjišťuje zda se komunikaci povedlo navázat. Pokud ne, je možné provést reset převodníku IO5 prostřednictvím signálu USB_RESET.

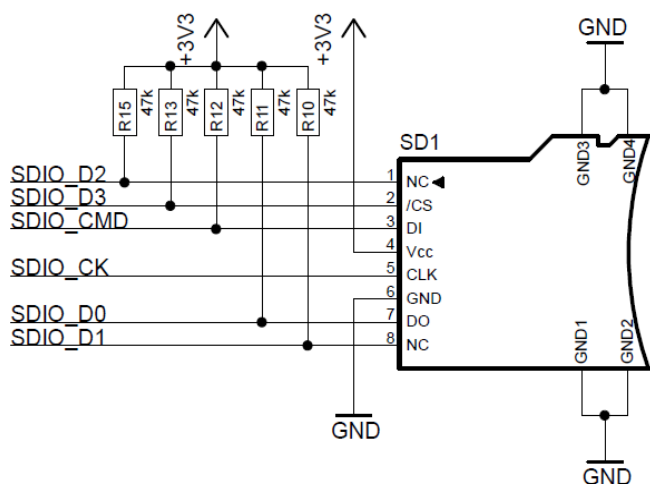
Pro režim převodníku RS232 na USB je třeba přestavba propojek viz Obr. 4.3.2.2. V tomto režimu není třeba externí napájení, převodník je napájen z USB.



Obr. 4.3.2.2. Pozice propojek pro volbu režimu

4.3.3 Připojení micro SD karty

Připojení micro SD karty je pomocí paralelní 4 bitové komunikace. To je možné díky periférii SDIO, která podporuje SDHC karty.



Obr. 4.3.3.1. Schéma připojení micro SD karty k MCU

4.3.4 Popis programu

Finální program pro tento modul se nepodařilo vytvořit vzhledem k časové náročnosti celého projektu. Je pouze otestována funkčnost zapojení. Byla zprovozněna tlačítka, LED diody a měření analogových hodnot. Měření se provádí pomocí stejných periférií jako v kapitole 4.2.11.

Dále byly inicializovány všechny sériové komunikace (USART1, USART2, USART3, USART6 a UART4). Také je připravena inicializace pro komunikaci s kartou prostřednictvím periférie SDIO, která podporuje paralelní 4 bitové rozhraní.

Do budoucna by tato deska měla umět získávat data s měřicími přístroji a modulů. S počítačem by měla umět komunikovat prostřednictvím protokolu Modbus, který se používá v automatizaci. Díky tomu bude možné desku spojit se SCADA programem jako je například Promotic.

5 Závěr

Modernizace dynamometrů zajistí v laboratoři měření v Tesle Blatné vyšší přesnost a zároveň zjednoduší ovládání. Také práce s výsledky bude mnohem komfortnější díky digitalizaci změřených dat.

Prvním úkolem bylo vybrat vhodné senzory. Zde jsem měl výhodu ve vyřešení měření otáček na velkém dynamometru. Měření působícího momentu motoru bylo složitější. První úvahy směřovaly využít principy měřidla, kde by se měřil náklon dle použitého závaží. Takové řešení přináší mnoho chyb a povedlo se najít vhodnější senzor. Jako nejvhodnější byl vybrán jednobodový váhový tenzometr.

Před rozhodnutím zda je toto řešení vhodné. Byl sehnán levný tenzometr do spotřební elektroniky společně s ADC převodníkem pro Arduino. Na tomto snímači bylo provedeno měření hystereze senzoru za pomoci Nucleo desky s ARM mikrokontrolérem a dvěma přestavěnými vzorky elektronik. Měřená data byla zobrazována v STM studio a ovládání dynamometru bylo prostřednictvím vývojového prostředí IAR Workbench. Toto měření je zaneseno do grafu v kapitole 3.5. Zde je vidět dobrá přesnost převodníku. Pokud vezmeme v úvahu dosavadní odečítání hodnot ze stupnice, které je náročné na přesnost pozorovatele. Už tato digitalizace významně přispěla k přesnosti měření zatěžovacích charakteristik motorů a usnadnila mnoho práce.

Další krok práce bylo rozvržení funkce zařízení. Za účelem modularity a možnosti využít jednotlivé části samostatně. Byla elektronika rozvržena do modulů. Prvním modulem je měření momentu a rychlosti. Modul je vsazen do panelové krabičky s plexisklem, za kterým se skrývá sedmi segmentový LED displej se dvěma řádky. Zobrazované hodnoty otáček a momentu mají odlišnou barvu pro rychlé zorientování. S okolím komunikuje prostřednictvím RS232.

Druhý modul má za úkol ovládat dynamometr. Umí režimy motor a brzda. V případě motoru lze ovládat jak otáčky tak směr otáčení. V režimu brzdy je možno nastavovat pouze moment. U měření momentu se plánuje provádět automatické měření. Modul také disponuje displejem pro vizualizaci, na kterém bude možné zobrazovat i data ostatních modulů.

Poslední elektronikou je deska sběru dat. Zde se sbírají data z měřících přístrojů, které udávají příkon motoru. Dále deska komunikuje s ostatními moduly. Umožňuje sebraná data analyzovat a uložit je na SD kartu. Pro orientaci v datech je v mikrokontroléru zprovozněna periferie reálného času. Deska také zajišťuje komunikaci protokolem Modbus s PC pomocí USB. Díky ní bude možné propojit zařízení se SCADA systémem.

Návrh schémat jsem provedl dle požadavků firmy. Návrh plošných spojů jsem dělal u desky měření a sběru dat v prostředí Eagle. Vždy návrh byl zkontrolován a bylo mu uděleno inventární číslo kolegou návrhářem plošných spojů. Desku ovládání dělal kolega dle mých požadavků. Desky byly zhotoveny profesionálně na dvoustranné desce a osazeny kolegou osazovačem.

Na vývoj programu nezbylo mnoho času. Moduly se povedlo zprovoznit v demo režimu. Už toto řešení značně ulehčuje a zpřesňuje měření. Po zprovoznění desky sběru dat a komunikace s multimetry. Bude se jednat o výborný nástroj, který značně ulehčí a urychlí vývoj řídicích elektronik motorů v Tesle Blatné.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] vutbr.cz [online]. 2014 [Cit. 28.4.2018]. Identifikace parametrů motorů pro laboratorní stand. Dostupné z :
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86227
- [2] vutbr.cz [online]. 2014 [Cit. 28.4.2018]. Řízení stejnosměrného motoru. Dostupné z :
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=82672
- [3] wachendorff-automation.com [online]. 2013 [Cit. 28.4.2018]. Encoder WDG 58B. Dostupné z :
http://www.wachendorff-automation.com/fileadmin/pim/WA/pdfs/en/Datenblaetter_Archiv/WDG_58B.pdf
- [4] hades.mech.northwestern.edu. [online]. 2016 [Cit. 28.4.2018]. Dostupné z :
<http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/File:Increment.jpg>
- [5] zemiceurope.com.[online]. [Cit. 29.4.2018]. Type L6N Load Cell
https://www.zemiceurope.com/media/Documentation/L6N_Datasheet.pdf
- [6] zemiceurope.com.[online]. [Cit. 29.4.2018]. Type H3 Load Cell
https://www.zemiceurope.com/media/Documentation/H3_Datasheet.pdf
- [7] cecas.clemson.edu. [online]. [Cit. 29.4.2018]. Dostupné z :
https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/sensors/images/Makkar_Ramakrishna_torsionsectional.jpg
- [8] encrypted-tbn0.gstatic.com. [online]. [Cit. 29.4.2018]. Dostupné z :
<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQdneF11rR4V13etU1f76pb5fU7QzrUh6SoPkL0jPoq1EYIAJE5iw>
- [9] support.dce.felk.cvut.cz. [online]. 2014 [Cit. 30.4.2018]. Tenzometrické měření náprav závodního vozu. Dostupné z :
https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/2/2a/Bp_2014_kriz_jan.pdf
- [10] measurement.gov.au. [online]. 2000 [Cit. 30.4.2018]. OIMLR60.pdf. Dostupné z : <http://www.measurement.gov.au/Documents/OIMLR60.pdf>
- [11] npl.co.uk. [online]. 2013 [Cit. 30.4.2018]. Guide to the Measurement of Force. Dostupné z : <http://www.npl.co.uk/upload/pdf/forceguide.pdf>
- [12] static3.tme.eu. [online]. [Cit. 30.4.2018]. Dostupné z :
https://static3.tme.eu/products_pics/b/e/2/be292365bc686bdab19b9874746555ae/361275.jpg
- [13] remaxcz.com. [online]. [Cit. 1.5.2018]. Čidla teploty Pt100, Pt 500, Pt 1000. Dostupné z : <http://remaxcz.com/old/katalog/snimace/teplota/kl/char/Pt100.pdf>
- [14] guenther.eu. [online]. [Cit. 1.5.2018]. Technical information. Dostupné z :
<https://www.guenther.eu/en/technical-information/resistance-thermometers/5-basic-values-for-standardised-resistances-according-to-din-en-60751?Edition=en>
- [15] tesla-blatna.cz. [online]. [Cit. 1.5.2018]. Teplotní senzor Pt 1K. Dostupné z :
http://www.tesla-blatna.cz/_soubory/katalogovy_list_pt1k.pdf
- [16] tesla-blatna.cz. [online]. [Cit. 1.5.2018]. Drátové výkonové rezistory vAl pouzdru :
http://www.tesla-blatna.cz/_soubory/rezistory-brzdne-alspouzdro-resistors-braking-alcase.pdf

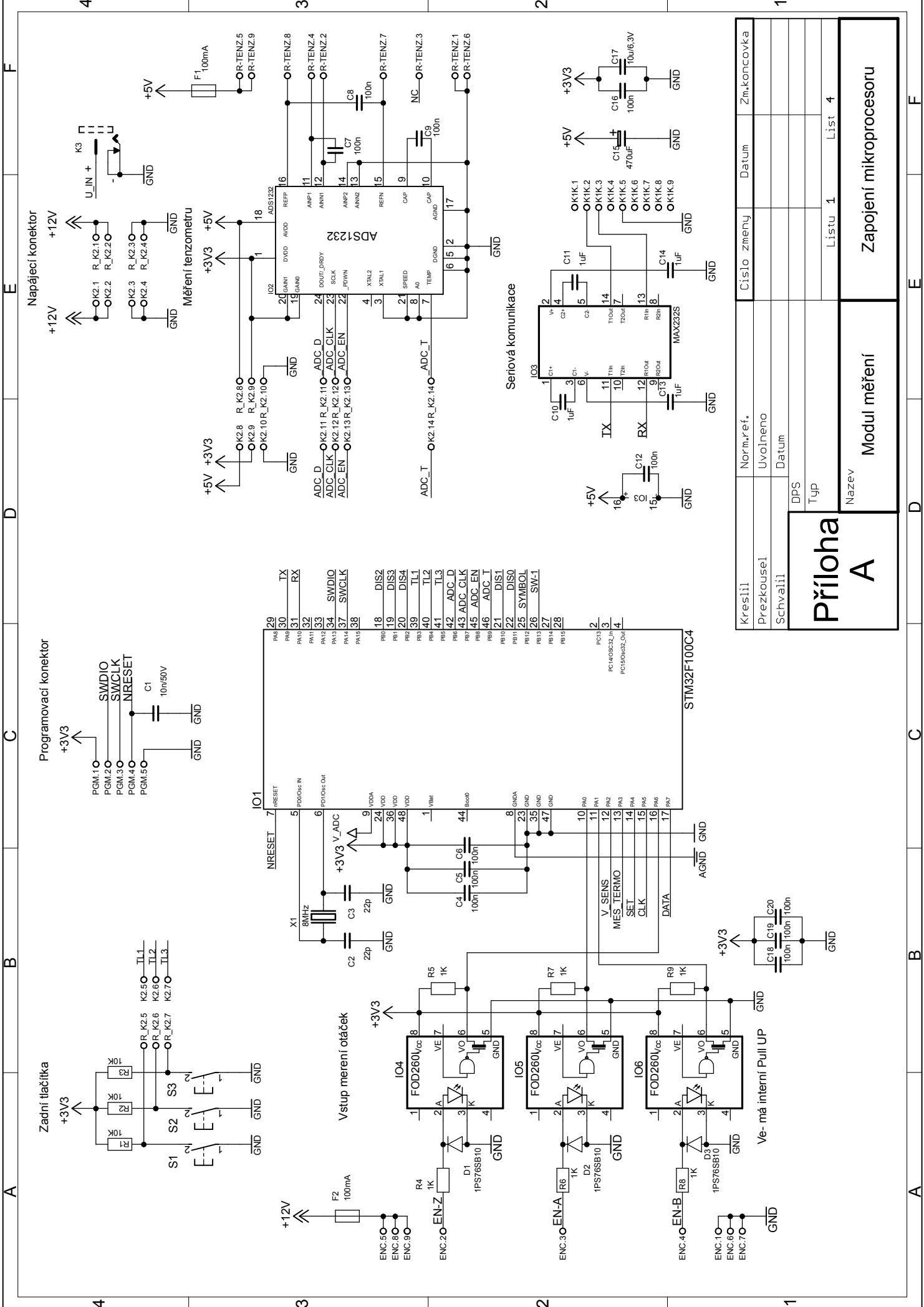
- [17] wiltronics.com. [online]. [Cit. 5.5.2018]. Load Cell Sensor 5kg. Dostupné z : <https://www.wiltronics.com.au/wp-content/uploads/datasheets/ARD2-2155%20Data%20Sheet.pdf>
- [18] sparkfun.com. [online]. [Cit. 5.5.2018]. HX711. Dostupné z : https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
- [19] st.com. [online]. 2016 [Cit.12.5.2018]. STM32F100x4 STM32F100x6 STM32F100x8 STM32F100xB. Dostupné z : <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/dd/87/fd/2a/fb/3f/48/5c/CD00251732.pdf/files/CD00251732.pdf/jcr:content/translations/en.CD00251732.pdf>
- [20] ti.com. [online]. 2014 [Cit. 12.5.2018]. MAX232. Dostupné z : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf>
- [21] ti.com. [online]. 2008 [Cit. 13.5.2018]. ADS1232. Dostupné z : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1232.pdf>
- [22] st.com. [online]. 2016 [Cit.13.5.2018]. STM32F205xx STM32F207xx. Dostupné z : <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/bc/21/42/43/b0/f3/4d/d3/CD00237391.pdf/files/CD00237391.pdf/jcr:content/translations/en.CD00237391.pdf>
- [23] allegromicro.com. [online]. 2017 [Cit.14.5.2018]. ACS758xCB. Dostupné z : <https://www.allegromicro.com/~media/.../ACS758-Datasheet.ashx>
- [24] infineon.com. [online]. 2015 [Cit.14.5.2018]. IRS44273L. Dostupné z : <https://www.infineon.com/dgdl/irs44273l.pdf?fileId=5546d462533600a40153567bb949285e>

Seznam příloh

Příloha A – Schéma zapojení modulu měřidla

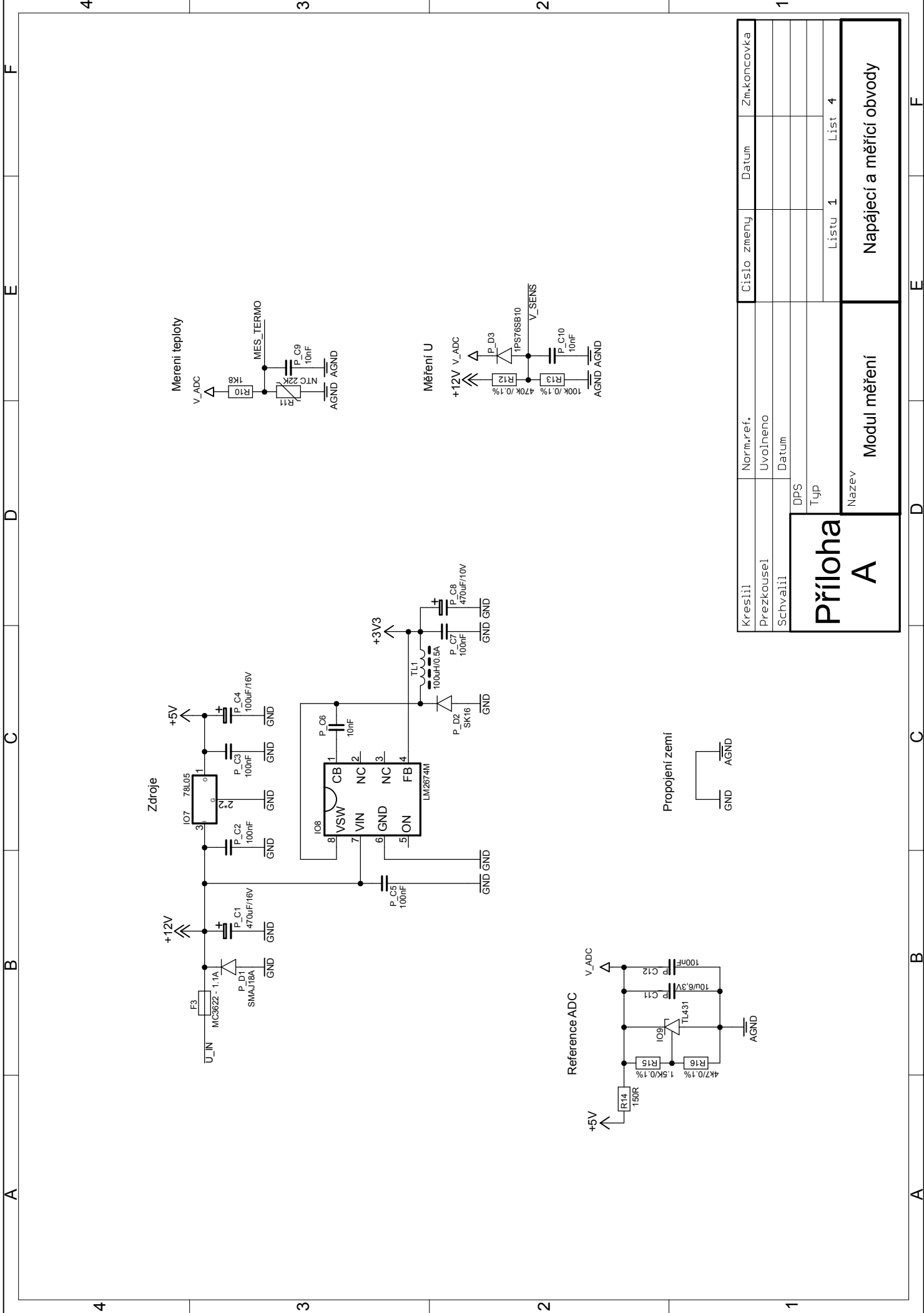
Příloha B – Schéma zapojení modulu řízení dynama

Příloha C – Schéma zapojení modulu sběru dat



Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkoušel	Uvolineno			
Schválil	Datum			
<h1 style="text-align: center;">Příloha A</h1>		Listu 1 List 4		
		<h2 style="font-size: 2em;">Zapojení mikroprocesoru</h2>		

DPS
Typ
Název

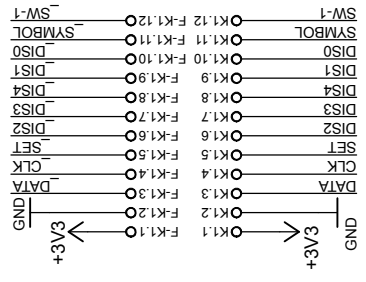
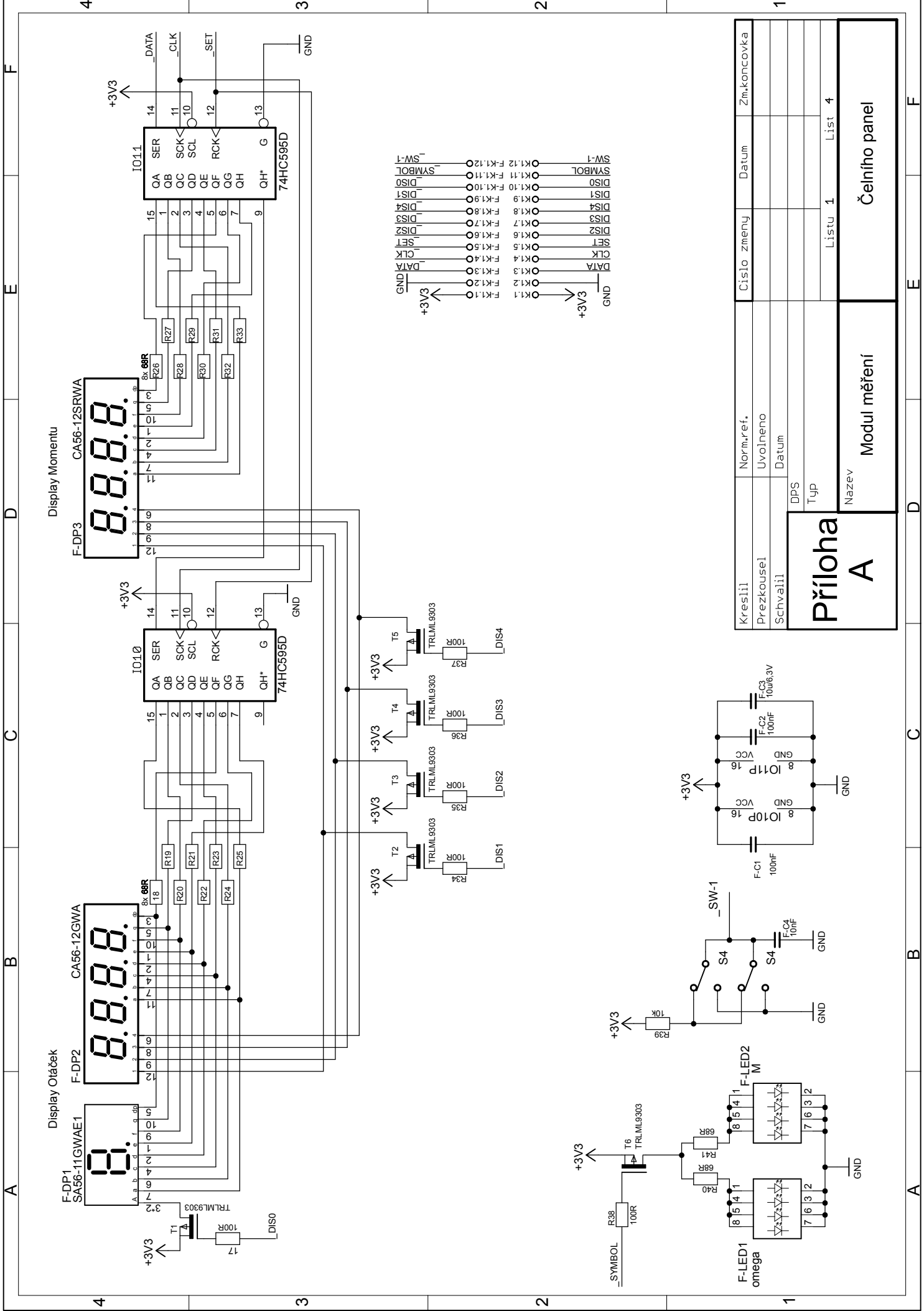


Příloha A

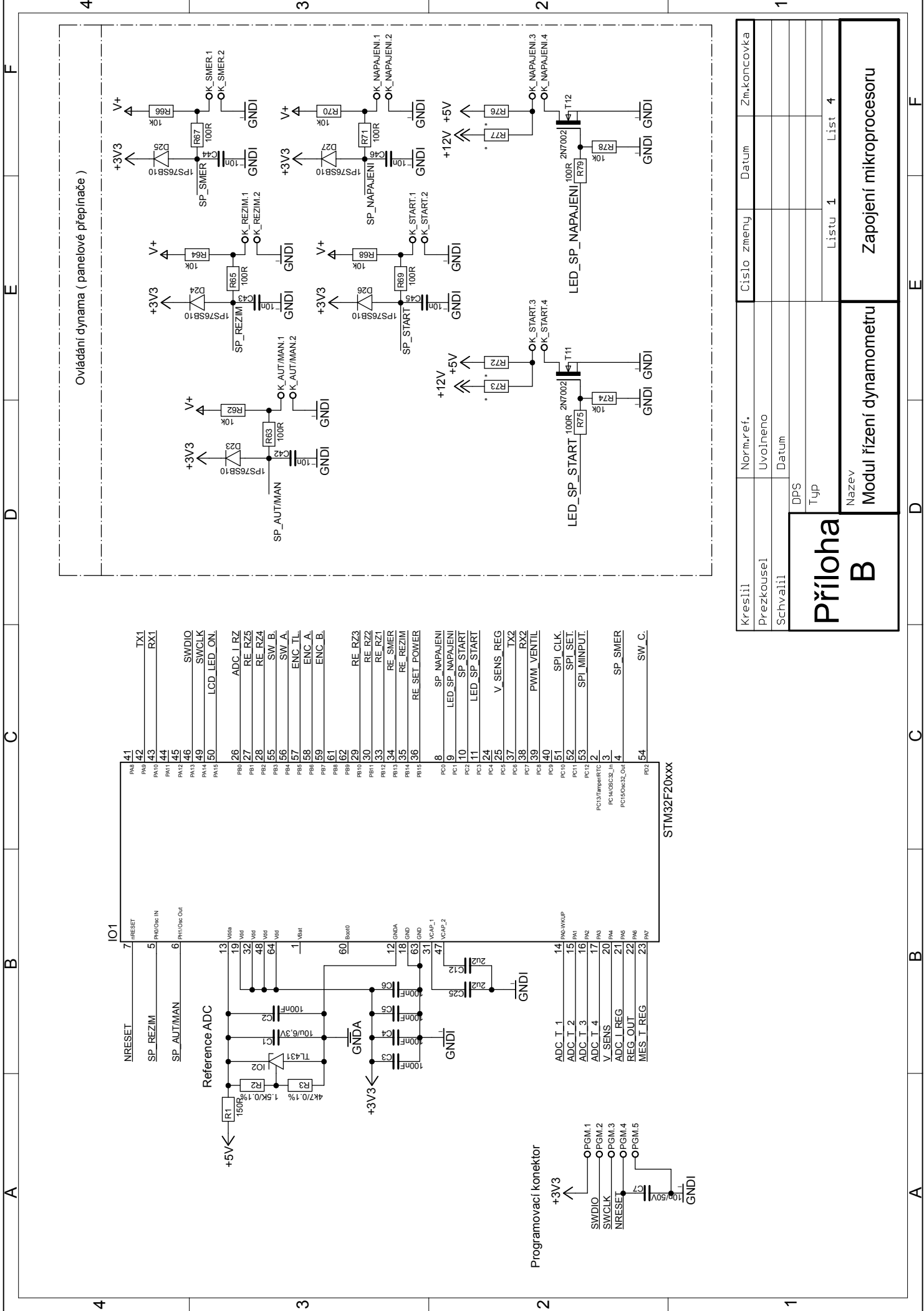
Modul měření

Napájecí a měřicí obvody

Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkousel	Uvořeno			
Schválil	Datum			
DPS		Listu 1	List 4	
Typ				
Název				



Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkousel	Uvolineno			
Schválil	Datum			
<h1 style="text-align: center;">Příloha A</h1>		DPS	Typ	Listu 1 List 4
		<h2 style="text-align: center;">Modul měření</h2>		
<h1 style="text-align: center;">Čelní panel</h1>				



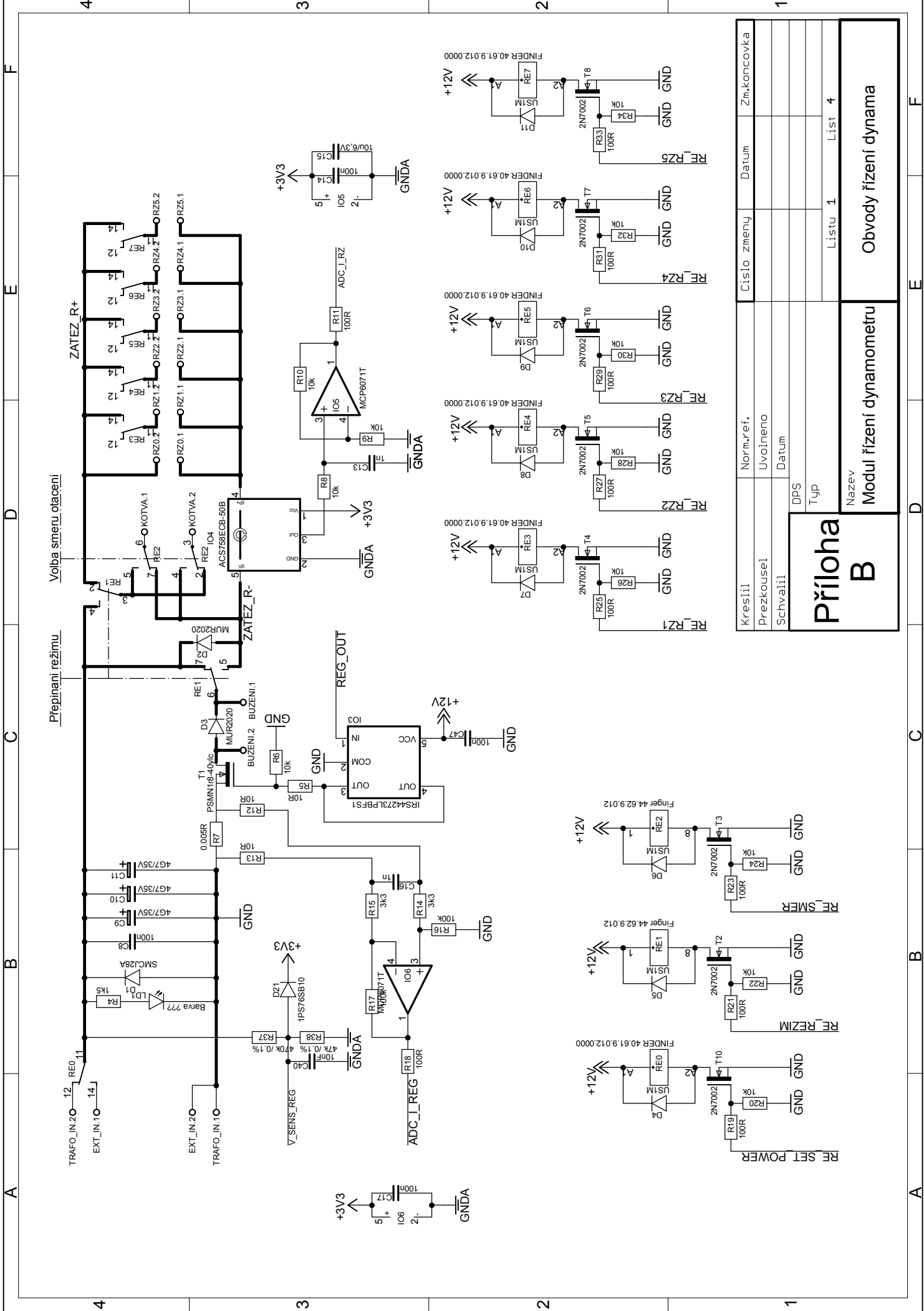
Ovládání dynama (panelové přepínače)

Příloha B

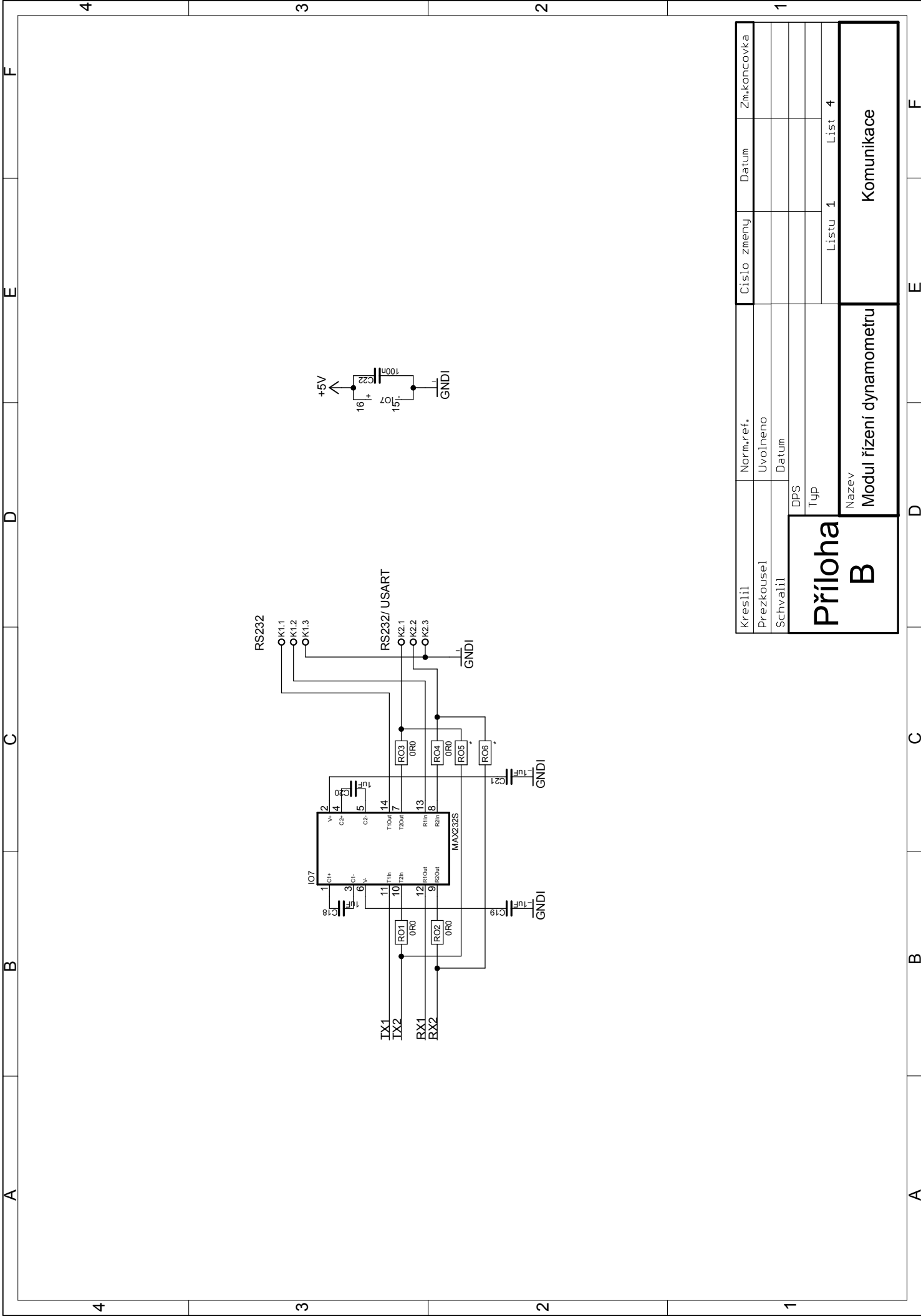
Modul řízení dynamometru

Zapojení mikroprocesoru

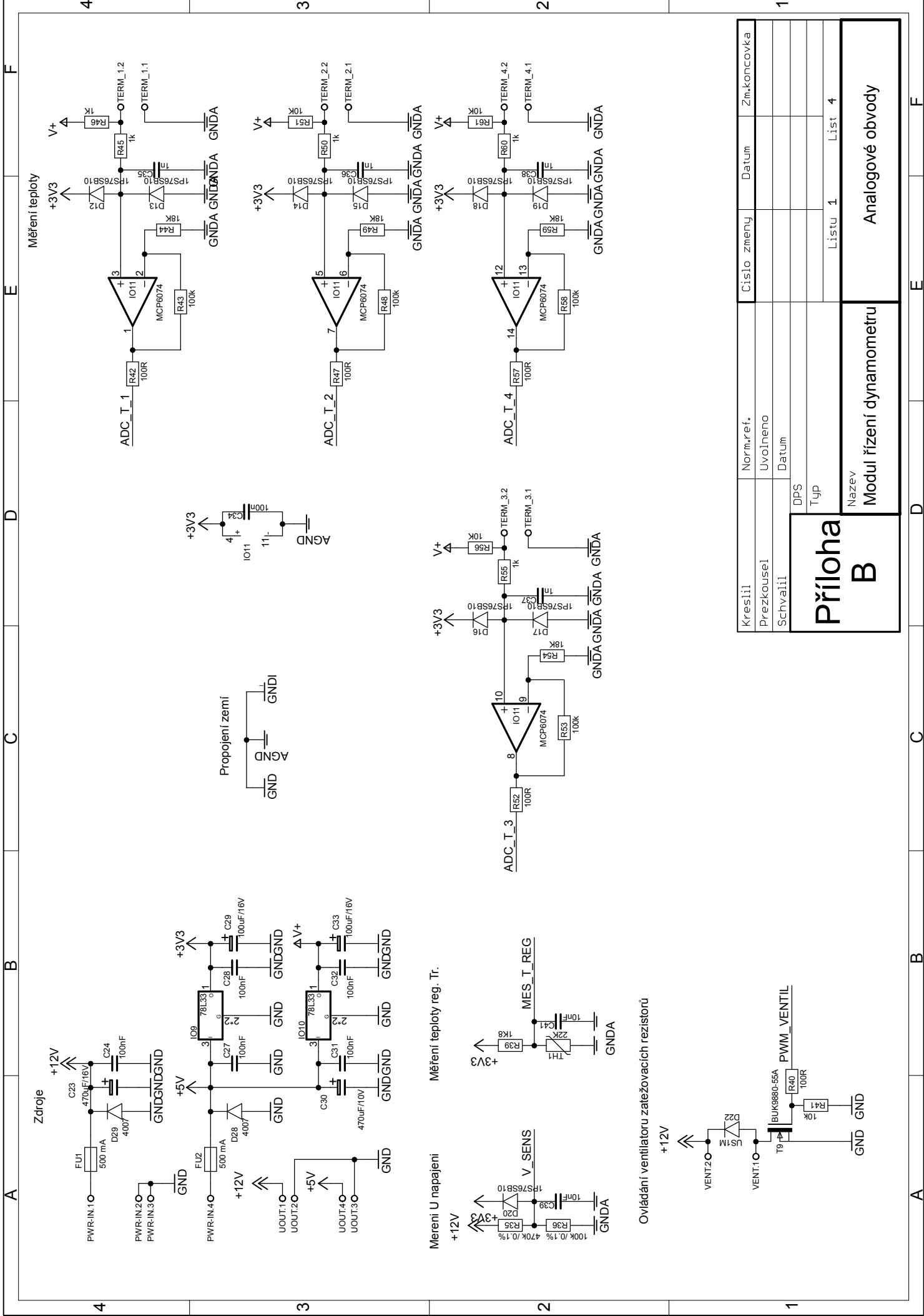
Kreslí	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkoušel	Uvolneno			
Schválil	Datum			
DPS		Listu 1 List 4		
Typ				
Název				
Zapojení mikroprocesoru				



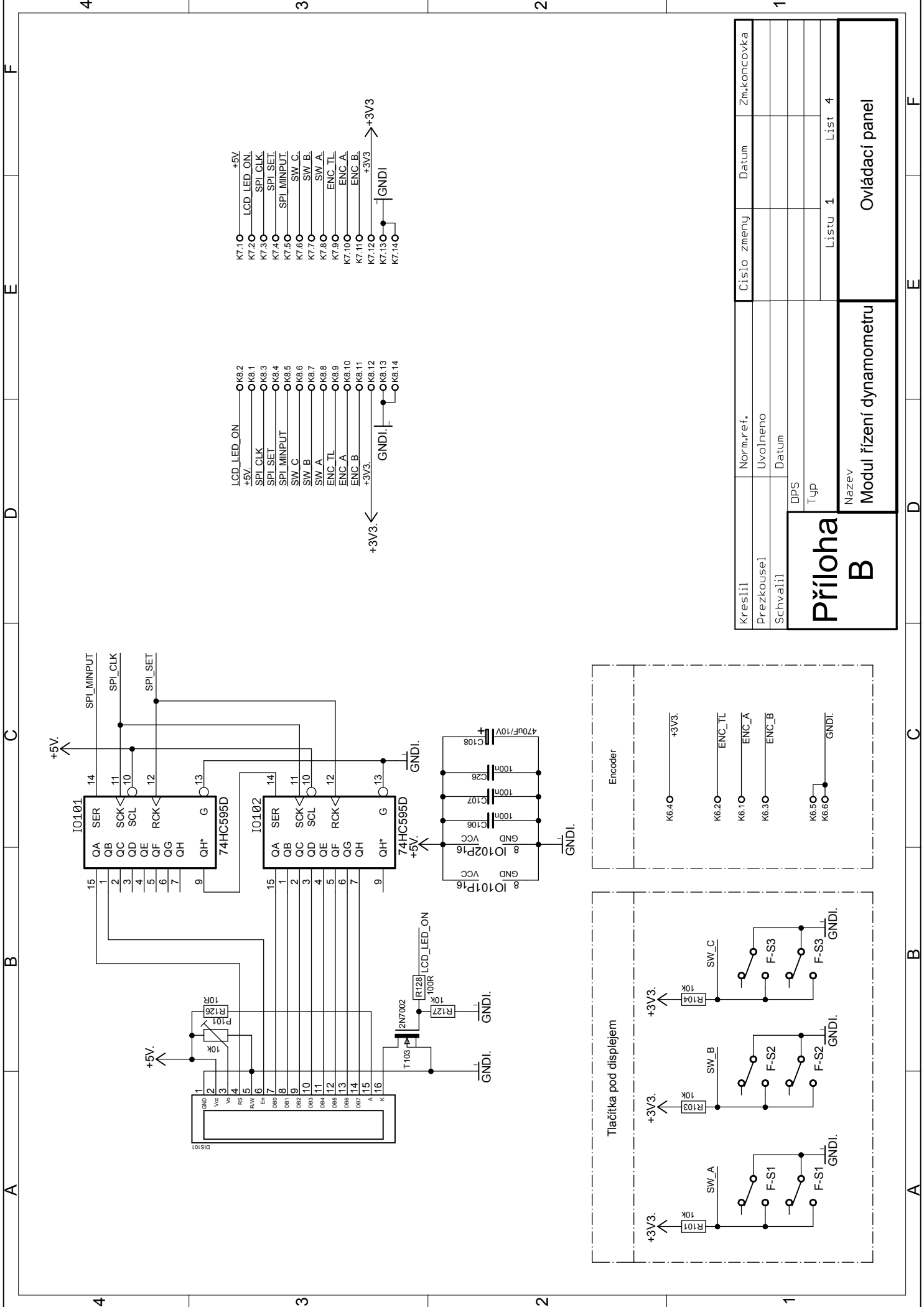
Kreslil	Norm.ref.	Datum	Zmkoncovka
Prezkoušel	Uvořeno	Datum	
Schválil	DPS	Datum	
<h1 style="text-align: center;">Příloha B</h1>		Typ	Listu 1 List 4
		Název	Obvody řízení dynamy



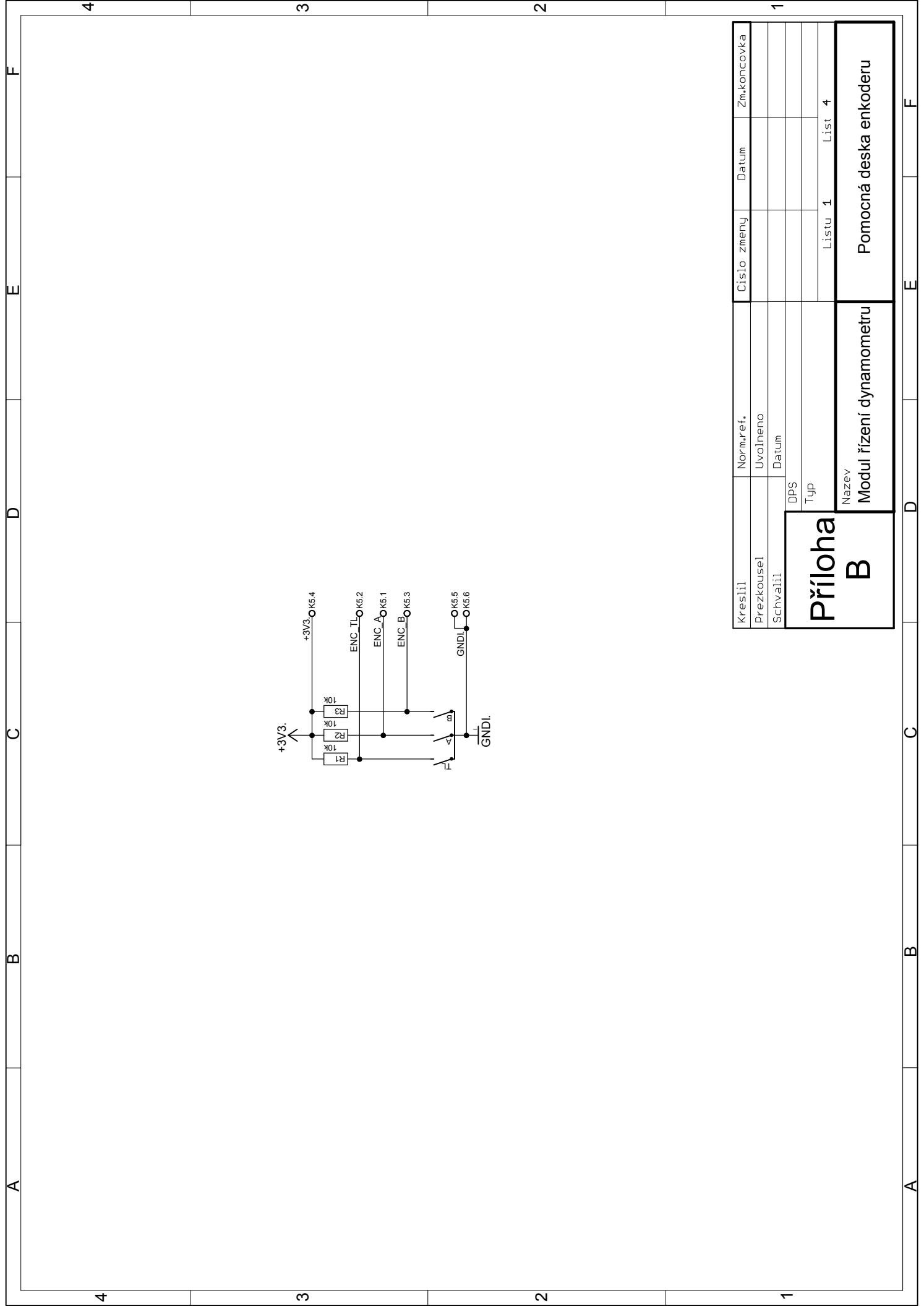
Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkoušel	Uvořeno			
Schválil	Datum			
Příloha B Název Modul řízení dynamometru		DPS	Listu 1	List 4
		Typ		
		Komunikace		



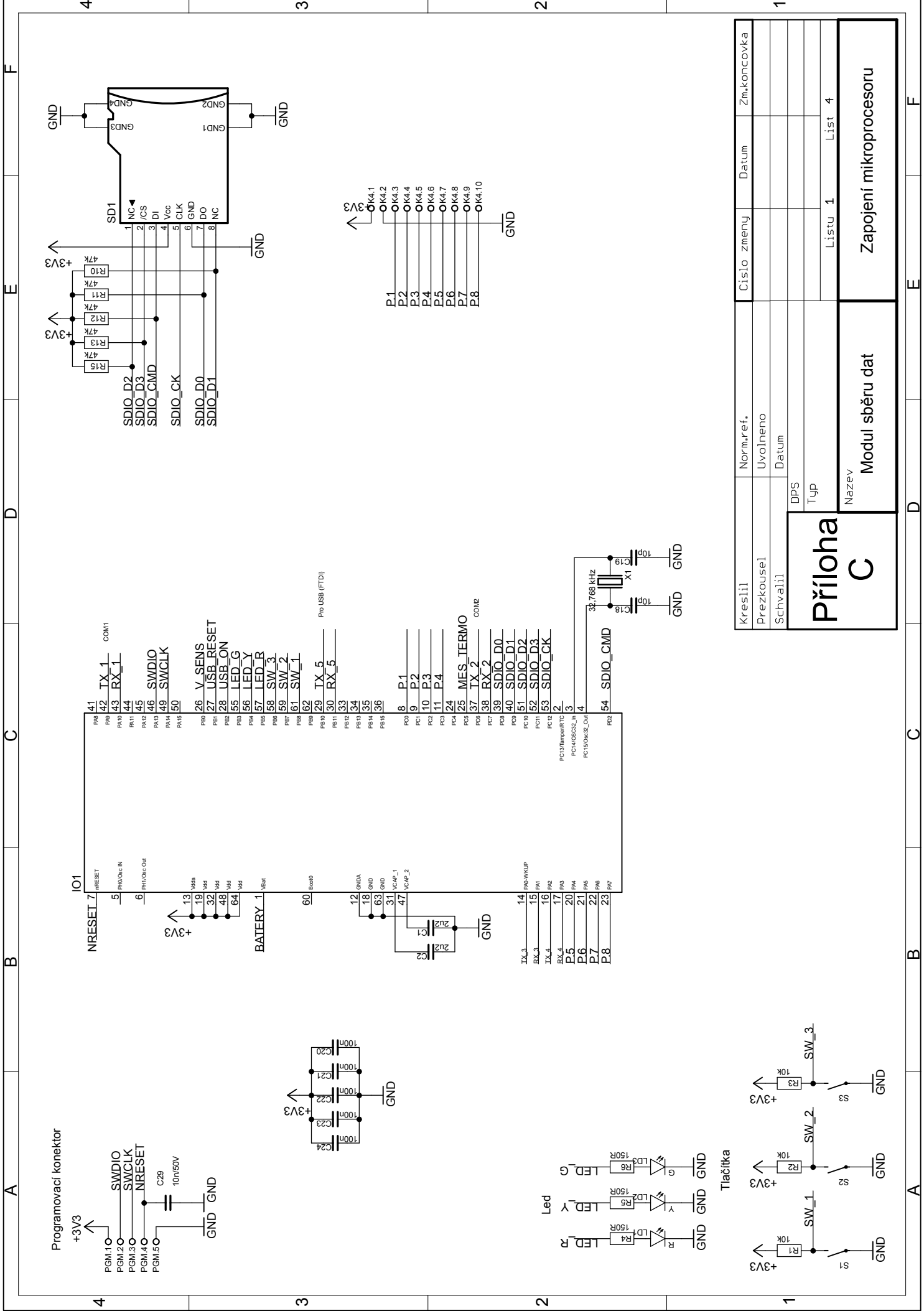
Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkoušel	Uvořeno			
Schválil	Datum			
<h1 style="margin: 0;">Příloha B</h1>		Listu 1 List 4		
		Listu 1 List 4		
<h2 style="margin: 0;">Modul řízení dynamometru</h2>		<h2 style="margin: 0;">Analogové obvody</h2>		



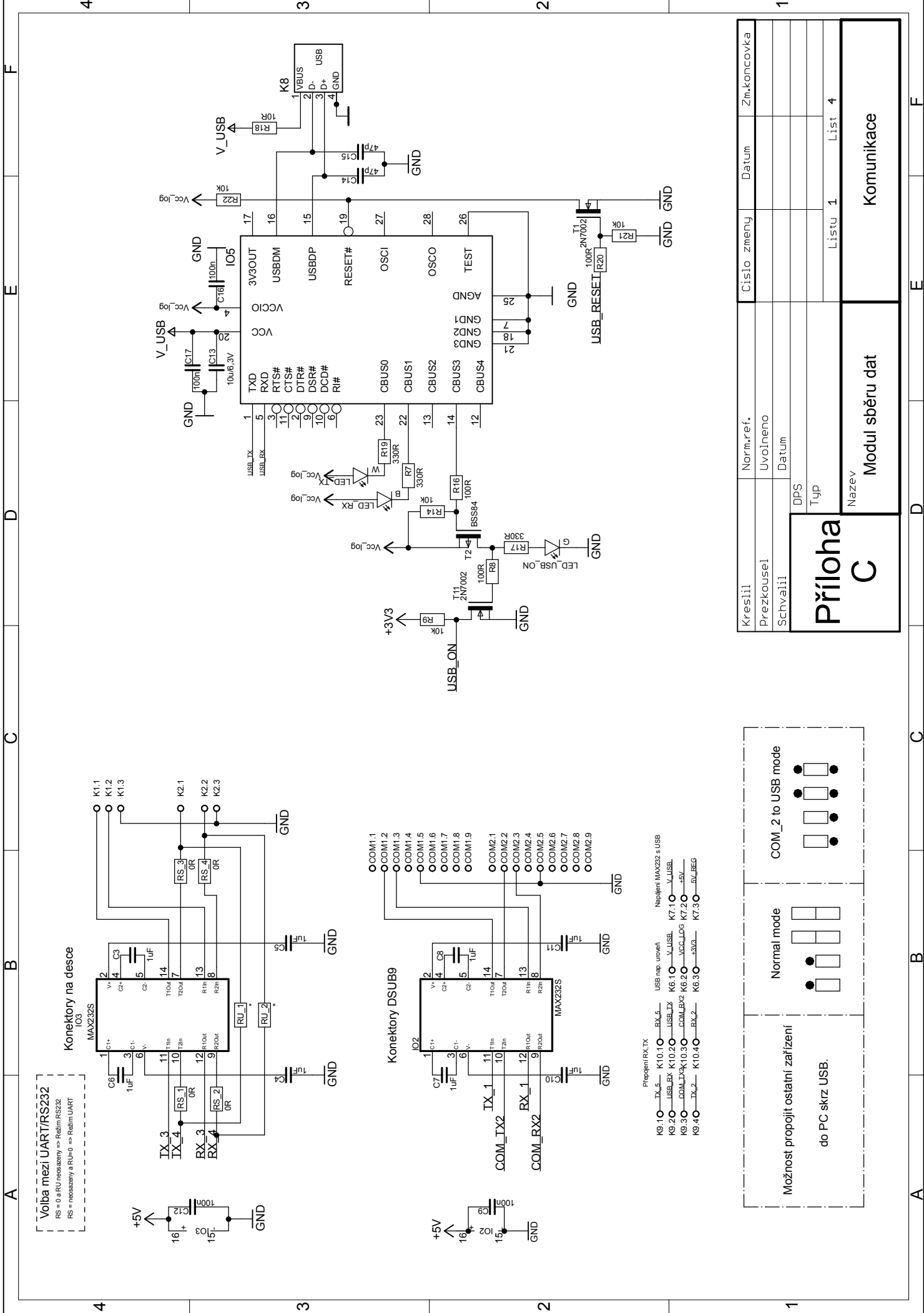
Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkoušel	Uvolneno			
Schválil	Datum			
<h1 style="text-align: center;">Příloha B</h1>		DPS		
		Typ	Listu 1	List 4
<h2 style="text-align: center;">Modul řízení dynamometru</h2>		Ovládací panel		



Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkoušel	Uvoĭneno			
Schválil	Datum			
Příloha B DPS Typ		Listu 1 List 4		
		Název Modul řízení dynamometru Pomocná deska enkoderu		



Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkoušel	Uvojneno			
Schválil	Datum			
<h1 style="text-align: center;">Příloha C</h1>		Listu 1 List 4		
		Modul sběru dat		
<h1 style="text-align: center;">Zapojení mikroprocesoru</h1>				

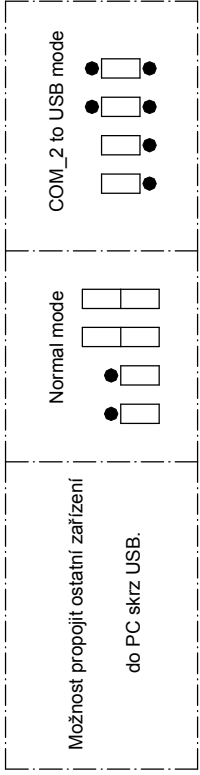


Volba mezi UART/RS232
 RS = 0 a RU nezastavěny => Režim RS232
 RS = nastaveny a RU=0 => Režim UART

Konektory na desce IO3

Konektory DSUB9

Přepnutí RX, TX
 K6.1 O TX_5 K10.1 O BX_5 USB nap. uvořen
 K6.2 O USB_RX K10.2 O USB_TX K6.7 O V_USB K7.1 O V_USB
 K6.3 O COM_TX2 K10.3 O COM_RX2 K6.2 O VCC_LOG K7.2 O +5V
 K6.4 O TX_2 K10.4 O BX_2 K6.3 O +5V2 K7.3 O +5V_REG



Kreslil	Norm.ref.	Císlo zmeny	Datum	Zm.koncovka
Prezkoušel	Uvořeno			
Schválil	Datum			
Příloha C		DPS		
		Typ		Listu 1 List 4
Modul sberu dat		Komunikace		

