



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

VÝROBNÍ TESTER

PRODUCTION TESTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Paul

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Filip Paul

ID: 211538

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Výrobní tester

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte zařízení sloužící k testování správnosti zapojení testerů desek plošných spojů typu ICT. Zařízení musí na základě konfigurovatelných vstupních dat ověřit správné propojení velkého množství testovacích bodů (řádově tisíce). Správnost propojení je určena maximálním odporem elektricky vodivé cesty, která propojuje testovací body mezi sebou. Navrhněte snadno škálovatelné řešení testeru z hlediska počtu měřicích bodů. Pro zvolenou koncepci navrhněte konkrétní obvodové řešení, desky plošných spojů a mechanické provedení přístroje, který se k testovanému zařízení připojí pomocí testovacích jehel. Vytvořte firmware pro řízení desky, který zároveň umožní komunikaci s PC pomocí LAN a USB.

Realizujte desky plošných spojů a mechanickou konstrukci testeru. Dále vytvořte řídicí program pro PC pro operační systém Windows, který umožní výsledek testu prezentovat obsluze srozumitelnou grafickou formou a zároveň ukládat do lokální databáze. Provedte ověření funkčnosti zařízení a zhodnoťte dosažené parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HOROWITZ, P., HILL, W. The Art of Electronics. New York: Cambridge University Press, 2015.

[2] MARTIN, T. The Insider's Guide to the STM32 ARM Based Microcontroller. Coventry: Hitex Ltd., UK, 2008.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

doc. Ing. Lucie Hudcová, 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

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací zařízení, které slouží k ověření správnosti vnitřního elektrického zapojení ICT testerů. Správnost zapojení je ověřována měřením odporu mezi jednotlivými testovacími body. ICT testery mohou obsahovat řádově tisíce propojení. Navrhované zařízení by mělo být schopno identifikovat chyby propojení a následně navrhnout vhodné řešení.

KLÍČOVÁ SLOVA

In-Circuit Testing (ICT), Fixture, Testovací body, Testovací jehly, End Of Line (EOL).

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design and implementation of a device, which is used to verify the internal electrical wiring of ICT testers. Wiring is verified by measuring the resistance between individual test points. ICT testers can contain thousands of connections. The device should be able to identify wiring errors, inform the operator about the error and propose a relevant solution.

KEYWORDS

In-Circuit Testing (ICT), Fixture, Testpoint, Test probes, End Of Line (EOL).

PAUL, Filip. *Výrobní tester*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2023, 97 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Filip Paul
VUT ID autora:	211 538
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	Výrobní tester

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
.....
podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Prof. Dr. Ing. Zdeňku Kolkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Koncept funkčnosti testeru	13
1.1 Princip funkčnosti ICT testeru	13
1.2 Koncepce navrhovaného testeru	14
1.2.1 Systémová koncepce	14
1.2.2 Hardwarová koncepce	16
Propojení bRC pinů mezi sebou	16
Propojení mezi bRC a Probes	16
2 Návrh měřících karet	17
2.1 Základní požadavky na měřící karty	17
2.2 Funkční bloky	17
2.2.1 Měřící část	18
Teoretický návrh	18
Výběr součástek a volba jejich hodnoty	21
Volba velikosti odporu děliče Rout	21
Volba P-channel mosfetu	26
Volba N-channel mosfetu	27
Volba komparátoru	27
Volba shift registrů	27
Volba multiplexerů	28
2.2.2 Napájecí část	28
2.2.3 Návrh PCB	30
3 Návrh ovládacích karet	31
3.1 Základní požadavky na Ovládací karty	31
3.2 Funkční bloky	31
3.2.1 Mikrokontrolér a jeho periférie	32
D/A převodník	32
Programování a debugging	33
Konfigurace hodinového signálu	33
3.2.2 Konektivita	34
Ethernet	34
USB	35
3.2.3 Napájení	36
3.2.4 PCB design	38
4 Algoritmizace a měřící procedury	39
4.1 Komunikační protokol ovládacích karet	39
4.1.1 Příkazy SET	40
SET DAC	40
SET SHIFT_REGISTER	40

SET CONFIGURATION	41
4.1.2 Příkazy READ	41
READ MUX	41
READ SHIFT_REGISTER	42
READ CONFIGURATION	42
4.1.3 Příkazy MEASURE	43
MEASURE VOLTAGE	43
MEASURE ADC	47
4.2 Režimy měření	48
4.2.1 Múd PASS/FAIL	48
4.2.2 Múd měření přesné hodnoty odporu	49
5 PC aplikace	50
5.1 Principy funkce PC aplikace	50
5.2 PC aplikace - Raw low layer	51
5.3 PC aplikace - Translation Layer	51
5.4 PC aplikace - Device Hub Layer	51
5.5 PC aplikace - Test Result Layer	51
5.5.1 konfigurační soubor tests.yaml	52
5.5.2 konfigurační soubor hardwareConfig.yaml	53
5.6 PC aplikace - MySql databáze	54
5.7 PC aplikace - Uživatelské rozhraní	54
5.7.1 Widget - Visa terminal	54
5.7.2 Widget - Ovládání karty	55
5.7.3 Widget - Ovládání Relé	55
5.7.4 Widget - Device status	56
5.7.5 Widget - ICT propojení	56
6 Technické parametry testeru	58
6.1 Dlouhodobá stabilita	58
6.2 Kalibrace	62
Závěr	65
Literatura	67
Seznam symbolů a zkratk	70
Seznam příloh	71
A Měřicí karta	72
A.1 Měřicí karta - schéma	72
A.2 Měřicí karta - PCB	78
B Ovládací karta	83
B.1 Ovládací karta - schéma	83

B.2 Ovládací karta - PCB	92
------------------------------------	----

Seznam obrázků

1.1	Části ICT testeru (obrázek testeru vlevo nahoře převzat z [4])	13
1.2	Koncepce funkčnosti navrhovaného testeru	14
1.3	Systémová koncepce	14
1.4	Měřicí karta	15
1.5	Ovládací karta - 3D model	15
2.1	Blokový diagram měřících karet	17
2.2	Napěťový dělič: a) vlevo pro 2; b) vpravo pro 4 propojené bRC piny	18
2.3	Napěťový dělič pro s možností high Z vstupem	19
2.4	Zapojení měřící části s p-channel MOSFET	20
2.5	3D zobrazení rovnice pro výstupní napětí děliče (generováno pomocí MATLAB)	23
2.6	3D zobrazení rovnice 2.8 s podmínkami (generováno pomocí MATLAB)	23
2.7	PASS FAIL - přesnost R_{path} 2Ω (generováno pomocí MATLAB)	24
2.8	Přesné měření mezi 2 piny - (generováno pomocí MATLAB)	25
2.9	vliv RDSON na přesnost měření (generováno pomocí MATLAB)	26
2.10	Výstřižek z datasheetu mosfetu SSM3J358R,LF - RDSON[9]	26
2.11	Výstřižek z datasheetu N-channel mosfetu PJA3432_R1_00001 - RDSON[10]	27
2.12	Napájení měřící karty: 5V regulátor (celé schéma měřící karty v příloze - POWER REGULATORS)	29
2.13	Výsledný návrh PCB měřící karty - všechny vrstvy bez zobrazených polygonů	30
3.1	Funkční diagram ovládací karty	31
3.2	DAC-externí zesilovač	32
3.3	Konfigurace hodinových signálů - STM32CubeMX	34
3.4	USB rozhraní	35
3.5	Regulátor napětí - 3V3 MCUs	36
3.6	Distribuce napájení	37
3.7	Návrh PCB ovládací karty - všechny vrstvy bez polygonů	38
4.1	Zjednodušené schéma zapojení pro měření napětí na bRC pinu	43
4.2	Časové průběhy napětí - měření napětí na bRC pinu (DAC_RAMP = 1)	44
4.3	Časové průběhy napětí - měření napětí na bRC pinu (DAC_RAMP = 5)	45
4.4	Časové průběhy napětí - měření nízkého napětí na bRC pinu (DAC_RAMP = 5)	45
4.5	Časové průběhy napětí - měření nízkého napětí na bRC pinu optimalizace	46
4.6	Časové průběhy napětí - měření napětí na všech pinech současně	47
5.1	PC aplikace - top level diagram	50
5.2	PC aplikace - tests.yaml ukázka	52
5.3	PC aplikace - tests.yaml ukázka výsledku testů - graf	52
5.4	PC aplikace - tests.yaml ukázka výsledku testů - default	53
5.5	PC aplikace - hardwareConfig.yaml	53
5.6	PC aplikace - widget: VISA terminal	54
5.7	PC aplikace - widget: Ovládání karty	55
5.8	PC aplikace - widget: Relé	55
5.9	PC aplikace - widget: Device status	56
5.10	Widget: ICT propojení	56

6.1	Dlouhodobá stabilita - schéma zapojení	58
6.2	Dlouhodobá stabilita - Konfigurace měřicí karty	58
6.3	Dlouhodobá stabilita - Časový průběh všech naměřených napětí	59
6.4	Dlouhodobá stabilita - Přiblížení časových průběhů napětí na pinech 7 až 8 . .	59
6.5	Dlouhodobá stabilita - Přiblížení časových průběhů napětí na pinech 1 až 6 . .	60
6.6	Dlouhodobá stabilita - Přiblížení časových průběhů odporů na pinech 1 až 6 . .	61
6.7	Kalibrace D/A převodníku	62
6.8	Dlouhodobá stabilita - Po kalibraci	63
6.9	3D model mechanické části testeru	66

Úvod

Cílem diplomové práce je navrhnout zařízení, které bude schopno ověřit správnost interního zapojení In Circuit Testing (ICT) testerů. ICT tester slouží k odhalování výrobních chyb a programování Desek Plošných Spojů (DSP - dále označováno jako PCB z anglického Printed Circuit Board) pomocí připojení velkého množství testovacích jehel. Testovací jehly jsou připojovány do určených míst na PCB, kde se následně provádí různé testy.

Diplomová práce je vypracována ve spolupráci s firmou Čevor inovations a.s., která se zabývá výrobou ICT testerů. Při výrobě těchto testerů vzniká potřeba kontroly správnosti zapojení fixture části. Fixture část (Obr. 1.1) je odlišná pro každé PCB a obsahuje řádově tisíce propojení. Zařízení navrhované v této práci tak není ICT testerem samotným, ale slouží právě k ověření správnosti interního zapojení fixture části ICT testeru. Jedná se tedy o tester ICT testerů.

Ověření správnosti propojení se určuje odporem elektrické cesty. Zařízení tedy musí být schopno měřit odpor mezi kterýmikoliv dvěma testovanými body. Zároveň jsou zde kladeny požadavky na škálovatelnost celého řešení z pohledu počtu testovaných propojení. V diplomové práci se počítá s návrhem zařízení, které má 4000 testovaných bodů. Fyzické (reálné) propojení testeru je následně porovnáno s výrobními daty ICT testeru. Výsledky testu jsou přenášeny do PC pomocí Ethernetu, kde jsou následně zpracovány. Výsledkem testu by pak měla být jasná identifikace chyb.

Diplomová práce popisuje funkčnost, hardwarové řešení testeru (návrh PCB) a softwarové řešení v podobě firmwaru pro PCB a uživatelského programu pro PC.

1 Koncept funkčnosti testeru

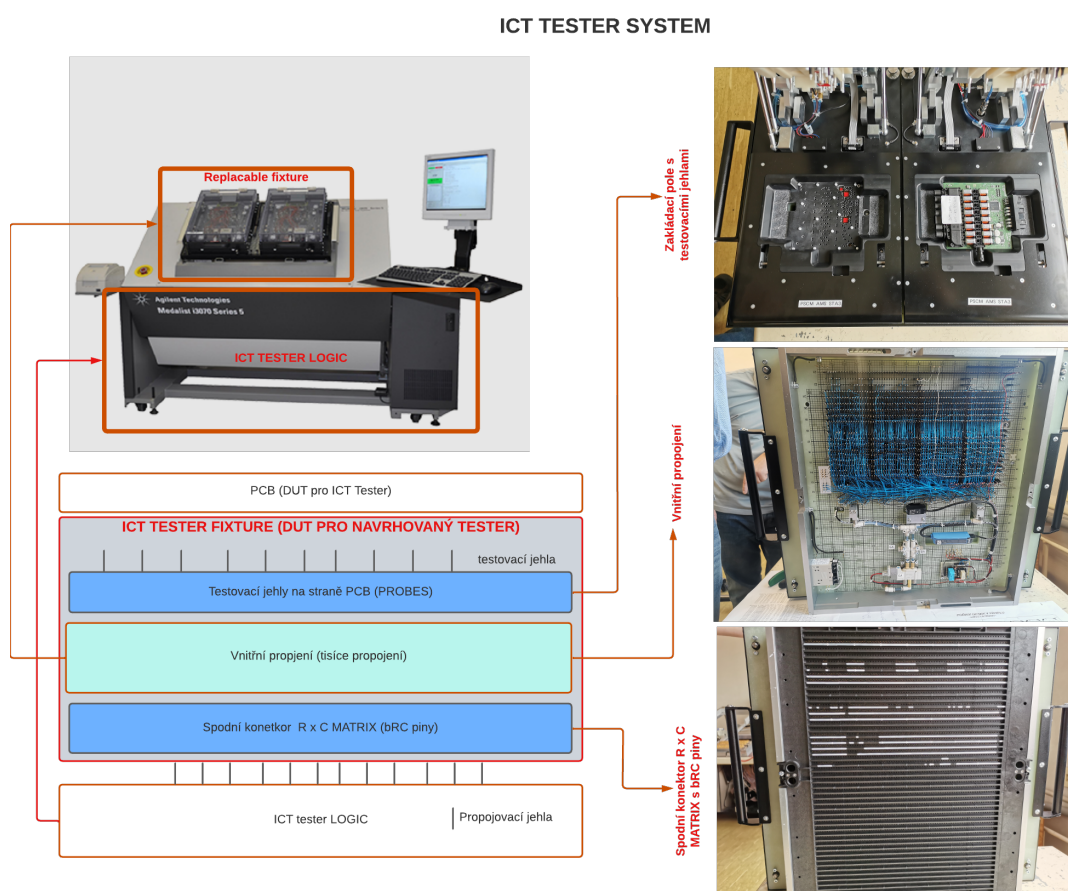
Tato kapitola definuje rozsah diplomové práce a podává úvodní náhled na funkčnost navrhovaných zařízení.

1.1 Princip funkčnosti ICT testeru

ICT tester se skládá ze dvou hlavních částí (měřící a fixture). Měřící část obsahuje různé měřicí přístroje např. osciloskop, multimetr, proudové a napěťové zdroje, boundary scan atd. Pomocí těchto zařízení ICT tester provádí různá měření.

Fixture je vyměnitelnou částí a obsahuje základací pole s testovacími jehlami (Probes). Testovací jehly zajišťují elektrické propojení mezi testovanými body na PCB a měřící částí. Ze spodní strany je fixture propojena s měřící částí pomocí matice bRC pinů. Písmena R a C v označení bRC označují Row (řádek) a Column (sloupec).

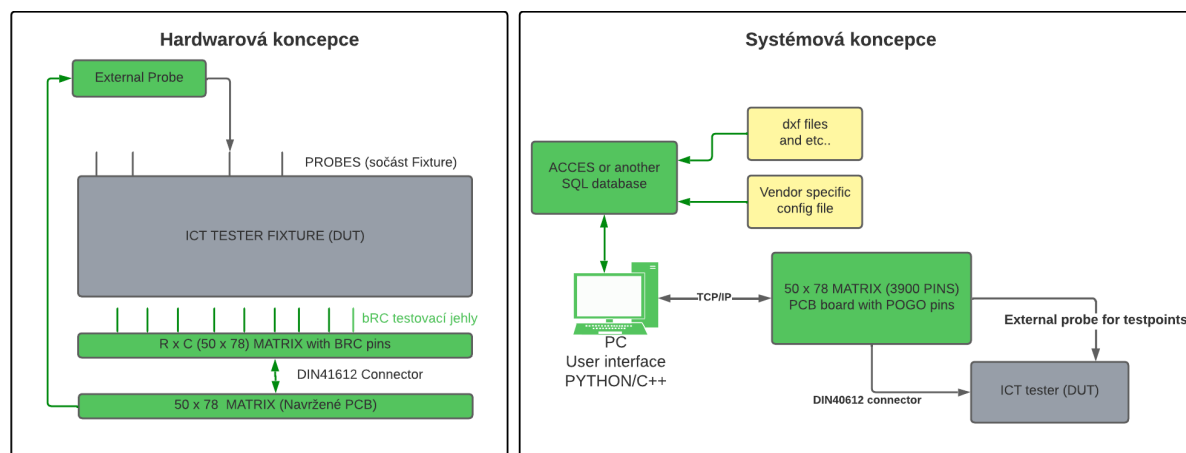
Fixture umožňuje mezi sebou libovolně propojovat bRC a Probes piny, včetně propojení pinů stejného druhu mezi sebou. Propojení mezi jednotlivými piny je většinou zajištěno pomocí ovíjení. Nicméně propojení může obsahovat i různé pasivní součástky. Obrázek 1.1 znázorňuje jednotlivé části ICT testeru[3][4].



Obr. 1.1: Části ICT testeru (obrázek testeru vlevo nahoře převzat z [4])

1.2 Koncepte navrhovaného testeru

Zatímco pro ICT tester bylo úkolem otestovat vložené PCB. Úkolem zařízení, navrhovaným v diplomové práci, je otestovat správnost propojení fixture části ICT testeru. Pro tento účel je navržena následující koncepce.

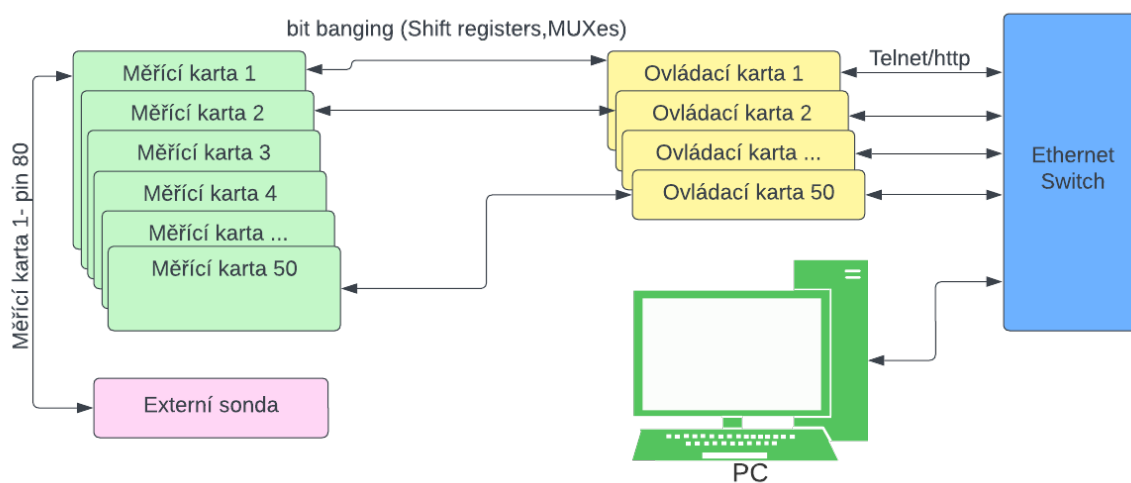


Obr. 1.2: Koncepte funkčnosti navrhovaného testeru

Na obrázku 1.2 jsou zeleně znázorněny části, která jsou součástí diplomové práce. Ostatní barvy značí části, které již existují a nebudou navrhovány.

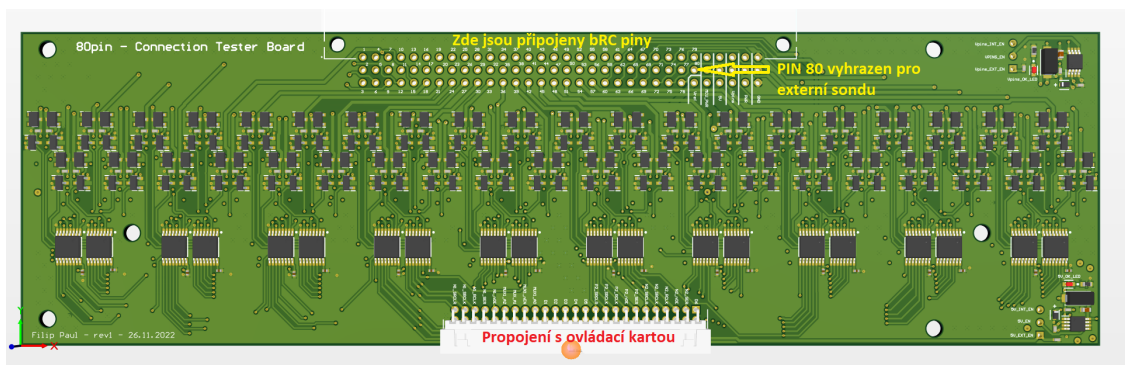
1.2.1 Systémová koncepce

Na obrázku 1.2 v pravé části je znázorněná systémová koncepce testeru. Pro otestování vnitřního propojení fixture je nutné propojit všechny bRC piny s logikou navrhovaného testeru. Většina komerčních ICT testerů omezuje počet sloupců v bRC MATRIX na 78 a liší se tak pouze počtem řad. Z tohoto důvodu je tester navržen tak, aby bylo možné libovolně měnit počet řad o 78 pinech[5].

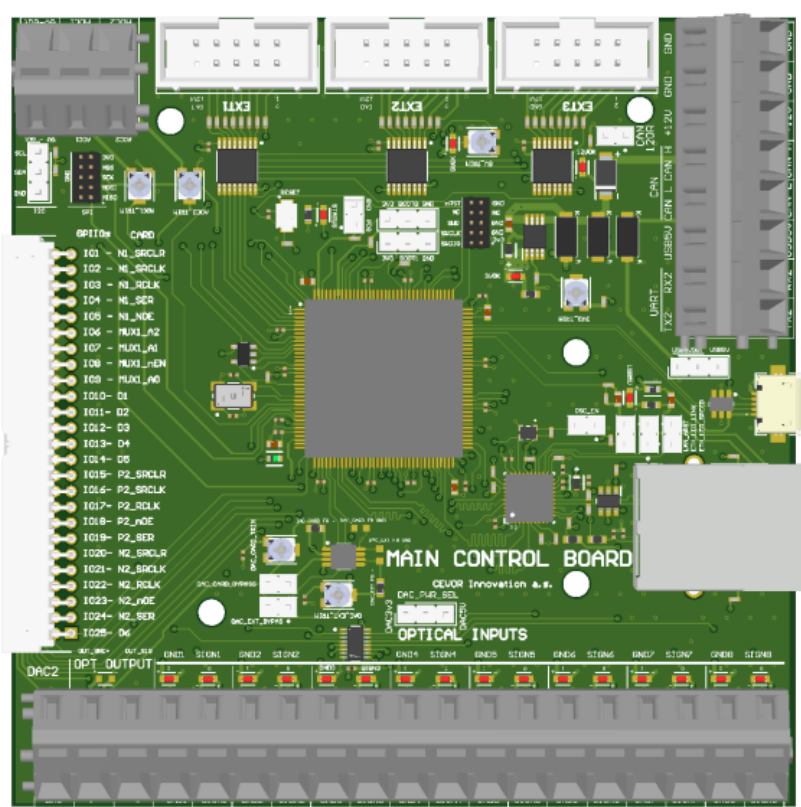


Obr. 1.3: Systémová koncepce

Navržené zařízení se skládá z měřících karet, ovládacích karet a řídicího počítače (Obr. 1.3). Úkolem měřící karty je měřit hodnoty odporu mezi jednotlivými bRC piny a odesílat data do ovládací karty. Měřící karty jsou kompatibilní s 5V a 3V3 logikou.



Obr. 1.4: Měřící karta



Obr. 1.5: Ovládací karta - 3D model

Jednotlivé ovládací karty mají možnost připojení k ethernetové síti pomocí 100BASE-T a jsou schopny ovládat měřící karty. Ovládací karty komunikují pouze s řídicí PC aplikací (nikoliv mezi sebou). Řídicí PC aplikace řídí všechny testy. Ovládací karty mají v sobě implementován Telnet a http server, přičemž se pro hlavní komunikaci používá právě Telnet server. Takto lze využít jakékoliv zařízení s přístupem do sítě pro řízení testeru.

Řídicí aplikace využívá ke své činnosti celou řadu vstupních souborů. Jedná se o soubory, které definují zapojení fixture, CAD, CAM a další data[6]. Protože vstupní soubory nemají

jednotný formát pro každého výrobce, aplikace nejprve data převede do mySQL databáze. S takto zpracovanými daty již lze provádět jednotné operace. Aplikace porovnává naměřená data z jednotlivých karet ze vstupními soubory a následně generuje výsledek testu propojení v co nejsrozumitelnější podobě.

1.2.2 Hardwarová koncepce

Propojení bRC pinů mezi sebou

Propojení mezi měřicími kartami a maticí bRC pinů je zajištěno pomocí POGO pinů (strana fixture), bRC jehel (strana testeru) a pneumatického kontaktování. Na Obr. 1.4 je znázorněn 3D model měřicí karty. V horní části jsou připraveny body pro připojení bRC jehel a napájení desky. Rozteč kontaktů je zvolena tak, aby bylo možno k měřicí kartě připájet standardizovaný DIN41612 konektor (dále pouze DIN) a kartu tak snadno použít pro jiné aplikace.

Ve spodní části se nachází 25x2 konektor, sloužící k propojení s ovládací kartou. Měřicí karta je navržena tak, aby buď poskytovala napájení ovládací kartě anebo byla ovládací kartou napájena (více v sekci o návrhu měřicí karty).

Propojení mezi bRC a Probes

Pomocí karet je možné automaticky zjistit propojení mezi všemi bRC piny, nicméně přímé propojení mezi bRC a Probe piny je nutné otestovat zvlášť. Za tímto účelem je k testeru připojena externí sonda (Obr. 1.3). Sonda je připojena do bRC pinu č. 80 na měřicí kartě č. 1.

Obsluha v závislosti na pokynech PC aplikace připojuje sondu k jednotlivým probes pinům. Takto lze pomocí jednotlivých karet zjistit propojení. Externí sonda je podobná jako sonda multimetru a slouží pouze k přivedení testovacího napětí na probe pin. Proces lze celý automatizovat v případě, že je k dispozici i maketa PCB, která bude obsahovat všechny probe piny přivedené na DIN konektor. V takovém případě lze připojit maketu PCB ke kartě a proces automatizovat.

2 Návrh měřících karet

Tato kapitola se zabývá hardwarovým řešením měřících karet. Dále je zde popsána funkčnost základních bloků karet, výběr komponentů a návrh PCB. Kapitulu provází schémata zapojení, přičemž většina schémat je pouze ilustračních a neodpovídá přesné skutečnosti zapojení. Přesné schéma zapojení lze nalézt v příloze diplomové práce.

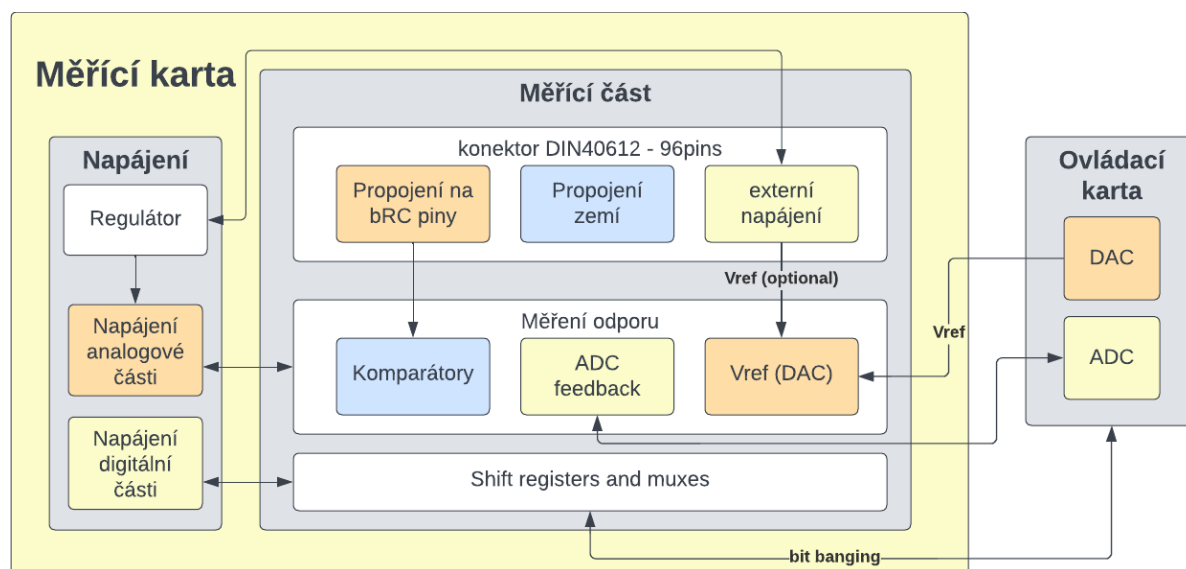
2.1 Základní požadavky na měřící karty

Následující seznam popisuje základní požadavky na měřící karty, seznam je seřazen podle priorit.

1. Schopnost měřit odpor mezi jakýmkoliv dvěma bRC piny, a to i v případě, že se každý z pinů nachází na jiné kartě.
2. Komunikace s ovládací kartou.
3. Škálovatelnost.
4. Modularitou se rozumí, co největší nezávislost jednotlivých funkčních bloků na sobě.
5. Dostupnost komponentů.
6. Cena komponentů.

2.2 Funkční bloky

Na následujícím obrázku je znázorněn blokový diagram měřících karet.



Obr. 2.1: Blokový diagram měřících karet

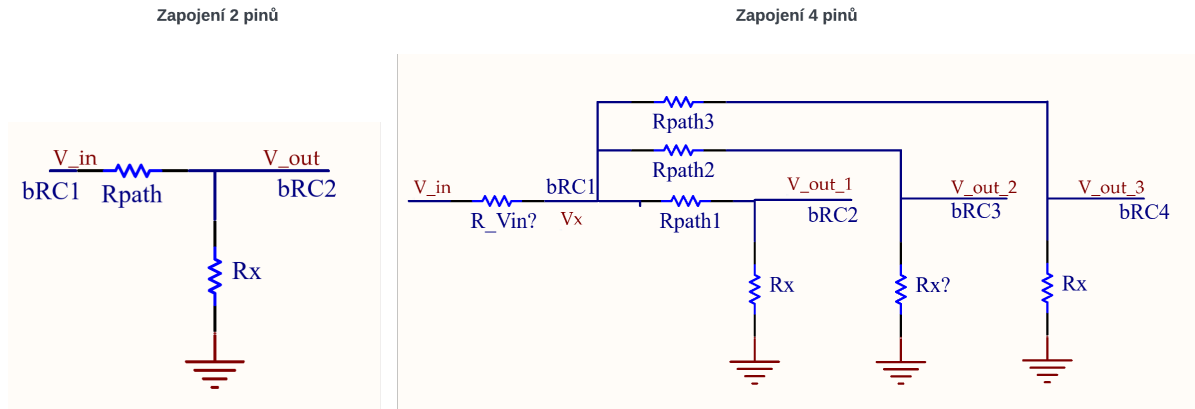
Karta se skládá ze 2 hlavních bloků (Měřící části a napájení). V následujících kapitolách jsou tyto bloky podrobně popsány.

2.2.1 Měřicí část

Teoretický návrh

Měřicí část je zodpovědná za měření odporu mezi dvěma bRC piny. Obr. 2.2a zobrazuje jednoduchý ideální napěťový dělič. Dělič je zapojen tak, že jeden z testovaných pinů bRC1 generuje napětí V_{in} a na druhém pinu bRC2 se měří napětí V_{out} . Měřeným odporem je odpor R_x , který lze dopočítat následovně:

$$R_{path} = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot R_x}{V_{out}} \quad (2.1)$$



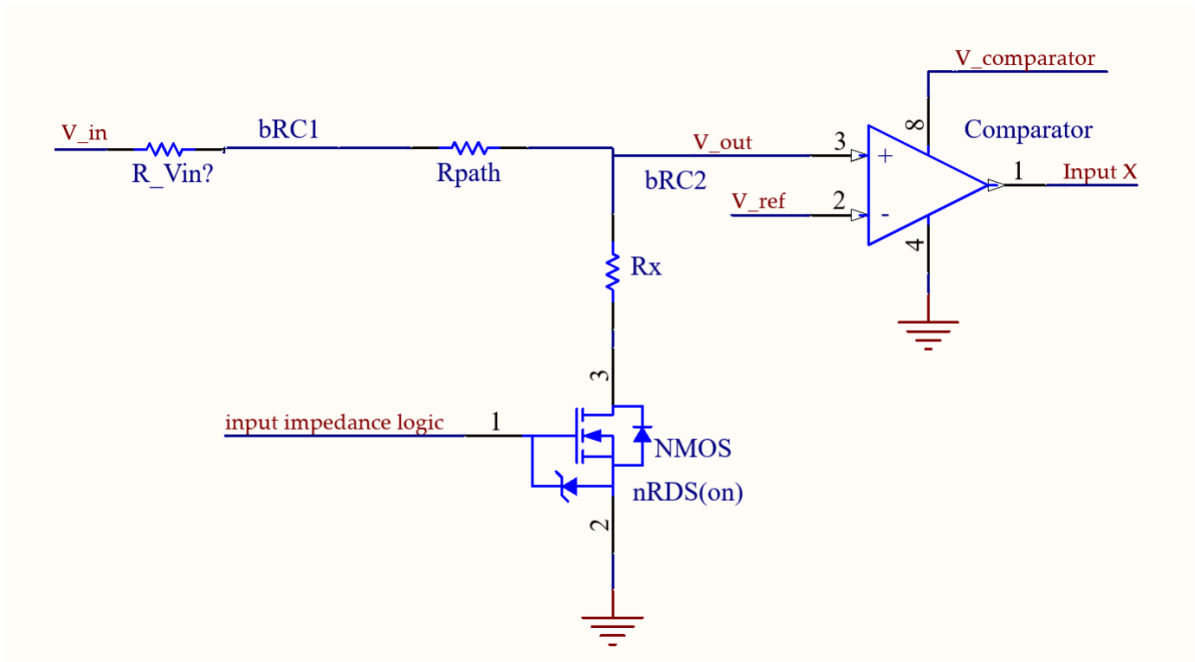
Obr. 2.2: Napěťový dělič: a) vlevo pro 2; b) vpravo pro 4 propojené bRC piny

Fixture může mít vnitřní zapojení takové, že se vzájemně propojí více než dva bRC piny. V takovém případě by pro např. 4 propojené bRC piny situace vypadala jako na obrázku 2.2b, kde odpory R_{path1} až R_{path3} značí odpory jednotlivých cest mezi piny. V_{out_1} až V_{out_3} značí napětí na výstupech děličů. V případě ideálního zdroje napětí (na obrázku značeno jako V_x) by obvod stále fungoval a platila by rovnice 2.1. Do obvodu by však tekla 3násobný proud.

V případě reálného zdroje napětí se uplatňuje jeho vnitřní odpor R_{Vin} a především úbytek napětí vzniklý na tomto odporu. Vzhledem k tomu, že úbytek napětí, na vnitřním odporu zdroje, je úměrný protékajícímu proudu a zároveň proud je úměrný počtu propojených pinů, kterých může být v případě zemních smyček fixture mnoho. Vzniká potřeba možnosti odpojení jednotlivých bRC pinů. Odpojení bRC pinu je zajištěno pomocí N-channel mosfetu (obr. 2.3). Toto zapojení v případě nulového napětí na vstupu mosfetu vytvoří vysokou impedanci na vstupu pinu, kterým pak protéká pouze zanedbatelný proud. V případě, že je na vstupu napětí vyšší než prahové napětí mosfetu, výpočet odporu se pro ideální zdroj napětí změní následovně.

$$R_{path} = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot (R_x + N_{RDSon})}{V_{out}}, \quad (2.2)$$

kde N_{RDSon} je odpor otevřeného mosfetu.



Obr. 2.3: Napěťový dělič pro s možností high Z vstupem

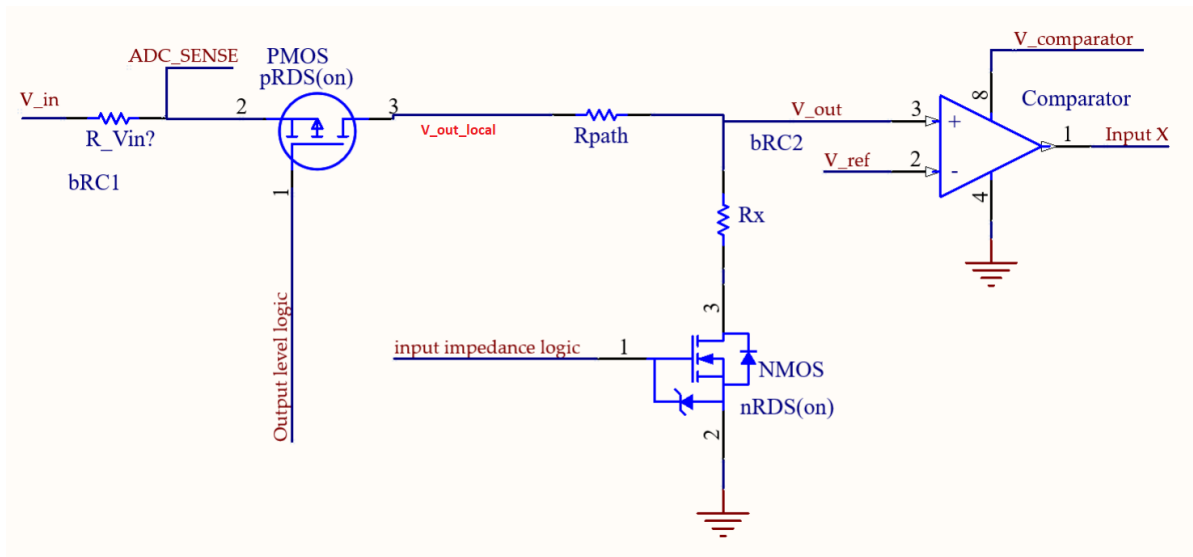
Další nevýhodou zapojení na obr. 2.2 je nutnost měření analogového napětí na každém pinu, což by vedlo k složitosti zapojení a vysokým nákladům na výrobu. Naprostá většina bRC pinů je propojená jako zkrat a zajímá nás především, zda hodnota odporu propojení nepřekračuje nějakou mez. Toho lze využít připojením komparátoru na výstup děliče (Obr. 2.3). Komparátor porovnává výstupní napětí V_{out} s hodnotou referenčního napětí V_{ref} .

Referenční napětí je nastavováno pomocí 12bitového D/A převodníku ovládací desky. V případě nastavení referenčního napětí pro určitou mezní hodnotu R_{path} , lze kontrolovat pouze logickou hodnotu výstupu $V_{comparator}$ (na obr.2.3 jako InputX). V případě, že bude nutné změřit reálný odpor cesty, je možné měnit napětí V_{ref} a sledovat při jaké hodnotě dojde k překlopení komparátoru.

Další otázkou je, jak generovat napětí V_{in} na vstupu děliče. Protože každý bRC pin musí být zároveň vstupní i výstupní, musí být konfigurovatelný do vysoké impedance (HIGH Z). Zároveň pokud bude každý pin schopen dodat do obvodu dostatečné množství proudu, bude možné měřit odpor několika cest současně. Řešením je obvod na obr. 2.4.

V tomto zapojení přibyl P-channel mosfet, který umožňuje spínat (ovládat) výstupní napětí V_{in} . Nicméně vzniká zde obdobný problém jako u zapojení na obr. 2.2b, a to že s rostoucím proudem roste úbytek napětí na vnitřním odporu zdroje charakterizovaným odporem R_{Vin} . Z tohoto důvodu je úbytek monitorován 12bitovým A/D převodníkem (na ovládací kartě). Výsledek měření odporu je pak vztažen k hodnotě změřené pomocí A/D převodníku. Odpor zdroje se pak bude rovnat R_{DSon} P-channel mosfetu. Nastává tak problém určit vliv odporu R_{DSon} na výslednou hodnotu změřeného odporu R_{path} [1, 2].

Protože každý pin může být zároveň výstupní i vstupní, kde vstupní funkci plní lokální komparátor. Lze pro přesné měření změřit přímo výstupní napětí V_{out_local} pomocí lokálního komparátoru a vliv R_{DSon} úplně eliminovat. Nicméně tato metoda je časově náročnější a je více diskutována v kapitole o algoritmizaci.



Obr. 2.4: Zapojení měřicí části s p-channel MOSFET

Ve schématu na obr. 2.4 si lze všimnout řídicích napětí (Output level logic, input impedance logic a input X). Output level logic řídí, zda generuje bRC pin napětí. Input impedance logic umožňuje nastavit vysokou impedanci na vstupním obvodu. Input X je výstup komparátoru. Vzniká tak potřeba pro každý bRC pin mít 2 logické výstupy a jeden vstup. Každá deska musí mít minimálně 78 bRC pinů, což znamená minimálně 156 logických výstupů a 78 logických vstupů.

Pro nastavení 78 hradel P-channel mosfetů (signál Output level logic) je použito 2x5x8-bit posuvných registrů zapojených do série. Obdobně je pro nastavení 78 hradel N-channel mosfetů (input impedance logic) použito 2x5x8-bit posuvných registrů zapojených do série. A pro 78 logických výstupů je použito 2x5x8-bit multiplexerů se společnou adresací. Společnou adresací se rozumí, že adresy 2x5 multiplexerů jsou řízeny 2x3 adresními piny. Vzhledem k použití 8-bit komponentů je výsledný počet bRC pinů na desce zaokrouhlen na 80 místo 78, přičemž 2 poslední vstupy/výstupy jsou na testeru ignorovány (v případě měřicí desky č.1 je pin č. 80 použit pro externí sondu). Hierarchické schéma měřicí karty lze nalézt v příloze.

Měřicí karty fungují, vzhledem k potřebám testování, ve dvou režimech (PASS/FAIL a měření reálného odporu). PASS/FAIL režim je určen pro rychlé hromadné otestování všech pinů, kde hlavním kritériem je, zda propojení mezi piny odpovídají nějaké mezní hodnotě odporu nebo ne. Výsledkem je pak pouze mapa propojení bez hodnot reálného odporu. Režim měření reálného odporu pak umožňuje změřit co nejpřesnější hodnotu odporu všech propojení.

Výběr součástek a volba jejich hodnoty

V předchozí sekci byla diskutována funkčnost zapojení. Nicméně nebylo doposud zmíněno, jaké kvantitativní hodnoty součástek jsou vhodné pro realizaci. V této sekci jsou popsány konkrétní reálné součástky, které byly použity včetně zdůvodnění jejich výběru.

Volba velikosti odporu děliče R_{out}

Odvození podmínek pro výběr odporu děliče:

V celé následující sekci je zanedbáván vliv komparátoru na měřící obvod. V první řadě je nutné definovat jaká je vyžadovaná přesnost, rozsah a rychlost měření. Vzhledem k charakteru propojení ve fixture by měl být tester schopen změřit odpor v rozsahu od 1Ω do $1\text{k}\Omega$. Vyžadovaná maximální absolutní chyba měření je $\pm 3\Omega$ v rozsahu od 1Ω do 100Ω . Pro vyšší hodnoty odporů se místo absolutní chyby uvažuje relativní chyba $\pm 5\%$. Co se týče rychlosti měření, tak pro automatické měření mezi dvěma bRC piny nejsou kladeny žádné požadavky, protože je proces plně automatizován.

Při měření odporu mezi bRC a Probe piny, obsluha postupně testuje všechny piny všech karet zvlášť externí sondou. V tomto případě by prodleva mezi přiložením sondy a vyhodnocením signálu neměla být pro člověka rozpoznatelná (signalizace pískáním obdobně jako continuity test multimetru). Z tohoto důvodu je nutné pro jeden pin změřit propojení mezi všemi ostatními piny do cca 40 ms (včetně komunikací s PC cca. 30 ms). Nicméně stačí vyhodnocovat PASS/FAIL pro odpor cesty a ne přímo jeho hodnotu. Následující tabulka je shrnutím tohoto odstavce.

Požadované charekteristiky měřícího obvodu					
TEST MODE	Počet pinů	Rozsah [Ω]	Přesnost [$\pm\Omega$]	čas [$\mu\text{s}/\text{pin}$]	Celkový čas [ms]
PASS/FAIL	4000	1-101	3	2,5	10
PASS/FAIL	4000	101-1000	rel. chyba 5%	2,5	10
Měření "pravé" hodnoty	4000	1-101	3	Nedefinován	Nedefinován
Měření "pravé" hodnoty	4000	101-1000	rel. chyba 5%	Nedefinován	Nedefinován

Tab. 2.1: Požadované měřící charakteristiky

Všechna následující odvození vycházejí z následující výchozí rovnice pro výstup napěťového děliče pro 2 propojené bRC piny:

$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot R_{out}}{R_{out} + R_{path} + R_{DSon}^P}, \quad (2.3)$$

kde $R_{out} = R_X + R_{DSon}^N$ a R_{DSon}^P je ekvivalent $R_{V_{in}}$ a odpovídá odporu P-channel mosfetu.

Z tabulky vyplývá několik podmínek pro volbu rezistoru R_{out} . První podmínka se vztahuje k přesnosti měření. Přesnost měření ovlivňují převážně 2 faktory. Prvním faktorem je chyba vzniklá diskretizací referenčního napětí komparátoru, které je generováno 12bit D/A převodníkem. Protože rovnice pro výstupní napětí děliče je nelineární bude nelineární i chyba vzniklá kvantováním. Podmínku pro splnění přesnosti, v případě, že se projeví pouze kvantizační chyba, lze vyjádřit následovně:

$$\left| \frac{\partial V_{out}}{\partial R_{path}} \cdot \Delta R_{path} \right| > \frac{V_{ref}}{2^{12}}, \quad (2.4)$$

kde $\left| \frac{\partial V_{out}}{\partial R_{path}} \cdot \Delta R_{path} \right|$ značí změnu napětí V_{out} způsobenou změnou R_{path} o požadovanou přesnost v Ω a R_{path} je z rozsahu 0 - 1k Ω . Tento vztah se také dá reprezentovat jako citlivost měření na změnu R_{path} .

Druhým faktorem, ovlivňujícím přesnost je chyba, kterou do měření přidává odpor R_{DSon}^P P-channel mosfetu při paralelním měření několika bRC pinů. Tato chyba roste se zvyšujícím se proudem a projeví se tak především při PASS/FAIL režimu. Vzhledem k náhodnému vnitřnímu propojení fixture není možno dopředu odhadnout, kolik bRC pinů bude připojeno, a tak ani výsledný proud odporem R_{DSon}^P . Uvažujme, že chceme změřit "nejhorší scénář" (všechny piny jsou mezi sebou propojeny tvrdým zkratem). Následně poteče obvodem proud přibližně:

$$I = \frac{V_{in}}{R_{out}/N_{pins} + R_{DSon}^P} \quad (2.5)$$

Proud je tak nepřímě úměrný velikosti hledaného odporu R_{out} a počtu paralelně měřených pinů. Pokud bychom chtěli změřit všechny piny na kartě současně ($N_{pins} = 80$). Musí každý pin být schopen dodat do obvodu proud $I = 80 \cdot V_{in}/R_{out}$. Vzhledem k nenulovému odporu R_{DSon}^P , který lze připodobnit vnitřnímu odporu zdroje napětí vzniká následující podmínka pro nejhorší možný případ:

$$I \cdot R_{DSon}^P < \left| \frac{\partial V_{out}}{\partial R_{path}} \cdot \Delta R_{path} \right| \quad (2.6)$$

$$\frac{V_{in} \cdot R_{DSon}^P}{R_{out}/N_{pins} + R_{DSon}^P} < \left| \frac{\partial V_{out}}{\partial R_{path}} \cdot \Delta R_{path} \right| \quad (2.7)$$

Podmínka vyjadřuje, že chyba vzniklá úbytkem napětí na R_{DSon}^P za předpokladu N_{pins} propojených pinů, by na výstupu děliče V_{out} neměla být větší než nejnižší napětí, které vznikne změnou odporu cesty o požadovanou přesnost v Ω .

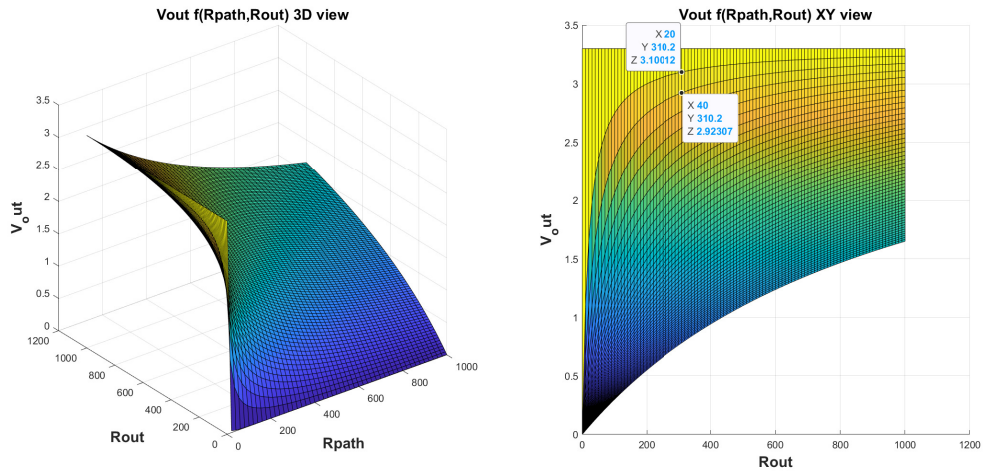
Při uvážení nejhoršího scénáře, že se sečte chyba dána kvantováním a chyba dána odporu R_{DSon}^P , lze vyjádřit podmínku pro hledaný odpor R_{out} následovně:

$$\frac{V_{ref}}{2^{12}} + \frac{V_{in} \cdot R_{DSon}^P}{R_{out}/N_{pins} + R_{DSon}^P} < \left| \frac{\partial V_{out}}{\partial R_{path}} \cdot \Delta R_{path} \right| \quad (2.8)$$

Řešení podmínek výběru hodnoty odporu děliče:

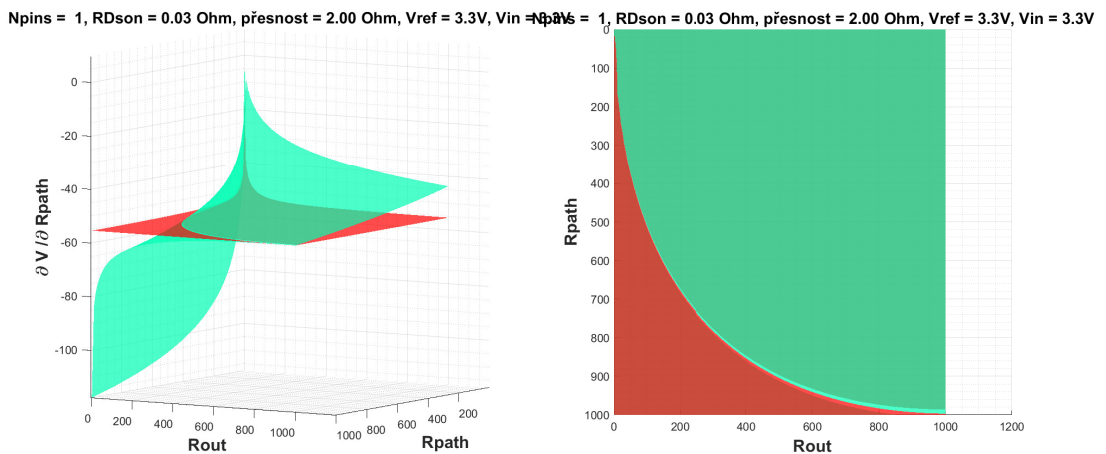
Rovnici 2.8 lze považovat za citlivost obvodu na změnu odporu R_{DSon}^P . Řešením by měla být oblast hodnot, ve které odpor R_{out} splňuje podmínky pro přesnost. Kvůli názornosti byla zvolena grafická metoda řešení. Následující obrázek 2.5 ukazuje výstupní napětí ideálního děliče v závislosti na odporu R_{out} a R_{path} . V levé části je zobrazena celá zkoumaná oblast a v pravé části je stejný graf zobrazen z "bočního" pohledu. V takovém zobrazení je patrné, jaká je změna výstupního napětí V_{out} při změně odporu R_{path} . Pokud zobrazíme 2 sousední hodnoty výstupního napětí tak, aby náležely stejnému odporu R_{out} (leží vertikálně nad sebou).

Rozdílem těchto 2 hodnot získáme citlivost $\left| \frac{\partial V_{out}}{\partial R_{path}} \cdot \Delta R_{path} \right|$. Na obrázku je z důvodu lepšího zobrazení zvolena velká změna odporu ΔR_{path} (v tomto případě 20Ω). Pro správný návrh je pak nutné zvolit stejnou změnu odporu ΔR_{path} jako má požadovaná přesnost [7, 8].



Obr. 2.5: 3D zobrazení rovnice pro výstupní napětí děliče (generováno pomocí MATLAB)

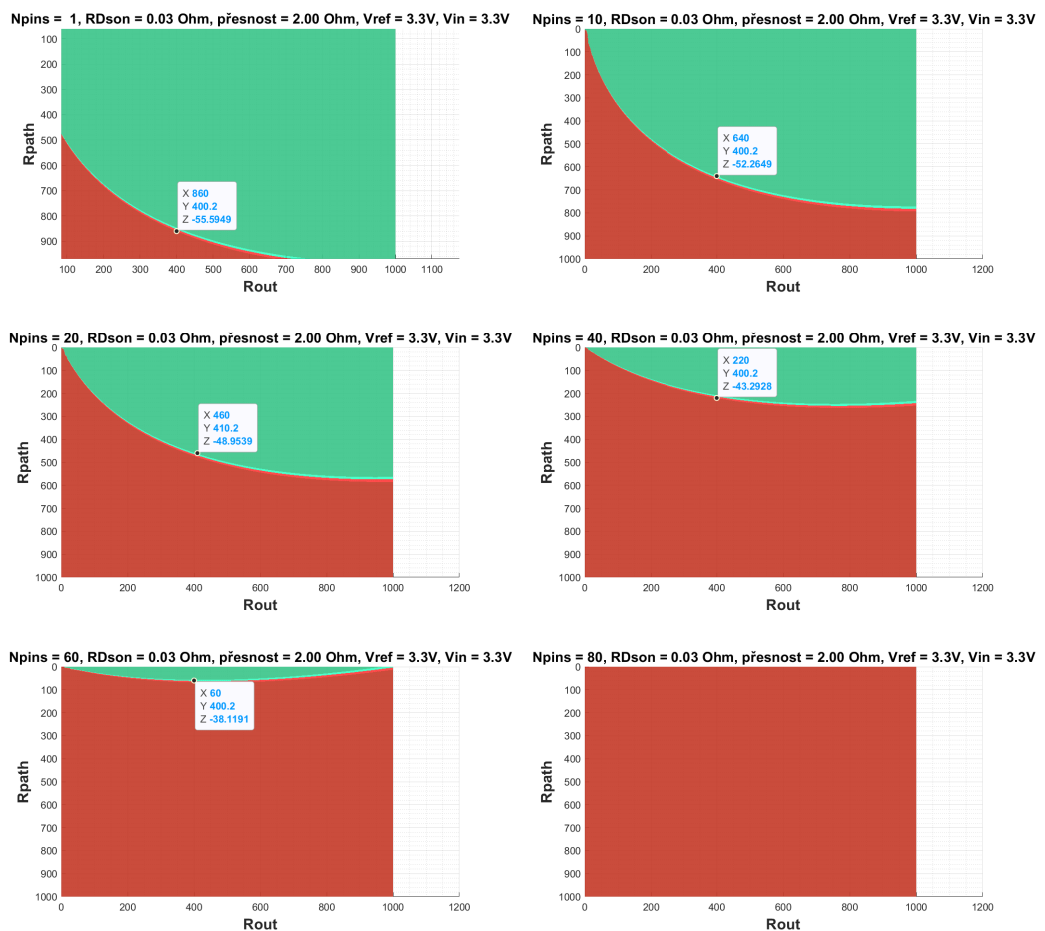
Nyní přejdeme k řešení rovnice (2.8). Následující obrázek 2.6 zobrazuje ve své levé části zeleně hodnotu citlivosti $\frac{\Delta V_{out}}{\Delta R_{path}}$ v celém zkoumaném prostoru. Červeně je pak zobrazena druhá strana rovnice (2.8). Podmínky jsou splněny ve všech kombinacích odporu R_{out} a R_{path} , kde má zelená část vyšší hodnoty difference než červená. V pravé části obrázku je pro jednodušší odečítání hodnot odporu výsledné oblasti pohled "shora". Zelená oblast splňuje podmínky a červená nesplňuje. Obecně platí, čím hlouběji v zelené oblasti se zkoumaný bod nachází, tím vyšší je přesnost



Obr. 2.6: 3D zobrazení rovnice 2.8 s podmínkami (generováno pomocí MATLAB)

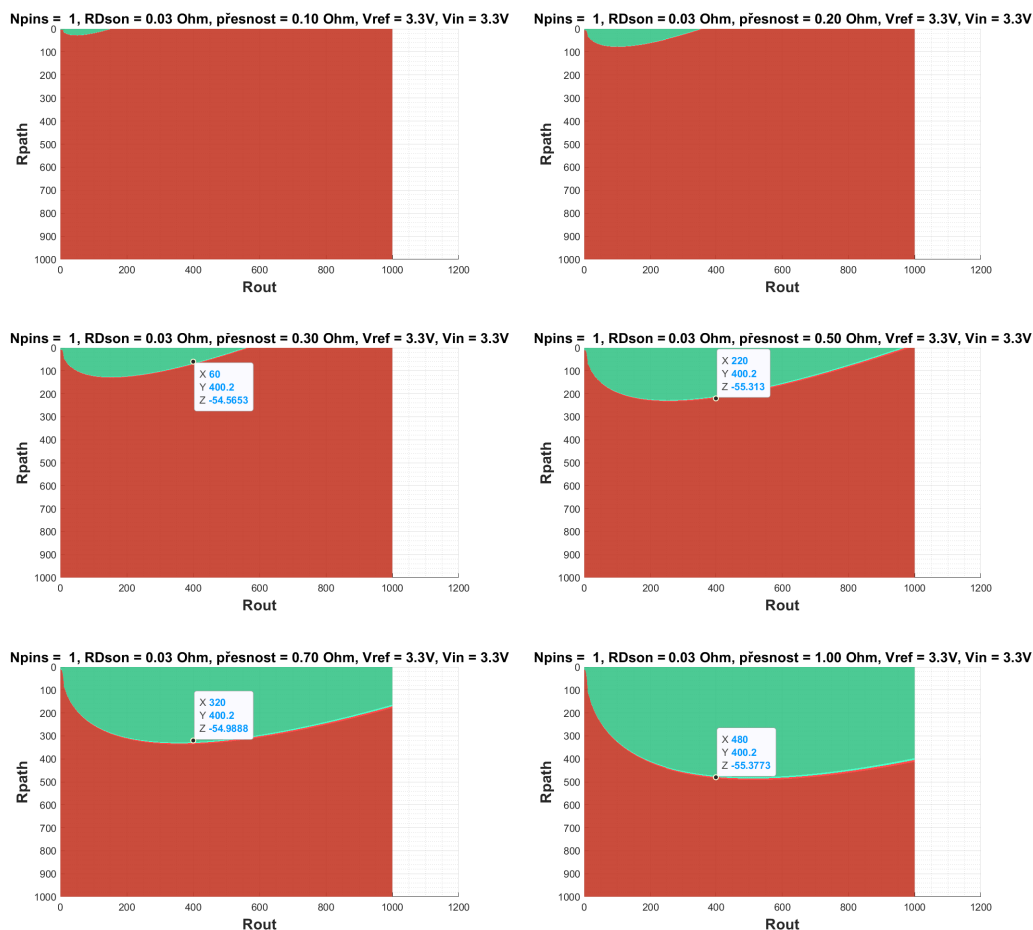
Do rovnice však vstupují parametry, jako je počet paralelně měřených pinů, odpor R_{DSon}^P a volba přesnosti. Následující série grafů zobrazuje vliv těchto parametrů na výslednou oblast, která splňuje podmínky. Výsledný zvolený odpor je 400Ω a v grafech jsou krajní hodnoty pro tento bod označeny (x: R_{path} , y: R_{out} a z: $20 \log \left(\left| \frac{\partial V_{out}}{\partial R_{path}} \cdot \Delta R_{path} \right| \right)$).

Zkoumání vlivu počtu pinů nás zajímá především při provozu testeru v PASS/FAIL režimu, kdy je nutné provádět měření rychle. Zároveň zde máme definovanou maximální chybu měření do 3Ω (grafy jsou generovány pro chybu 2Ω). Při tomto testu se předpokládá, že všechny měřené cesty mají odpor do 100Ω . Z obrázku 2.7 je patrné, že nebude možné změřit všech 80 pinů jedné karty současně s požadovanou přesností. Požadovanou přesnost nebude možné dosáhnout ani při měření 60 pinů současně, protože nejvyšší hodnota odporu cesty, která leží v zelené oblasti je přibližně 60Ω . Při této úvaze bylo počítáno s $R_{Dson}^P = 0.03\Omega$, což je hodnota o cca $15\text{m}\Omega$ vyšší, než má použitý P-channel mosfet (výběr mosfetu je popsán dále v diplomové práci). Hodnota zvoleného odporu 400Ω umožňuje, při měření 40 pinů současně, splnit podmínku přesnosti $\pm 2\Omega$ pro určení hodnoty odporu propojení do přibližně 220Ω .



Obr. 2.7: PASS FAIL - přesnost R_{path} 2Ω (generováno pomocí MATLAB)

Vliv požadované přesnosti měření nás zajímá v režimu vyhodnocení co nejpřesnější hodnoty měřené cesty. V tomto režimu se předpokládá měření propojení pouze 2 pinů. Z obrázku 2.8 je patrné, že vyšší přesnosti lze docílit volbou nižšího odporu R_{out} . Tento požadavek je protichůdný s požadavkem na velikost odporu pro PASS/FAIL test (Obr. 2.7). Hodnota výsledného odporu 400Ω tak byla zvolena jako jistý kompromis mezi těmito dvěma požadavky.



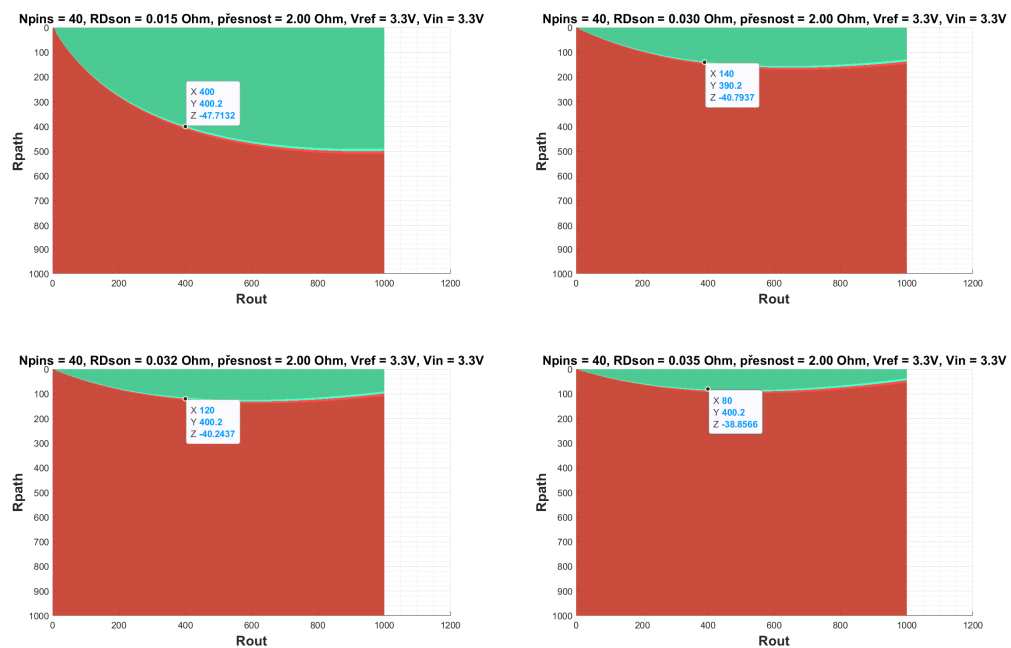
Obr. 2.8: Přesné měření mezi 2 piny - (generováno pomocí MATLAB)

Volba P-channel mosfetu

Při výběru P-channel mosfetu je vzhledem k podmínkám na přesnost nutné zvolit mosfet s nízkým odporem R_{DSon}^P . Tohoto odporu by mělo být možno dosáhnout pomocí řídicího napětí 3.3 V. Zároveň by měl mosfet být schopen dodat do obvodu dostatečný proud pro měření 40 pinů současně (proč 40 pinů je zdůvodněno v kapitole o volbě odporu R_{out}). Mosfet musí tedy do obvodu být schopen dodat následující minimální proud.

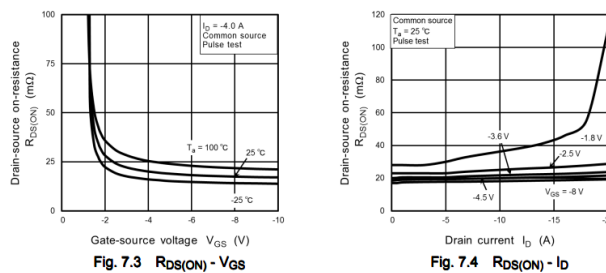
$$I_{min} = \frac{40 \cdot V_{in}}{R_{out}} = \frac{40 \cdot 3.3}{400} = 330mA \quad (2.9)$$

Z následujícího obrázku je patrné, že při použití $R_{out} = 400\Omega$ je pro splnění podmínky přesnosti měření 2Ω v rozsahu od 1 do 100Ω zvolit mosfet s nejvyšším možným R_{DSon}^P přibližně 0.032Ω . Zároveň je zde požadavek na co nejnižší cenu, dostupnost a menší velikost pouzdra.



Obr. 2.9: vliv R_{DSon} na přesnost měření (generováno pomocí MATLAB)

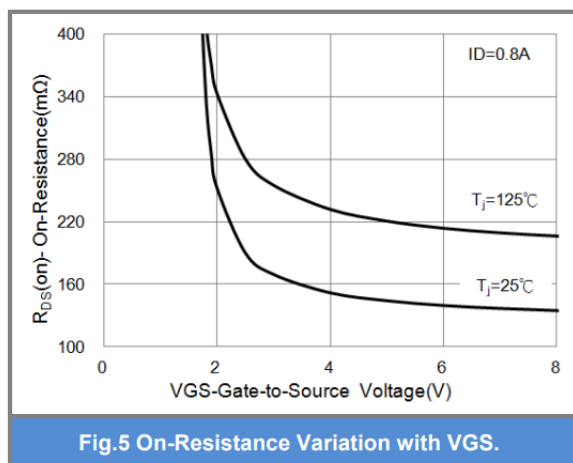
Na základě výše zmíněným požadavků byl zvolen mosfet SSM3J358R,LF. Níže je výstřížek z datasheetu. Podle typických hodnot by se mělo docílit R_{DSon} do $25m\Omega$.



Obr. 2.10: Výstřížek z datasheetu mosfetu SSM3J358R,LF - R_{DSon} [9]

Volba N-channel mosfetu

Parametry N-channel mosfetu nemají příliš velký vliv na chování obvodu, protože jeho odpor R_{DSon}^N je započítán do hodnoty odporu R_{out} . Zároveň je hodnota R_{DSon}^N většinou nižší než tolerance odporu R_{out} . Hlavním požadavkem je zde, aby bylo možno ovládat mosfet 3.3 a 5V logikou. Dále by měl mosfet být schopen snést proud $I = 3.3/400 = 8.25\text{mA}$, byl co nejlevnější dostupný a měl menší velikost pouzdra. Byl vybrán PJA3432_R1_00001 s následujícími parametry.



Obr. 2.11: Výstřižek z datasheetu N-channel mosfetu PJA3432_R1_00001 - R_{DSon} [10]

Volba komparátoru

Doposud nebylo počítáno s vlivem reálného komparátoru. Aby byly výsledky co nejpřesnější je vhodné zvolit komparátor s co nejvyšším vstupním odporem. Protože při propojení pinů nízkou hodnotou odporu je výstupní napětí děliče blízké napájecímu napětí, tak je komparátor napájen vyšším napájecím napětím konfigurovatelným od cca 4 do 5.5V (více v sekci o napájení). Komparátor by také neměl mít hysterezi. Dále, protože je vstup komparátoru přímo připojen na bRC piny, tak by zde měla být ESD ochrana. Pro jednodušší PCB návrh je vhodné, aby pouzdro obsahovalo více komparátorů.

Byl vybrán komparátor LM393LVQDRQ1. Vstup komparátoru je interně chráněn proti ESD do 2kV. Na výstupu komparátoru je pull-up rezistor připojený k napájení ovládací karty (tímto je docíleno napěťové kompatibility s 3V3 i 5V logikou). Vybraný komparátor má poměrně vysokou kapacitu vstupu (3pF). Vliv kapacity je diskutován v sekci o návrhu D/A převodníku ovládací karty[11].

Volba shift registrů

Základním požadavkem na shift registry je možnost řízení pomocí 3V3 logiky, přičemž shift registr samotný je napájen 5V. Dále schopnost řídit vybrané P a N-Channel mosfety. Všechny 80 výstupů (P-Mosfetů) je řízeno 2x5 shift registry zapojených do série. Pro výstupní piny není kladen velký důraz na rychlost nastavení hodnot, protože pro každý výstupní pin

je nutné změřit dalších 4000 vstupních tak je na přepínání času dostatek. Naopak ovládání N-channel mosfetů by mělo být co nejrychlejší.

V kapitole o výběru rezistoru děliče je zmíněno, že bude možné měřit 40 pinů současně. Jistým kompromisem jednoduchosti ovládání a rychlostí je tak ovládat N-channel mosfety 10 shift registry zapojenými stylem 2x5 do série (viz. schéma měřící karty v příloze).

Toto řešení ovládání je zároveň modulární, lze odebírat celé bloky po 8 pinech a zlevnit tak měřící kartu pro použití v jednodušších aplikacích. Stejně jako u předchozích součástek i zde je požadavek na menší pouzdro. Byl vybrán shift registr SN74AHCT595PWR. Tento shift registr je 3 stavový, lze tak přímo řídit jednotlivé mosfety bez nutnosti pull-up/down rezistorů. Poblíž napájení každého z shift registrů je umístěn 100nF vazební kondenzátor. Řídící piny shift registrů jsou přivedeny na 2x25 pinový konektor, kterým je měřící deska připojena k ovládací desce[12].

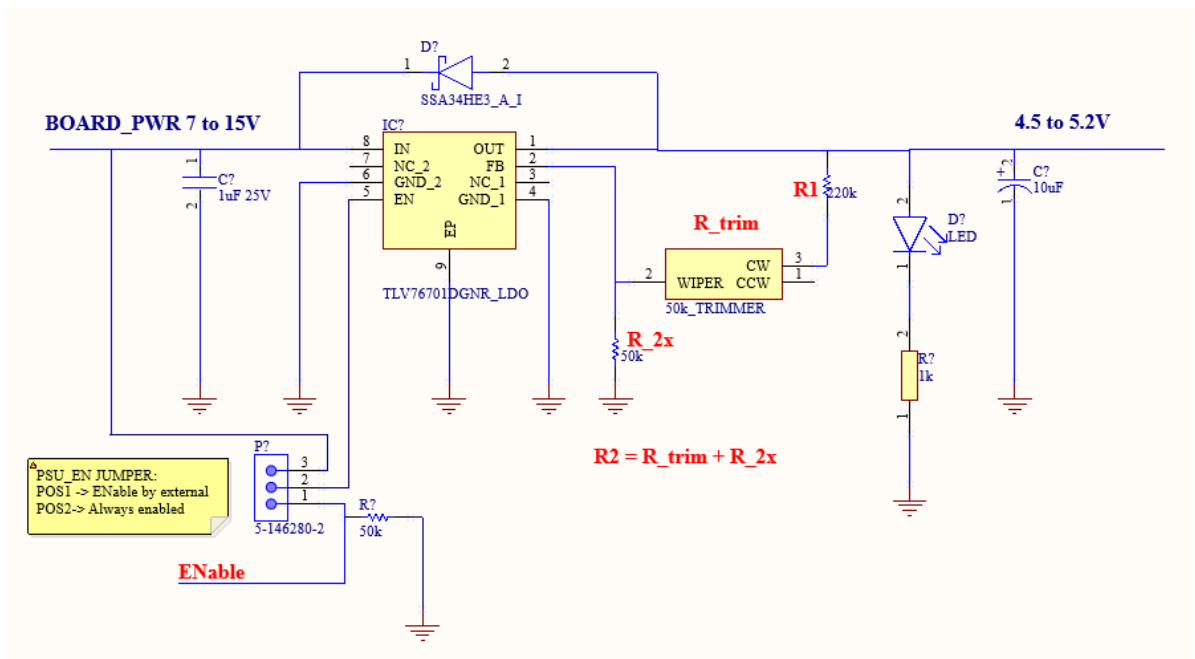
Volba multiplexerů

Multiplexer by měl být ovladatelný 3.3V i 5V logikou. Byl zvolen multiplexer TMUX1308QDYRQ1. K multiplexeru je obdobně jako k shift registru připojen 100nF vazební kondenzátor. Komparátory jsou zapojeny stylem 2x5 a mají jednotnou adresaci (2x3 adresní piny, 2x enable pin, 2x5 výstupních pinů). Výstupy multiplexeru jsou přivedeny na 2x25 pinový konektor[13].

2.2.2 Napájecí část

Měřící karta je ve svém standardním provedení napájena 7V až 15V. Toto napájecí napětí je následně regulováno dvěma nastavitelnými regulátory TLV76701DGNR na 3V a 5V. Tyto regulátory disponují enable pinem, kterým je možné spínat regulátory ve správném pořadí, tak aby nedocházelo k nedefinovaným stavům. Enable piny jsou řízeny pomocí ovládací karty, je však možno pomocí zkratovacích propojek přepnout regulátory do režimu, kde se spínají současně automaticky. Dále tyto regulátory nabízejí ESD ochranu vstupů a automatickou tepelnou ochranu. Tepelnou ochranou je i limitován maximální výstupní proud, který dokáže regulátor do obvodu dodat. Tepelná ochrana je však vyšší než doporučený rozsah teplot (-40 až 125°C), ve kterých by měl regulátor fungovat. Při okolní teplotě 25°C tak lze dosáhnout ztrátového výkonu přibližně 1.66W, což při napájení desky 7V a regulaci na 3.3V umožňuje dodat maximální proud přibližně 448 mA. Při dlouhodobějším měření teplota žádného z regulátorů nepřekročila 70°C.

Napětí 5V, ve finálním schématu v příloze označeno jako Vcomp, slouží k napájení multiplexerů, komparátorů a shift registrů. Ve zpětnovazebním obvodu regulátoru je připojen odporový dělič s 50 kΩ trimmerem, pomocí kterého lze nastavit výstupní napětí v rozmezí přibližně od 4.5 do 5.2V. Po osazení měřící karty se však zjistilo, že takto vysoká hodnota zpětnovazebních odporů způsobuje, že je deska náchylná na dotek lidské ruky a proto byla hodnota odporů zmenšena. Nejaktuálnější schéma lze nalézt v příloze na konci diplomové práce. Vzhledem k povaze napájených komponentů se nepředpokládá vysoký odběr proudu.



Obr. 2.12: Napájení měřicí karty: 5V regulátor (celé schéma měřicí karty v příloze - POWER REGULATORS)

Napětí 3V, ve finálním schématu v příloze označeno jako V_{pins} , slouží k generování napětí na bRC pinech. Obdobně jako regulátor pro 5V má i regulátor pro 3V trimmer pro nastavení výstupního napětí. Zde je však v napěťovém děliči zvolena jiná hodnota pevného rezistoru R_1 , tak aby bylo možno pomocí 50 k Ω trimmeru nastavit výstupní napětí v rozmezí od 2.8 do 3.5V. Protože bude referenční napětí generováno 3.3V D/A převodníkem. Počítá se s nastavením výstupního napětí na 3V pro případ, že by převodník nefungoval v celém svém rozsahu. 3V regulátor musí být schopen dodat do obvodu proud minimálně 330mA (zdůvodnění je patrné z rovnice 2.9). Volba hodnot rezistorů ve zpětné vazbě vychází z rovnice pro výstupní napětí regulátoru

$$V_{out} = V_{FB} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right), \quad (2.10)$$

kde $V_{FB} = 0.8V$, pro R_2 byl použit 50 k Ω trimmer v sérii s odporem 50 k Ω . Hodnota R_1 pro 5V regulátor byla zvolena 220 k Ω a pro 3V regulátor 120 k Ω . Obdobně jako u 5V regulátoru došlo k následné snížení hodnoty odporů viz schéma na konci diplomové práce.

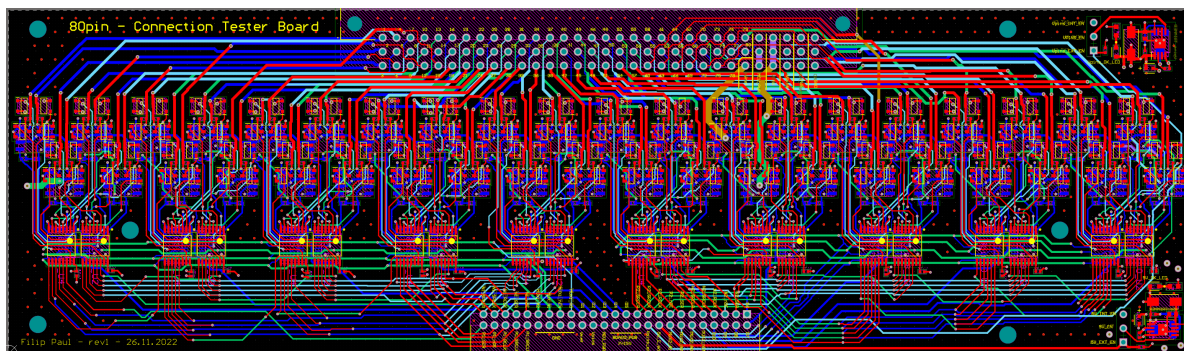
Regulátory mají připojeny Shotkyho diody SSA34HE3. Tyto diody slouží jako ochrana proti přepětí na výstupu. Na výstupu regulátorů jsou připojeny LED pro snadnou kontrolu, zda je regulátor zapnutý. Výstupy regulátorů jsou přivedeny na jak na 2x25pinový konektor, tak na pole pinů pro připojení bRC (případně DIN konektoru). Je tak možno využít výstupní napětí regulátorů pro napájení externích komponent, nebo také regulátory neosazovat a napájet měřicí kartu externím regulovaným zdrojem.

Na měřicí kartě lze také nalézt napětí, které je ve finálním schématu v příloze označeno jako PWR_MCU. Toto napětí je do měřicí desky přivedeno z ovládací karty. Je to napětí, které je následně využito pro výstup multiplexerů (pull up výstupu komparátoru) a je tím

zajištěna napěťová kompatibilita s ovládací logikou 3.3V a 5V.

2.2.3 Návrh PCB

Pro návrh PCB bylo využito softwaru Altium Designer. PCB bylo vyrobeno a osazeno externími firmami. Jedná se o 6vrstvé PCB, přičemž podrobnější informace lze najít v příloze na konci diplomové práce.



Obr. 2.13: Výsledný návrh PCB měřicí karty - všechny vrstvy bez zobrazených polygonů

Pro minimalizaci zemních smyček jsou po celé desce rozmístěny prokovy propojující GND signály (stitching vias). V gerber datech a 3D modelu jsou stitching vias zobrazeny jako zakryté (tented). Nicméně kvůli nižší ceně výroby PCB jsou použity odkryté vias. Z důvodu požadavků na osazení komponent byla použita ENIG povrchová úprava.

Důležitou podmínkou návrh PCB měřících karet je, že jejich výška (včetně komponentů) nesmí přesáhnout 8 mm. Tento rozměr je dán roztečí jednotlivých řad bRC pinů. Na 3D modelech v příloze jsou zobrazeny měřicí karty s DIN konektorem, který přesahuje výšku 8 mm (nebude však osazen). Finální rozměry měřicí karty bez DIN konektoru jsou (délka x šířka x výška) 215 x 62.5 x 7.65 mm. PCB obsahuje několik děr pro uchycení pomocí M3 šroubů.

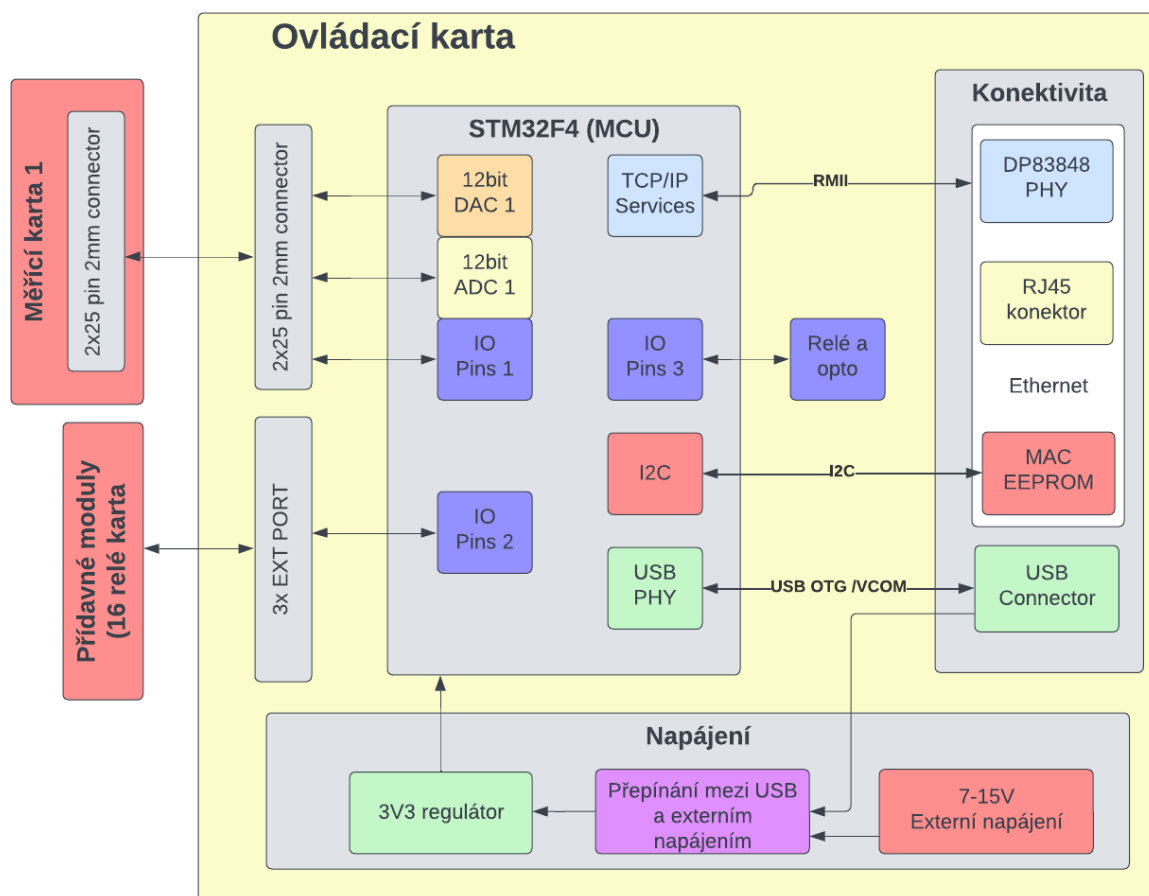
3 Návrh ovládacích karet

3.1 Základní požadavky na Ovládací karty

Následující seznam popisuje základní požadavky na ovládací karty, seznam je seřazen podle priorit. Obdobně jako v kapitole o měřicích kartách jsou schémata i v této kapitole ilustrační a přesné zapojení lze nalézt v příloze.

1. Schopnost ovládat měřicí karty.
2. Možnost komunikace pomocí 100 Mbit Ethernetu a USB.
3. Dostupnost komponentů.
4. Cena komponentů.

3.2 Funkční bloky



Obr. 3.1: Funkční diagram ovládací karty

Ovládací karta obsahuje několik pomyslných funkčních bloků (Obr. 3.1). Jednotlivé bloky jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Celé schéma k ovládací kartě je v příloze na konci tohoto dokumentu.

3.2.1 Mikrokontrolér a jeho periférie

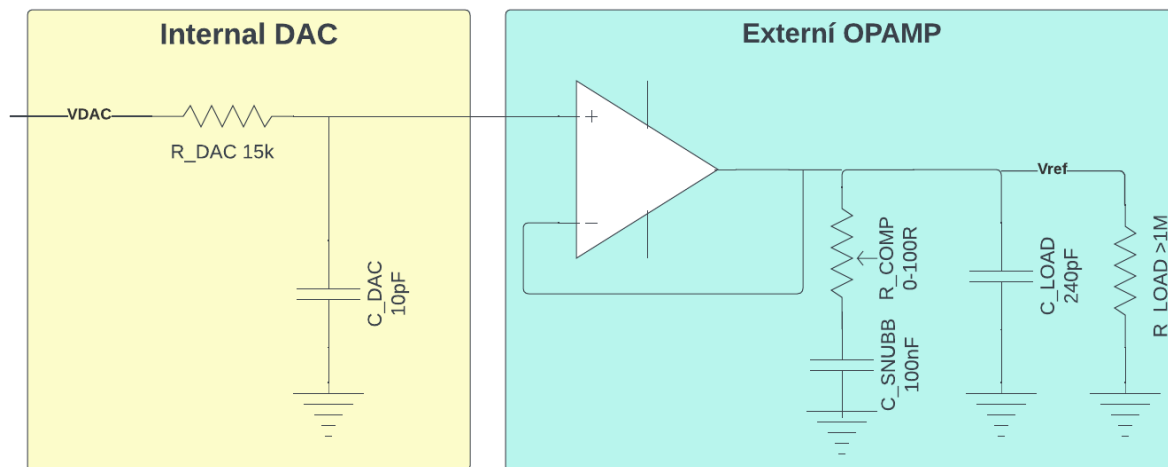
Ovládací karta je založena na 32bitovém mikrokontroléru STM32F407ZGT6 s Cortex M4 jádrem. Tento mikrokontrolér disponuje 114 I/O piny (3V3 logika), dvěma nezávislými 12bitovými A/D a D/A převodníky, nativní podporou USB OTG a 100 Mbit Ethernet MAC vrstvou. Právě díky těmto vlastnostem, je tento mikrokontrolér vhodný pro ovládání měřících karet a komunikaci s PC.

Pro komunikaci s PC aplikací se primárně počítá s telnet serverem, který běží na mikrokontroléru. Nicméně pro ladící (debugovací) účely je možno s ovládací kartou komunikovat i pomocí USB. K programování mikrokontroléru lze použít rozhraní SWD, JTAG nebo DFU (USB bootloader)[2].

Jednotlivé shift registry a multiplexery měřící karty jsou ovládány, skrze ovládací kartu, pomocí metody bit banging. Ovládací karta obsahuje i další periférie jako například CAN, LIN, RTC, opticky oddělené vstupy a výstupy apod. Tyto periférie slouží k použití karty v jiném projektu, který není obsahem diplomové práce, a proto nejsou podrobněji diskutovány.

D/A převodník

STM32F407ZGT6 nabízí dva 12bitové D/A převodníky s možností využití integrovaného bufferu v podobě invertujícího operačního zesilovače. Nicméně podle datasheetu je možné použít výstupní buffer pouze do velikosti kapacitní zátěže 50 pF. Kapacitní zátěž D/A převodníku bude rovna parazitním kapacitám, které nelze jednoznačně určit a vstupní kapacitě 80 komparátorů (V+ proti GND). Každý z komparátorů má svou vstupní kapacitu přibližně 3 pF. Dohromady tedy vznikne kapacitní zátěž minimálně 240 pF.[15]



Obr. 3.2: DAC-externí zesilovač

Pro použití D/A převodníku je použit externí operační zesilovač v zapojení (Obr. 3.2). V tomto zapojení je rychlost D/A převodníku limitována kapacitou pinu D/A převodníku C_DAC (cca 10 pF) a vnitřním odporem R_DAC (cca 15 kΩ). Mezní kmitočet nezatíženého

D/A převodníku pak lze určit následovně.

$$f_{max} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{dac} \cdot R_{dac}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \text{ pF} \cdot 15 \text{ k}\Omega} = 1,06 \text{ MHz} \quad (3.1)$$

Kapacitní zátěž společně s výstupním odporem operačního zesilovače by mohla způsobit nestabilitu a s tím spojené nežádoucí oscilace v časové oblasti. Z tohoto důvodu datasheet použitého operačního zesilovače AD8531 doporučuje použít v případě vyšší kapacitní zátěže tzv. snubber network. V datasheetu je možno nalézt následující hodnoty součástek pro různou kapacitní zátěž (v Obr. 3.2 realizováno kombinací součástek C_SNUBB a R_COMP).

Load Capacitance (CL)	Rs[Ohm]	Cs [uF]
0.47nF	300	0.1
4.7nF	30	1
47nF	5	1
240pF (zvolené hodnoty)	100Ω Trimmer	0.1

Tab. 3.1: Snubber Network (Přepis tabulky z datasheetu [18])

Protože datasheet neuvádí hodnoty součástek pro kapacitní zátěž 240 pF, je odpor R_COMP realizován trimmerem pro možnost kalibrace. Hodnota kapacity C_SNUBB byla zvolena 100 nF.

Kalibrace je prováděna tak, že se na výstupu D/A převodníku nastaví obdélníkový signál o frekvenci 500 kHz a poté se trimmerem nastaví taková hodnota, aby v časové oblasti byl co nejmenší překmit[16, 17].

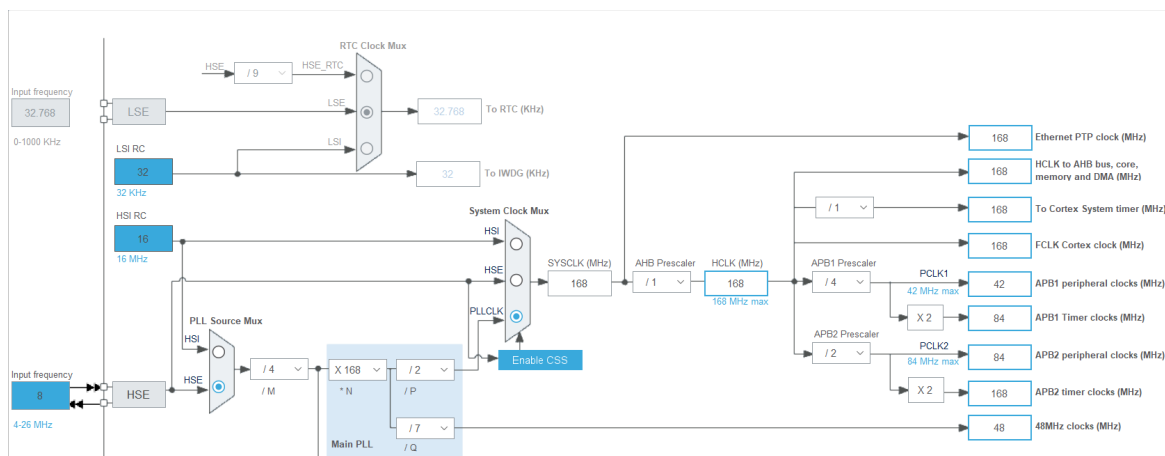
Programování a debugging

Pro účely debugování a programování mikrokontroléru jsou zpřístupněny SWD a JTAG piny. Dále je možno modifikovat konfiguraci mikrokontroléru pomocí jumperů, které jsou propojeny s boot piny mikrokontroléru. Při normálním provozu se počítá s programováním pomocí SWD rozhraní. Případně je také možné mikrokontrolér naprogramovat přes USB konektor pomocí zabudovaného DFU.

Konfigurace hodinového signálu

Mikrokontrolér má vysokou variabilitu v konfiguraci hodinových signálů. K požadovaným funkcím ovládací karty je vhodné použít externí krystalový rezonátor, který bude připojen do High Speed Clock pinů mikrokontroléru. V případě ovládací karty bylo použit 8 MHz krystalového rezonátoru ABM3B-8.000MHZ-D2-T společně s 2x27 pF zatěžovacími kapacitami.

Pro jednodušší konfiguraci hodinových signálů mikrokontroléru bylo využito programu STM32CubeMX. Výsledná konfigurace hodinových signálů je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr. 3.3: Konfigurace hodinových signálů - STM32CubeMX

3.2.2 Konektivita

Ovládací karta je vybavena USB-micro a RJ45 konektorem. Umožňuje tak velmi snadné propojení s PC aplikací pomocí standardních USB a ethernetových rozhraní.

Ethernet

Pro zajištění ethernetového připojení je využito MAC vrstvy mikrokontroléru společně s fyzickou vrstvou (PHY) realizovanou pomocí čipu DP83848 a RJ45 konektoru s integrovaným transformátorem pro 100 BASE-T. Komunikace mezi mikrokontrolérem a DP83848 je realizováno pomocí RMII rozhraní. PHY vyžaduje pro svou správnou funkčnost 100Ω diferenciální páry (viz. schéma ovládací karty v příloze).

DP83848 vyžaduje pro svou činnost v RMII režimu připojení externího 50 MHz oscilátoru. Výstup oscilátoru je zároveň přiveden na příslušný pin mikrokontroléru a slouží jako hodinová reference.

DP83848 je možno konfigurovat pomocí tzv. bootstrap pinů. DP83848 při svém startu zjišťuje logické úrovně bootstrap pinů a podle toho konfiguruje své parametry. Následující tabulka shrnuje nastavení bootstrap pinů použitých v ovládací kartě.

PIN	Nastavení	Popis
AN0	1	AN0 a AN1 piny konfiguruji, jakými možnostmi se bude zařízení prezentovat při AutoNegotiation.
AN1	1	Pro kombinaci AN0 = 1 a AN1 = 1 zařízení se prezentuje jako 10BASE-T a 100BASE-TX HALF/FULL duplex
LED_CFG	1	Konfiguruje chování LED na RJ45 konektoru.
MII_MODE	1	DP83848 očekává RMII pro komunikaci s MAC vrstvou
MDIX_ENABLE	1	Interní pull up - MDIX (crossover) povolen

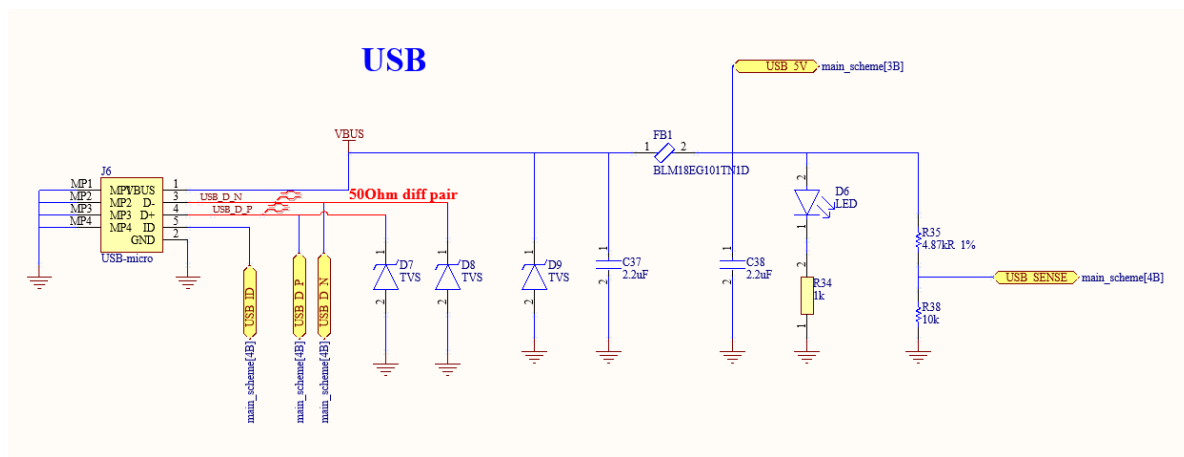
Tab. 3.2: Nastavení bootstrap pinů DP83848

Protože ani mikrokontrolér a ani DP83848 nenabízí jedinečnou MAC adresu je použita EEPROM, která má již od výrobce naprogramovanou jedinečnou MAC adresu. EEPROM používá ke komunikaci I2C protokol a při startu zařízení je MAC adresa načtena do MAC vrstvy mikrokontroléru. V mikrokontroléru je implementován telnet a http server a je využito LWIP stacku společně s HAL knihovnami a Free-RTOS.

USB

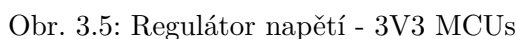
Mikrokontrolér je vybaven fyzickou vrstvou pro USB OTG, je tak možné propojit datové signály přímo s USB-micro konektorem. Přestože je do USB konektoru vyveden ID pin, který slouží k rozlišení zařízení mezi host a device, využívá ovládací karta pouze režim device. Pro detekci připojení ovládací karty k USB portu je použit napěťový dělič, jehož výstup je přiveden do USB_sense pinu mikrokontroléru. Napěťový dělič obsahuje rezistor o toleranci 1 %. Tuto toleranci není nutno dodržet a tento rezistor byl použit pouze z důvodu nízké ceny a faktu, že se již v návrhu vyskytuje.

Připojení pomocí USB slouží převážně k servisním účelům. Ovládací kartu lze napájet přímo z USB portu, přičemž napájení je opatřeno vstupním filtrem realizovaným feritovou perličkou a kondenzátorem (více v sekci o napájení). Obdobně jako u ethernetu je i zde nutno při návrhu PCB použít diferenciální páry pro datové signály ($90\ \Omega$). Každý ze signálů, který je vyveden na USB-micro konektor je opatřen TVS diodami pro ochranu proti ESD.



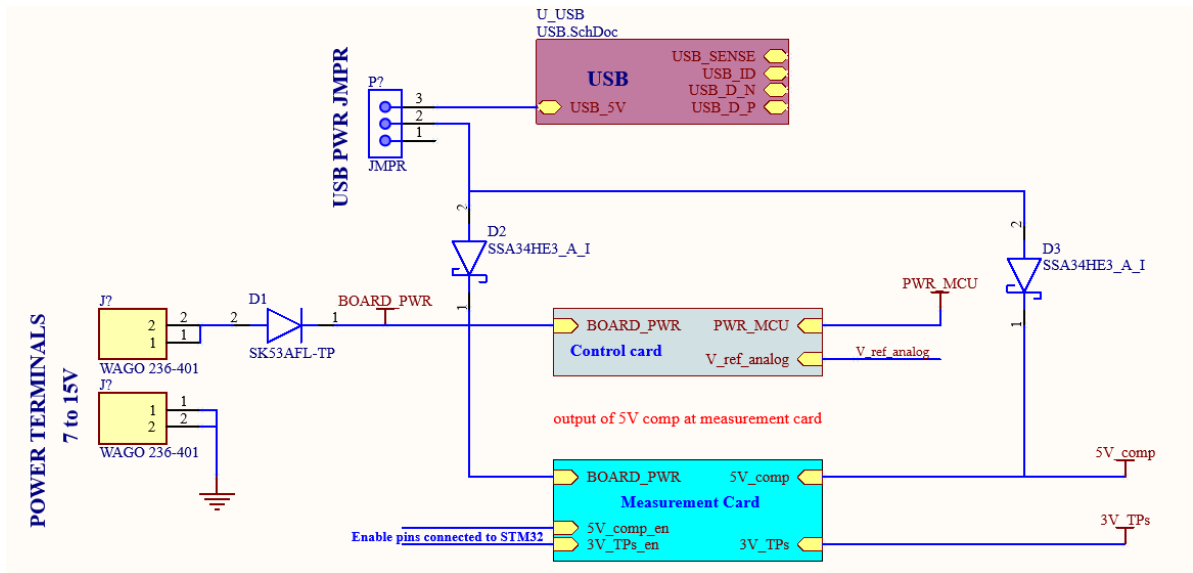
Obr. 3.4: USB rozhraní

Při normálním provozu se počítá s externím napájením v rozmezí 7-9 VDC. Toto napětí je přivedeno na WAGO svorky. Napětí (ve schématu BOARD_PWR) přivedeno na vstup nastavitelného regulátoru TLV76701DGNR. Funkce tohoto regulátoru je obdobná jako u regulátorů popsaných v sekci o měřicí kartě. Výstup regulátoru je možné nastavit trimmerem v rozmezí přibližně od 2.8 do 3.45V (ve schématu 3v3_MCUs).



Očekávaný maximální proud fyzické vrstvy ethernetu je přibližně 150 mA. Proudový odběr ovládací karty nelze jednoznačně určit, protože je závislý na firmwaru mikrokontroléru. Nicméně se očekává, že by proud tímto regulátorem v nejhorším případě neměl přesáhnout 400 mA. Použitý regulátor by měl být schopen dodat do obvodu proud přibližně 450 mA (viz. 2.2.2).

Celý systém měřících a ovládacích karet může být napájen pomocí USB. V tomto případě je však přesnost měření limitována kvalitou USB napájení. Následující obrázek znázorňuje distribuci napájení ovládacích a měřících karet. Schéma však neodpovídá reálnému zapojení, protože jednotlivé komponenty jsou propojeny přes 2x25 pin konektory. Pro přehlednost jsou však konektory vynechány.



Obr. 3.6: Distribuce napájení

V případě napájení pomocí USB je napětí `BOARD_PWR` generováno z USB portu. Aby se zamezilo poškození všech připojených zařízení, které by mohlo potenciálně vzniknout připojením vyššího napětí na WAGO svorkách a USB současně, je do schématu připojena dioda `D2`. Dioda `D1` slouží jako ochrana k přepólování na vstupu WAGO svorek. Zároveň dioda `D1` plní obdobnou funkci jako dioda `D2` nyní však pro ochranu zdroje napájení připojeného do WAGO svorek proti napětí na USB. V případě současného připojení externího napětí na WAGO svorky a USB portu, bude deska napájena vyšším z napětích. Napětí `BOARD_PWR` je v případě napájení přes USB rovno přibližně:

$$V_{BOARD_PWR} = V_{USB} - V_{D2} = 5V - 0.4V = 4.6V, \quad (3.2)$$

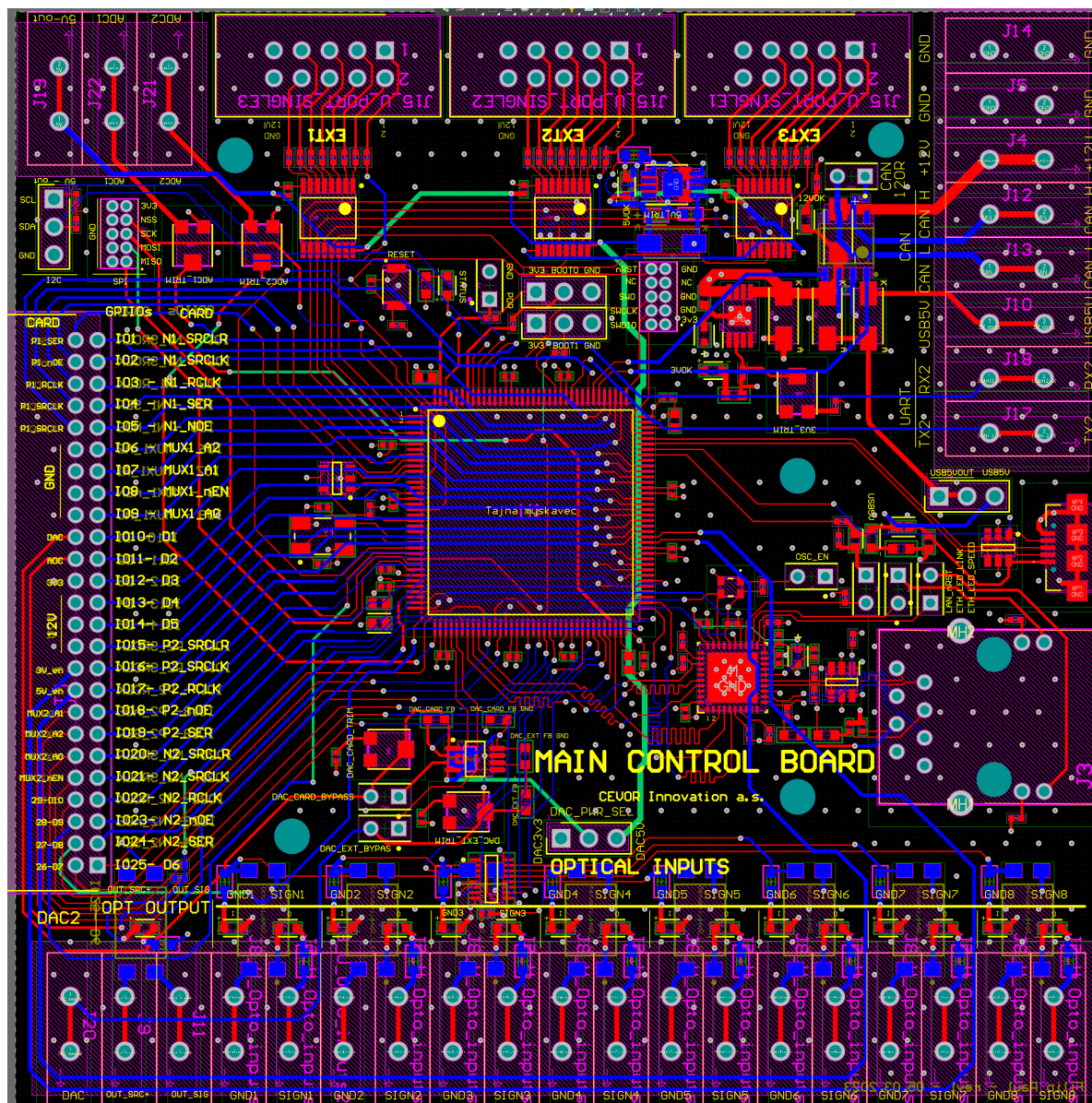
kde V_{D2} je úbytek na diodě `D2`. Tento úbytek je pro diodu `SSA34HE3_A_I` roven přibližně 0.2V při proudu 1A a přibližně 0.4V při proudu 2A

Úbytek napětí na regulátorech `TLV76701DGNR` je přibližně 0.8V. Součtem úbytků na diodě `D2` a regulátoru lze dosáhnout regulovaného výstupního napětí až 3.8V, což je dostatečné pro napájení všech regulátorů kromě regulátoru, který zajišťuje napětí `5V_comp`. Napětí `5V_comp` je tedy generováno přímo z USB portu přes diodu `D3`. Dioda `D3` má obdobný význam jako dioda `D2`, nyní však chrání USB port před vyšším napětím na výstupu regulátoru `5V_comp` v případě napájení z WAGO svorek. Z tohoto je patrné, že napětí `5V_comp` není nijak regulováno a je přímo závislé na napětí a rušení USB portu. V případě detekce napětí na `USB_sense` pinu je komparátor `5V_comp` vypnut pomocí enable pinu.

Pro možnost použití USB rozhraní pouze pro komunikaci (ne pro napájení), lze USB napájení rozpojit pomocí zkratovací propojky.

3.2.4 PCB design

Stejně jako u návrhu měřící karty byl při návrhu ovládací karty použit software ALTIUM Designer. PCB je 6vrstvé s řízenými impedancemi pro diferenciální páry USB a Ethernet fyzických vrstev. Pro určité cesty je zajištěna stejná délka cest pro správnou funkčnost rychlých signálů. Podrobnější informace lze nalézt v příloze diplomové práce.



Obr. 3.7: Návrh PCB ovládací karty - všechny vrstvy bez polygonů

4 Algoritmizace a měřící procedury

Jak již bylo zmíněno v kapitole o systémové koncepci a na obr.1.3. Jednotlivé ovládací karty jsou propojeny pomocí ethernetového rozhraní do switche. Pro správnou funkčnost testeru je zde použit spravovatelný switch, který mimo jiné umožňuje získat informace o své MAC tabulce. MAC tabulku společně s protokolem ARP lze využít pro přiřazení čísla portu ethernetového switche k IP adrese připojených ovládacích karet. Tímto způsobem lze přiřadit jednotlivé ovládací karty k jednotlivým řadám bRC pinů bez nutnosti dodatečné konfigurace či různému kódování řad.

Z pohledu celého systému je hlavním řídicím prvkem PC aplikace. V následující části je popsán Komunikační protokol, který je použit pro komunikaci mezi PC aplikací a ovládacími kartami.

4.1 Komunikační protokol ovládacích karet

Komunikační protokol je založen na ASCII příkazech a je tak relativně čitelný pro člověka. Jednotlivé příkazy protokolu jsou přenášeny pomocí TCP/IP rámců (port 23) v případě ethernetového rozhraní nebo pomocí Virtuálního COM portu v případě USB rozhraní. Pro obě možnosti připojení se protokol neliší.

Jednotlivé příkazy jsou vyhodnocovány po obdržení znaku CR (ASCII 0x0D), LF (ASCII 0x0A) nebo jejich libovolnou kombinací. Odpovědi z ovládacích karet jsou zakončeny znakem LF. Ovládací karta je určena obecně k ovládání více modulů než pouze měřících karet. Nicméně pro účely diplomové práce jsou diskutovány pouze příkazy vztahující se k měřícím kartám. Každý příkaz vztahující se k měřícím kartám obsahuje prefix 80_IO_CARD. Jednotlivé parametry příkazu jsou odděleny mezerou.

Pro každý příkaz odesílá ovládací karta odpovědi začínajícími prefixem "ERROR;" nebo "OK;" (bez uvozovek) podle toho, zdali byl příkaz vyhodnocen úspěšně či nikoliv. Poté následuje textová odpověď na příkaz zakončená znakem LF. Příkazy jsou rozděleny do 3 skupin (SET READ a MEASURE). Skupina SET slouží k nastavení parametrů měření, skupina READ slouží k čtení nastavených parametrů a skupina MEASURE slouží k samotnému měření.

V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé příkazy pomocí následující konvence:

- Znak | značí, že je možné použít pouze jeden z uvedených parametrů.
- Text v uvozovkách značí nastavitelnou hodnotu do příkazu se zadává bez uvozovek a v případě desetinných čísel je použita desetinná tečka.
- Text mezi * je vysvětlen podrobněji v dané sekci

4.1.1 Příkazy SET

SET DAC

Příkaz SET DAC slouží k nastavení napětí na výstupu DAC. Protože se jedná o 12bitový převodník, je možné nastavit pouze hodnoty napětí, které jsou násobky napětí referenčního napětí. Pokud je zadáno napětí, které není násobkem referenčního napětí, je nastaveno nejbližší nižší napětí. Referenční napětí ovládací karty je nastaveno při kalibraci příkazem SET CONFIGURATION VOLTAGE_REFERENCE. Případně je hodnotu referenčního napětí možno získat příkazem READ CONFIGURATION VOLTAGE_READINGS.

- **Obecný tvar:** 80_IO_CARD SET DAC "Napětí ve V"
- **Příklad:**
-> 80_IO_CARD SET DAC 2.75
<- OK;DAC: 3398, discretized Value in Volts:2.74959
- **Interpretace odpovědi:** Tato odpověď byla obdržena při referenčním napětí 3.314400V. Hodnota 3398 je bitová hodnota, která je zapsána do registru DAC a hodnota 2.74959 je odpovídající hodnota napětí.

SET SHIFT_REGISTER

Příkaz SET SHIFT_REGISTER slouží k nastavení výstupní hodnoty posuvného registru či celé skupiny posuvných registrů. Prvním parametrem příkazu je volba skupiny posuvných registrů. Relevantní skupiny posuvných registrů pro diplomovou práci jsou IO1TO40_OUTPUTS, IO41TO80_OUTPUTS, IO1TO40_IMPEDANCES a IO41TO80_IMPEDANCES. Správnou kombinací výstupů těchto posuvných registrů lze nastavit jakýkoliv bRC pin do vysoké či nízké impedance a případně i výstupní hodnotu napětí.

Druhým parametrem je volba způsobu zadání výstupní hodnoty registrů. K dispozici jsou následující možnosti: VALUE a DO_N_SHIFTS. V případě možnosti VALUE následuje decimální hodnota jejíž bitové vyjádření reprezentuje stavy jednotlivých výstupů posuvných registrů. Každý ze skupin registrů má svoji endianitu, kterou lze zjistit z příkazu READ CONFIGURATION SHIFT_REGISTERS (podrobněji popsáno dále). Druhou možností je využití parametru DO_N_SHIFTS, který posune celý obsah posuvného registru o zadaný počet bitů vpravo či vlevo v závislosti na endianitě registru.

- **Obecný tvar:** 80_IO_CARD SET SHIFT_REGISTER *registr* *způsob* "Hodnota"
- ***registr*:** IO1TO40_OUTPUTS, IO41TO80_OUTPUTS, IO1TO40_IMPEDANCES, IO41TO80_IMPEDANCES
- ***způsob*:** VALUE, DO_N_SHIFTS
- **Příklad:**
-> 80_IO_CARD SET SHIFT_REGISTER IO1TO40_IMPEDANCES VALUE 4
<- OK;Setting Register:IO1TO40_IMPEDANCES to:4
-> 80_IO_CARD SET SHIFT_REGISTER IO1TO40_IMPEDANCES DO_N_SHIFTS 4
<- OK;Setting Register:IO1TO40_IMPEDANCES to:16

- **Interpretace odpovědi:** Obecně lze vždy v odpovědi nalézt nový stav registru po provedení požadované operace.

SET CONFIGURATION

Příkazy v této skupině obecně slouží k nastavení stavových hodnot, kalibračních hodnot případně nastavení způsobu měření určitých hodnot. Hodnoty, které potřebují být nastaveny pomocí prefixu SET CONFIGURATION, jsou popsány v sekcích, pro které jsou tyto hodnoty používány. Ukázky vybraných hodnot, které lze nastavit pomocí příkazu SET CONFIGURATION jsou uvedeny například v sekci READ CONFIGURATION.

- **Obecný tvar:** 80_IO_CARD SET CONFIGURATION *Název konfigurace* "Hodnota"
- ***Název konfigurace*:** Popsáno v sekcích, pro které jsou hodnoty používány.
- **Příklad:**
-> 80_IO_CARD SET CONFIGURATION VOLTAGE_REFERENCE 3.3144
<- OK;VOLTAGE_REFERENCE set to:3.314400
- **Interpretace odpovědi:** Obecně lze vždy v odpovědi nalézt potvrzení o nastavení hodnoty.

4.1.2 Příkazy READ

READ MUX

Příkaz READ MUX umožňuje číst hodnoty z multiplexerů umístěných na ovládací kartě. Příkaz se skládá ze 2 parametrů. Prvním parametrem je volba skupiny multiplexerů. Pro ovládací kartu jsou k dispozici 2 skupiny (MUXES_1TO40 a MUXES_41TO80). Druhým parametrem je volba podoby obdržené hodnoty. První možností je přečíst hodnotu celé skupiny multiplexerů za použití parametru ALL. Výsledkem tohoto příkazu je 40bitové číslo v decimální podobě, kde každý bit reprezentuje stav jednoho bRC pinu připojeného ke zvolenému multiplexeru. 40bitová hodnota je vztahena k endianitě multiplexeru, kterou lze zjistit příkazem 80_IO_CARD READ CONFIGURATION MULTIPLEXERS. Druhou možností je zadat přímo číslo pinu, jehož stav chceme zjistit. Výsledkem tohoto příkazu je 1bitová hodnota v decimální podobě.

- **Obecný tvar:** 80_IO_CARD READ MUX *multiplexer* "číslo pinu"|ALL
- ***multiplexer*:** MUXES_1TO40 a MUXES_41TO80
- **Příklad:**
-> 80_IO_CARD READ MUX MUXES_1TO40 ALL
<- OK;Reading MUX MUXES_1TO40, ALL:0
-> 80_IO_CARD READ MUX MUXES_1TO40 1
<- OK;Reading MUX: MUXES_1TO40, address:1, value:0
- **Interpretace odpovědi:** V případě parametru ALL je v odpovědi obsažena 40bitová hodnota v decimální podobě. V případě zadání čísla pinu je v odpovědi obsažena 1bitová hodnota v decimální podobě.

READ SHIFT_REGISTER

Tento příkaz slouží k získání aktuální hodnoty shiftregistru. Jediným parametrem tohoto příkazu je jméno skupiny shiftregistru.

- **Obecný tvar:** 80_IO_CARD READ MUX *register*
- ***register*:** IO1TO40_OUTPUTS, IO41TO80_OUTPUTS, IO1TO40_IMPEDANCES, IO41TO80_IMPEDANCES
- **Příklad:**
-> 80_IO_CARD READ SHIFT_REGISTER IO1TO40_OUTPUTS
<- OK;Reading Register IO1TO40_OUTPUTS, value:1099511627775
- **Interpretace odpovědi:** V odpovědi je obsažena 40bitová hodnota v decimální podobě, kde jednotlivé bity této hodnoty značí aktuální výstupní hodnotu shiftregistru v závislosti na jeho endiannessi. V případě výpadku napájení se může stát, že hodnota shiftregistru nebude odpovídat skutečnému stavu výstupních pinů.

READ CONFIGURATION

Příkaz READ CONFIGURATION slouží k získání konfigurace ovládací karty. Ovládací karta obsahuje poměrně obsáhlé množství konfigurací. V této sekci jsou popsány pouze ty konfigurace, které jsou využívány v diplomové práci. Některé vyčtené tímto příkazem nastavovat pomocí příkazu SET CONFIGURATION.

- **Obecný tvar:** 80_IO_CARD READ CONFIGURATION *konfigurace*
- **Příklad SHIFT_REGISTERS:**
-> 80_IO_CARD READ CONFIGURATION SHIFT_REGISTERS
<- OK;IO1TO40_OUTPUTS:(length:40,endianness:1,value:1099511627775);
IO41TO80_OUTPUTS:(length:40,endianness:0,value:0);
IO1TO40_IMPEDANCES:(length:40,endianness:1,value:1);
IO41TO80_IMPEDANCES:(length:40,endianness:0,value:0);
- **Interpretace odpovědi:** V odpovědi jsou obsaženy veškeré informace o konfiguraci posuvných registrů.
- **Příklad MULTIPLEXERS:**
-> 80_IO_CARD READ CONFIGURATION MULTIPLEXERS
<- OK;MUXES_1TO40:(bits:8,parallel:5,endianness:0,value:0);
MUXES_41TO80:(bits:8,parallel:5,endianness:0,value:0);
- **Interpretace odpovědi:** V odpovědi jsou obsaženy veškeré informace o konfiguraci multiplexerů.
- **Příklad VOLTAGE_READINGS:**
-> 80_IO_CARD READ CONFIGURATION VOLTAGE_READINGS
<- OK;DAC_RAMP_DIRECTION:0;
DAC_RAMP_MIN_VALUE_VALUE:0;
DAC_RAMP_MAX_VALUE_VALUE:4095;
DAC_RAMP_STEP:1;
DAC_RAMP_DELAY_2500_NS:2;

```
VOLTAGE_READ_AVERAGES:2;  
VOLTAGE_REFERENCE:3.314400;
```

- **Interpretace odpovědi:** V odpovědi jsou obsaženy veškeré nastavitelné parametry, které se využívají při měření napětí na jednotlivých pinech příkazy MEASURE.

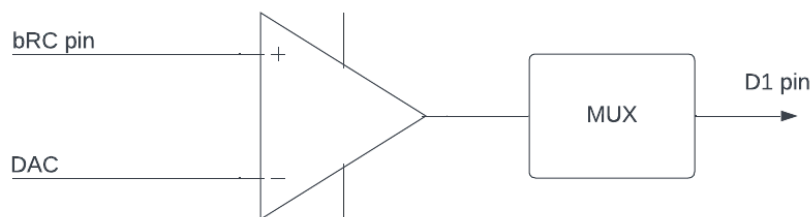
4.1.3 Příkazy MEASURE

MEASURE VOLTAGE

Příkaz MEASURE VOLTAGE slouží k měření napětí na určitém bRC pinu či pinech. V případě použití parametru ALL je změřeno napětí na všech 80 pinech měřicí karty. V případě, že je místo parametru ALL zadáno číslo tak příkaz vrátí hodnotu napětí na daném pinu.

- **Obecný tvar:** 80_IO_CARD MEASURE VOLTAGE ALL|"číslo pinu"
- **Příklad ALL:**
-> 80_IO_CARD MEASURE VOLTAGE ALL
<- OK;2.965643;2.860450;2.431585;-1.000000;0.922465;.....;-1.00000;-1.000000;
- **Interpretace odpovědi:** V odpovědi jsou obsaženy hodnoty napětí na všech 80 pinech odděleny znakem středníku (;). "...."v příkladu značí, že výpis byl zkrácen. Hodnota -1 značí, že napětí je mimo rozsah měřicí karty.
- **Příklad číslo pinu:**
-> 80_IO_CARD MEASURE VOLTAGE 3 <- OK;Voltage:2.128143
- **Interpretace odpovědi:** V odpovědi je obsaženo napětí na pinu 3 (číslováno od 0). V případě, že napětí je mimo rozsah měřicí karty, tak příkaz vrátí hodnotu -1.

Proces měření napětí lze konfigurovat pomocí příkazů ze skupiny SET CONFIGURATION. Následující část popisuje vliv vybraných parametrů. Měření napětí probíhá pomocí porovnávání nastavené hodnoty D/A převodníku s měřenou hodnotou napětí na bRC pinu. V reálném zapojení je tohoto dosaženo pomocí komparátoru. Výstup komparátoru je z důvodu velkého množství pinů multiplexován na digitální vstup mikrokontroléru (Obr.4.1). Měření popsána v

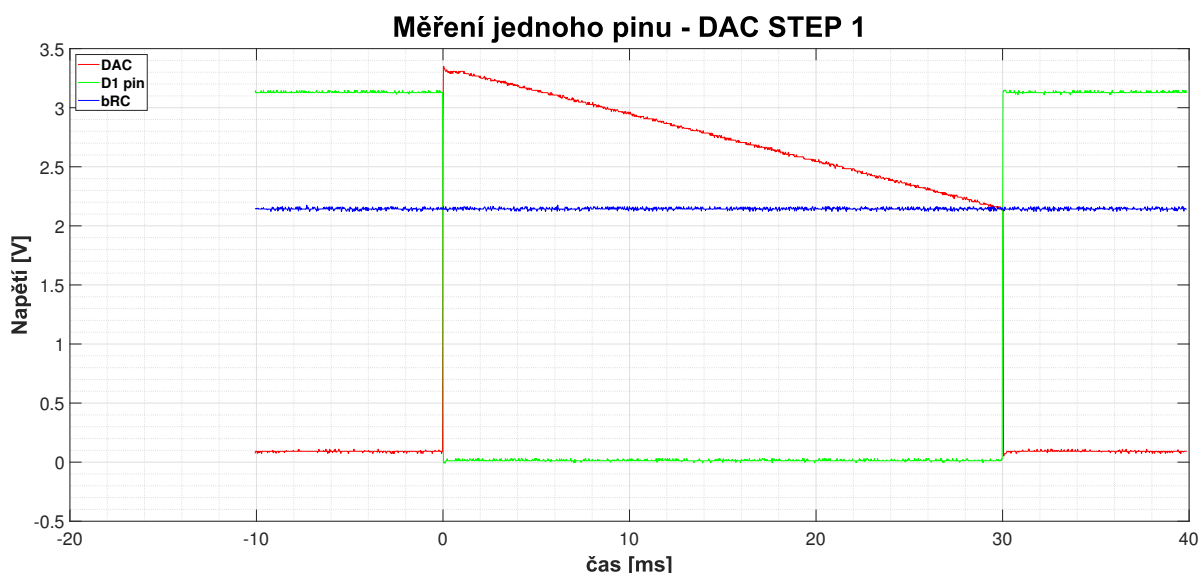


Obr. 4.1: Zjednodušené schéma zapojení pro měření napětí na bRC pinu

této sekci byla provedena na reálné měřicí kartě, kde výstup multiplexeru pro měřený bRC pin je přiveden na pin D1 ovládací karty. Měření byla provedena pomocí osciloskopu KEYSIGHT DSOX1204A a digitálního 6.5místního multimetru GWINSTEK GDM-9061. Kde jednotlivé průběhy napětí jsou následně zpracovány pomocí programu MATLAB.

Na obrázku 4.2 je zobrazen průběh napětí jednotlivých uzlů z obr. 4.1. Modře je znázorněna měřená hodnota napětí na bRC pinu, která má podle multimetru hodnotu 2.1475V, přičemž příkaz vrátil hodnotu napětí 2.1275V. Tato hodnota je závislá na nastavení napěťové reference příkazem 80_PIN_CARD SET CONFIGURATION VOLTAGE_REFERENCE.

Červeně je zobrazena hodnota napětí na výstupu D/A převodníku a zeleně je znázorněn výstup multiplexeru. Každá z následujících diskutovaných konfigurací v této sekci začíná prefixem 80_PIN_CARD SET CONFIGURATION, přičemž je tento prefix vynecháván.

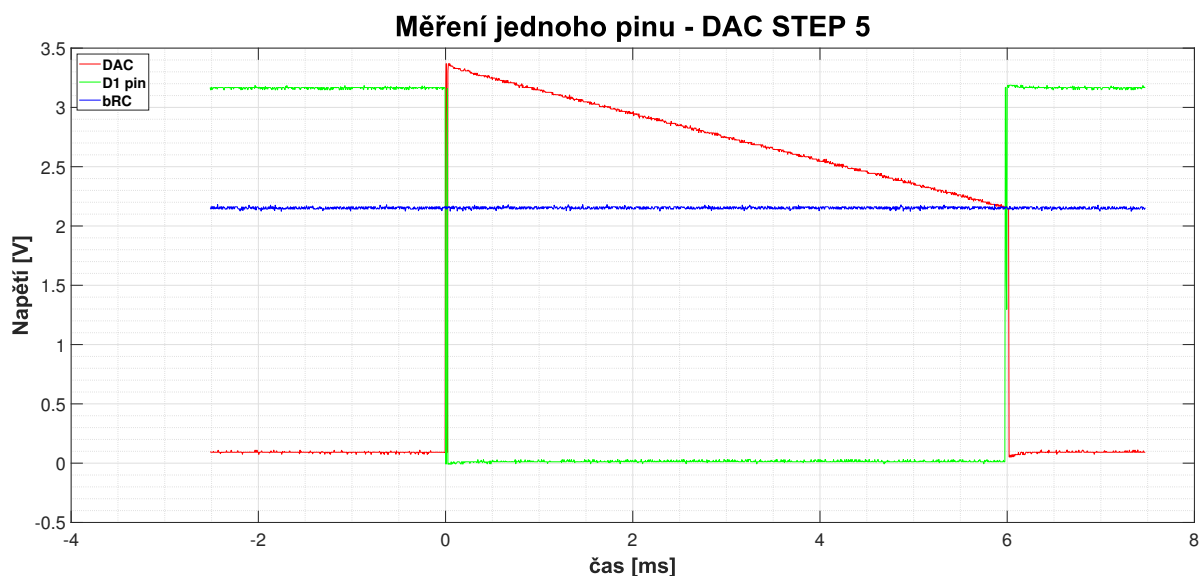


Obr. 4.2: Časové průběhy napětí - měření napětí na bRC pinu (DAC_RAMP = 1)

Měření napětí probíhá tak, že se na D/A převodníku nastavují sestupně (případně vstupně v závislosti na konfiguraci DAC_RAMP_DIRECTION) hodnoty napětí. Při každém kroku se kontroluje, zda nedošlo k překlopení napěťové úrovně na výstupu komparátoru (respektive multiplexeru - D1 pin).

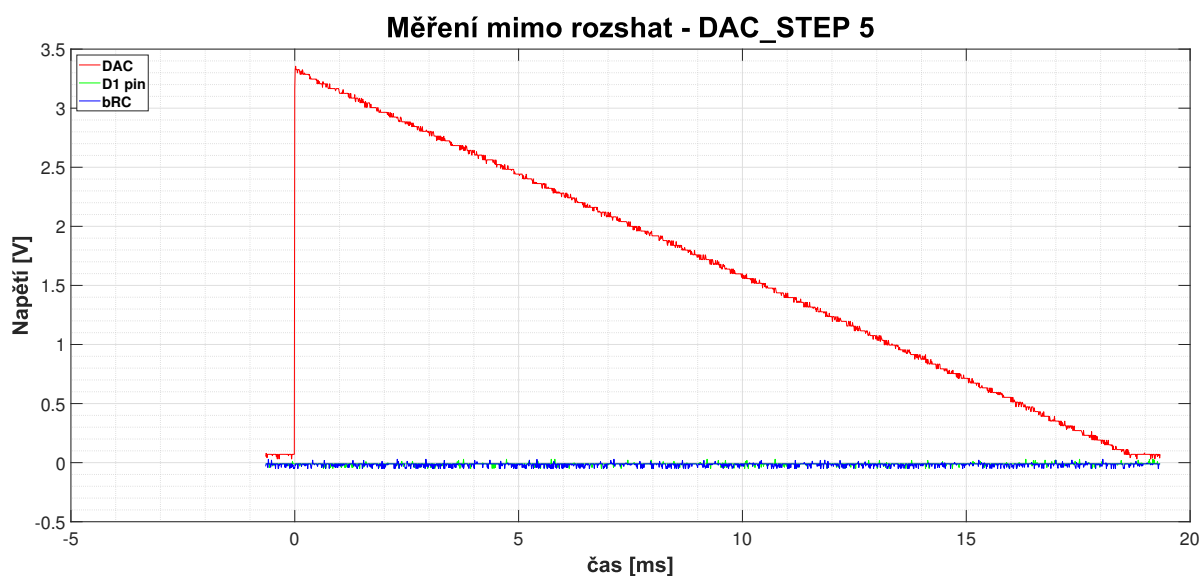
Detekce překlopení probíhá tak, že se vyčítá N-krát (lze nastavit konfigurací VOLTAGE_READ_AVERAGES) logická hodnota na pinu D1. Pokud je alespoň polovina z takto vyčtených hodnot opačné logické úrovně než logická úroveň pinu D1 na počátku měření, tak se přepočte aktuálně nastavená hodnota registru D/A převodníku na napětí a toto napětí se odešle do PC aplikace. Detekce překlopení komparátoru je patrná na obrázku 4.2 přibližně v čase 30 ms.

Další nastavitelnou konfigurací je DAC_RAMP_STEP, která udává bitový krok rampy D/A převodníku. Takto lze měření urychlit za cenu snížení přesnosti. Na obrázku 4.3 je zobrazen průběh napětí při nastavení DAC_RAMP_STEP = 5. Touto změnou bylo dosaženo změření stejného napětí jako v předchozím bodě přibližně za 6 ms.



Obr. 4.3: Časové průběhy napětí - měření napětí na bRC pinu (DAC_RAMP = 5)

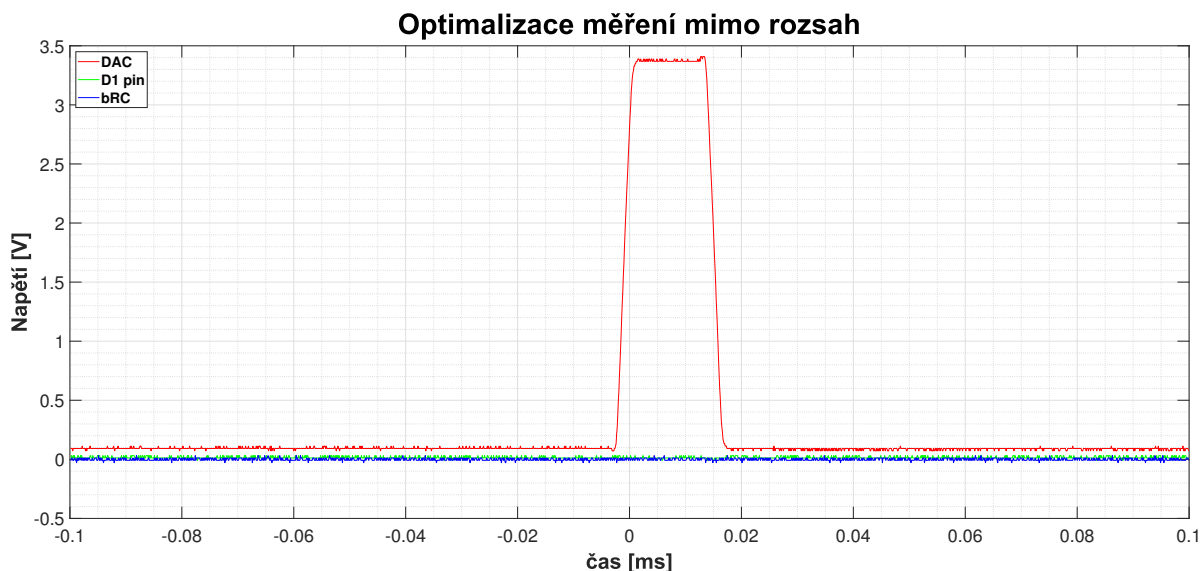
Z obrázků 4.2 a 4.3 lze dedukovat, že celkový čas je závislý na měřeném napětí. V případě, že je zvolena sestupná rampa a měřené napětí je nulové budou průběhy vypadat následovně:



Obr. 4.4: Časové průběhy napětí - měření nízkého napětí na bRC pinu (DAC_RAMP = 5)

Na obrázku 4.4 lze pozorovat, že pokud napětí je příliš nízké, tak se výstup komparátoru nikdy nepřeklopí a příkaz vrátí v odpovědi hodnotu -1. To je způsobeno tím, že D/A převodník není schopen generovat nulové napětí. Při nastavení registru D/A převodníku na 0 je na výstupu převodníku napětí přibližně 70mV. Lze tak měřit pouze napětí, které je vyšší než tato dolní mez. Horní mez měření není omezena, protože napájecí napětí bRC pinů je nižší než napětí, které je D/A převodník schopen generovat. Zároveň obrázek 4.4 demonstuje přibližnou maximální dobu měření (19ms pro DAC_RAMP_STEP = 5 a 95ms pro DAC_RAMP_STEP = 1).

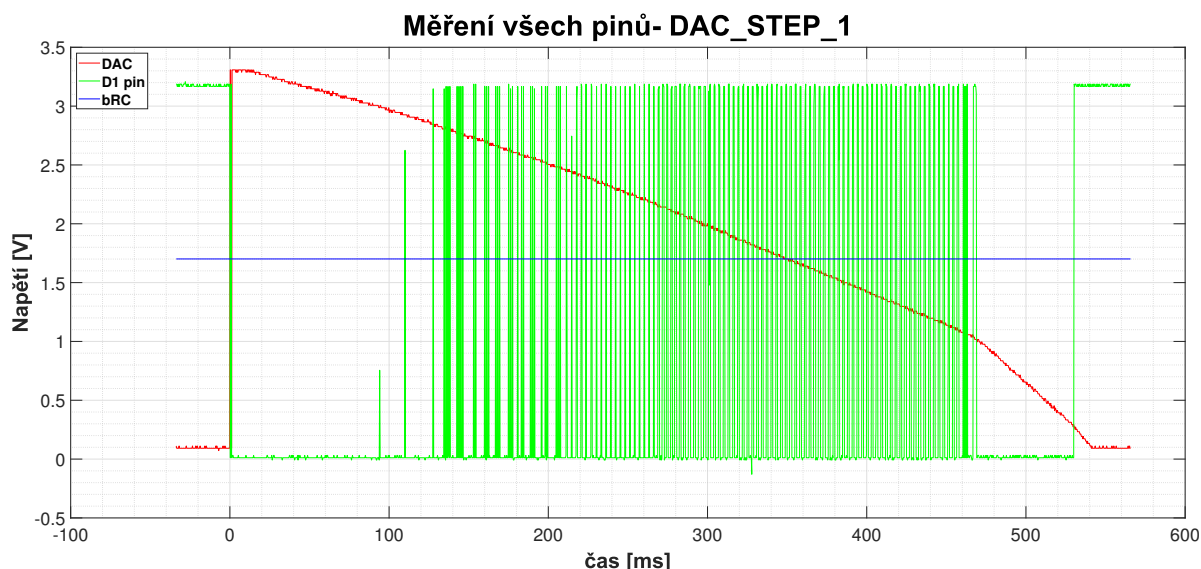
Vzhledem k charakteru propojení bRC pinů, kde je většina pinů buď propojena tvrdým zkratem (napětí na bRC pinu blízké 3V) nebo rozpojená (napětí na pinu blízké 0V), vzniká potřeba zkrátit čas měření napětí mimo rozsah D/A převodníku. Z tohoto důvodu je před začátkem měření nejprve změřena logická hodnota výstupu multiplexeru (D1 pin) při nejnižší a nejvyšší napěťové hodnotě D/A převodníku. Pokud je výstup multiplexeru v obou případech stejný, tak se předpokládá, že je hodnota nižší než dolní mez D/A převodníku a příkaz vrátí hodnotu -1. Při reálném provozu, tak nemůže nastat situace z obr. 4.4. Měření pak probíhá podle obr. 4.5. Optimalizované měření pak v případě, že je měřená hodnota mimo rozsah, trvá pouze přibližně 0.02 ms nezávisle na použitých konfiguracích.



Obr. 4.5: Časové průběhy napětí - měření nízkého napětí na bRC pinu optimalizace

Další konfigurace, které lze využít jsou `DAC_RAMP_MAX_VALUE` a `DAC_RAMP_MIN_VALUE`, které určují dolní a horní mez rampy D/A převodníku. Tímto lze zkrátit čas měření za cenu nižšího rozsahu. Zároveň je na tyto mezní hodnoty aplikována stejná metoda jako je popsána v předchozím odstavci. Nicméně nyní dolní mez D/A převodníku nepředstavuje hardwarovou dolní mez měření, nýbrž mez nastavenou příkazem `DAC_RAMP_MIN_VALUE`. V případě využívání `DAC_RAMP_MAX_VALUE` může dojít k měření hodnoty napětí mimo tuto horní mez. Protože pro funkčnost měřicí karty není nutné rozlišovat, zda měřená hodnota je nad horní nebo pod dolní mezí, tak v obou případech vrací příkaz hodnotu -1.

Prozatím bylo diskutováno pouze měření napětí na jednom pinu. V případě příkazu `80_IO_CARD MEASURE VOLTAGE ALL` jsou změřena napětí na všech bRC pinech současně během jedné rampy D/A převodníku (Obr. 4.6 na další straně).



Obr. 4.6: Časové průběhy napětí - měření napětí na všech pinech současně

Měření všech pinů probíhá obdobně jako u měření jednotlivých pinů. Nejprve se u všech pinů zkontroluje, zda je měřené napětí v mezích. Následuje D/A rampa, kde se při každém kroku kontroluje u každého pinu, zda nedošlo k překlopení komparátoru. Pokud dojde k překlopení komparátoru, tak se uloží aktuální hodnota D/A převodníku do paměti mikrokontroléru. Pokud je pro daný pin již v paměti uložená nějaká hodnota, tak při dalším kroku D/A rampy již nedochází ke kontrole překlopení komparátoru. To je patrné z obr. 4.6, kde není rampa D/A převodníku lineární a postupně se měření urychluje s počtem již změřených pinů.

Zelený průběh napětí na D1 pinu vypadá takto, protože se jedná o výstup multiplexeru. Multiplexery jsou řízeny pomocí společné adresace, takže se v průběhu měření, opakovaně a nechtěně, přepíná i výstup již změřeného pinu. Teoreticky by se dalo předpokládat, že takováto aktivita na všech výstupních pinech multiplexerů bude způsobovat rušení, nicméně při dosavadním měření se tato skutečnost nijak výrazně neprojevila, a tak je ignorována. Případně by rušení šlo do jisté míry omezit správnou posloupností měření pinů.

MEASURE ADC

Tento příkaz slouží k změření aktuální hodnoty A/D převodníku. Příkaz vrací hodnotu již přepočtenou na napětí, toto napětí je vztaženo k referenčnímu napětí, které lze nastavit příkazem `80_IO_CARD SET CONFIGURATION VOLTAGE_REFERENCE`

- **Obecný tvar:** `80_IO_CARD MEASURE ADC`

- **Příklad:**

```
-> 80_IO_CARD MEASURE ADC
<- OK;ADC, value:3.004
```

- **Interpretace odpovědi:** Odpověď obsahuje změřenou hodnotu A/D převodníku vztaženou k referenčnímu napětí.

4.2 Režimy měření

V části o návrhu měřicí karty byly stručně zmíněny 2 módy měření (PASS/FAIL a měření přesné hodnoty).

4.2.1 Mód PASS/FAIL

V sekci (Volba velikosti odporu děliče Rout) byly zmíněny dva módy, ve kterých tester funguje. Prvním z módů je PASS/FAIL mód. V tomto módu používá obsluha externí sondu připojenou k pinu č. 80 měřicí karty připojené k ovládací kartě č.1. Obsluha je vyzvána k připojení externí sondy k určité testovací jehle (probe). Tester následně otestuje, které propojení mezi bRC piny a sondou splňuje požadavky na mezní hodnotu odporu cesty. Výsledkem tohoto testu tak není přesná hodnota odporu měřené cesty, ale pouze logická hodnota v závislosti, zda je odpor měřené cesty nižší než určitá zvolená mez.

Naměřená data jsou odesílána do PC aplikace, která výsledky porovnává s konfiguračními soubory a v závislosti na výsledku informuje obsluhu o dalším postupu. Informování obsluhy je realizováno akusticky (obdobně jako continuity test u multimetru) a vizuálně na displeji. Celý systém tak musí provést měření, co nejrychleji, aby aplikace byla schopna informovat obsluhu v reálném čase s co nejnižší odezvou.

Reálně je měření prováděno tak, že se nejprve nastaví D/A převodník na hodnotu 2.9V. Dále se nastaví všechny piny do vysoké impedance. Následně je na pinu č.80 (externí sonda) nastavena vysoká logická úroveň (3V). Dalším krokem je vyčtení logických hodnot pinů na všech připojených kartách. V případě, že je pin propojen s externí sondou, tak nezávisle na jeho odporu (do stovek k Ω) bude hodnota napětí na pinu vyšší než hodnota D/A převodníku a pin bude logické úrovně 1. V případě, že pin není propojen s externí sondou, tak bude mít hodnotu napětí na pinu nižší než je hodnota D/A převodníku, a pin bude logické úrovně 0. Zvolená hodnota D/A převodníku na 2.9V je záměrně zvolena takto vysoká, protože napětí na pinu ve vysoké úrovni bez přivedení externího signálu není definováno, nicméně při dlouhodobém měření nikdy nepřesáhlo hodnotu vyšší než 2V (kapitola 6).

Tímto lze dosáhnout proměření všech bRC pinů s externí sondou, avšak bez zvolení mezní hodnoty odporu cesty. Důvodem, proč se nejprve nastavují všechny piny do vysoké impedance je ten, že by při vysokém počtu propojených pinů mohl protékat pinem externí sondy vysoký proud a mohlo by tak dojít k poškození zařízení. Ze získané informace o propojení pinů s externí sondou se následně postupně nastavují skupiny pinů do nízké impedance (obvykle lze změřit všechny piny zároveň). Dále se nastaví D/A převodník tak, aby hodnota výstupu odpovídala mezní hodnotě požadovaného odporu cesty a vyčtou se logické hodnoty všech pinů. Nyní je však výsledkem této operace zmapování všech propojení s externí sondou, které splňují požadavky na mezní hodnotu odporu cesty.

Protože se při testu vyčítají pouze logické hodnoty pinů (s výjimkou 2 hodnot nastavení D/A převodníku), tak je možné tento test provádět mnohem rychleji než měření přesné hodnoty odporu. Protože je tento test závislý na rychlosti PC aplikace a propustnosti ethernetové sítě, nelze snadno specifikovat jeho celkový čas. Obvykle se však stihne vše provést do 30 ms.

4.2.2 Mód měření přesné hodnoty odporu

Tento mód se oproti PASS/FAIL módu liší tím, že zde nejsou kladeny vysoké nároky na čas měření, protože proces je plně automatizován a měření probíhá pouze mezi bRC piny. Výsledkem tohoto měření je pak přesná hodnota odporu propojených pinů. Tento mód lze využít i pro měření pomocí externí sondy. V tomto případě se aplikuje obdobný postup jako v případě PASS/FAIL módu s výjimkou posledního kroku, kde se místo logických úrovní pinů vyčte přesná hodnota napětí pomocí příkazu `80_IO_CARD MEASURE VOLTAGE ALL` na všech ovládacích kartách. Hodnota napětí je pak v PC aplikaci přepočítána na hodnotu odporu. Doba trvání takového měření je časově proměnná z důvodu diskutovaných v sekci 4.1.3.

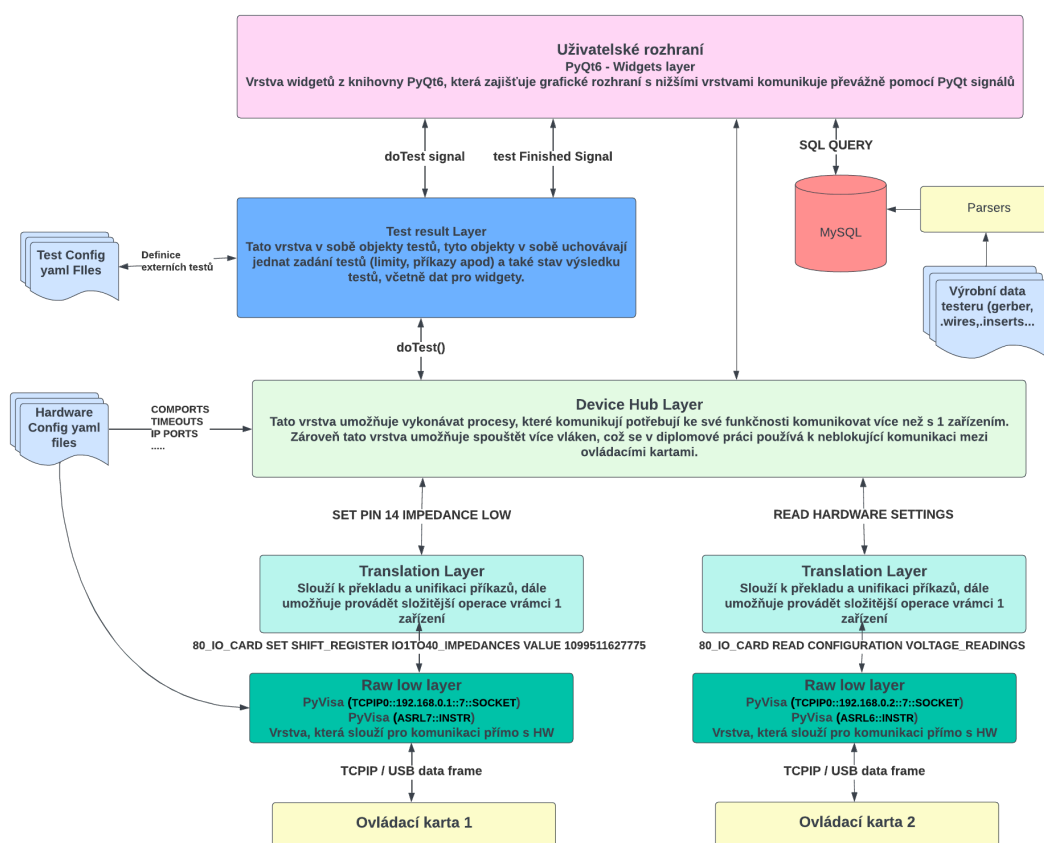
5 PC aplikace

Pro účely testeru byla vyvinuta PC aplikace založená na programovacím jazyku python. Tato aplikace umožňuje nejen komunikovat s testerem a provádět měření, ale také převádět vstupní CAD, CAM, gerber a různé textové konfigurační soubory do vhodného formátu pro účely testeru.

5.1 Principy funkce PC aplikace

Obrázek 5.1 uvádí velmi zjednodušený a neúplný náhled na strukturu PC aplikace. PC aplikace je postavena na platformě "TEST API", která je vyvíjena autorem diplomové práce. Platforma je poměrně obsáhlá a její popis by přesáhl rámec této práce. Z tohoto důvodu bude popsána pouze část platformy, která je pro diplomovou práci nejdůležitější.

Aplikace je rozdělena do několika vrstev, každá z vrstev by měla plnit svoji specifickou úlohu a být jakýmsi nezávislým blokem. PC aplikace se snaží toto "pravidlo" dodržovat nicméně ne všechny bloky jsou kompletně nezávislé. Použité názvy vrstev nevychází ze žádného standardu jako např. ISO/OSI apod.



Obr. 5.1: PC aplikace - top level diagram

5.2 PC aplikace - Raw low layer

Nejnižší vrstvou je tzv. Raw low layer. Tato vrstva složí přímo ke komunikaci se zařízením. Převádí tak příkazy z kapitoly 4 do TCP/IP, popř. USB rámců. V případě diplomové práce tuto vrstvu pro ovládací karty zajišťuje knihovna pyVisa, která je založena na knihovně VISA od firmy National Instruments. Tato knihovna umožňuje pohodlně komunikovat se zařízením přes různé fyzické vrstvy (TCP/IP, USB, RS232, GPIB) a to pomocí jednotné API.

5.3 PC aplikace - Translation Layer

Druhou nejnižší vrstvou je tzv. Translation Layer (Překládací vrstva). Úkolem této vrstvy by mělo být poskytnout sofistikovanější funkce, které se skládají z více příkazů, kterou nabízí komunikační protokol ovládaného zařízení. Zároveň by tato vrstva měla co nejvíce sjednocovat příkazy pro přístroje stejného druhu od různých výrobců. Tato funkce je však pro diplomovou práci zanedbatelná, protože všechny ovládací karty používají stejný komunikační protokol.

Jako příklad funkce této vrstvy uveďme příkaz pro nastavení výstupní impedance pinu č.14 do nízké impedance, přičemž ostatní piny mají zůstat nezměněny. Vyšší vrstvy předají příkaz v podobě SET PIN 14 IMPEDANCE LOW. Překládací vrstva nejprve zjistí aktuální hodnotu registru, který určuje impedance jednotlivých pinů. Dále v závislosti na endianness změni hodnotu registru a odešle příkaz, který nastaví novou hodnotu registru pomocí příkazu `80_IO_CAR SET SHIFT_REGISTER IO1TO40_IMPEDANCES VALUE "nová hodnota"`.

5.4 PC aplikace - Device Hub Layer

Device Hub Layer má za úkol vykonávat příkazy, které ke své funkci potřebují více než pouze jedno zařízení. Typickým případem by bylo nastavení výstupního napětí napájecího zdroje a následné ověření napětí multimetrem. V diplomové práci byla tato vrstva např. využita k automatizovanému měření průběhů v kapitole 4.

Druhým důležitým úkolem této vrstvy je rozřazovat požadované testy do vláken programu a předcházet tak zamrzání. Z tohoto důvodu by veškerá komunikace od vyšších vrstev měla probíhat přes tuto vrstvu. Tato funkcionalita je vhodná pro diplomovou práci, protože umožňuje zasílat příkazy do několika ovládacích karet zároveň a urychlit tak měření.

5.5 PC aplikace - Test Result Layer

Test Result layer je více než vrstvou spíše objektem. Není tak striktně ohraničený a z historických důvodů má přesah do některých z nejnižších vrstev. Do tohoto objektu jsou ukládány výsledky jednotlivých testů (příkazů) a zároveň jsou tyto výsledky vyhodnocovány podle určitých kritérií. Test Result Layer se nejčastěji uplatní v kombinaci s konfiguračním souborem `tests.yaml`, který není kompilován, má textovou podobu a dokonce program lze kompilovat i v případě, že tento soubor neexistuje. Následující obrázek je ukázkou výstřížku z konfiguračního souboru `tests.yaml`.

5.5.1 konfigurační soubor tests.yaml

```
WIDGETS:
- {TEST: "WIDGET_TEST", WIDGET: "GRAPH", X_LABEL: "Voltage [V]", Y_LEFT_LABEL: "CURRENT [mA]", TITLE: "VA characteristic", NUMBER_OF_X_TICKS: 8, NUMBER_OF_Y_TICKS: 10, MARKER_Y1_LEFT: "xn"}
- {TEST: "WIDGET_TEST2", WIDGET: "GRAPH", X_LABEL: "Voltage [V]", Y_LEFT_LABEL: "CURRENT [mA]", TITLE: "VA characteristic", NUMBER_OF_X_TICKS: 25, NUMBER_OF_Y_TICKS: 15 }
- {TEST: "RAMP_UP", WIDGET: "GRAPH", X_LABEL: "Voltage [V]", Y_LEFT_LABEL: "CURRENT [mA]", TITLE: "VA characteristic", NUMBER_OF_X_TICKS: 5 }
- {TEST: "CMDLINE_TEST", WIDGET: "GRAPH", X_LABEL: "time", Y_LEFT_LABEL: "samples", TITLE: "commandline output", NUMBER_OF_X_TICKS: 5 }
- {TEST: "RAMP_DOWN", WIDGET: "DEFAULT", TITLE: "Was test succesfull?"}

SETUP_POWER_SUPPLY:
- {COMMAND: "SIGLENTPSU CH1 SET VOLTAGE 3.25", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: ""}
- {COMMAND: "SIGLENTPSU CH1 SET CURRENT 0.35", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: ""}
- {COMMAND: "SIGLENTPSU CH2 SET VOLTAGE 7", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: ""}
- {COMMAND: "SIGLENTPSU CH2 SET CURRENT 0.7", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: ""}
- {COMMAND: "SIGLENTPSU CH1 SET OUTPUT ON", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: ""}
- {COMMAND: "SIGLENTPSU CH2 SET OUTPUT ON", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: ""}

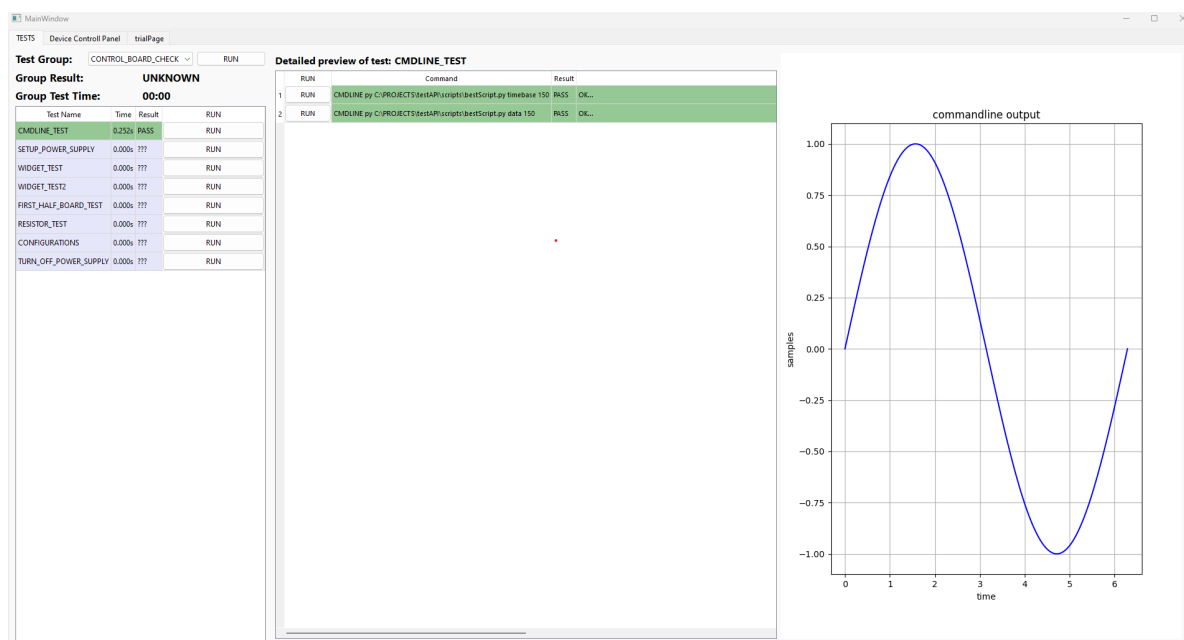
CONFIGURATIONS:
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD READ HARDWARE_SETTINGS", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "Configuration loaded succesfully"}
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD SET REGISTER IOIT040_OUTPUTS VALUE 0x0", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "||OK||"}
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD SET REGISTER IOIT040_OUTPUTS VALUE 0xFFFFFFFF", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "||OK||"}
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD SET REGISTER IOIT040_IMPEDANCES VALUE 0x0", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "||OK||"}
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD SET REGISTER IOIT040_IMPEDANCES VALUE 0xFFFFFFFF", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "||OK||"}
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD SET PIN 14 IMPEDANCE HIGH", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "||OK||"}
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD SET PIN 14 IMPEDANCE LOW", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "||OK||"}
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD SET PIN 14 OUTPUT HIGH", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "||OK||"}
- {COMMAND: "CTRL_BOARD 80PINOCARD SET PIN 14 OUTPUT LOW", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "||OK||"}

CMDLINE_TEST:
- {COMMAND: "CMDLINE py C:\\PROJECTS\\testAPI\\scripts\\bestScript.py timebase 150", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "", WIDGET_INFO: "X_AXIS"}
- {COMMAND: "CMDLINE py C:\\PROJECTS\\testAPI\\scripts\\bestScript.py data 150", LOWER_LIM: "", UPPER_LIM: "", EXPECTED: "", WIDGET_INFO: "Y1_LEFT_AXIS"}
```

Obr. 5.2: PC aplikace - tests.yaml ukázka

Podrobný popis konfiguračního souboru test.yaml a všech jeho funkcí by byl příliš zdlouhavý. Obecně jsou podporovány všechny příkazy, které nabízí Device Hub Vrstva. Hlavní myšlenkou je demonstrovat, že pomocí tohoto souboru, lze dynamicky definovat testy a jejich widgety (způsob zobrazení). To, jaký widget bude použit pro zvolený test lze měnit v části "WIDGETS" tests.yaml souboru. Například pro test "CMDLINE_TEST" je zvolen widget "GRAPH", což v PC aplikaci nastaví zobrazení v podobě grafu. Následně v červeně označené části (Obr. 5.2) je definováno, která data budou zobrazena na určitých osách grafu.

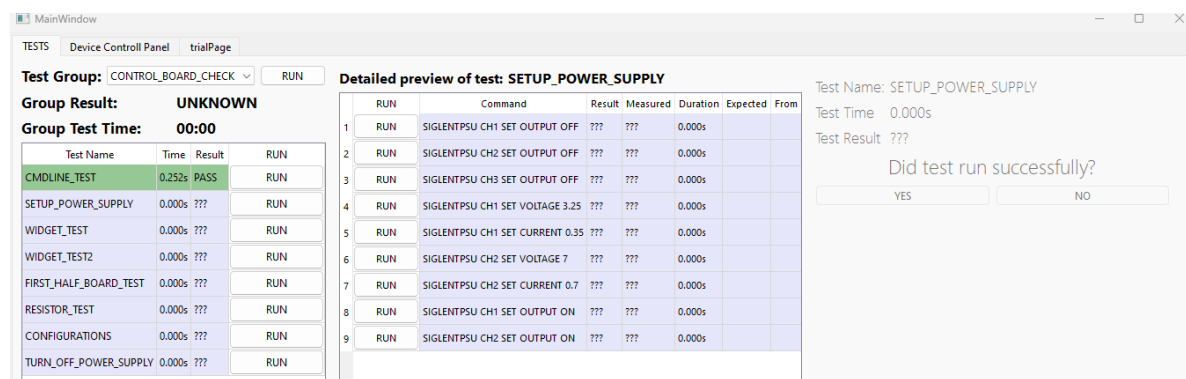
Po spuštění testu lze v PC aplikaci zobrazit výsledky v následující podobě.



Obr. 5.3: PC aplikace - tests.yaml ukázka výsledku testů - graf

Pokud by byl spuštěn například test SETUP_POWER_SUPPLY, kterým mimo jiné byl nastavován laboratorní zdroj SIGLENT SPD3303X-E, pomocí kterého byla deska napájena v

době měření všech výsledků zobrazených v diplomové práci. PC aplikace zobrazí v pravé části výchozí widget, protože v konfiguračním souboru nebyl pro tento test žádný widget definován.



Obr. 5.4: PC aplikace - tests.yaml ukázka výsledku testů - default

5.5.2 konfigurační soubor hardwareConfig.yaml

Dalším konfiguračním souborem, který je v diplomové práci použit je soubor hardwareConfig.yaml. Tento soubor je oproti předchozího souboru tests.yaml nutný k běhu programu. Nicméně jeho obsah je možné měnit i po kompilaci. Následující obrázek je ukázkou výstřižku z tohoto souboru.

```
CONTROL_BOARD:
  DEVICENAME : "CONTROL BOARD"
  COMMUNICATION: "VISA"
  #COMMUNICATION: "VIRTUAL"
  VISASTRING : 'TCPIP0::192.168.0.2::7::SOCKET'
  #BAUDRATE: 115200 #Irelevant for TCIP IP..
  TIMEOUT: "30000"
  QUERYDELAY: 0.01
  PREFIXFORTESTS: "CTRL_BOARD"
  SELF_CHECK_PERIOD: 5000, #provided by main function only
  SELF_CHECK_COMMAND: "*IDN?"
  SELF_CHECK_RESPONSE: "OK;STM32 super board"
  READTERMINATION: "\n"
  WRITETERMINATION: "\n"
  CONNECTATSTARTUP: True
  NEEDSTOBECONNECTED: False

SIGLENTSPD3303XE:
  DEVICENAME : "SIGLENTPSU"
  COMMUNICATION: "VISA"
  #COMMUNICATION: "VIRTUAL"
  VISASTRING : 'TCPIP0::192.168.0.3::inst0::INSTR'
  #VISASTRING : 'ASRL9::INSTR'
  BAUDRATE: 115200 #Irelevant for TCIP IP..
  TIMEOUT: "1000"
  QUERYDELAY: 0.01
  PREFIXFORTESTS: "SIGLENTPSU"
  SELF_CHECK_PERIOD: 5000, #provided by main function only
  SELF_CHECK_COMMAND: "SYSTem:ERror?"
  SELF_CHECK_RESPONSE: "0 No Error"
  READTERMINATION: "\n"
  WRITETERMINATION: "\n"
  CONNECTATSTARTUP: True
  NEEDSTOBECONNECTED: False
```

Obr. 5.5: PC aplikace - hardwareConfig.yaml

Na výstřižku jsou zobrazeny konfigurace pro 2 zařízení, které používají pro Raw low layer právě komunikaci pomocí VISA knihoven. Jsou zde nastaveny nejdůležitější parametry, které jsou potřebné pro komunikaci s daným zařízením. Zajímavou možností je zvolit nastavení položky "COMMUNICATION" z VISA na VIRTUAL. Tímto lze aplikaci používat i v případě, že není k dispozici daný hardware. Veškeré testy pro dané zařízení pak probíhají v tzv. "virtuálním módu". Pro některá zařízení je opravdu emulován virtuální hardware a pro některá (včetně ovládacích karet z diplomové práce) jsou pouze navracovány hodnoty "VIRTUAL".

Důležitou položkou je parametr PREFIXFORTESTS, který určuje, jaký prefix bude použit pro testy, které jsou definovány v tests.yaml. Například pro zmíněný test SETUP_POWER_SUPPLY z obrázku 5.2 je prefix "SIGLENTPSU". Každý test začínající na tento prefix je pak přesměrován do příslušného hardwaru. V diplomové práci je využito těchto prefixů pro rozlišení jednotlivých ovládacích karet.

5.6 PC aplikace - MySql databáze

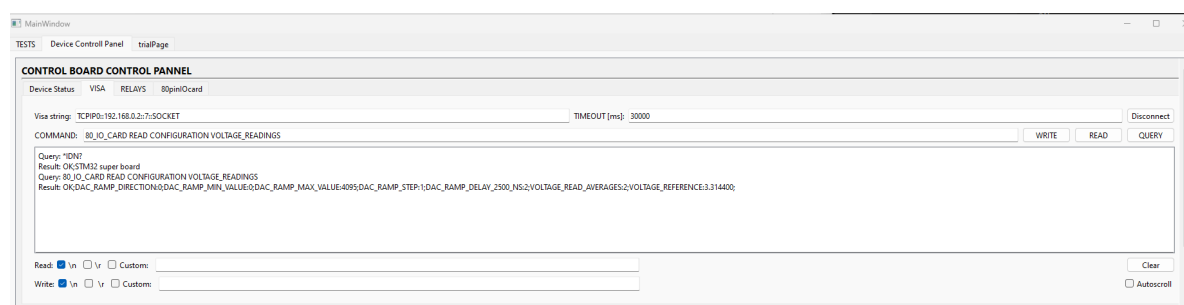
PC aplikace používá k ukládání data MySql databázi. Do databáze jsou ukládány jednak výsledky testů, tak databáze slouží jako sjednocovací prvek pro výrobní data ICT testerů od různých výrobců. Výrobní data jsou převáděna pomocí různých parsovacích podprogramů do jednotné struktury databáze a zbylé části PC aplikace jsou pak nezávislé na formátu výrobních dat. Tato struktura umožňuje jednoduše přidávat podporu pro další výrobce, pouze tvorbou nových parsovacích podprogramů.

5.7 PC aplikace - Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní PC aplikace je založeno na knihovně PyQt6. Tato knihovna je verzí knihovny Qt (originálně C++) pro jazyk Python. PyQt6 umožňuje vytvářet různé widgety, které jsou mezi sebou propojovány pomocí signálů a slotů. Pro ovládací kartu bylo vytvořeno několik widgetů. Všechny widgety diskutované v následujících sekcích jsou dostupné pro každou z připojených ovládacích karet.

5.7.1 Widget - Visa terminal

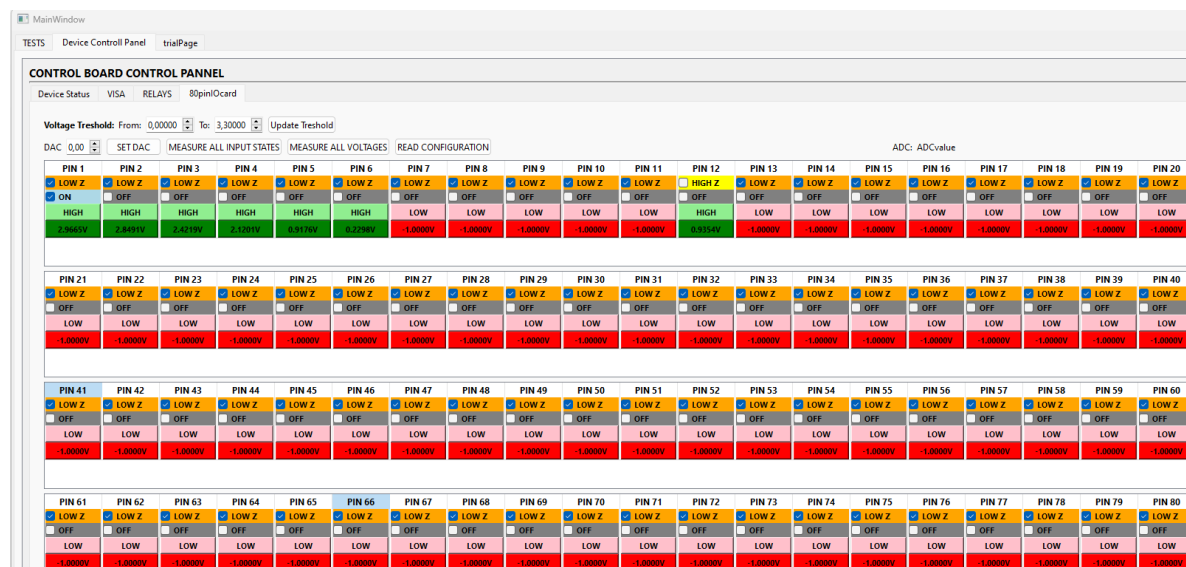
Prvním widgetem je VISA terminal, kde lze napřímo odesílat ovládací kartě příkazy z kapitoly č.4.



Obr. 5.6: PC aplikace - widget: VISA terminal

5.7.2 Widget - Ovládání karty

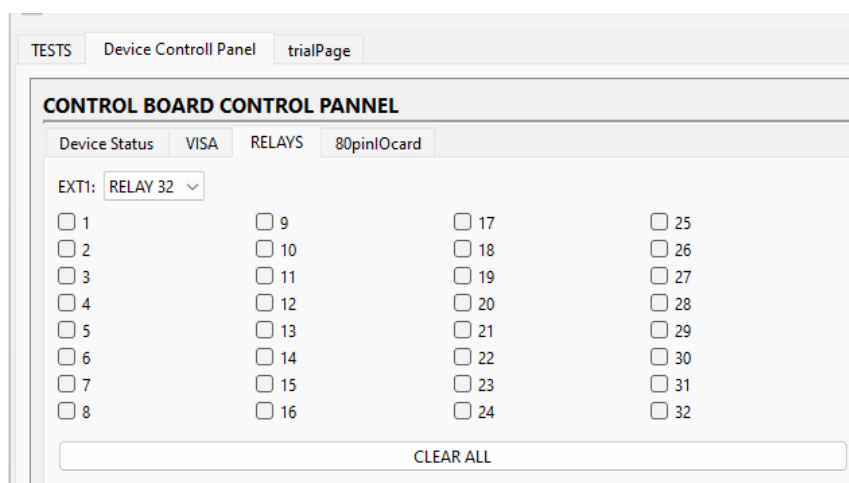
Další widget umožňuje pomocí grafického rozhraní nastavovat nejdůležitější funkce ovládacích karet. Na obrázku 5.7 lze vidět ovládací panel, kde se pro každý pin dá nastavit jeho výstup či impedance. Dále lze měřit napětí na jednotlivých pinech, získat aktuální logickou úroveň na pinu, Nastavovat D/A převodník, vyčítat aktuální konfiguraci ovládací karty apod.



Obr. 5.7: PC aplikace - widget: Ovládání karty

5.7.3 Widget - Ovládání Relé

Každá z ovládacích karet má k dispozici tzv. EXT porty, do kterých lze připojovat i jiné moduly než měřící karty diskutované v této diplomové práci. Jedním z modulů, který je však využit je modul 32 relé karty připojený do EXT1 portu první ovládací karty. Tato relé karta slouží k ovládání mechanických částí testeru jako jsou například vzduchové válce pro kontaktování apod. Na obrázku 5.8 lze vidět widget pro ovládání této relé karty.



Obr. 5.8: PC aplikace - widget: Relé

5.7.4 Widget - Device status

Každé z připojených zařízení má v aplikaci dostupný tzv. Device status widget, ve kterém jsou zobrazeny aktuální informace o stavu daného zařízení. Také se v tomto widgetu vyskytuje tlačítko pro otevření příslušného konfiguračního souboru, pomocí kterého lze modifikovat konfiguraci daného zařízení (Obr. 5.5).

CONTROL BOARD CONTROL PANNEL

Device Status

VISA

RELAYS

80pin/Ocard

Status:
Device Name: CONTROL BOARD
Connection: CONNECTED
Test Status: READY
Last Startup Time: 2023-05-03 12:34:40.786857
Last Self Check Time: 2023-05-03 12:34:41.720725
Last Fault Time: UNKNOWN

Last Fault Description:
Resource TCPiP0:192.168.0.2::7::SOCKET is not found. TCP/IP connections are sometimes not listed.. You can still try to connect!

Settings From Config File: [Open Config File](#)
DEVICENAME: CONTROL BOARD
COMMUNICATION: VISA
VISASTRING: TCPiP0:192.168.0.2::7::SOCKET
TIMEOUT: 30000
QUERYDELAY: 0.01
PREFIXFORTESTS: CTRL_BOARD
SELF_CHECK_PERIOD: 5000
SELF_CHECK_COMMAND: "IDN?"
SELF_CHECK_RESPONSE: OK;STM32 super board

READTERMINATION:

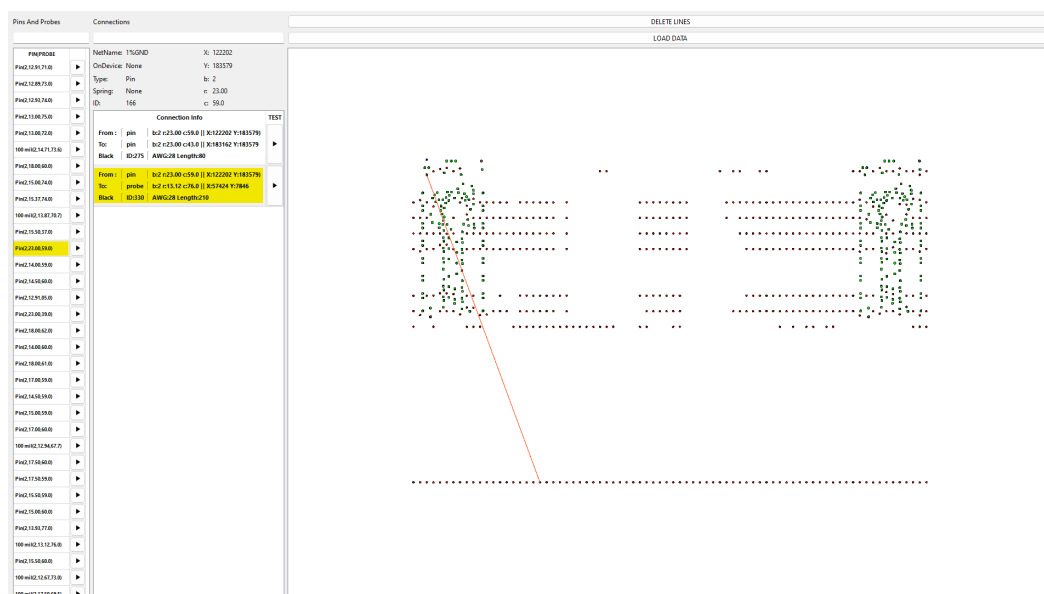
WRITERMINATION:

CONNECTATSTARTUP: True
NEEDSTOBECONNECTED: False

Obr. 5.9: PC aplikace - widget: Device status

5.7.5 Widget - ICT propojení

Widget ICT propojení je zobrazením dat uložených v MySQL databázi. V levé části tohoto widgetu (Pins And Probes), lze vidět všechny bRC piny a testpointy. Po kliknutí na některý z těchto pinů se v prostřední části (Connections) zobrazí podrobné informace o vybraném pinu. Pod detailními informacemi o pinu jsou zobrazena veškerá propojení, která vedou z nebo do vybraného pinu. Pro každé propojení jsou zde i přídatné informace o délce propojení, barvě drátu apod.



Obr. 5.10: Widget: ICT propojení

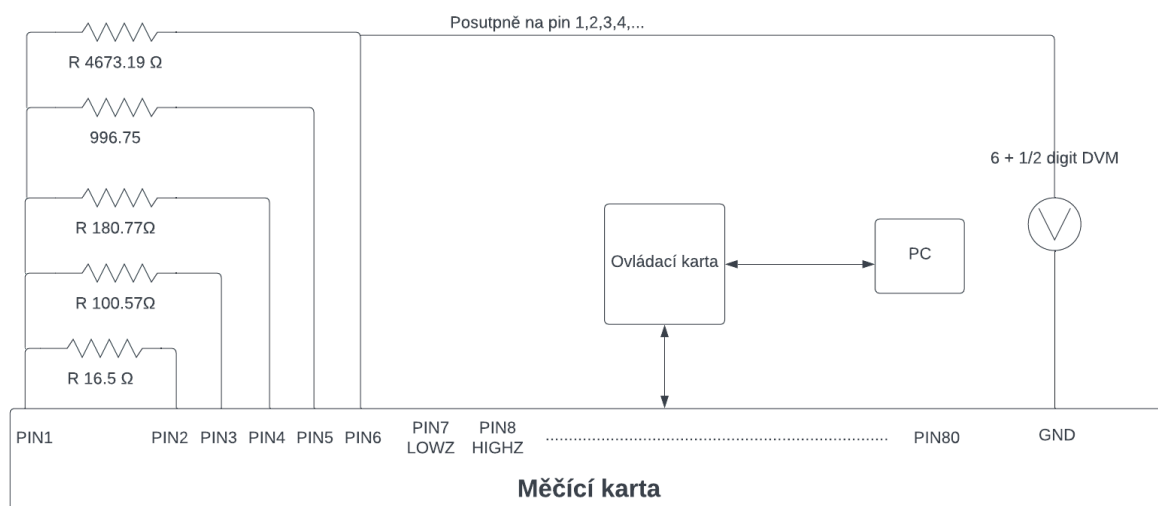
Po kliknutí na některé z propojení se v pravé části zobrazí grafické znázornění této cesty. Červenými kolečky jsou zde znázorněny jednotlivé bRC piny na spodní straně fixture a zelenými čtverečky jednotlivé testpointy.

U každého z pinů (část Pins And Probes) i u každého z propojení (část Connections) je tlačítko s ikonou šipky. Po kliknutí na toto tlačítko se provede příslušný test. Výsledky jsou pak interpretovány v podobě změny barev propojení. Červená barva značí, že propojení nevyhovuje nastaveným mezním hodnotám. Zelená barva indikuje správné propojení. Oranžová barva je označením pro nesprávné propojení (vede na jiný pin než bylo zamýšleno). V případě, že propojení zatím nebylo testováno, je propojení zobrazeno bezbarvě (bíle). Žlutá barva pak značí aktuálně vybrané propojení.

6 Technické parametry testeru

6.1 Dlouhodobá stabilita

Pro zjištění dlouhodobé stability byl proveden téměř 9hodinový test běhu zařízení. Kde každých 500 ms byl ovládací kartě zasílán příkaz 80_IO_CARD MEASURE VOLTAGE ALL. Výsledky měření pro piny 1 až 8 byly ukládány do textového souboru a následně zpracovány v programu MATLAB. Zapojení testeru bylo provedeno dle schématu 6.1.



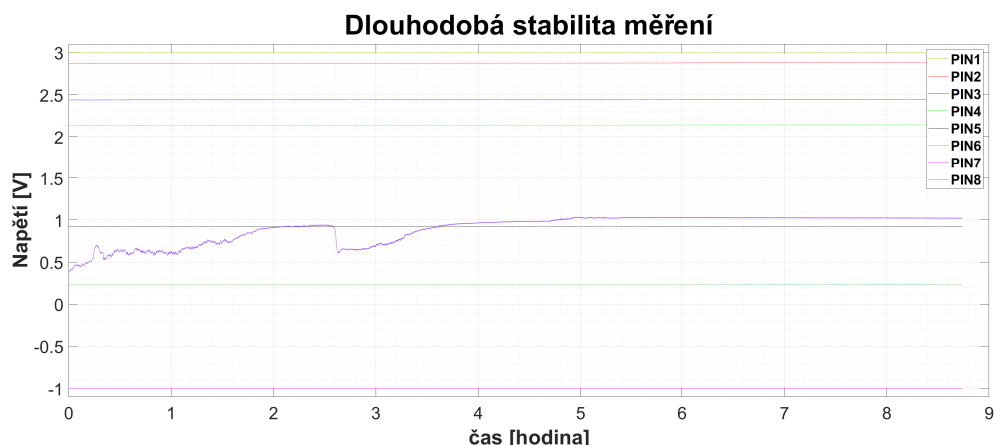
Obr. 6.1: Dlouhodobá stabilita - schéma zapojení

Měřicí karta byla nastavena do konfigurace na Obr. 6.2. Tato konfigurace umožňuje změřit propojení všech pinů do pinu č.1. Jedinou výjimkou je však nastavení pinu č. 8 do Vysoké impedance.

CONTROL BOARD CONTROL PANEL																			
Device Status VISA RELAYS 80pinIOCard																			
Voltage Threshold: From: 0.00000 To: 3.30000 Update Threshold																			
DAC 0.00 SET DAC MEASURE ALL INPUT STATES MEASURE ALL VOLTAGES READ CONFIGURATION ADC: ADCvalue																			
PIN 1	PIN 2	PIN 3	PIN 4	PIN 5	PIN 6	PIN 7	PIN 8	PIN 9	PIN 10	PIN 11	PIN 12	PIN 13	PIN 14	PIN 15	PIN 16	PIN 17	PIN 18	PIN 19	PIN 20
LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	HIGH Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
HIGH	HIGH	HIGH	HIGH	HIGH	HIGH	LOW	HIGH	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW
2.860V	2.817V	2.791V	2.807V	2.847V	2.722V	-1.000V	2.807V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V
PIN 21	PIN 22	PIN 23	PIN 24	PIN 25	PIN 26	PIN 27	PIN 28	PIN 29	PIN 30	PIN 31	PIN 32	PIN 33	PIN 34	PIN 35	PIN 36	PIN 37	PIN 38	PIN 39	PIN 40
LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW
-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V
PIN 41	PIN 42	PIN 43	PIN 44	PIN 45	PIN 46	PIN 47	PIN 48	PIN 49	PIN 50	PIN 51	PIN 52	PIN 53	PIN 54	PIN 55	PIN 56	PIN 57	PIN 58	PIN 59	PIN 60
LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW
-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V
PIN 61	PIN 62	PIN 63	PIN 64	PIN 65	PIN 66	PIN 67	PIN 68	PIN 69	PIN 70	PIN 71	PIN 72	PIN 73	PIN 74	PIN 75	PIN 76	PIN 77	PIN 78	PIN 79	PIN 80
LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z	LOW Z
OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW
-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V	-1.000V

Obr. 6.2: Dlouhodobá stabilita - Konfigurace měřicí karty

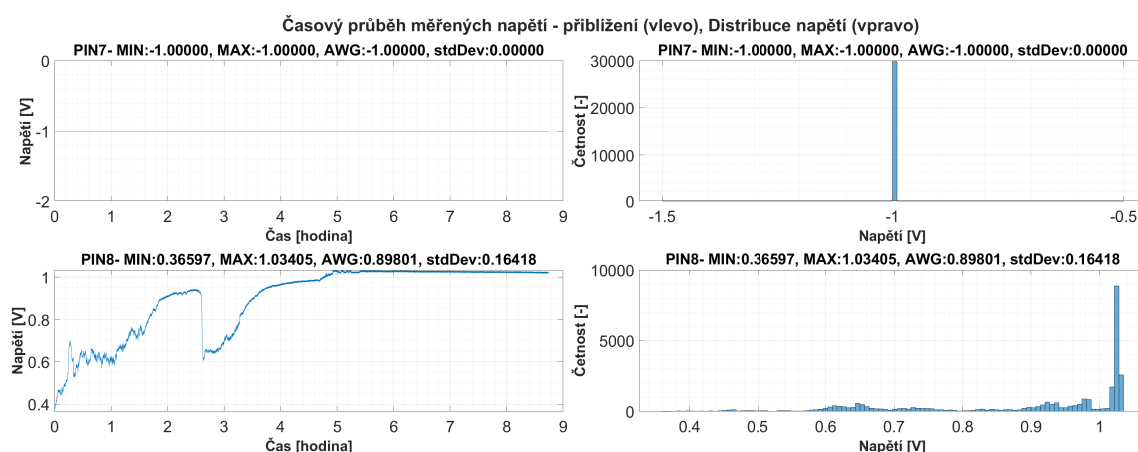
Obrázek 6.3 zobrazuje průběhy napětí a všech zkoumaných pinech.



Obr. 6.3: Dlouhodobá stabilita - Časový průběh všech naměřených napětí

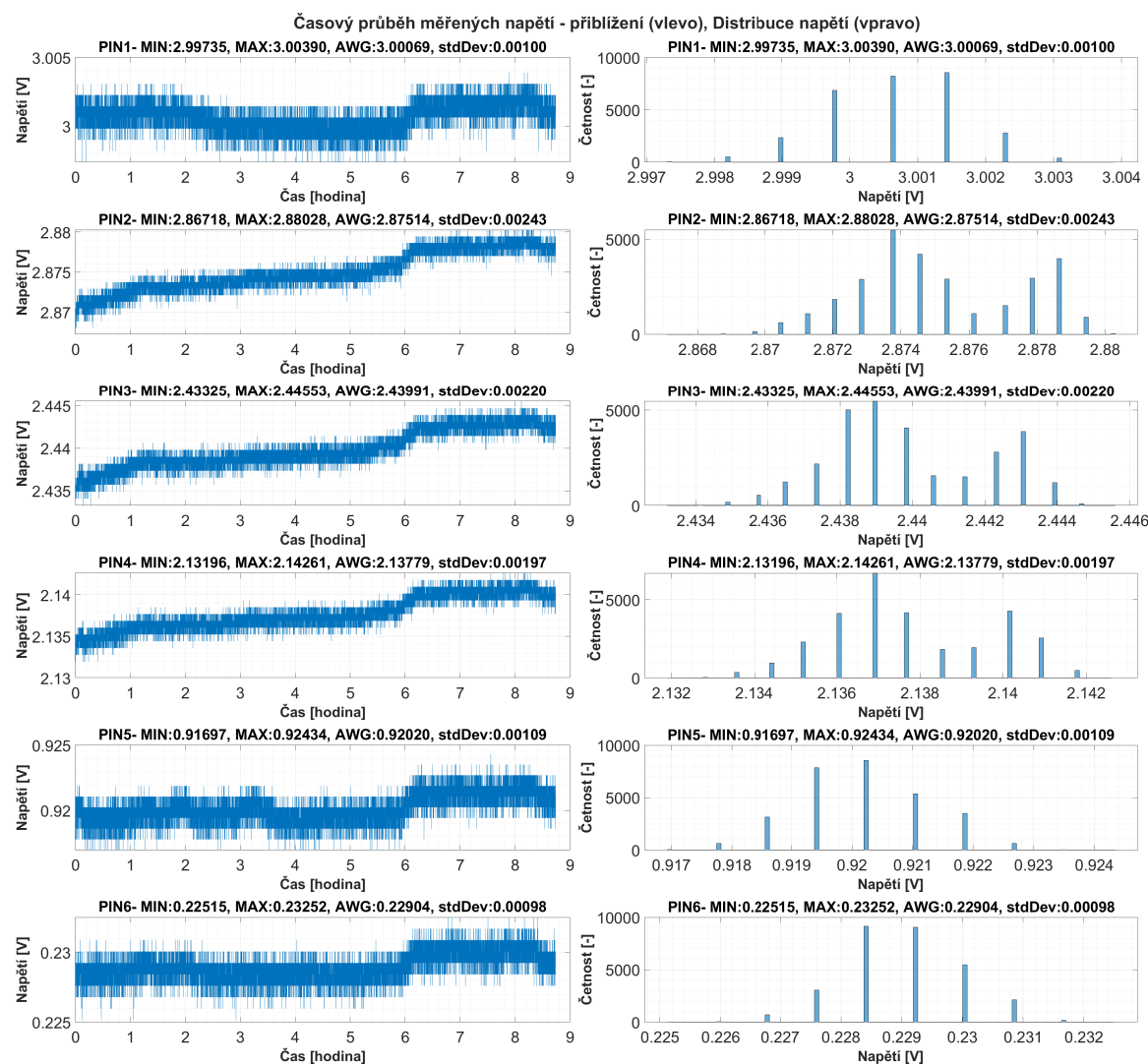
Následující průběhy vycházejí z Obr. 6.3 a zobrazují detail časových průběhů napětí na jednotlivých pinech. Podívejme se nejprve na průběh napětí na pinu č.7 (Obr. 6.4 nahoře). Podle schématu (Obr. 6.1) by pin č.7 neměl být nikam připojen a zároveň být v nízké impedanci. Očekává se tedy, že měřené napětí bude velmi blízké nule. Ovládací karta vždy správně navrátila hodnotu -1, která charakterizuje, že měřená hodnota je mimo rozsah měřící karty. Předpokládá se tak, že napětí je menší jak 70mV.

Pin č.8 je podle schématu zapojení (Obr. 6.1) ve vysoké impedanci a zároveň není nikam připojen. Impedance tohoto pinu je velmi vysoká (řádově stovky $M\Omega$) a pin chová nedefinovaně a může mít vesměs libovolnou hodnotu. Během měření však změřená hodnota nepřekročila hodnotu přibližně 1.3V (Obr. 6.4 dole).



Obr. 6.4: Dlouhodobá stabilita - Přiblížení časových průběhů napětí na pinech 7 až 8

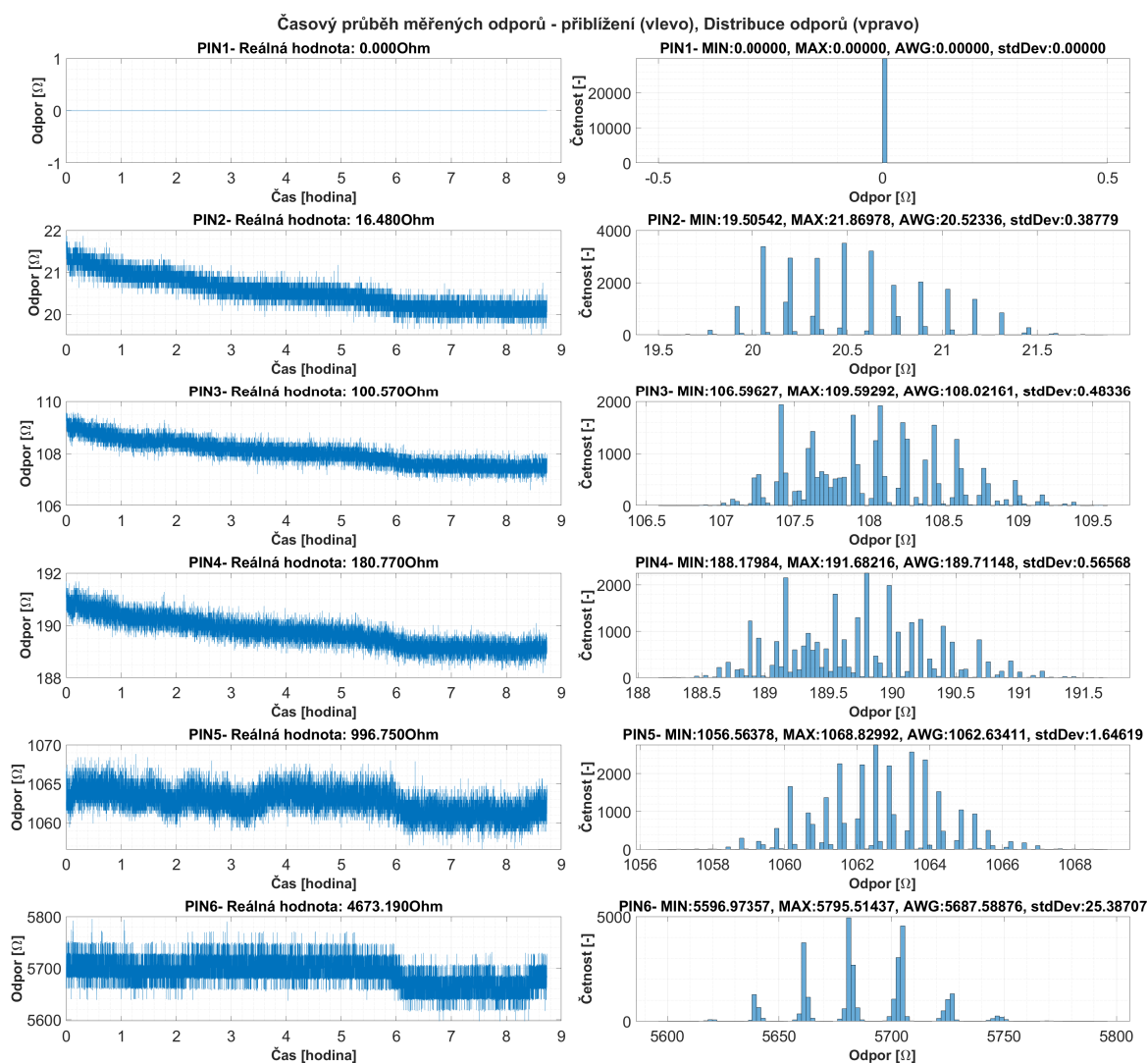
Na následujícím obrázku jsou zobrazeny průběhy napětí na pinech 1 až 6. V titulku každého grafu jsou uvedeny hodnoty průměru (AWG), MIN, MAX a směrodatné odchylky (stdDev) ve voltech. Z histogramů je patrné, že rozptyl naměřených hodnot je větší než krok D/A převodníku o 1 bit (každý ze sloupců je reprezentací určité bitové hodnoty). Lze tak v praxi uvažovat o nastavení kroku rampy D/A převodníku na 2 bity. Tímto lze dosáhnout přibližně dvojnásobné rychlosti měření, přičemž se chyba měření příliš nezvýší.



Obr. 6.5: Dlouhodobá stabilita - Přiblížení časových průběhů napětí na pinech 1 až 6

Hlavním úkolem měření je však zjistit hodnoty odporů. Na Obr. 6.6 jsou jednotlivé hodnoty z Obr. 6.5 přepočítány na odpory vzhledem k pinu č. 1. Pro piny č. 7 a 8 nemá příliš velký význam grafy uvádět, protože tyto piny nejsou nikam připojeny. Pin č.1 je připojen sám k sobě, a tak jeho hodnota odporu je nulová.

V titulcích grafů lze obdobně jako u měřeného napětí nalézt statistické hodnoty a v titulcích u časových průběhů jsou zobrazeny i reálné hodnoty měřených odporů, které byly změřeny pomocí multimetru GWINSTEK GDM-9061.



Obr. 6.6: Dlouhodobá stabilita - Přiblížení časových průběhů odporů na pinech 1 až 6

Při porovnání změřených hodnot s reálnými je patrná odchylka v hodnotách odporů. Následující tabulka zobrazuje relativní a absolutní chyby měření odporů vztaženou k průměrným naměřeným hodnotám. Tyto chyby jsou poměrně vysoké. Z tohoto důvodu je nutné měřicí (respektive ovládací) karty kalibrovat.

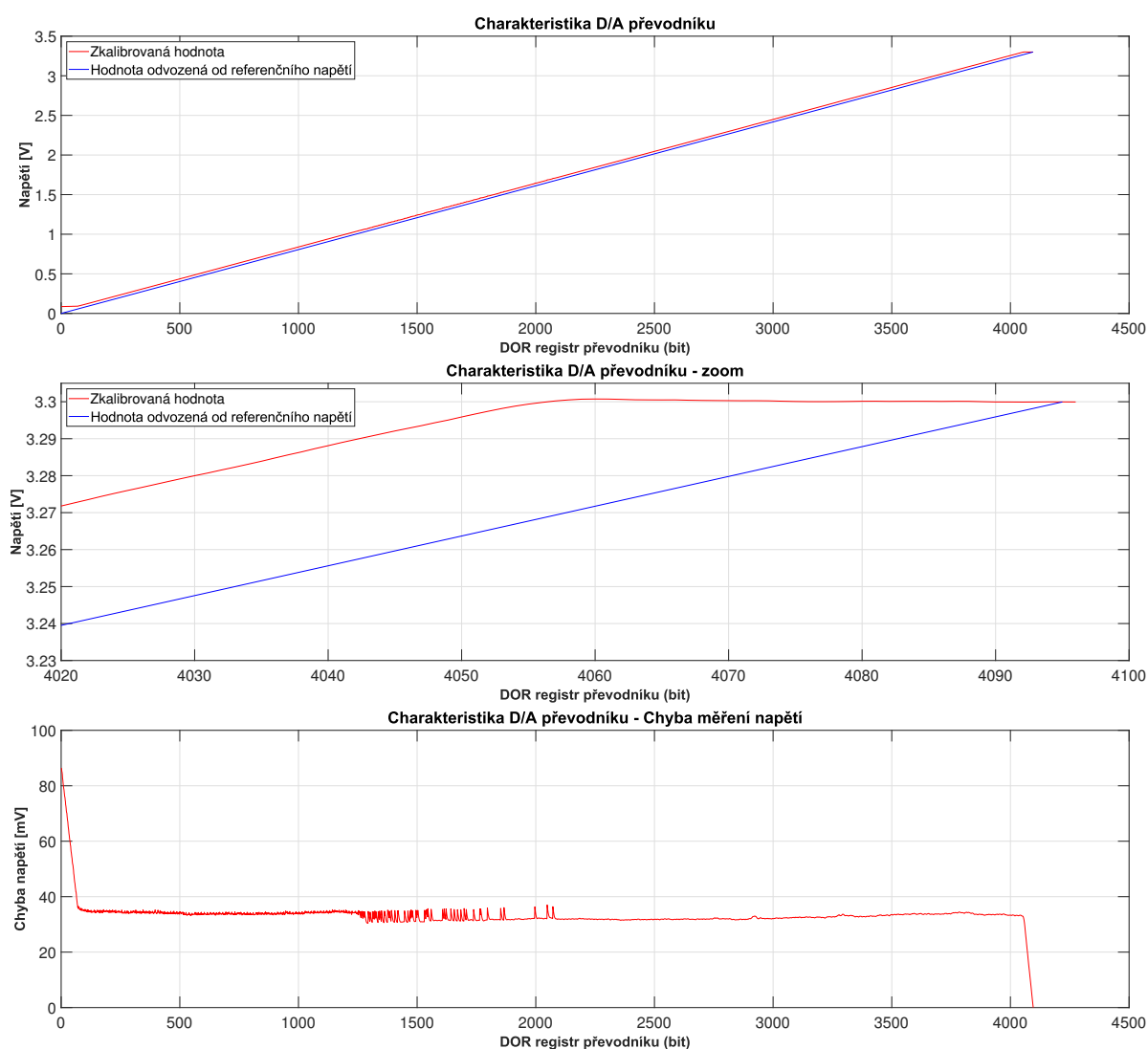
Chyba	PIN2	PIN3	PIN4	PIN5	PIN6
abs [Ω]	4.043859	7.451614	8.941479	65.88411	1014.399
rel [%]	24.53872	7.40938	4.946329	6.609893	21.70677

Tab. 6.1: Chyby měření odporů vůči pinu č. 1 nekalibrované měřicí karty

6.2 Kalibrace

Z důvodů zmíněných v předchozí sekci je nutné provádět kalibraci zařízení. Největší chyba měření je způsobena chybou D/A převodníku. Tato chyba vzniká především kvůli saturacím při nejvyšších a nejnižších hodnotách napětí v kombinaci se špatným nastavením referenčního napětí. Referenční napětí v předchozí sekci bylo nastaveno následujícím způsobem.

Nejprve byla na D/A převodníku nastavena nejvyšší možná úroveň a poté bylo změřeno napětí na výstupu D/A převodníku referenčním multimetrem. Obdržená hodnota napětí byla zapsána do ovládací karty a následně provedeno měření. Všechny obdržené hodnoty napětí v tomto měření tak byly vztaženy k referenční hodnotě. Protože je však D/A převodník ve své maximální hodnotě již satureován je vzniká pak chyba v interpretaci hodnot. Na obr. 6.7 je modře znázorněna hodnota odvozená od referenčního napětí a červeně reálná hodnota napětí, kterou D/A převodník generuje.



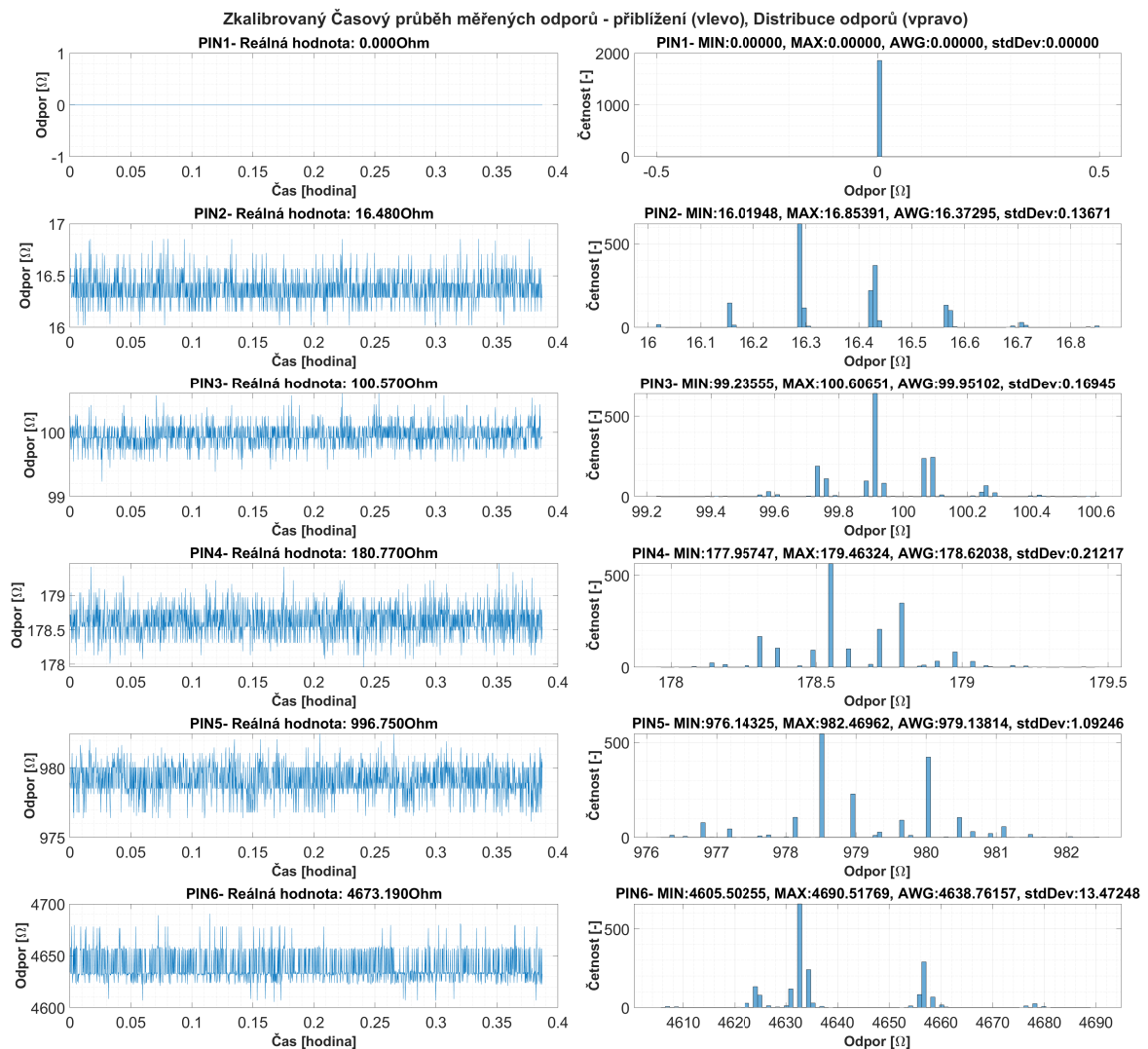
Obr. 6.7: Kalibrace D/A převodníku

Řešením tohoto problému je nejprve změřit výstupní hodnoty D/A převodníku pro každý jeho krok. Toto měření je automatizováno a prováděno tak, že na výstup D/A převodníku

je připojen referenční multimetr a následně se pomocí kalibračního python skriptu uloží do mySQL databáze změřená hodnota pro každý krok D/A převodníku.

PC aplikace pak při měření nejprve nastaví referenční hodnotu napětí na 0xFFFF (4095) čímž jsou obdržené hodnoty z ovládací karty přímo nastavenými hodnotami registru D/A převodníku. PC aplikace následně využívá mySQL databázi jako lookup tabulku pro interpretaci přijatých hodnot.

Kalibrační hodnoty tak nejsou ukládány přímo do ovládací karty, ale do mySQL databáze. Takto lze poměrně snadno provádět kalibraci zpětně již na změřená data. Na následujícím obrázku je jsou zobrazeny výsledky nového měření odporů po kalibraci. Podmínky měření jsou stejné jako pro měření v předchozí sekci s rozdílem, že toto měření trvalo necelou hodinu.



Obr. 6.8: Dlouhodobá stabilita - Po kalibraci

V následující tabulce (6.2) jsou zobrazeny hodnoty relativních a absolutních chyb měření vztahených k průměrné hodnotě naměřených hodnot po kalibraci.

Chyba	PIN2	PIN3	PIN4	PIN5	PIN6
abs [Ω]	0.106549	0.618979	2.149619	17.61186	34.42843
rel [%]	0.646554	0.615471	1.189146	1.766929	0.736722

Tab. 6.2: Chyby měření po kalibraci odporů vůči pinu č. 1 nekalibrované měřicí karty

Z tabulky (6.2) je patrné výrazné zlepšení chyb měření po kalibraci oproti nekalibrovanému zařízení (tab.6.1). Dále by se dalo například zlepšit měření pomocí změřených osazených rezistorů v napěťovém děliči pro každý bRC pin a následné korekce výpočtu odporu cesty. Nicméně vzhledem k dostatečné přesnosti měření a časové náročnosti dalších kalibračních procedur je proces kalibrace omezen pouze na kalibraci D/A převodníku.

Závěr

V diplomové práci bylo navrženo a realizováno škálovatelné řešení pro měření odporu propojení velkého množství elektrických cest. Výsledkem návrhu je koncepce měřících a ovládacích karet, které dohromady tvoří pole 4000 pinů, mezi kterými lze libovolně měřit odpor elektrických cest. Pro obě karty lze v příloze diplomové práce nalézt schéma zapojení a výrobní data.

Pro ovládací kartu byl vyvinut firmware, který ve spolupráci s PC aplikací umožňuje provádět automatická měření a následně výsledky prezentovat ve srozumitelné grafické podobě. Dále vyvinutá PC aplikace umožňuje pohodlně pomocí grafického rozhraní manuálně ovládat vstupy a výstupy ovládacích a měřících karet. Dále aplikace umožňuje formátovat vstupní data, která jsou generována nejrozšířenějšími ICT testery AGILENT (KEYSIGHT) 30xx.

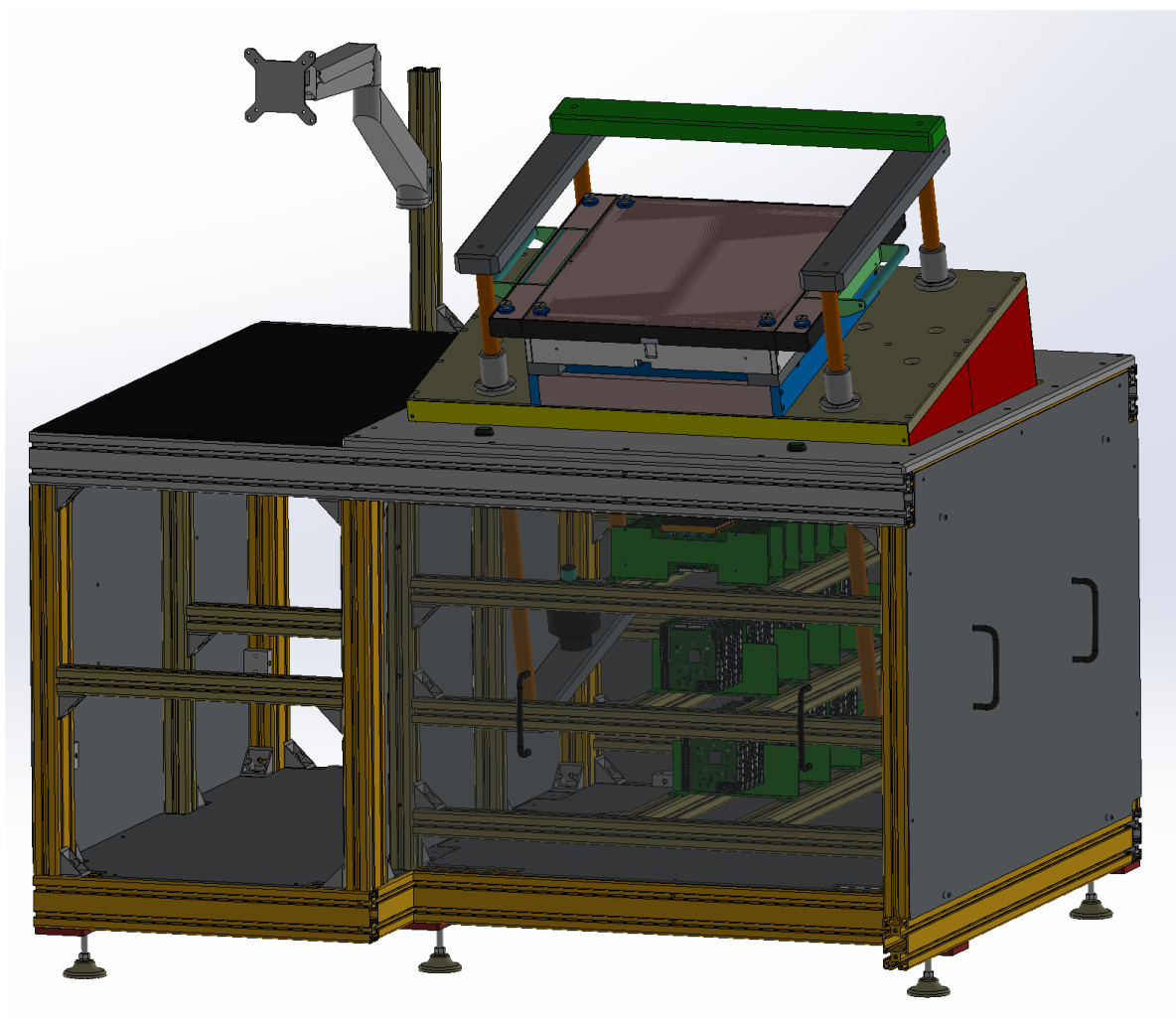
Pro automatický běh testeru jsou k dispozici dva pracovní režimy (PASS/FAIL a měření přesného odporu). V režimu PASS/FAIL lze proměřit propojení všech 4000 bRC vůči jednomu vybranému bRC pinu do 40 ms (včetně signalizace v PC aplikaci), což splňuje požadavek na rychlost měření.

Funkčnost celého systému byla ověřena automatizovaným přibližně 9hodinovým měřením v režimu přesného měření odporu. Při tomto měření byla dosažena požadovaná přesnost, která je definována absolutní chybou $\pm 3 \Omega$ pro rozsah 0Ω až 100Ω a relativní chybou $\pm 5 \%$ pro rozsah 100Ω až 1000Ω .

Výše zmíněné vlastnosti systému splňují základní požadavky na funkčnost elektrické části zařízení. Nicméně zařízení v době odevzdání diplomové práce má několik nedostatků, které budou postupně odstraňovány i po odevzdání práce. Prvním nedostatkem je, že ovládací karty neobsahují bootloader, který by umožňoval aktualizaci firmwaru pomocí Ethernetu. Dále, protože zatím bylo osazeno pouze 10 kusů ovládacích karet, nebylo možné zařízení otestovat v plném rozsahu.

V současné době umožňuje PC aplikace načítat pouze generovaná data z ICT testerů AGILENT (KEYSIGHT) 30xx. Do budoucna je plánováno rozšíření o další formáty dat, které jsou generovány jinými ICT testery.

Úkolem diplomové práce bylo realizovat i mechanickou část testeru. Ve spolupráci s konstruktéry firmy Čevor Innovation a.s. byl navržen 3D model (Obrázek na další straně). V modelu je celá logika testeru zabudovaná do stolu tvořeného hliníkovými profily. Do stolu bude zabudováno také napájení celého zařízení, bezpečnostní prvky v podobě start/stop tlačítka a optické závory, pneumatické části a další. Konstrukce zařízení musí být dostatečně robustní, aby byla schopná úspěšně odolávat silám (9000 N) potřebným k nakontaktování všech 4000 pinů.



Obr. 6.9: 3D model mechanické části testeru

Literatura

- [1] HOROWITZ, P., HILL, W.: *The Art of Electronics*. [online]. 2015, New York: Cambridge University Press, [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL (direct download):
<[https://www.uvm.edu/~gpetrucc/courses/Chem219/Lectures/Paul%20Horowitz,%20Winfield%20Hill%20-%20The%20Art%20of%20Electronics-Cambridge%20University%20Press%20\(2015\).pdf](https://www.uvm.edu/~gpetrucc/courses/Chem219/Lectures/Paul%20Horowitz,%20Winfield%20Hill%20-%20The%20Art%20of%20Electronics-Cambridge%20University%20Press%20(2015).pdf)>.
- [2] MARTIN, T.: *he Insider's Guide to the STM32 ARM Based Microcontroller*. [online]. 2008, T Coventry: Hitex Ltd., UK, [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<https://www.hitex.com/fileadmin/documents/tools/dev_tools/dt_protected/insiders-guides/stm32/isg-stm32-v18d-scr.pdf>.
- [3] KEYSIGHT TECHNOLOGIES: *Keysight Medalist i3070 Series 5* [online]. 2017, Product datasheet Nr. 5990-4344EN [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<<https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-02227/data-sheets/5990-4344.pdf>>.
- [4] ACCULOGIC: *Keysight (Agilent) 3070 Test Program* [online]. Keysight (Agilent) 3070 Test Program - product webpage [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<<https://acculogic.com/services/test-engineering-services/in-circuit-test-programming-services/agilent-hp-3070-test-program-development-services/>>.
- [5] TERADYNE, Smith, J. Michael: *ICT Fixture Guidelines* [online]. ICT Fixture Guidelines, Test Techniques and Practices [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL (direct download):
<<https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=114866>>.
- [6] Wikipedia: *CAD data exchange* [online]. 2022, Wikipedia - CAD data exchange [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<https://en.wikipedia.org/wiki/CAD_data_exchange>.
- [7] Mark Fortunato: *Analyzing circuit sensitivity for analog circuit design* [online]. 2008, Analyzing circuit sensitivity for analog circuit design - Embedded Staff magazine [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<<https://www.embedded.com/analyzing-circuit-sensitivity-for-analog-circuit-design/>>.
- [8] Emmanuel A. Gonzalez, Martin Christian G. Leonor, Leonard U. Ambata: *Analyzing Sensitivity in Electric Circuits* [online]. 2007, Analyzing Sensitivity in Electric Circuits - IEEE MULTIDISCIPLINARY ENGINEERING EDUCATION MAGAZINE [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL (direct download):
<https://nanopdf.com/download/analyzing-sensitivity-in-electric-circuits_pdf>.
- [9] TOSHIBA: *SSM3J358R* [online]. SSM3J358R - Product datasheet [cit. 27. 12. 2022]. Do-

- stupné z URL:
https://cz.mouser.com/datasheet/2/408/SSM3J358R_datasheet_en_20170124-1916450.pdf.
- [10] PANJIT Semiconductor: *PJA3432* [online]. PJA3432 - Product datasheet [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
<https://cz.mouser.com/datasheet/2/1057/PJA3432-1867274.pdf>.
- [11] TEXAS INSTRUMENTS: *LM393LV-Q1 Dual and LM339LV-Q1 Quad Low Voltage, RRI Automotive Comparators* [online]. LM393LV-Q1 Dual and LM339LV-Q1 Quad Low Voltage, RRI Automotive Comparators - Product datasheet [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm393lv-q1.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1672576488296&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F.
- [12] TEXAS INSTRUMENTS: *SNx4AHCT595 8-Bit Shift Registers With 3-State Output Registers* [online]. SNx4AHCT595 8-Bit Shift Registers With 3-State Output Registers - Product datasheet [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ahct595.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1672576686373&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F.
- [13] TEXAS INSTRUMENTS: *TMUX13xx-Q1 Automotive 5-V, Bidirectional 8:1, 1-Channel and 4:1, 2-Channel Multiplexers with Injection Current Control* [online]. TMUX13xx-Q1 Automotive 5-V, Bidirectional 8:1, 1-Channel and 4:1, 2-Channel Multiplexers with Injection Current Control - Product datasheet [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmux1308-q1.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1672576632072&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F.
- [14] TEXAS INSTRUMENTS: *TLV767 1-A, 16-V Precision Linear Voltage Regulator* [online]. TLV767 1-A, 16-V Precision Linear Voltage Regulator - Product datasheet [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv767.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1672577000555&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.com%252F.
- [15] STMICROELECTRONICS: *Extending the DAC performance of STM32 microcontrollers* [online]. Application note - AN4566 [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:
https://www.st.com/resource/en/application_note/an4566-extending-the-dac-performance-of-stm32-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf.
- [16] Soufiane Bendaoud, Giampaolo Marino: *Practical Techniques to Avoid Instability Due to Capacitive Loading* [online]. Ask The Application Engineer - 32 [cit. 27. 12. 2022]. Dostupné z URL:

<https://ez.analog.com/cfs-file/__key/telligent-evolution-components-attachments/00-383-00-00-00-01-74-37/plugin_2D00_capacitive_5F00_loading_2D00_1.pdf>.

- [17] Tim Green, Texas Instruments: *Operational Amplifier Stability Part 6 of 15: Capacitance-Load Stability* [online]. Burr-Brown Products from Texas Instruments, published in analogZone [cit. 27.12.2022]. Dostupné z URL:
<<https://picture.iczhiku.com/resource/eetop/sYKyS1lZpy00SBNB.pdf>>.
- [18] ANALOG DEVICES: *Low Cost, 250 mA Output Single-Supply Amplifiers* [online]. AD8531/AD8532/AD8534 - Product datasheet [cit. 30.04.2022]. Dostupné z URL:
<<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/48476/AD/AD8532.html>>.

Seznam symbolů a zkratek

ADC	Analogově-Digitální Převodník
ARP	Address Resolution Protocol
A/D	Analogově-Digitální Převodník
bRC	piny na spodní straně fixture
DAC	Digitálně-Analogový Převodník
D/A	Digitálně-Analogový Převodník
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
ESD	Electrostatic Discharge - elektrostatický výboj
Fixture	Vyměnitelný adaptér se základacím polem pro ICT testery
LED	Light Emitting Diode
LWIP	Lightweight IP
I2C	Inter-Integrated Circuit
MAC	Media Access Control
MDIX	Medium Dependent Interface Crossover
PC	Personal Computer - Počítač
PCB	Printed Circuit Board - Deska plošných spojů
PHY	Physical Layer - fyzická vrstva
Probes	Testovací jehly
USB OTG	USB On-The-Go
RMII	Reduced Media Independent Interface

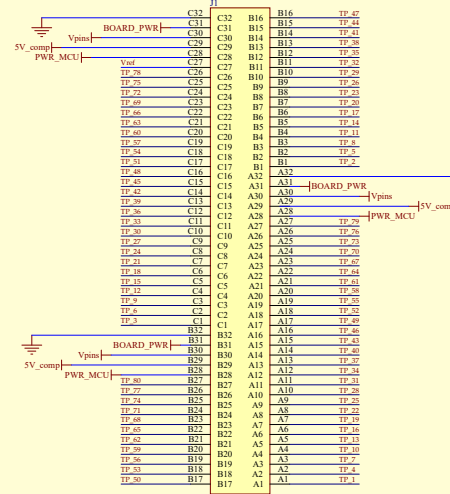
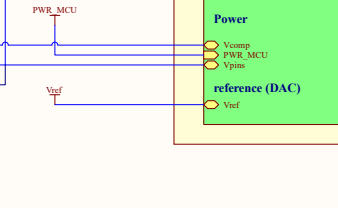
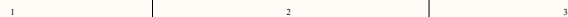
Seznam příloh

A	Měřicí karta	72
A.1	Měřicí karta - schéma	72
A.2	Měřicí karta - PCB	78
B	Ovládací karta	83
B.1	Ovládací karta - schéma	83
B.2	Ovládací karta - PCB	92

A Měřicí karta

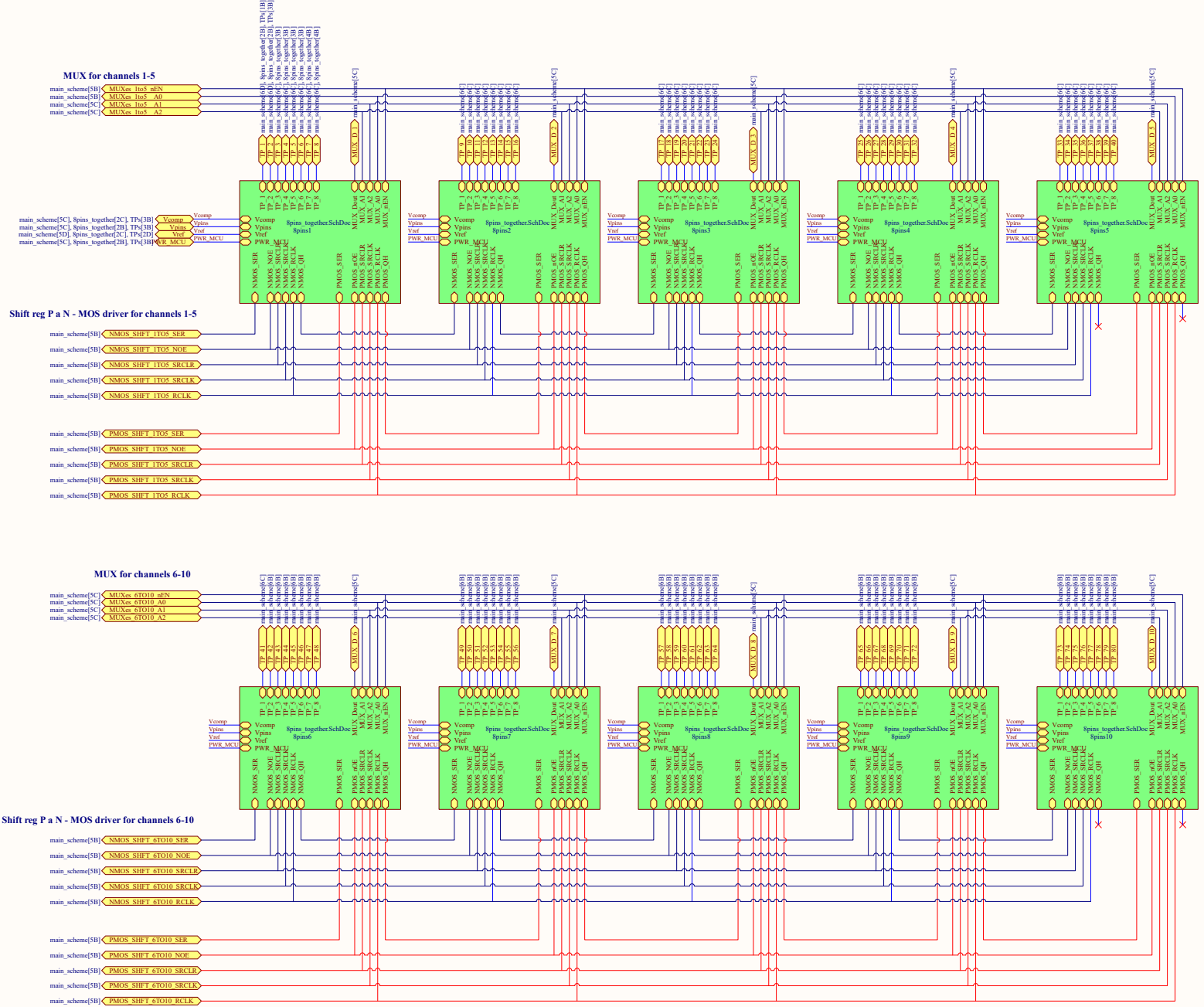
A.1 Měřicí karta - schéma

D

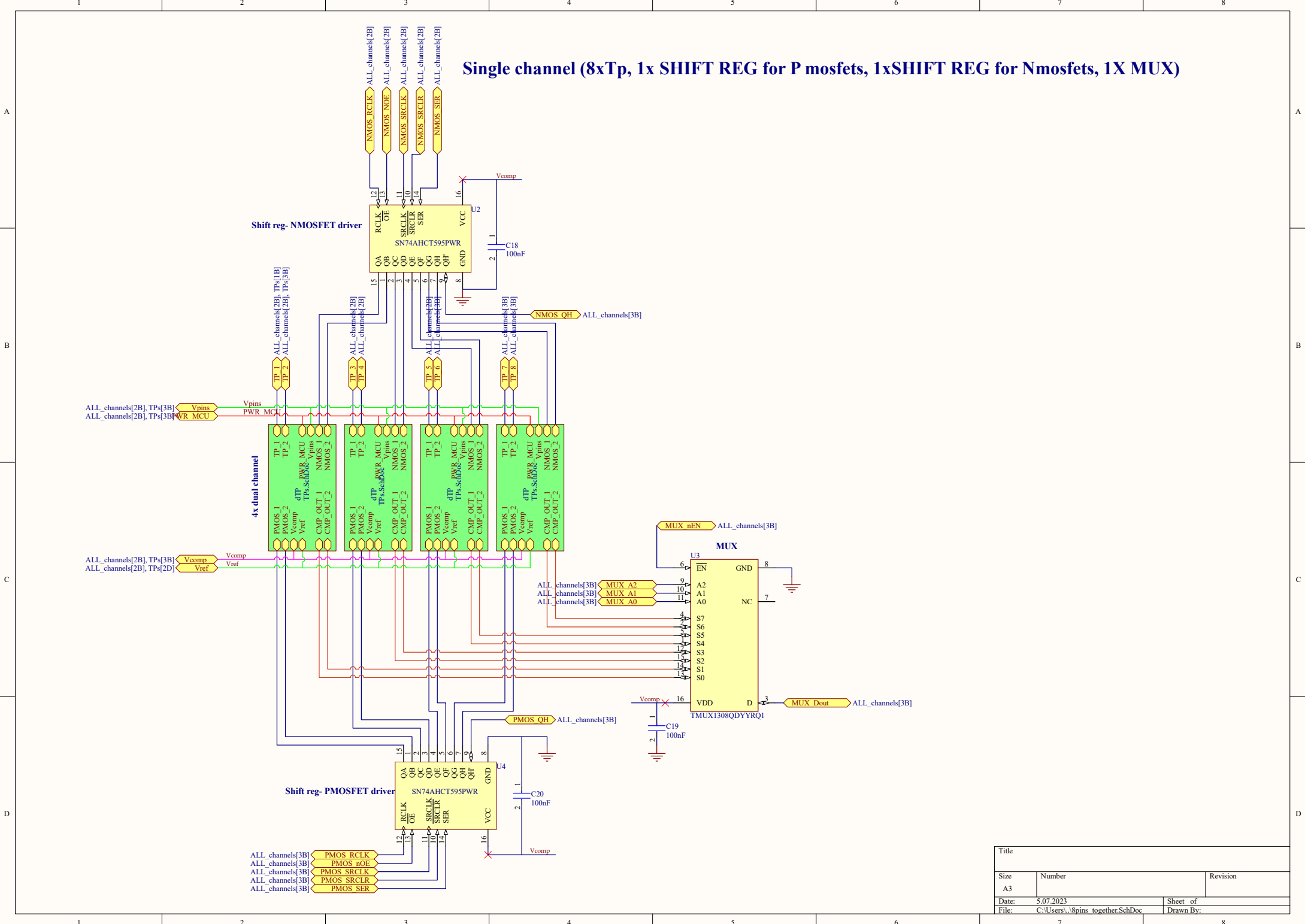


6	7
---	---

ALL 80 pins - controlled by 2x5 (for P and N MOSFETS) + 2x5MUXES



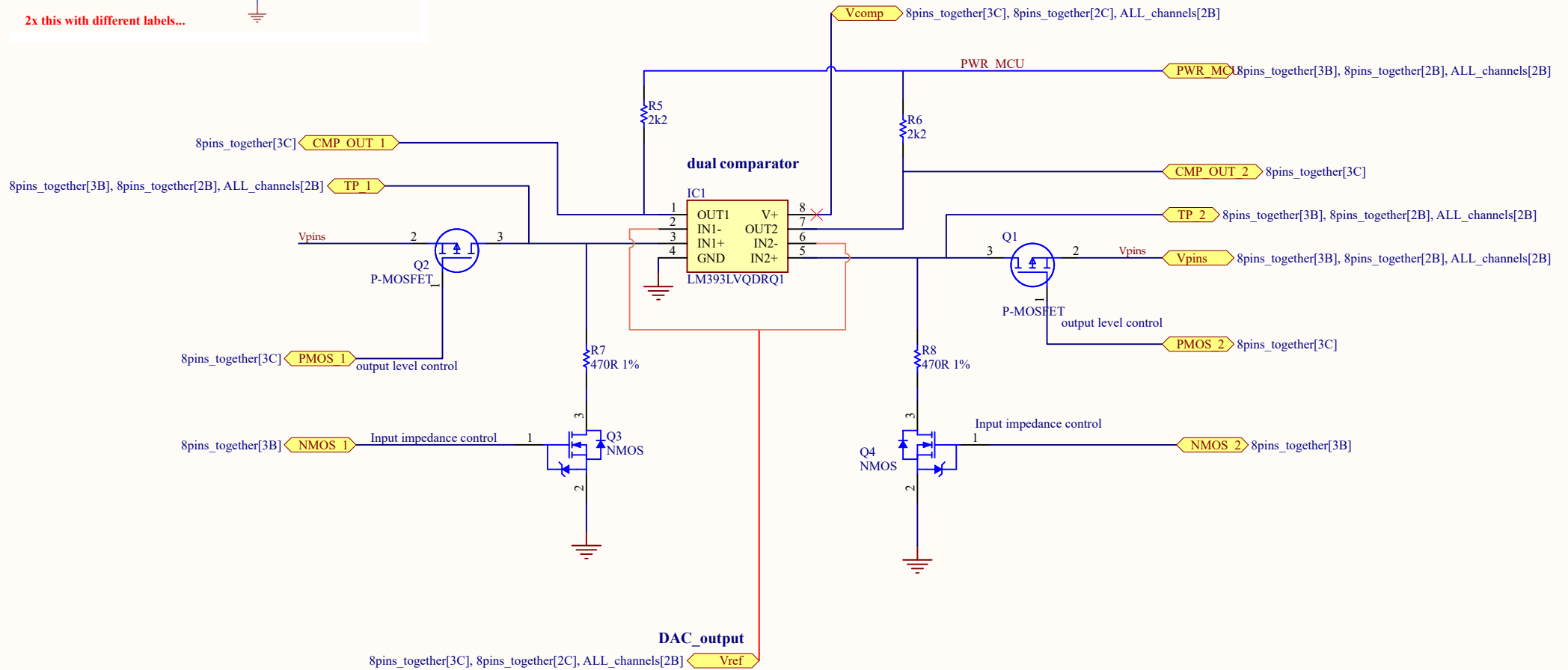
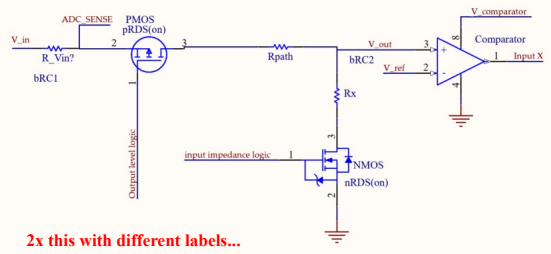
Title		
Size	Number	Revision
A2		
Date:	5/07/2023	Sheet of
File:	C:\Users\ALL_channels\SchDoc	Drawn By:



Single channel (8xTp, 1x SHIFT REG for P mosfets, 1xSHIFT REG for Nmosfets, 1X MUX)

Title		
Size	Number	Revision
A3		
Date:	5.07.2023	Sheet of
File:	C:\Users\...\8pins_together.SchDoc	Drawn By:

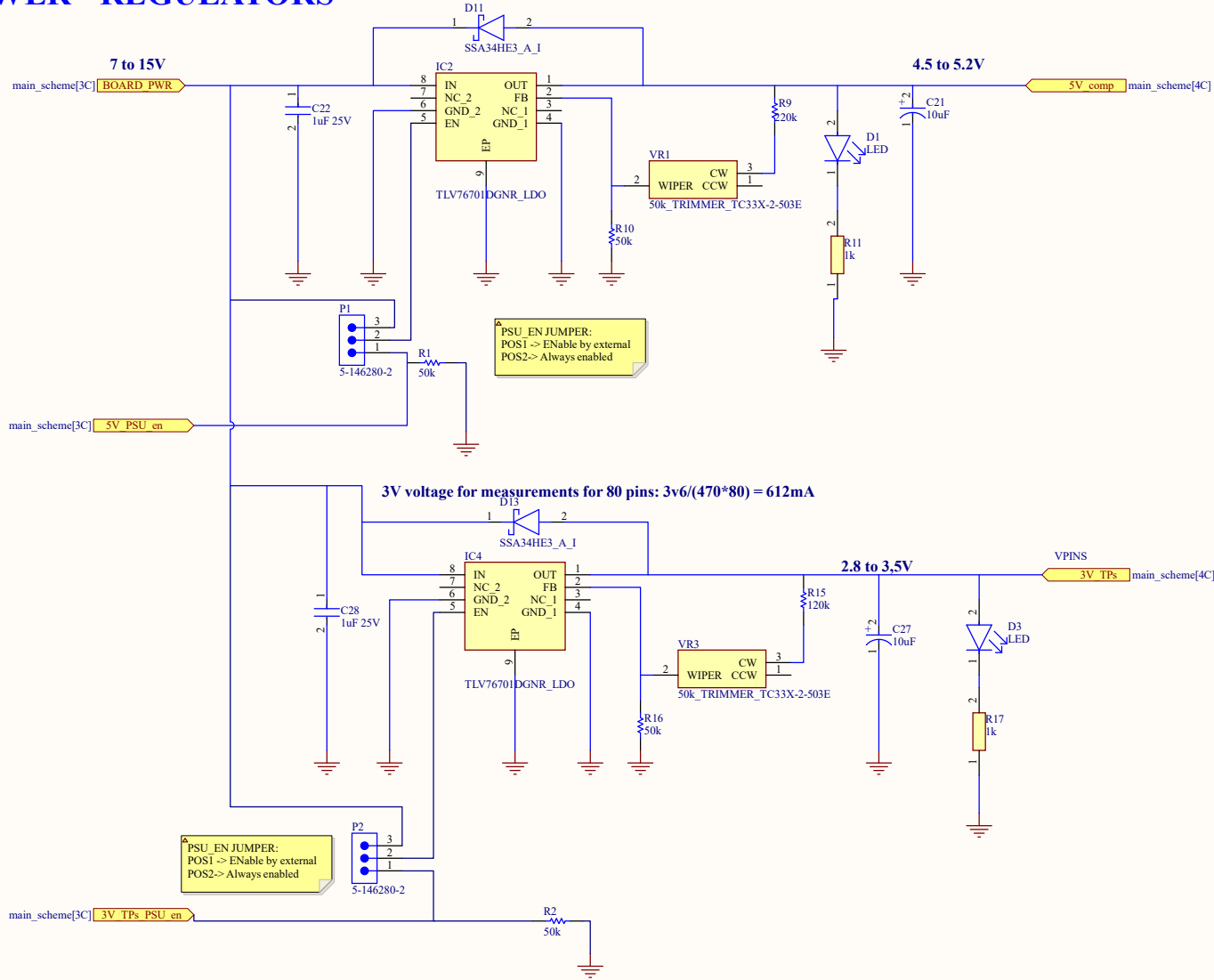
Analog frontend for 2 channels (dual comparator with P and N MOSFETS)



Title		
Size A4	Number	Revision
Date: 5.07.2023	Sheet of	
File: C:\Users\...\TPs.SchDoc	Drawn By:	

POWER - REGULATORS

$R1 = (V_{out}/0.8-1)*R2$; $R2 = 50k\Omega$
5V : shfregs/comps/mux - (Worst case cca 440mA)

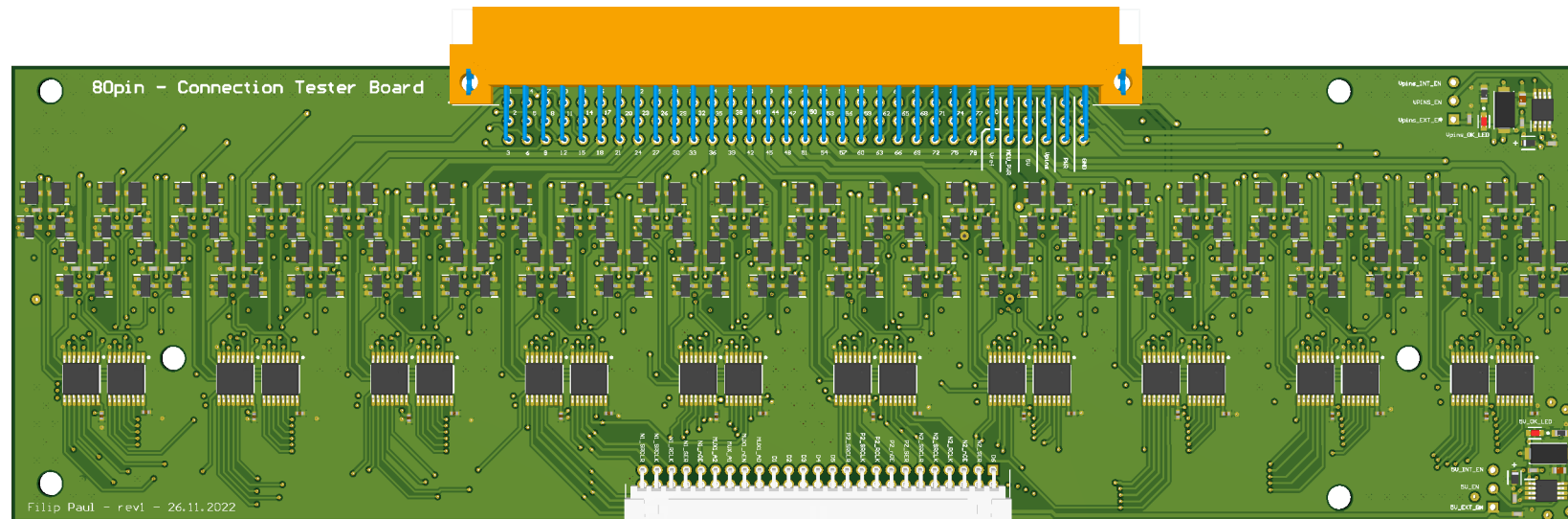


Title		
Size	Number	Revision
A3		
Date:	5.07.2023	Sheet of
File:	C:\Users\...\POWER.SchDoc	Drawn By:

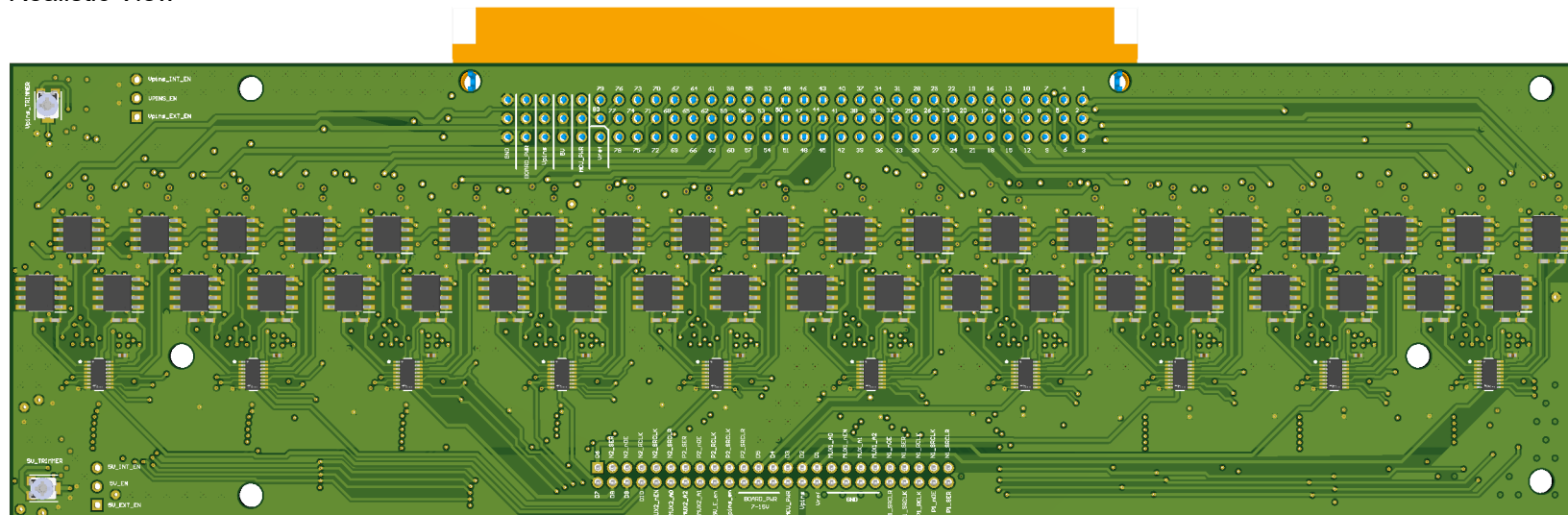
A.2 Měřicí karta - PCB

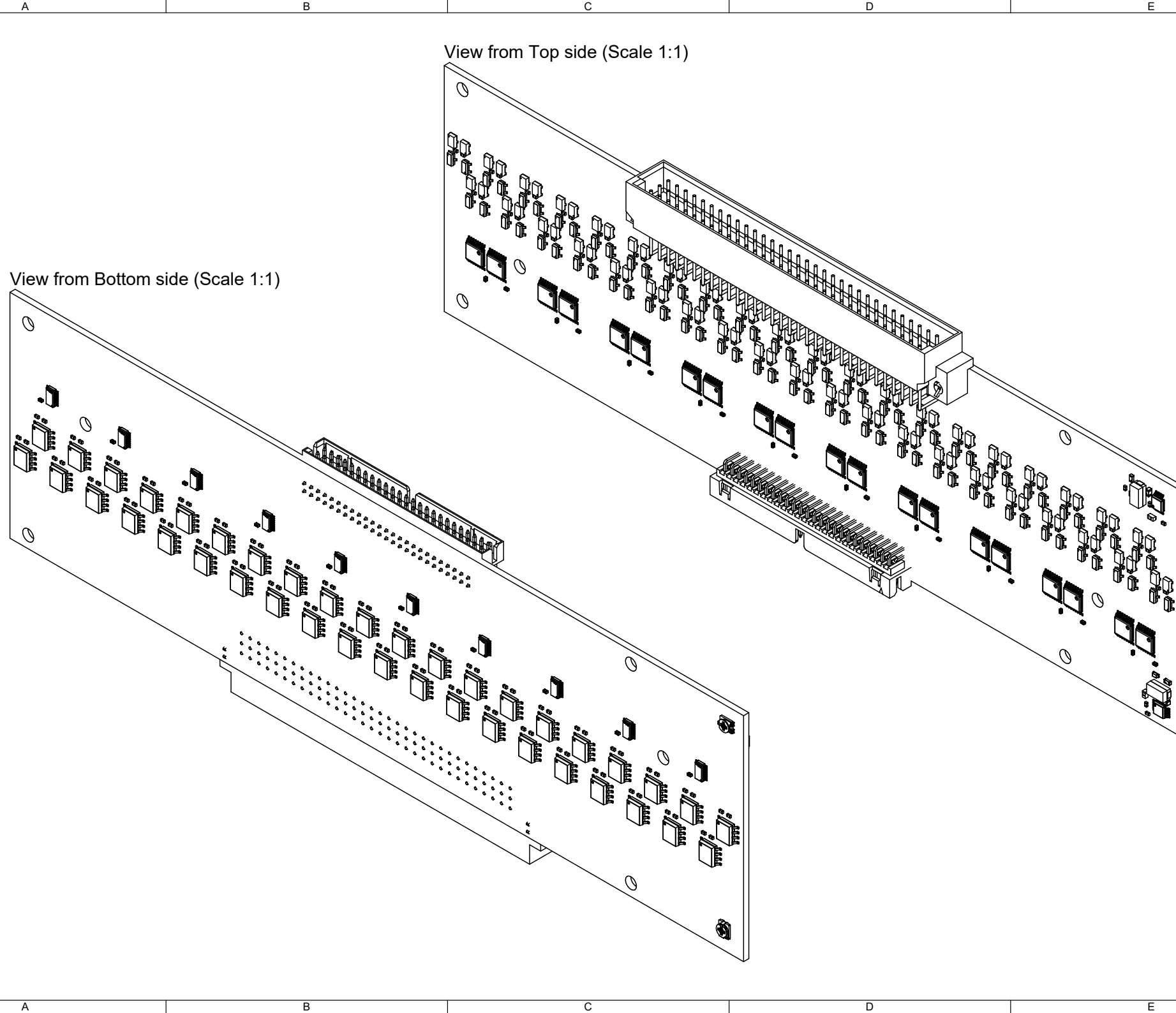
80pin - Connection Tester Board

Realistic View

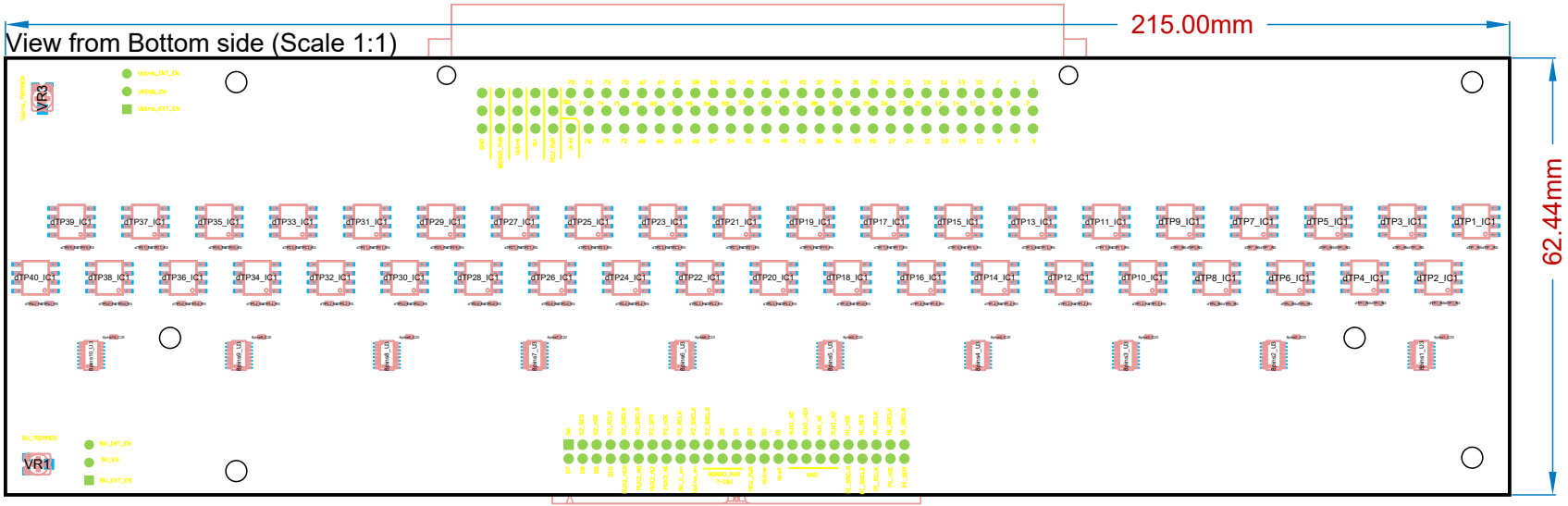
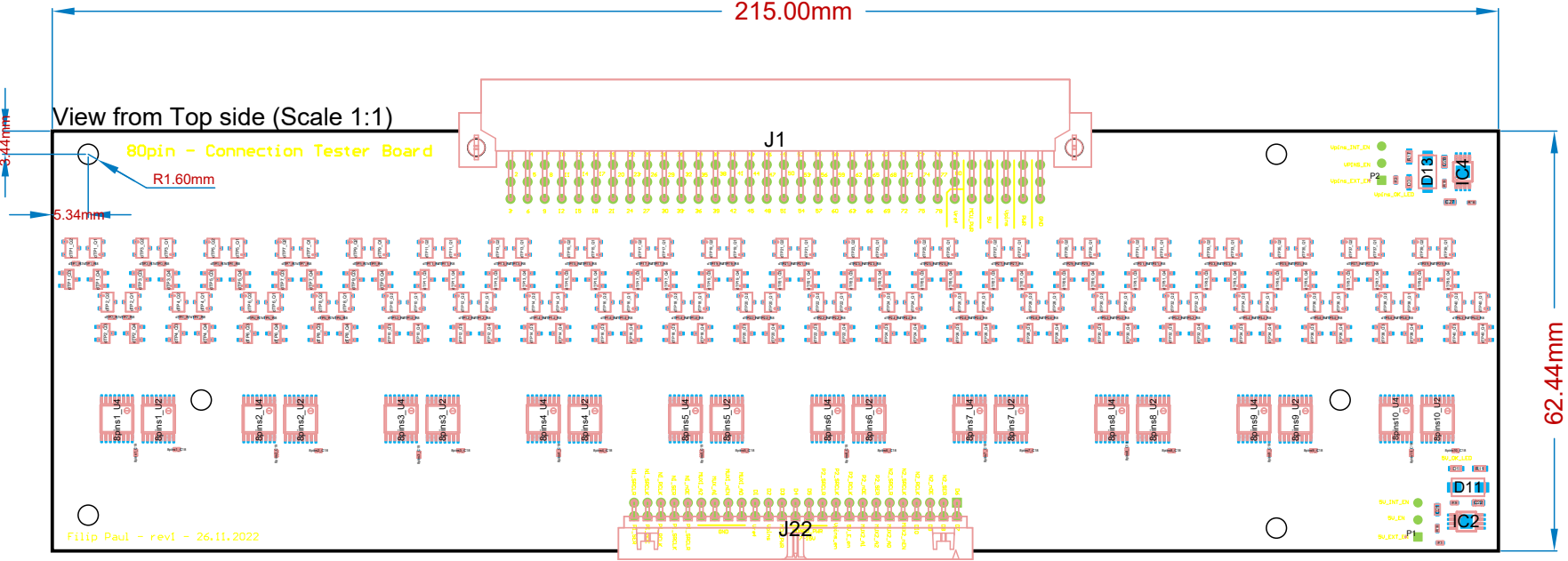


Realistic View

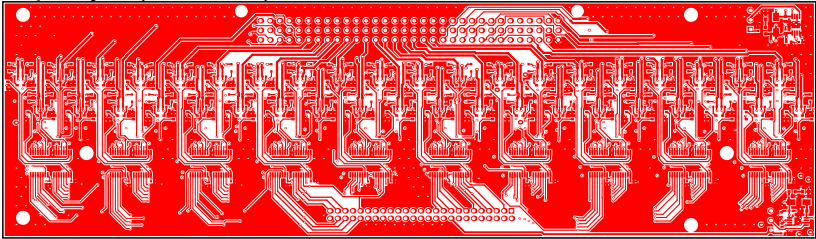




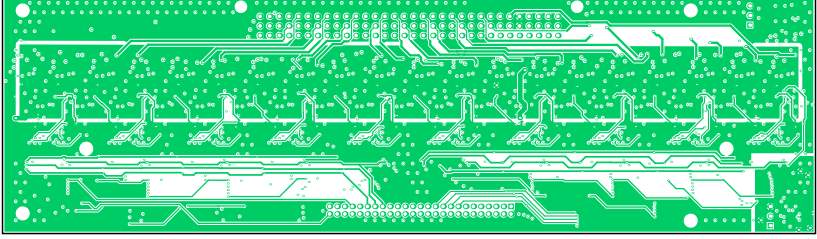
ASSEMBLY DRAWING



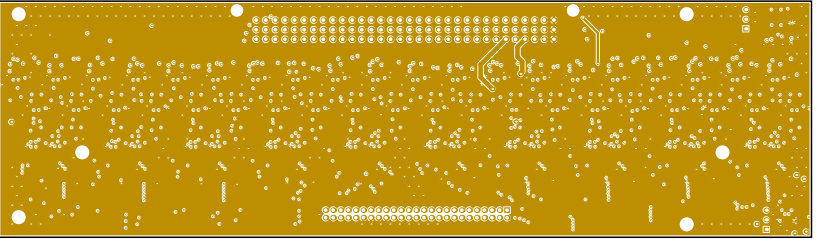
Top Layer (Scale 1:2)



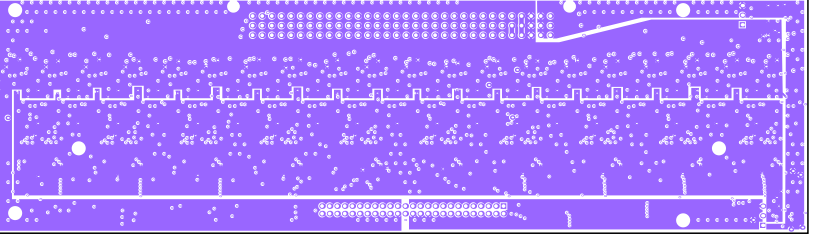
Layer 3 (Scale 1:2)



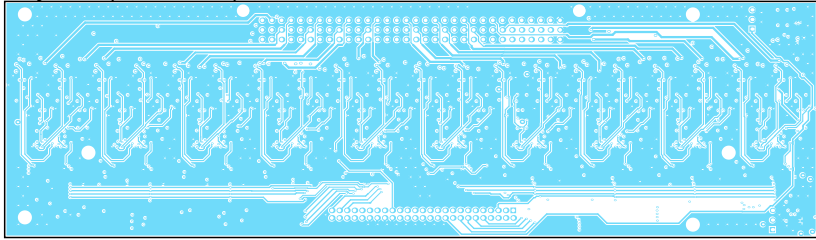
Layer 1 (Scale 1:2)



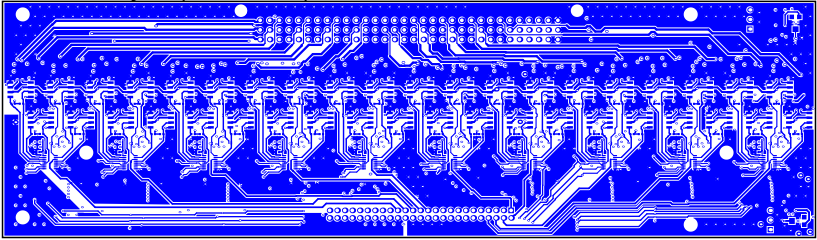
Layer 4 (Scale 1:2)



Layer 2 (Scale 1:2)



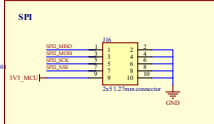
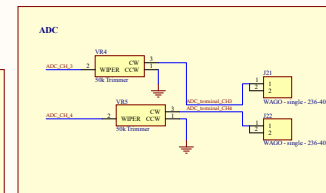
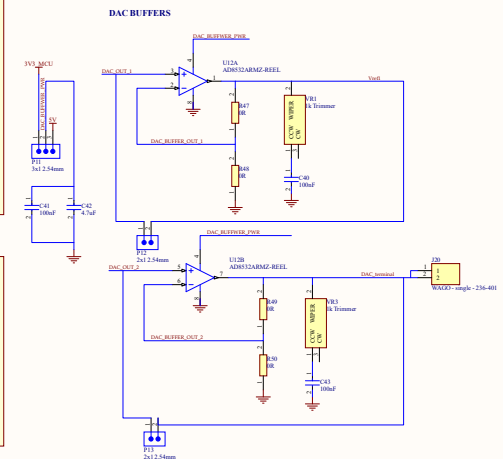
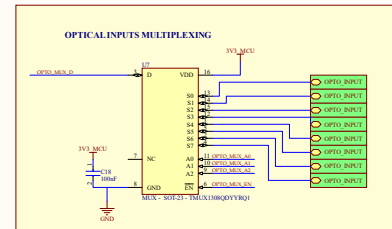
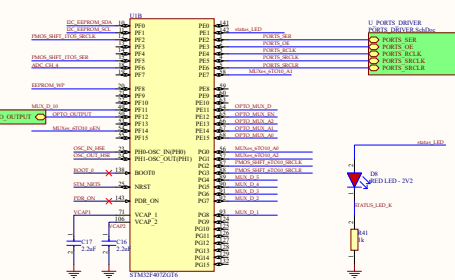
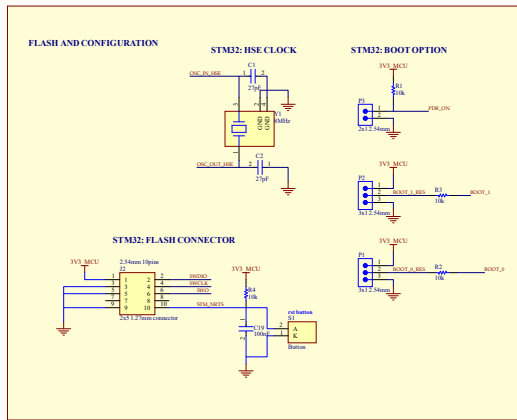
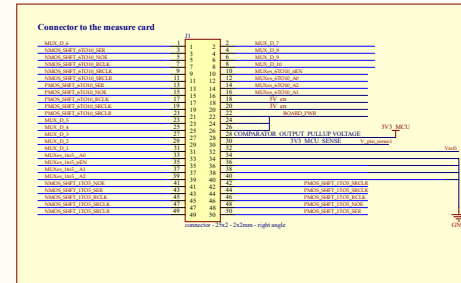
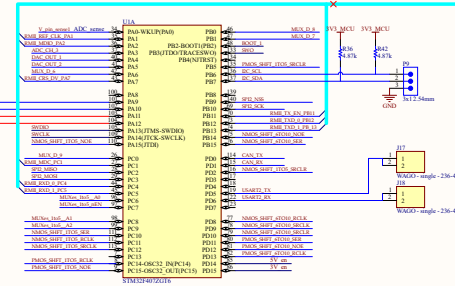
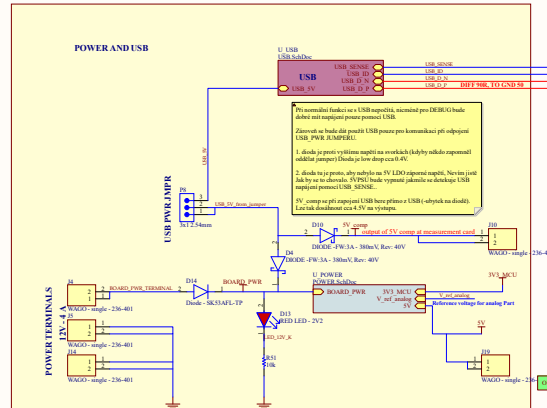
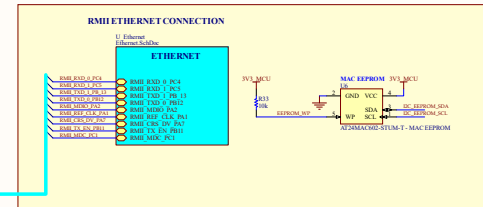
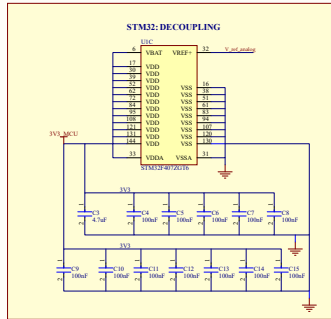
Bottom Layer (Scale 1:2)



B Ovládací karta

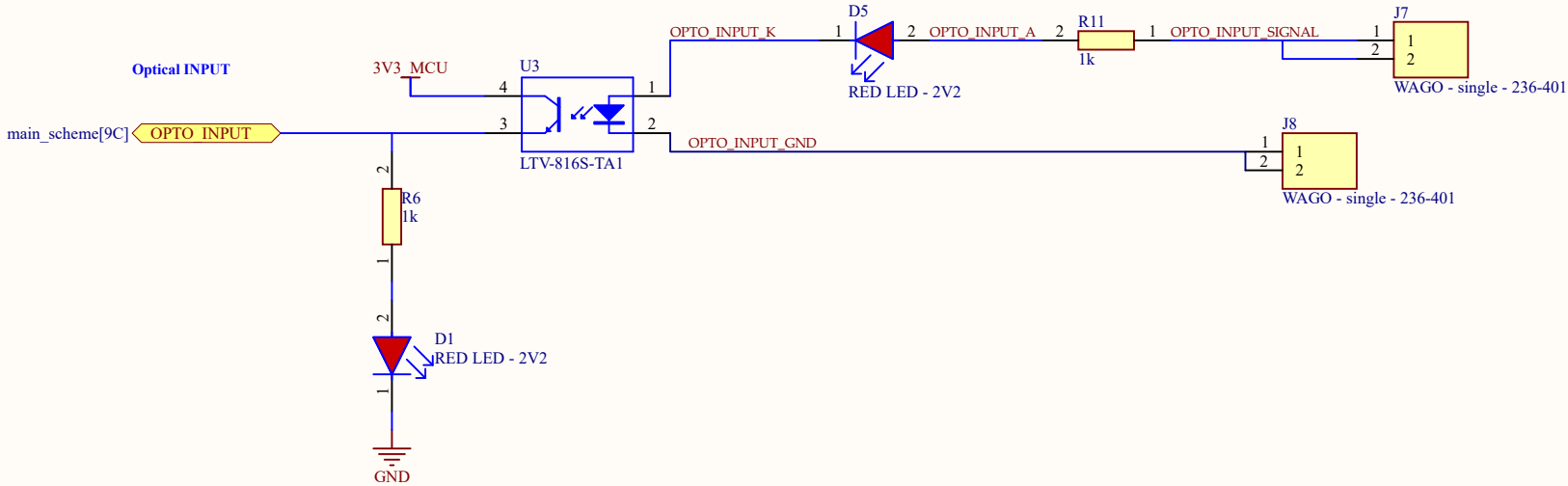
B.1 Ovládací karta - schéma

SYSTEM TOP LEVEL VIEW



Rev	Number	Revision
Rev	A1	1.0
Rev	A1	1.0
Rev	A1	1.0
Rev	A1	1.0

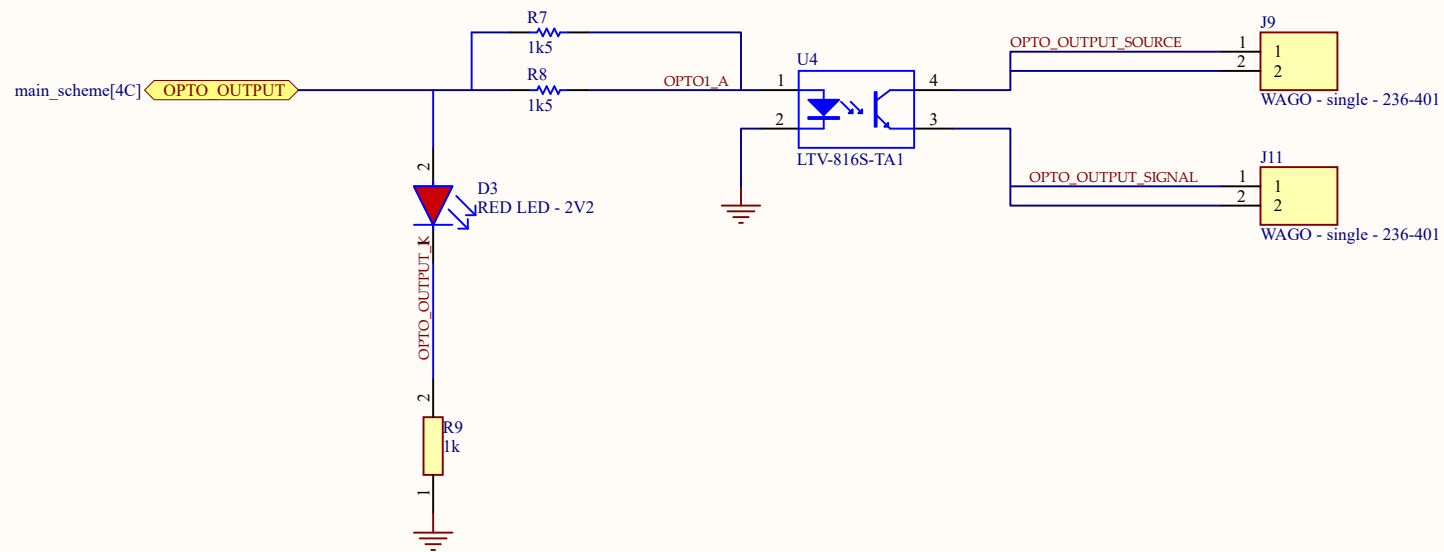
OPTICAL INPUT



Title		
Size A4	Number	Revision
Date:	5.07.2023	Sheet of
File:	C:\PROJECTS\...\Opto inputs.SchDoc	Drawn By:

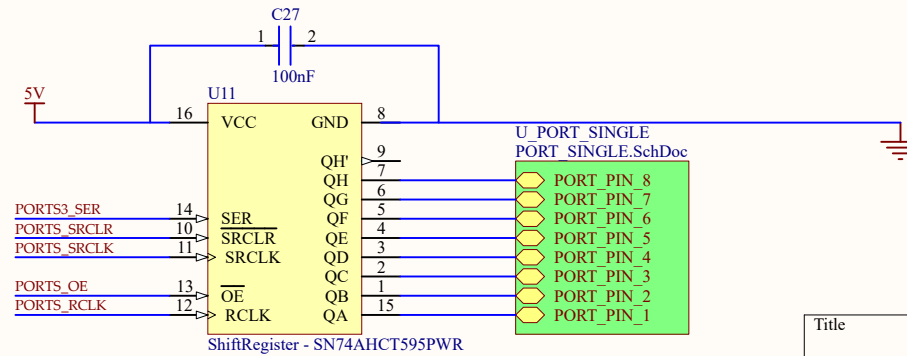
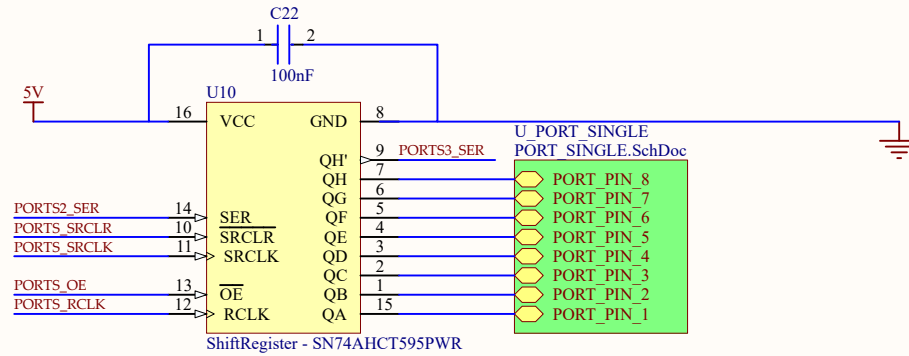
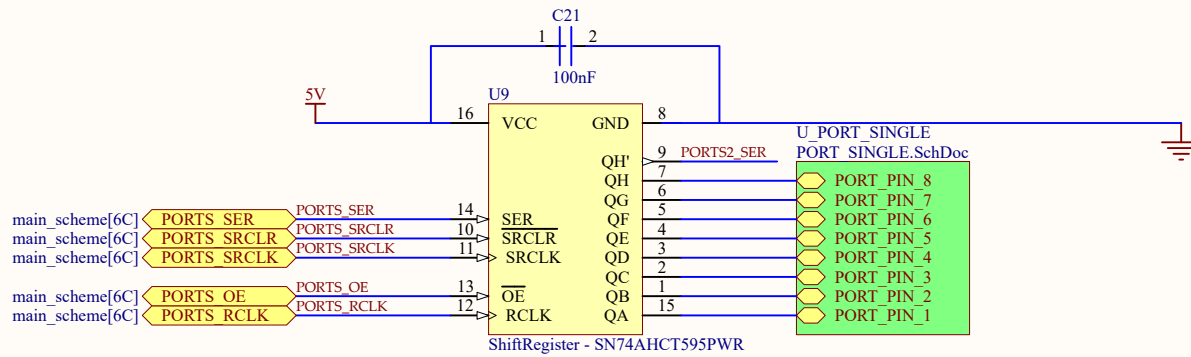
Title		
Size A3	Number	Revision
Date: 5.07.2023	Sheet of	
File: C:\PROJECTS\A\POWER.SchDoc	Drawn By:	

Optical Output



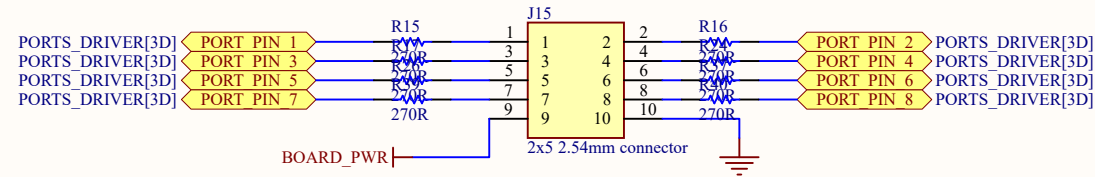
Title		
Size A4	Number	Revision
Date:	5.07.2023	Sheet of
File:	C:\PROJECTS\...\Opto_outputs.SchDoc	Drawn By:

EXT PORTS



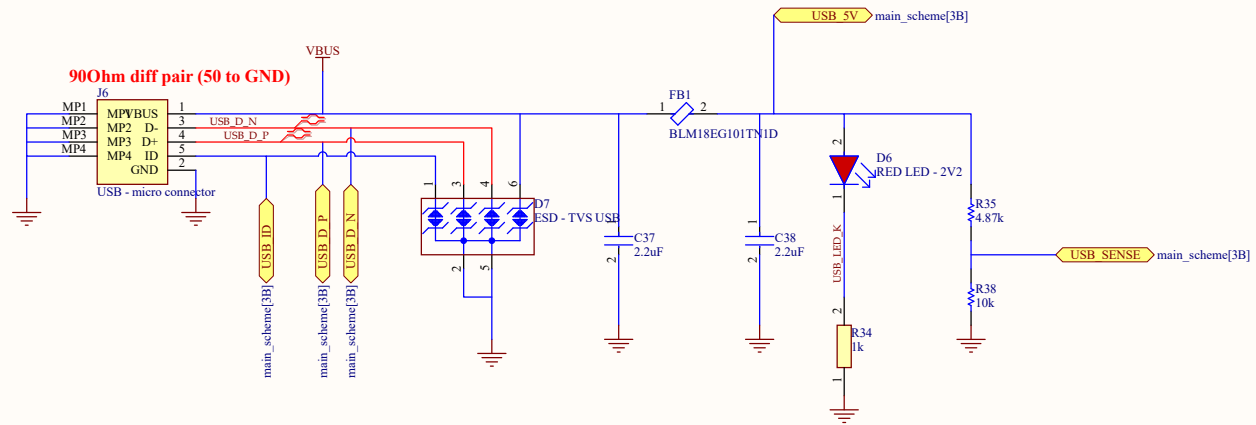
Title		
Size A4	Number	Revision
Date:	5.07.2023	Sheet of
File:	C:\PROJECTS\...\PORTS DRIVER.SchDoc	

SINGLE EXT PORT CONNECTOR



Title		
Size A4	Number	Revision
Date:	5.07.2023	Sheet of
File:	C:\PROJECTS\...\PORT_SINGLE.SchDoc Drawn By:	

USB

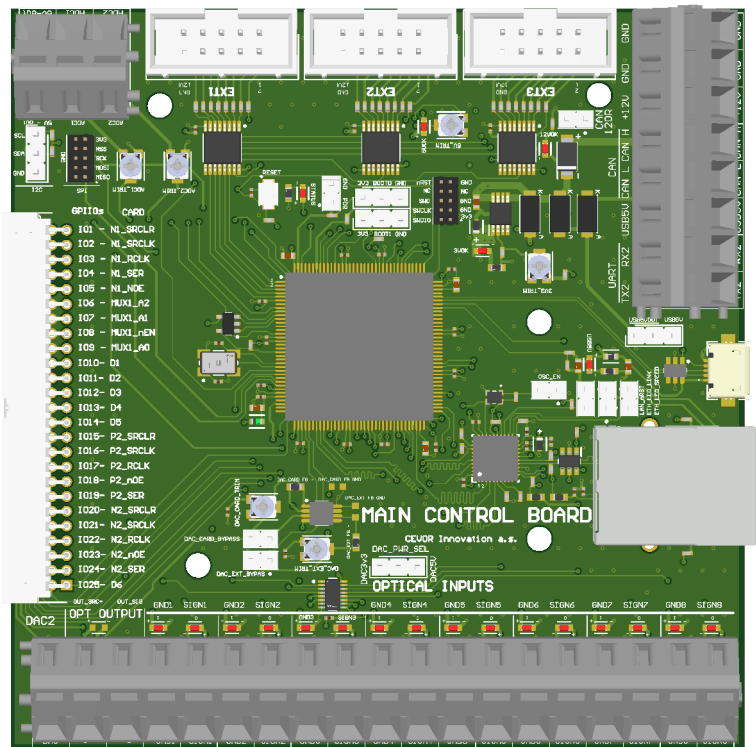


Title		
Size	Number	Revision
A3		
Date:	5.07.2023	Sheet of
File:	C:\PROJECTS\USB\SchDoc	Drawn By:

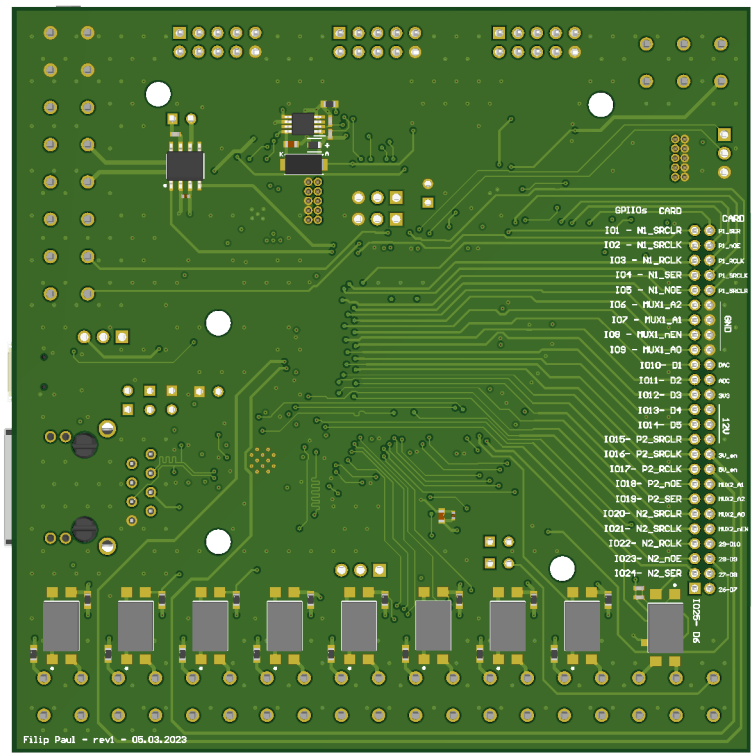
B.2 Ovládací karta - PCB

MAIN CONTROL BOARD

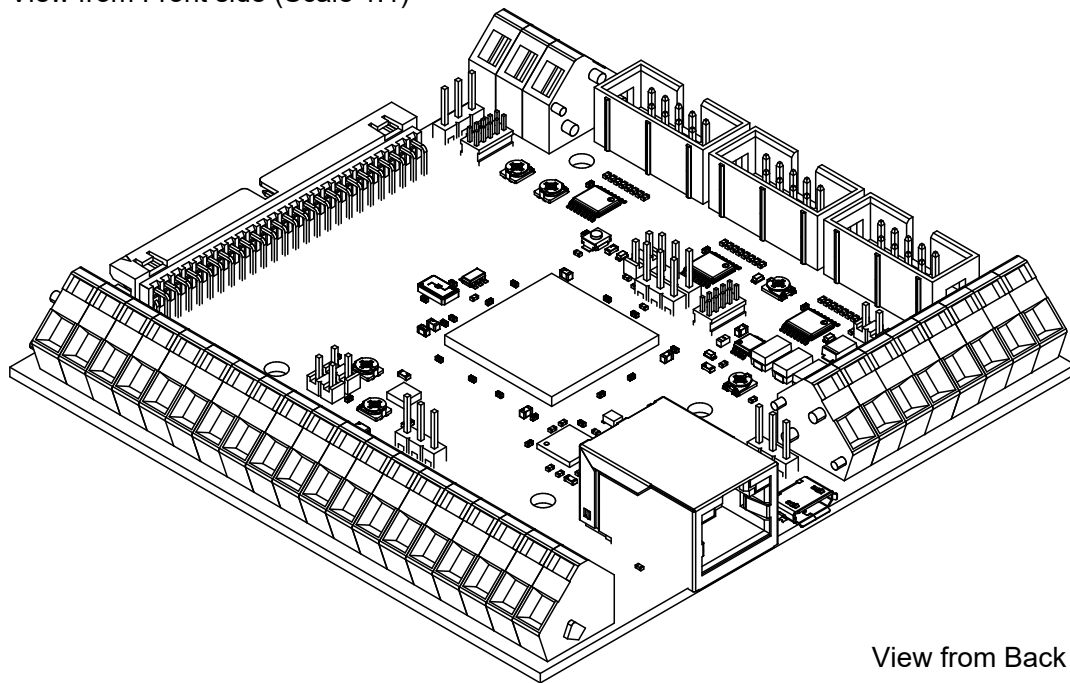
Realistic View



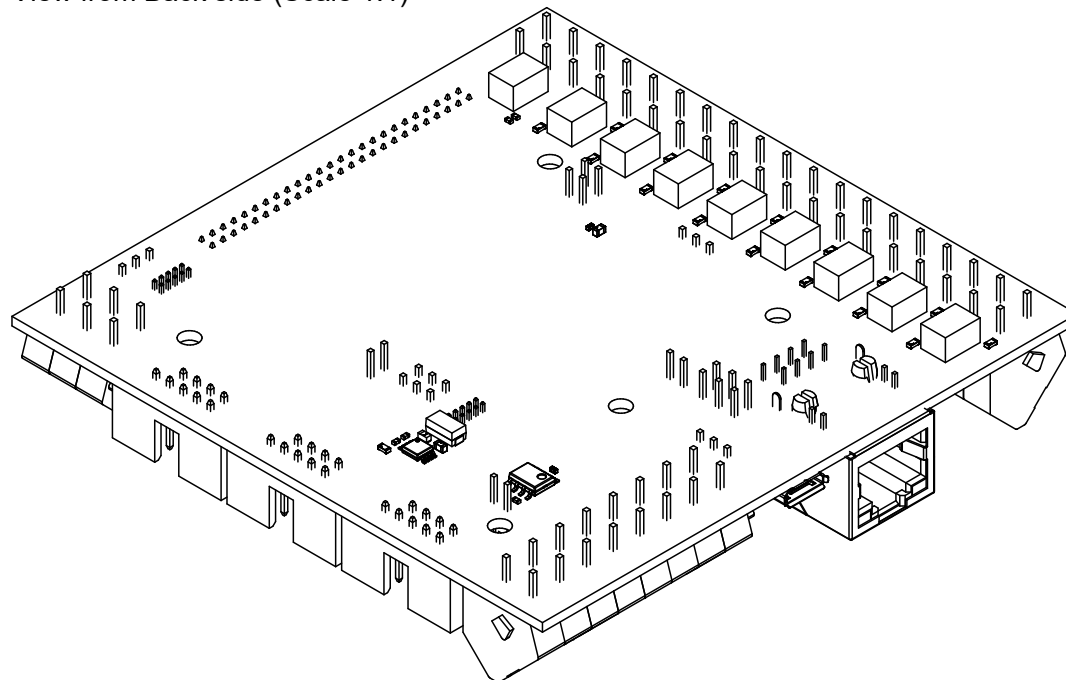
Realistic View



View from Front side (Scale 1:1)

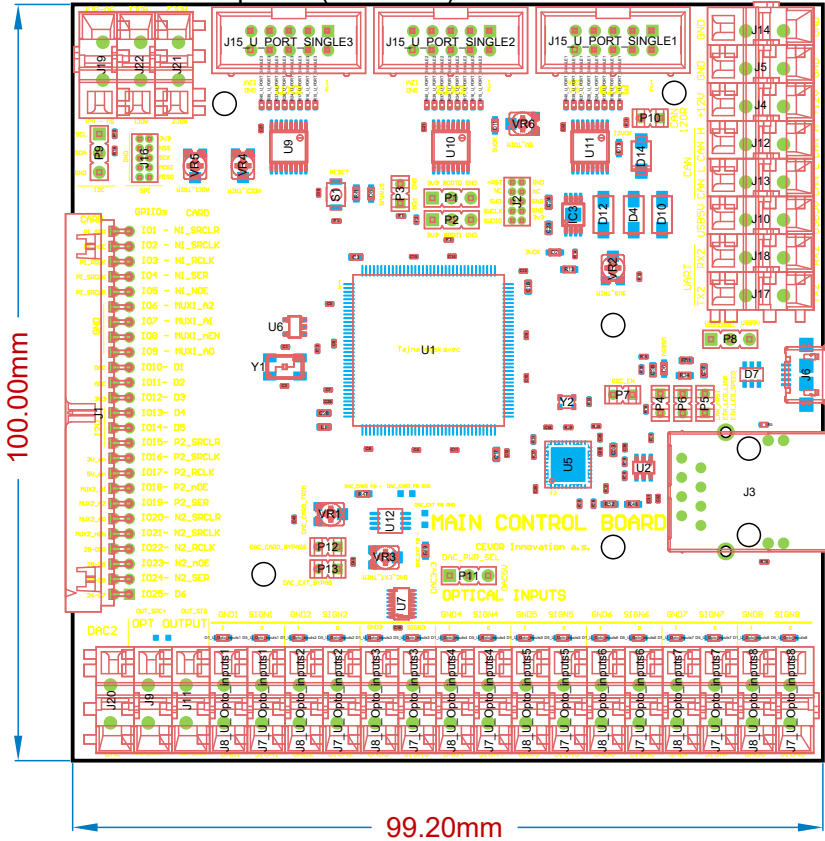


View from Back side (Scale 1:1)

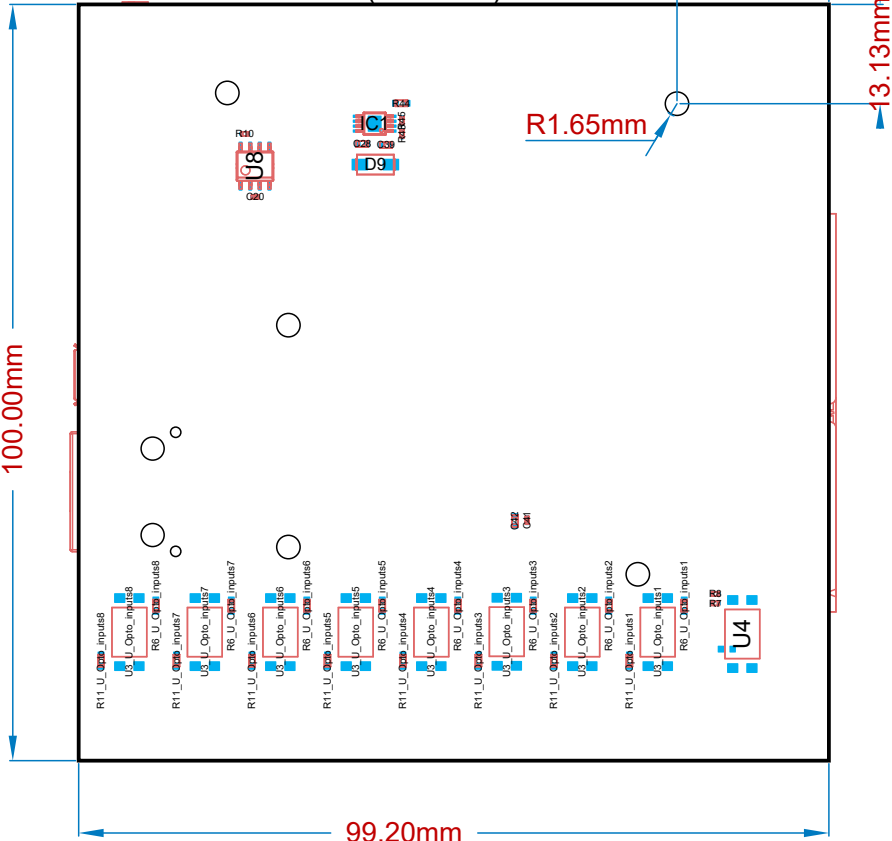


ASSEMBLY DRAWING

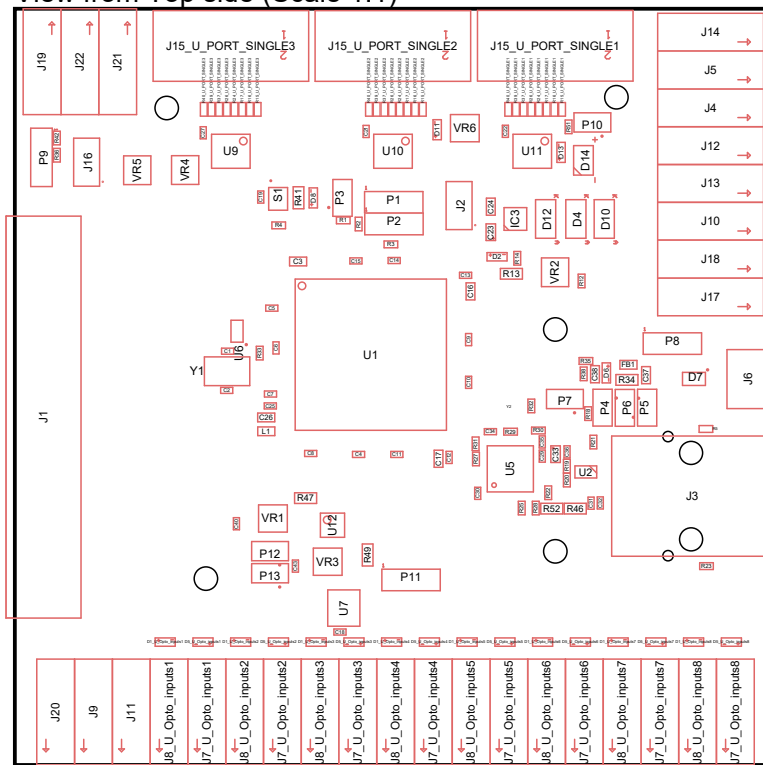
View from Top side (Scale 1:1)



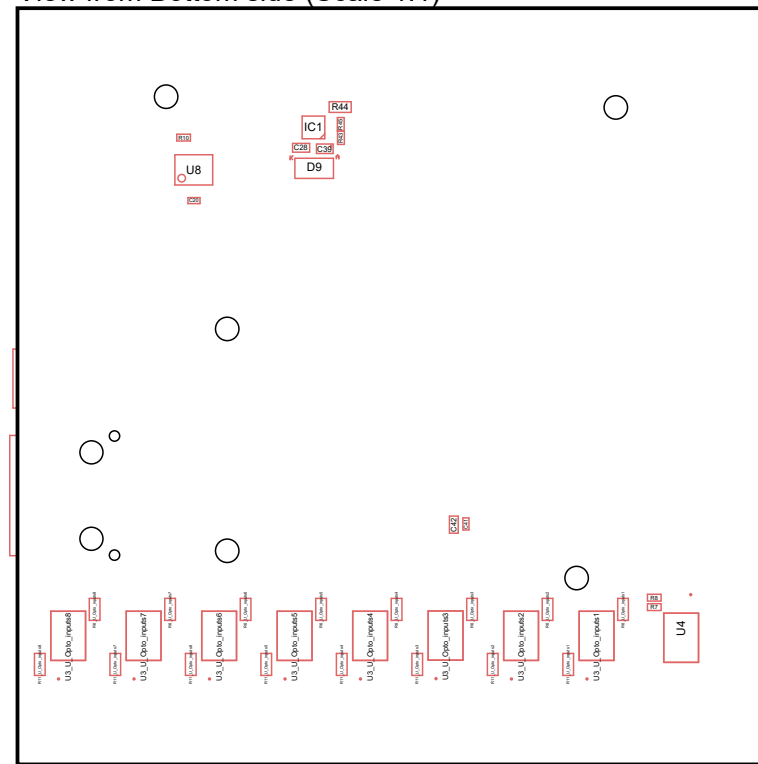
View from Bottom side (Scale 1:1)



View from Top side (Scale 1:1)



View from Bottom side (Scale 1:1)



FABRICATION DRAWING

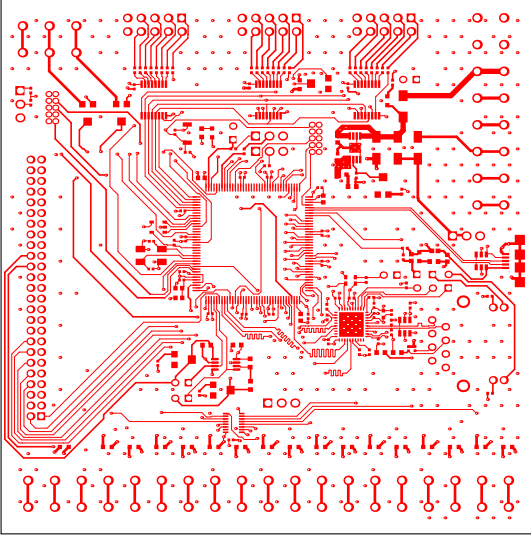
Layer Stack Legend

	Material	Layer	Thickness	Dielectric Material	Type	Gerber
		Top Overlay			Legend	GTO
	Surface Material	Top Solder	0.02mm	Solder Resist	Solder Mask	GTS
	JLC_6_TOP	Top Layer	0.04mm		Signal	GTL
	Prepreg		0.10mm	JLC3313	Dielectric	
	JLC_6_INNER	Inner Layer 2(GND)	0.02mm		Signal	G1
	Prepreg		0.55mm	JLCcore	Dielectric	
	Copper	Inner Layer 3	0.02mm		Signal	G2
			0.11mm	LC2116	Dielectric	
	Copper	Inner Layer 4	0.02mm		Signal	G3
	Prepreg		0.55mm	JLCcore	Dielectric	
	JLC_6_INNER	Inner Layer 5	0.02mm		Signal	G4
	Prepreg		0.10mm	JLC3313	Dielectric	
	JLC_6_TOP	Bottom Layer 1	0.04mm		Signal	GBL
	Surface Material	Bottom Solder	0.02mm	Solder Resist	Solder Mask	GBS
		Bottom Overlay			Legend	GBO
Total thickness: 1.59mm						

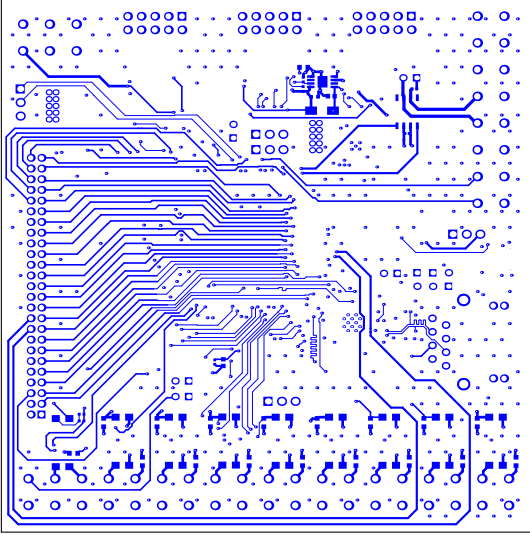
Impedance control stackup:
USB (top layer):
USB_D_P and USB_D_N -> 90 Ohms diff, 50 GND

ETHERNET (top layer):
TD_P and TD_N -> 100Ohms diff, 50 GND
TD_P and RD_N -> 100Ohms diff, 50GND

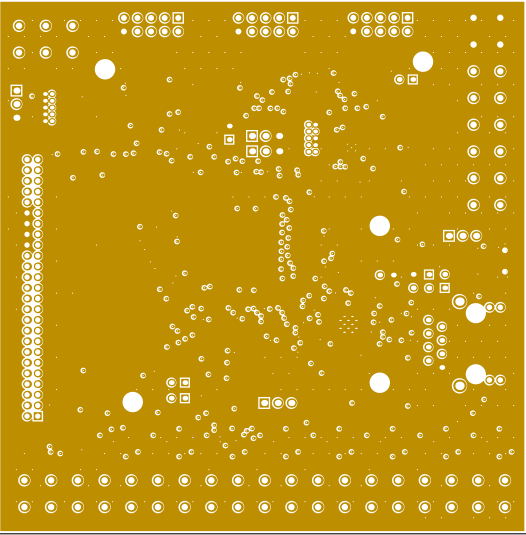
Top Layer (Scale 1:1)



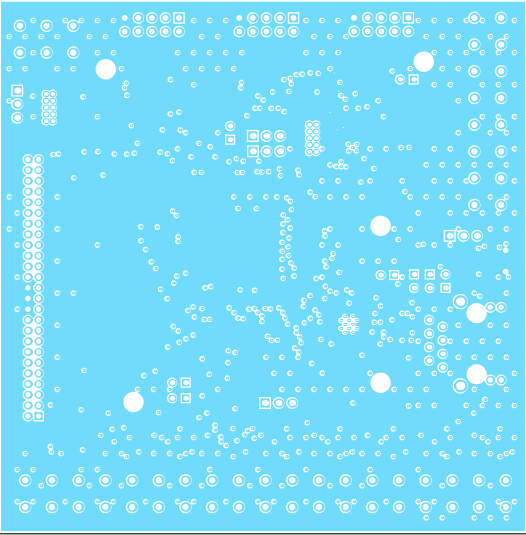
Bottom Layer 1 (Scale 1:1)



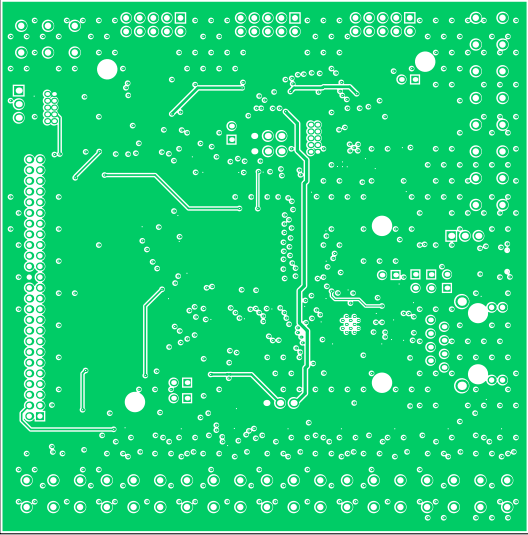
Inner Layer 2(GND) (Scale 1:1)



Inner Layer 3 (Scale 1:1)



Inner Layer 4 (Scale 1:1)



Inner Layer 5 (Scale 1:1)

