

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Tomáš Matějka



# 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

## MĚŘICÍ SYSTÉM TERMOLUMINISCENCE

THERMOLUMINESCENCE MEASUREMENT SYSTEM

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Tomáš Matějka**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Michal Kubíček, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**  
Ústav radioelektroniky

**Student:** Bc. Tomáš Matějka

**ID:** 159629

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měřicí systém termoluminiscence

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se systémem pro měření termoluminiscence PSI TL 500 a s obecnými principy termoluminiscence u fotosystému. Provedte kompletní revizi a návrh elektroniky systému TL 500. Řídicí jednotku systému vytvořte na platformě Xilinx Zynq.

Vytvořte program pro řídicí jednotku, realizujte prototyp a ověřte jeho funkčnost.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MAXFIELD, Clive. The design warrior's guide to FPGAs: devices, tools, and flows. Boston: Newnes/Elsevier, c2004. ISBN 0-7506-7604-3.

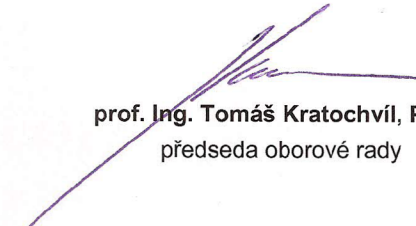
[2] WRIGHT, Tony. The photomultiplier handbook. ISBN 978-0199565092.

**Termín zadání:** 5. 2. 2018

**Termín odevzdání:** 17. 5. 2018

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Martin Trtílek

  
prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.  
předseda oborové rady



### 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**

Tato práce se zabývá revizí a návrhem nové verze elektroniky pro měřicí systém PSI TL 500, určený ke zkoumání jevu termoluminiscence u fotosystému II. V práci je provedeno seznámení s principy a vlastnostmi aktuální podoby měřicího systému a jsou diskutovány změny zanesené do jeho nové verze. Je proveden návrh nové digitální řídicí části systému založené na platformě Xilinx Zynq. Pro analogovou měřicí část je pak provedena revize zapojení a do návrhu jsou zaneseny dílčí změny.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

termoluminiscence, měřicí systém, Zynq, MicroZed, fotosystém, rostliny

## **ABSTRACT**

This thesis deals with revision and design of electronic for measuring system PSI TL 500 which is designed for measurement of thermoluminescence phenomena in photosystem II. Thesis describes principles and properties of the measuring system in its current form and changes for the new version are discussed. Digital control part based on Xilinx Zynq platform is designed. Revision of analog measuring part of system is made and partial changes are implemented.

## **KEYWORDS**

thermoluminescence, measuring system, Zynq, MicroZed, photosystem, plants

MATĚJKA, Tomáš. *Měřicí systém termoluminiscence*. Brno, 2017, 82 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měřicí systém termoluminiscence“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) 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(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Kubíčkoví, Ph.D. a konzultantovi diplomové práce panu Ing. Martinovi Trtílkovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

# OBSAH

Úvod	1
<b>1 Termoluminiscence a její měření</b>	<b>2</b>
1.1 Jev termoluminiscence a fotosystém . . . . .	2
1.1.1 Termoluminiscence . . . . .	3
1.1.2 Význam jevu termoluminiscence u fotosystému . . . . .	4
1.2 Měřicí systém termoluminiscence PSI TL 500 . . . . .	6
1.2.1 Dostupné konfigurace a parametry . . . . .	7
1.2.2 Provedení měřicí jednotky . . . . .	9
1.2.3 Provedení řídicí jednotky . . . . .	11
1.2.4 Nedostatky současné verze systému TL 500 . . . . .	13
1.2.5 Požadavky na návrh nové verze systému TL 500 . . . . .	14
<b>2 Návrh nové verze měřicího systému</b>	<b>16</b>
2.1 Rozhraní UII pro propojení měřicí a kontrolní jednotky . . . . .	16
2.1.1 I2C sběrnice . . . . .	17
2.1.2 Sériový kanál . . . . .	18
2.1.3 Trigrovací signály . . . . .	19
2.1.4 Proces detekce a inicializace MU . . . . .	20
2.2 Návrh řídicí jednotky . . . . .	21
2.2.1 MicroZed . . . . .	23
2.2.2 Návrh základové desky CU . . . . .	24
2.3 Návrh měřicí jednotky . . . . .	25
2.3.1 Světelný zdroj saturačních pulsů . . . . .	27
2.3.2 Zdroj aktinického světla . . . . .	31
2.3.3 Monitorovací ADC . . . . .	34
<b>3 Softwarové řešení pro SoC Zynq</b>	<b>36</b>
3.1 Platforma SoC Zynq . . . . .	36
3.1.1 Použité vývojové nástroje a postupy . . . . .	37
3.2 Implementace termoregulátoru . . . . .	38
3.2.1 Programovatelná logika . . . . .	38
3.2.2 Jádro Linuxu . . . . .	38
3.2.3 Uživatelský prostor Linuxu . . . . .	39
<b>4 Realizace a testování</b>	<b>41</b>
4.1 Realizovaný prototyp . . . . .	41
4.1.1 Řídicí jednotka . . . . .	41

4.1.2	Měřicí jednotka . . . . .	42
4.2	Testování světelných zdrojů . . . . .	43
4.2.1	Přípravek pro měření světelné intenzity . . . . .	44
4.2.2	Měření parametrů zdroje aktinického světla . . . . .	46
4.2.3	Měření parametrů světelného saturačního zdroje . . . . .	48
4.2.4	Testování termoregulátoru . . . . .	52
4.2.5	Měření termoluminiscence fotosyntetických vzorků . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>54</b>
	<b>Literatura</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>TL CU Maiboard - schéma zapojení</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>TL CU Maiboard - osazovací výkres</b>	<b>68</b>
<b>C</b>	<b>TL CU Maiboard - DPS</b>	<b>69</b>
C.1	Vrstva 1 . . . . .	69
C.2	Vrstva 2 . . . . .	69
C.3	Vrstva 3 . . . . .	70
C.4	Vrstva 4 . . . . .	70
<b>D</b>	<b>TL MU Maiboard - schéma zapojení</b>	<b>71</b>
<b>E</b>	<b>TL CU Maiboard - osazovací výkres</b>	<b>78</b>
E.1	Horní vrstva . . . . .	78
E.2	Spodní vrstva . . . . .	79
<b>F</b>	<b>TL MU Maiboard - DPS</b>	<b>80</b>
F.1	Vrstva 1 . . . . .	80
F.2	Vrstva 2 . . . . .	80
F.3	Vrstva 3 . . . . .	81
F.4	Vrstva 4 . . . . .	81
<b>G</b>	<b>Seznam elektronických příloh</b>	<b>82</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Změna vlnové délky fluorescence a fosforence vůči absorpci. [1]	2
1.2	Grafické znázornění jevu termoluminiscence u fotosystému. [7]	5
1.3	Změřená termoluminiscenční křivka řasy z rodu Chlorella.	5
1.4	Měřicí systém termoluminiscence PSI TL 500. [8]	6
1.5	Vodní chladicí jednotka AC-625 (vlevo) a jednotka tekutého dusíku (vpravo). [8]	8
1.6	Blokové znázornění zapojení systému TL 500 pro ST verzi (vpravo dole), LT verzi (nahore) a HT verzi (vlevo dole). [8]	9
1.7	Náhled na měřicí jednotku systému TL 500. [9]	10
1.8	Řez měřicí jednotkou - fotonásobič (1), termoregulátor (2), optika fotonásobiče (3), clona fotonásobiče (4), LED (5), měřicí ploška (6). [9]	11
1.9	Přední panel (nahore) a zadní panel (dole) řídicí jednotky. Konektory RS232 (1), MU - datové signály (2), MU - termistory (3), WCU (4), MU - napájení (5), MU - Peltierův článek a AHU (6), LNCU (7), síťové napájení (8). [9]	12
1.10	Původní měřicí systém termoluminiscence TL 200. [9]	13
2.1	Blokové schéma zapojení nové verze systému PSI TL 500.	16
2.2	Schematické zapojení I2C pro UII.	18
2.3	Schéma zapojení M-LVDS rozhraní UII.	19
2.4	Schéma zapojení budičů trigrovacích signálů.	20
2.5	Blokové schéma řídicí jednotky.	22
2.6	SOM MicroZed, pohled shora (vlevo) a pohled zesodu (vpravo). [20]	23
2.7	Blokové schéma základové desky „TL CU Mainboard“.	24
2.8	Blokové schéma spodní části MU.	26
2.9	Blokové schéma horní části MU.	26
2.10	Spínání LED saturačního světla pomocí NMOS tranzistoru.	28
2.11	HW omezení doby pulsu a řízení výkonového NMOS tranzistoru.	29
2.12	DC-DC měnič pro nabíjení kondenzátorů pulsního světelného zdroje.	29
2.13	Obvod pro nastavení výstupního napětí DC-DC měniče.	30
2.14	Komparátor pro spínání zátěže.	30
2.15	Časová odezva zdroje aktinického saturačního světla.	31
2.16	Schéma zapojení zdroje proudu pro aktinické kontinuální světlo.	32
2.17	Časová odezva zdroje proudu.	33
2.18	Závislost zpoždění proudového výstupu na hodnotě nastaveného proudu.	33
2.19	Frekvenční přenosová a fázová charakteristika zdroje.	33
2.20	Schéma zapojení monitorovacího ADC.	34

3.1	Obecné vnitřní blokové scéma SoC Zynq. . . . .	36
3.2	Zapojení časovače v PL SoC Zynq. . . . .	39
3.3	Vývojový diagram softwarově implementovaného termoregulátoru v uživatelském prostoru Linuxu. . . . .	40
4.1	Realizovaný prototyp CU, pohled zepředu. . . . .	41
4.2	Realizovaný prototyp CU, pohled zezadu. . . . .	42
4.3	Realizovaná základová deska CU. . . . .	42
4.4	Realizovaný prototyp MU. . . . .	43
4.5	Mechanické uchyzení LED světelných zdrojů a optických čoček. . . . .	43
4.6	Schematické zapojení transimpedančního zesilovače s PIN fotodiodou pro měření světelné intenzity. . . . .	44
4.7	Zapojení PIN fotodiody pro měření pomocí osciloskopu. . . . .	45
4.8	Kalibrace měřicího přípravku. Referenční světelný zdroj (1), měřicí přípravek s teflonovým válečkem (2), senzor referenčního měřiče světelné intenzity Skye (3) a světlonepropustná překrývka (4). . . . .	46
4.9	Změřená světelná intenzita a proud LED aktinického světelného zdroje v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC. . . . .	47
4.10	Zpoždění proudového výstupu aktinického světelného zdroje v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC. . . . .	48
4.11	Změřená světelná intenzita a relativní pokles intenzity během trvání světelného pulsu v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC pro saturační světelný zdroj. Doba trvání pulsu je 150 $\mu\text{s}$ . . . . .	49
4.12	Změřená světelná intenzita v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC pro saturační světelný zdroj. Detail nelineární oblasti z obr. 4.11 v logaritmickém měřítku. . . . .	49
4.13	Změřené výstupní napětí zdroje a výsledný proud LED saturačního světelného zdroje v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC. Doba trvání pulsu je 150 $\mu\text{s}$ . . . . .	50
4.14	Oscilogram znázorňující časový průběh trigrovacího signálu ( $U_{TRIG}$ ), proudu LED ( $I_{LED}$ ), výstupního napětí zdroje ( $U_{LED}$ ) a světelné intenzity ( $E$ ) pro saturační světelný zdroj. Nastavená hodnota je 90 % z rozsahu DAC a doba trvání pulsu 150 $\mu\text{s}$ . . . . .	50
4.15	Oscilogram znázorňující časový průběh trigrovacího signálu ( $U_{TRIG}$ ), proudu LED ( $I_{LED}$ ), výstupního napětí zdroje ( $U_{LED}$ ) a světelné intenzity ( $E$ ) pro saturační světelný zdroj. Nastavená hodnota je 100 % z rozsahu DAC a doba trvání pulsu 10 $\mu\text{s}$ . . . . .	51
4.16	Změřený průběh výstupního napětí světelného saturačního zdroje po světelném pulsu v čase $t = 0$ s délkou trvání 150 $\mu\text{s}$ a při nastavené hodnotě 90 % z rozsahu DAC. . . . .	52

4.17 Průběh regulované teploty měřicí plošky u standardní verze termoluminiscence s Peltierovým článkem. Závislost měřené teploty a chyby vůči požadované teplotě při lineárním ohřevu se strmostí $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . . .	52
4.18 Změřená termoluminiscenční křivka u rostliny Ibišek. . . . .	53

# SEZNAM TABULEK

1.1	Souhrn základních parametrů systému TL 500. [8] . . . . .	10
2.1	Popis signálů UII a jejich využití u systému termoluminiscence. . . . .	17
2.2	Přehled monitorovaných signálů MU. . . . .	35

# SEZNAM VÝPISŮ

1.1	Ukázka části měřicího protokolu pro termoluminiscenci. . . . .	7
-----	--	---

# ÚVOD

Biologie je nepostradatelný vědní obor věnující se přírodě a pomáhá nám chápat život kolem nás. Moderní technologie nám poskytují nové možnosti zkoumání a staly se tak neoddelitelnou součástí všech odvětví biologie. V této vědní disciplíně působí i společnost Photon Systems Instruments (PSI). Jde o českou společnost zabývající se především vývojem a výrobou profesionálních laboratorních zařízení využitelných pro vědecký výzkum právě v oblasti biologie. Během více než dvacetiletého působení společnosti se její produkty prosadily v globálním měřítku a našly uplatnění v mnoha zemích. Její přístroje se používají například na významných univerzitách jako je Princeton nebo Stanford.

Cílem této práce je provést modernizaci laboratorního přístroje PSI TL 500. Jde o měřicí systém určený k sledování jevu termoluminiscence u fotosystému II. Má být proveden návrh nové digitální řídicí části měřicího systému se záměrem náhrady dnes již zastaralých komponent, zjednodušení výroby, zmenšení rozměrů, ale především zavedení nových funkcionalit a poskytnutí uživatelsky přívětivějšího prostředí pro obsluhu. Návrh řídicí jednotky s důrazem na univerzálnost pak umožní její budoucí využití i v dalších produktech. V rámci modernizace má být také provedena revize zapojení analogové části měřicího systému za účelem dosažení kompatibility s novou řídicí částí, odstranění drobných návrhových chyb, zlepšení určitých parametrů a zavedení nových funkcionalit.

Práce je rozdělena do čtyř kapitol. První kapitola slouží jako teoretický úvod k jevu termoluminiscence a k seznámení se současnou verzí měřicího systému TL 500. Druhá kapitola se zabývá návrhem hardwaru nové verze měřicí a řídicí části systému TL 500. Třetí kapitola se věnuje použitým vývojovým nástrojům a softwaru řídicí jednotky. V poslední čtvrté části je pak uveden realizovaný prototyp nové verze měřicího systému a výsledky jeho testování.

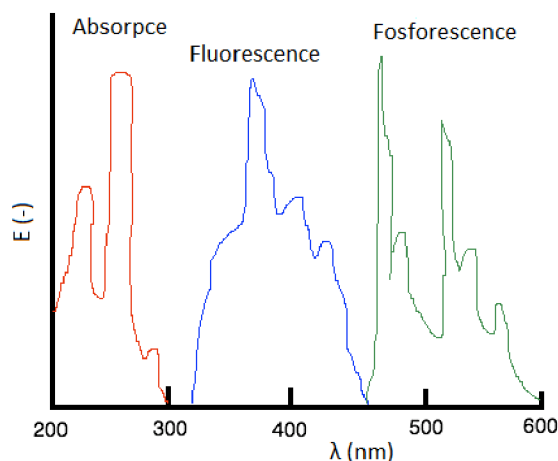
# 1 TERMOLUMINISCENCE A JEJÍ MĚŘENÍ

První část kapitoly se věnuje teoretickému úvodu k jevu termoluminiscence a jeho využití pro zkoumání energetických úrovní u fotosystému II. Druhá část kapitoly pak slouží k seznámení s měřicím systémem termoluminiscence PSI TL 500. V závěru kapitoly jsou uvedeny požadavky na návrh nové verze měřicího systému.

## 1.1 Jev termoluminiscence a fotosystém

Luminiscence je termín používaný pro popis emise světelného (nebo obecně elektromagnetického) záření materiálu. Na rozdíl od inkandescence není tato emise způsobena vlastní nenulovou teplotou daného materiálu (princip záření černého tělesa). Luminiscence je tedy definována jako „přebytek záření materiálu nad jeho tepelným zářením“. Luminiscence je vyvolána, pokud odpovídající materiál absorbuje množství energie a dochází k přechodu atomů nebo molekul do vyšších energetických stavů, tedy k excitaci. Excitovaný stav není stabilní a dochází tak k deexcitaci atomů do jejich základního stavu. Během deexcitace je uvolněná energie vyzářena jako kvantum elektromagnetického záření (foton) [2].

Luminiscenci dělíme dle způsobu jejího vyvolání, tedy způsobem jakým došlo k excitaci. Pokud je excitace způsobena absorpcí elektromagnetického záření (fotonu), je tento druh luminiscence nazýván jako fotoluminiscence. Dalšími druhy luminiscence mohou být například elektroluminiscence (luminiscence vyvolaná elektrickým proudem nebo polem), chemiluminiscence (luminiscence vyvolaná chemickou reakcí), radioluminiscence (luminiscence vyvolaná působením ionizujícího záření) apod. [2].



Obr. 1.1: Změna vlnové délky fluorescence a fosforence vůči absorpci. [1]

Další dělení luminiscence je na fluorescenci a fosforescenci. Oba termíny jsou obvykle spojovány s fotoluminiscencí, protože v obou případech dochází k excitaci

absorpcí fotonu. Rozdíl je v době života atomu v excitovaném stavu. V případě fluorescence dochází k emisi fotonu v časovém intervalu menším než  $10^{-5}$  s po excitaci. V případě fosforescence může být tento interval v řádu sekund až minut [1]. Pro fluorescenci i fosforescenci je typický spektrální posun oproti absorbovanému záření způsobený energetickými ztrátami. Emitované záření má tak menší energii a delší vlnovou délku než záření absorbované. Situace je znázorněna na obrázku 1.1.

### 1.1.1 Termoluminiscence

Termoluminiscence je luminiscence, jejímž stimulátorem je tepelná energie. Podstatné je, že tepelná energie samotná nevyvolává excitující účinek, ten je vyvolán předchozí absorpcí energie, například formou světelného nebo ionizujícího záření. Přesnější označení jevu je „tepelně stimulovaná luminiscence“, pojem termoluminiscence se však v praxi vžil. Pokud dojde k excitaci za dostatečně nízké teploty, jsou excitující elektrony „uvězněny“ do elektronových pastí v zakázaném pásu. K uvolnění elektronů dojde až v případě dodání tepelné energie. Při deexcitaci je energie uvolněna opět formou elektromagnetického záření (fotonu) [5].

Při pozorování jevu termoluminiscence je zkoumaný materiál lineárně zahříván a současně je měřena světelná intenzita emitovaná materiálem. Během ohřevu světelná intenzita roste, až dosáhne při určité teplotě svého maxima, které odpovídá aktivační energii. Následuje pokles intenzity vlivem vyčerpání zásoby zachycených elektronů. Závislost světelné intenzity na teplotě je nazývána termoluminiscenční křivkou. Často existuje více než jeden typ záchytných hladin, proto může mít termoluminiscenční křivka několik maxim [4].

Termoluminiscence najde několik praktických uplatnění, jedním z nich je například termoluminiscenční datování, které využívají zejména archeologové pro určení stáří nalezených vzorků keramiky, stavebních materiálů, skla, porcelánu apod. Archeologické vzorky uložené v zemi desítky až desetitisíce let jsou permanentně vystaveny přírodním zdrojům ionizujícího záření. Jde především o záření radionuklidů obsažených v okolí vzorku nebo ve vzorku samém. Ionizující záření má excitující účinek a dochází k postupnému hromadění elektronů v elektronových pastech. Množství nahromaděných elektronů je tedy úměrné stáří vzorku. Důležitým předpokladem je, že zkoumaný vzorek byl při své výrobě prudce zahřát (vypálen). Byla tak vyvolána termoluminiscence a došlo k rekombinaci dříve nahromaděných elektronů v použitém materiálu, čímž došlo k „časovému vynulování“ vzorku.

Při určování stáří je změřena termoluminiscenční křivka archeologického vzorku. Dále je měřena termoluminiscenční křivka vzorku po jeho vystavení známé dávce ionizujícího záření. Tak je zjištěna tzv. „dávková závislost“ vzorku vyjadřující změny tvaru termoluminiscenční křivky v závislosti na množství absorbované dávky záření.

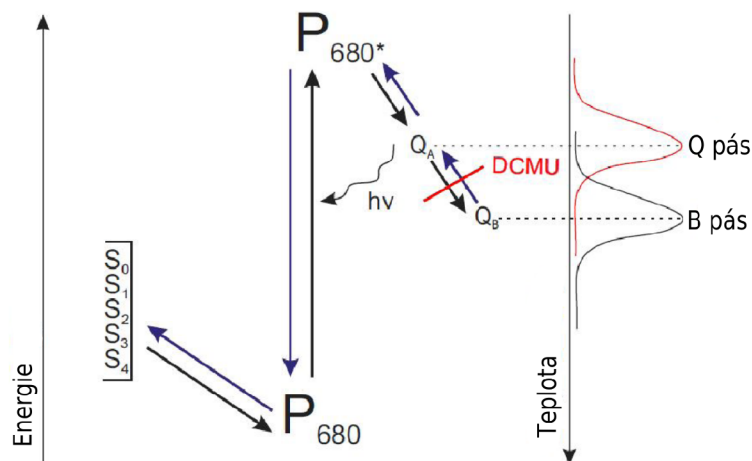


Zároveň jsou zkoumány parametry ionizujícího záření v místě nálezu vzorku. Ze zjištěných informací lze následně určit stáří archeologického vzorku s přesností až  $\pm 5\%$  [4].

Dalším příkladem využití termoluminiscence je termoluminiscenční dozimetrie. Princip je obdobný s termoluminiscenčním datováním, kdy je excitující účinek vyvolán absorpcí ionizujícího záření. Vhodná látka je po určitou dobu vystavena působení ionizujícího záření. Světelná intenzita při následném vyvolání termoluminiscence je pak úměrná dávce absorbovaného ionizujícího záření.

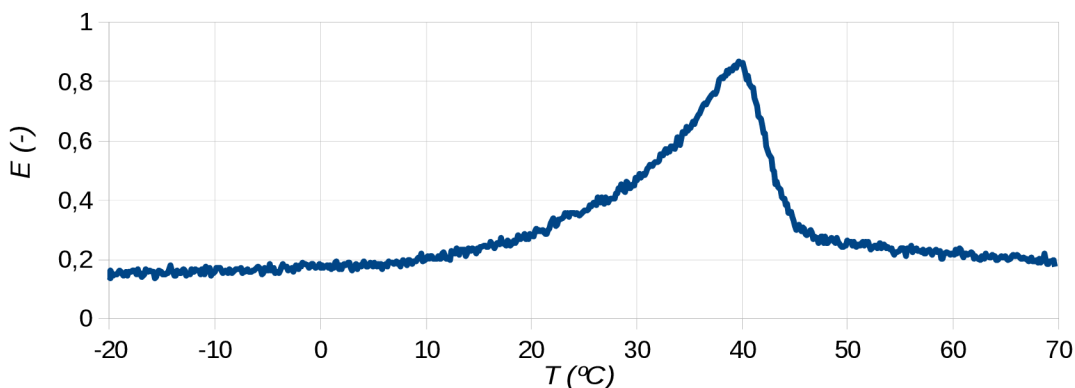
### 1.1.2 Význam jevu termoluminiscence u fotosystému

Termoluminiscence najde uplatnění také v oblasti biologie. Zde se využívá pro zkoumání energetických struktur u fotosystému II (PSII). Při osvětlení fotosyntetického vzorku dochází v reakčních centrech PSII k separaci náboje a k akumulaci radikálních párů, čímž je uchována absorbovaná světelná energie. Následným lineárním ohřevem vzorku dochází k rekombinaci radikálních párů a absorbovaná energie je uvolňována formou světelného záření. Tvar termoluminiscenční křivky charakterizuje zkoumaný fotosyntetický vzorek. Pravděpodobnost rekombinace (tedy i intenzity světelného záření) roste exponenciálně s teplotou. Zásoba akumulované energie (elektronů) je však konečná a termoluminiscenční křivka dosáhne při určité teplotě svého maxima. Pozice maxima je úměrná aktivační energii a je využita pro přiřazení k určitému termoluminiscenčnímu pásu. Termoluminiscenční pásy jsou definovány přes široké spektrum pozorovaných teplot a poskytují informaci o stabilitě radikálních párů a o funkci reakčních center PSII. Informace mohou sloužit například k monitorování vlivu různých biotických a abiotických stresových faktorů prostředí, zkoumání účinků herbicidů nebo pro detekce genetických modifikací [6]. Na obr. 1.2 je ilustrace jevu termoluminiscence u PSII, kde je znázorněna změna termoluminiscenčního pásu jako následek použití herbicidu (DCMU).



Obr. 1.2: Grafické znázornění jevu termoluminiscence u fotosystému. [7]

Pro osvit fotosyntetického vzorku se typicky využívá tzv. zdroje aktinického světla, nebo zdroje saturačních světelných pulsů. Zdroj aktinického světla má charakter kontinuálního osvětlení o intenzitě v řádu desítek až tisíců  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Zdroje saturačních světelných pulsů mají charakter krátkých světelných záblesků, s dobou trvání od jednotek až po stovky  $\mu\text{s}$ . Světelné záblesky dosahují vysokých hodnot světelné intenzity, typicky až statisíců  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Rozsah pozorovaných teplot se může pohybovat v rozmezí od  $-180^\circ\text{C}$  do  $+200^\circ\text{C}$ , většina termoluminiscenčních pásem se však nachází v intervalu od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+60^\circ\text{C}$ .



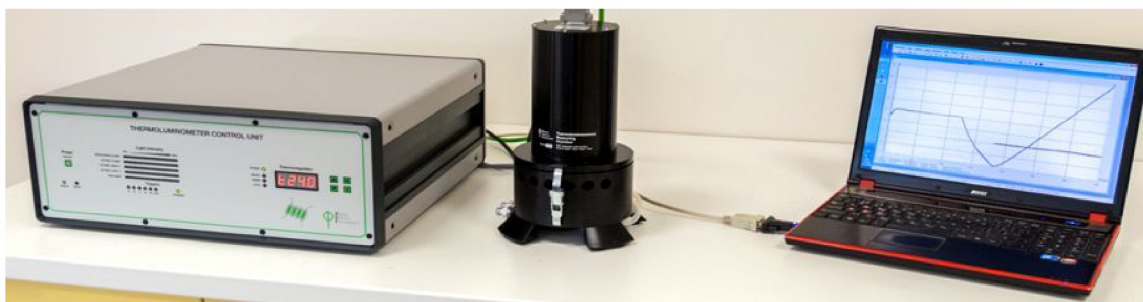
Obr. 1.3: Změřená termoluminiscenční křivka řasy z rodu Chlorella.

Na obrázku 1.3 je znázorněna změřená termoluminiscenční křivka řasy z rodu Chlorella. Vzorek podchlazený na teplotu  $-20^\circ\text{C}$  byl vystaven jednomu světelnému saturačnímu pulsu o intenzitě přibližně  $150\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  s dobou trvání  $150 \mu\text{s}$ . Následoval lineární ohřev se strmostí  $1^\circ\text{C}/\text{s}$  až na teplotu  $+70^\circ\text{C}$ . Výsledkem je závislost relativní hodnoty světelné intenzity na teplotě vzorku. Z průběhu je patrné maximum při teplotě  $+40^\circ\text{C}$ .

## 1.2 Měřicí systém termoluminiscence PSI TL 500

Měřicí systém PSI TL 500 je laboratorní přístroj společnosti PSI (Photon Systems Instruments) určený pro měření jevu termoluminiscence u fotosystému. Měřicí systém se skládá ze dvou hlavních částí. První částí je řídicí jednotka (control unit, dále jen CU) a je znázorněna na obr. 1.4 vlevo. CU zahrnuje napájení, potřebnou řídicí elektroniku a přední panel, který informuje uživatele o stavu probíhajícího měření.

Druhou částí systému je měřicí jednotka (measuring unit, dále jen MU), která je propojena s CU a její podoba je znázorněna na obr. 1.4 uprostřed. Zkoumaný vzorek se vkládá do MU, kde je udržována jeho teplota dle přednastaveného teplotního profilu. Vzorek může být vystaven účinkům aktinického nebo saturačního světelného zdroje, oba světelné zdroje jsou součástí MU. Intenzita vzorkem emitovaného světla je v MU měřena pomocí fotonásobiče a digitalizovaná data jsou vyčítána pomocí CU.



Obr. 1.4: Měřicí systém termoluminiscence PSI TL 500. [8]

Soustava je řízena prostřednictvím programu FluorWin z uživatelského PC s operačním systémem Windows. Uživatelský PC komunikuje s CU pomocí rozhraní RS232 nebo USB.

FluorWin je univerzální program, který využívají i další produkty společnosti PSI. Uživatel si pomocí programu FluorWin nadefinuje protokol popisující celý průběh měření. Speciálně pro tvorbu protokolů je využíván společností PSI vyvinutý programovací jazyk. Definice průběhu měření spočívá v nastavení parametrů měření, jako je teplota vzorku na začátku a na konci měření, strmost změny teploty, zisk detektoru, intenzity světelných zdrojů apod. Dále si uživatel určí přesné časové značky jednotlivých událostí. Například v jaký čas bude aktivován zdroj saturačního aktinického světla, jak dlouho bude záblesk saturačního světla trvat, nebo kolikrát se má záblesk opakovat. Časové značky lze nastavovat s jemným rozlišením 100 ns. Velkou předností tohoto řešení je univerzálnost, kdy je možné bez omezení definovat libovolné parametry a události v libovolných okamžicích.

Na výpisu 1.1 je názorná ukázka části takového protokolu [9]. Protokoly je možné vytvářet i pomocí průvodce (wizard).

Výpis 1.1: Ukázka části měřicího protokolu pro termoluminiscenci.

```
1 ;*** SETTING LIGHT DURATION *****
2 MeasuringFlash=2.5us
3 ActinicFlash=200us
4 ;
5 ;**** SETTING LIGHT INTESITY *****
6 M_Voltage=0Num
7 F_Voltage=8Num
8 A_Voltage=10Num
9 ;
10 ;**** SETTING LIGHT ON THE TIME SCALE**
11 FlashesNum = 30Num
12 Flash_Time = 1s
13 actinic_light_duration = 50s
14 ;
15 ;**** TEMP SETTINGS *****
16 cooling_time_1 = 10s
17 cooling_temperature_1 = 0
18 end_temp = 20Num+5Num
19 ;
20 ;**** MEASUREMENT PERIODE *****
21 periode = 100ms ;Sample period
```

Uživatелеm definovaný protokol je následně programem zkompileován. Při kompilaci je kontrolováno dodržení syntaxe a dodržení dovolených rozsahů nastavených hodnot. Zkompileovaný protokol je následně odeslán do CU a je zahájeno měření. Po skončení měření jsou z CU naměřená data nahrána do PC a uživateli jsou prezentovány ve FluorWin jako měřená intenzita světla v závislosti na čase nebo na teplotě vzorku.

### 1.2.1 Dostupné konfigurace a parametry

Přístroj je nabízen ve třech základních variantách podle dosažitelného teplotního rozsahu měřeného vzorku. Verze LT (low temperature) je určena pro teplotní rozsah od  $-90^{\circ}\text{C}$  do  $+70^{\circ}\text{C}$ , verze ST (standard temperature) od  $-25^{\circ}\text{C}$  do  $+70^{\circ}\text{C}$  a verze HT (high temperature) od  $-15^{\circ}\text{C}$  do  $+170^{\circ}\text{C}$ .

Kromě jednotek CU a MU je součástí měřicího systému TL 500 také vodní chladič jednotka (water cooling unit, dále jen WCU). Smyslem WCU je uzavření cirkulačního okruhu chladičí kapaliny s jednotkou MU. Více o principu funkce MU v sekci 2.3. WCU je autonomní jednotka udržující přednastavenou teplotu chladičí kapaliny. Teplota kapaliny se nastavuje ručně přímo na jednotce WCU. Pomocí CU je pak pouze spínáno cirkulační čerpadlo, které je součástí WCU.

LT varianta systému TL 500 je dále rozšířena o chladič jednotku tekutého dusíku (liquid nitrogen cooling unit, dále jen LNCU). LNCU je Dewarova nádoba naplněná tekutým dusíkem. Tekutý dusík je přiveden do MU, kde je díky jeho odpařování možné dosáhnout velmi nízkých teplot vzorku. Přísun tekutého dusíku je regulován pomocí elektronicky spínatelného ventilu, který je řízen pomocí CU. LNCU i WCU jsou znázorněny na obrázku 1.5.

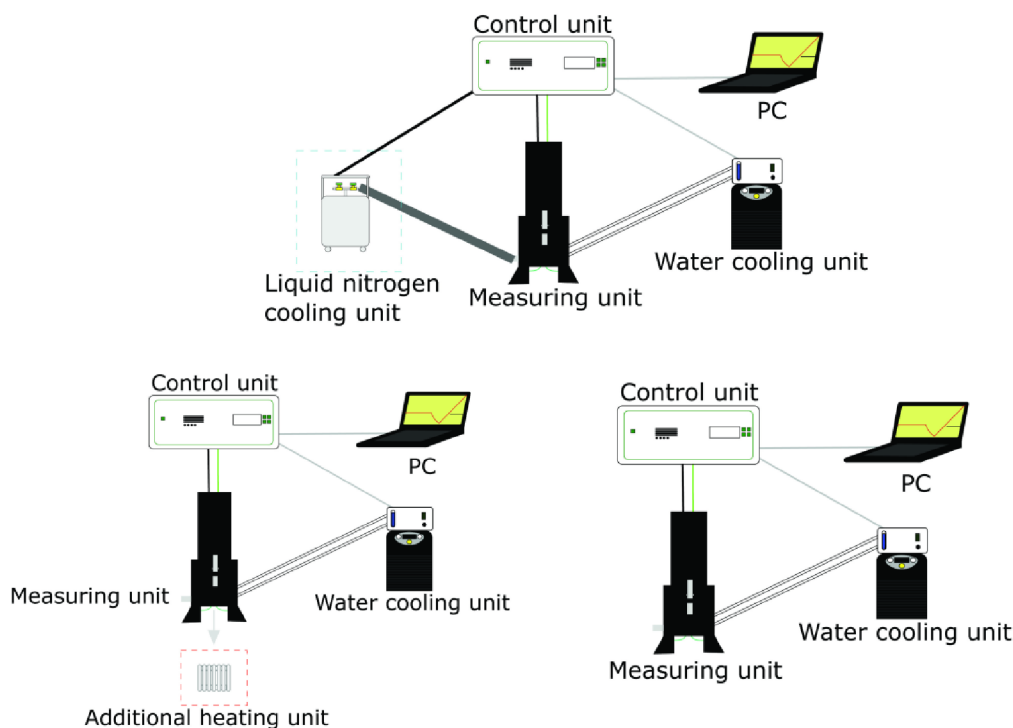


Obr. 1.5: Vodní chladič jednotka AC-625 (vlevo) a jednotka tekutého dusíku (vpravo). [8]

Aby bylo u HT varianty možné dosáhnout vysokých teplot, je MU vybavena přídatnou topnou jednotkou (additional heating unit, dále jen AHU). AHU se skládá z odporových topných elementů napájených a řízených pomocí CU. AHU je zabudována přímo v MU a je její neoddělitelnou součástí.

Na obrázku 1.6 je názorné zapojení jednotlivých částí měřicího systému TL 500 pro LT, ST a HT verzi.

Všechny tři varianty systému TL 500 jsou standardně vybaveny zdroji aktinického a pulsního saturačního světla. Zdroj saturačních světelných pulsů může působit na vzorek vysokou intenzitou až  $90\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Maximální trvání saturačního pulsu je omezeno na  $150\ \mu\text{s}$ . Aktinický světelný zdroj dosahuje nižších světel-



Obr. 1.6: Blokové znázornění zapojení systému TL 500 pro ST verzi (vpravo dole), LT verzi (nahore) a HT verzi (vlevo dole). [8]

ných intenzit, maximálně  $1\,500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , avšak doba působení tohoto zdroje není omezena. Intenzity obou světelných zdrojů jsou nastavitelné pomocí měřicího protokolu a jejich spektrální maximum se pohybuje okolo 627 nm.

Tabulka 1.1 shrnuje nejdůležitější parametry systému TL 500.

### 1.2.2 Provedení měřicí jednotky

Měřicí jednotka (MU) je tvořena ze dvou částí, kde horní část je uchycena na pohyblivém pantu a je odklopitelná. V horní odklopitelné části MU je umístěna řídicí elektronika, fotonásobič, světelné zdroje, optické čočky fotonásobiče a optické čočky světelných zdrojů. Ve spodní části MU je pak umístěn termoregulátor a pozlacená kruhová měřicí ploška pro umístění vzorku. Podoba MU je znázorněna na obrázku 1.7.

Termoregulátor ve spodní části MU je tvořen Peltierovým článkem. K horní straně Peltierova článku je uchycena pozlacená měřicí ploška tak, aby mezi horní stranou Peltierova článku a měřicí ploškou byl co nejmenší termální odpor. Ke spodní straně Peltierova článku je uchycen tepelný výměník, který je hadičkami propojen s jednotkou WCU, uzavírají tak spolu cirkulační okruh chladicí kapaliny. Na spodní i horní straně Peltierova článku je pro účel měření teploty umístěn ter-

Tab. 1.1: Souhrn základních parametrů systému TL 500. [8]

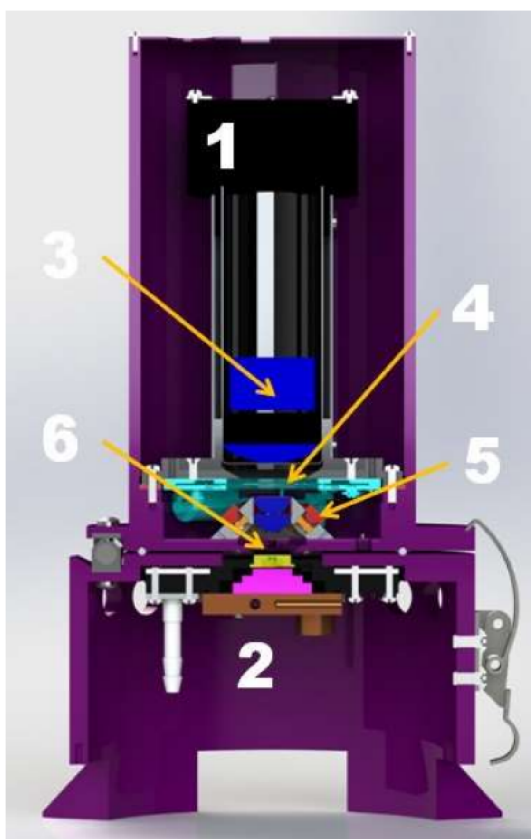
Dosažitelný teplotní rozsah měření:	
LT verze	$-90^{\circ}\text{C}$ až $+70^{\circ}\text{C}$
ST verze	$-25^{\circ}\text{C}$ až $+70^{\circ}\text{C}$
HT verze	$-15^{\circ}\text{C}$ až $+170^{\circ}\text{C}$
Lineární změna teploty vzorku:	
ST a HT verze	$0,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ až $2^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$
LT verze	$0,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ až $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$
Maximální intenzita aktinického světelného zdroje.	$1\,500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Maximální intenzita saturačního světelného zdroje.	$90\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
Maximální doba trvání světelného saturačního pulsu.	$150\ \mu\text{s}$
Spektrální maximum aktinických světelných zdrojů.	$627\ \text{nm}$
Minimální vzorkovací perioda výstupního signálu z fotonásobiče.	$100\ \text{ms}$
Spektrální odezva fotonásobiče.	$300$ až $900\ \text{nm}$



Obr. 1.7: Náhled na měřicí jednotku systému TL 500. [9]

mistor. Termistory i Peltierův článek jsou připojeny k CU, kde je pomocí PWM horní strana článku regulována na požadovanou teplotu vzorku. Zatímco termistor na horní straně článku poskytuje informaci o aktuální teplotě vzorku, termistor na spodní straně slouží pro kontrolu diference teploty mezi oběma stranami Peltierova článku. CU spíná cirkulační čerpadlo na WCU a udržuje tak tepelnou diferenci v přijatelných mezích. V případě HT verze jsou ke spodní části Peltierova článku uchycena odporová topná tělesa, která snižují tepelnou diferenci při vysokých teplotách vzorku a umožňují tak dosáhnout vysokých teplot vzorku. V případě LT verze je na spodní část Peltierova článku přiveden tekutý dusík, jenž odpařováním

snižuje diferenci teplot a umožňuje tak dosažení nízkých teplot horní části článku.



Obr. 1.8: Řez měřicí jednotkou - fotonásobič (1), termoregulátor (2), optika fotonásobiče (3), clona fotonásobiče (4), LED (5), měřicí ploška (6). [9]

Pro detekci světla emitovaného vzorkem slouží fotonásobič se soustavou optických čoček, umístěný v horní odklopné části MU. Jako ochrana fotonásobiče je použita optická clona nacházející se před vstupem fotonásobiče. Clona je otevírána elektromagnetem a chrání fotonásobič proti přebuzení při aktivaci saturačního světelného zdroje nebo před okolním světlem při odklopení horní části hlavy. Odklopení hlavy je detekováno magnetickým spínačem. Veškerá elektronika MU je umístěna v prostoru kolem fotonásobiče.

Zdroje aktinických světél jsou tvořeny výkonovými LED diodami. LED diody jsou umístěny v kruhovém prstenci kolem ústí fotonásobiče pod úhlem  $45^\circ$  vůči měřicí plošce a jsou doplněny optickými čočkami. Na obrázku 1.8 je znázorněn řez měřicí jednotkou, zde je patrné uspořádání zmíněných prvků.

### 1.2.3 Provedení řídicí jednotky

Jádrem řídicí jednotky (CU) je základová deska s dvojicí CPLD z rodiny XC9500 od výrobce Xilinx. Deska je dále doplněna o paměti typu SRAM. Paměť slouží pro



nahrání zkompilevaného protokolu programem FluorWin a pro ukládání naměřených dat před odesláním zpět do PC. Součástí CU je dále elektronika termoregulátoru, která ze získaných údajů o teplotě prostřednictvím termistorů umístěných v MU generuje PWM signál pro Peltierův článek a reguluje teplotu vzorku na požadovanou hodnotu. V případě HT varianty spíná termoregulátor také jednotku AHU (topná odporová tělesa) a v případě LT varianty spíná jednotku LNCU (ventil tekutého dusíku).

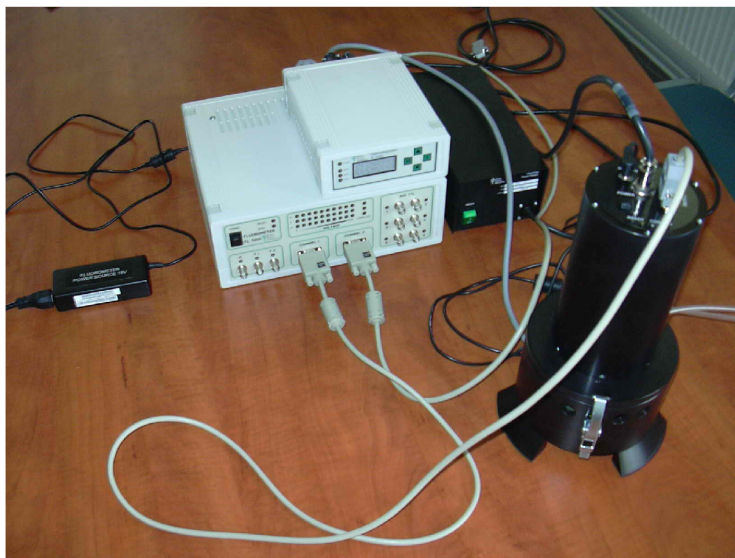


Obr. 1.9: Přední panel (nahore) a zadní panel (dole) řídicí jednotky. Konektory RS232 (1), MU - datové signály (2), MU - termistory (3), WCU (4), MU - napájení (5), MU - Peltierův článek a AHU (6), LNCU (7), síťové napájení (8). [9]

Na obrázku 1.9 je znázorněn přední a zadní panel CU. Přední panel poskytuje informaci o nastavených intenzitách světelných zdrojů a jejich aktivitě (u termoluminiscence jsou využity pouze dva z pěti indikovaných světelných zdrojů). Dále je k dispozici displej termoregulátoru, kde je zobrazována aktuální teplota vzorku. Termoregulátor lze využívat i samostatně, kdy udržuje manuálně přednastavenou teplotu vzorku i bez účasti měřicího protokolu. Z popisu konektorů na obrázku 1.9 je zřejmé, že provedení CU je univerzální a bez rozdílu se používá pro LT, ST i HT variantu systému termoluminiscence. Jednotlivé varianty se liší odlišným firmwarem, který je specifický pro každou variantu.

### 1.2.4 Nedostatky současné verze systému TL 500

Současná podoba systému TL 500 vychází ze staršího systému termoluminiscence TL 200. Podoba původního systému je znázorněna na obrázku 1.10. Z obrázku je patrné, že systém byl tvořen celkem čtyřmi jednotkami. Nevýhodou tohoto řešení bylo velké množství konektorů a potřebných kabelů pro vzájemné propojení. Zapojení a obsluha takového systému byla pro uživatele složitá. Pro zvýšení uživatelského komfortu byl proto vytvořen systém TL 500.



Obr. 1.10: Původní měřicí systém termoluminiscence TL 200. [9]

Návrh systému TL 500 spočíval v integraci elektroniky dílčích částí systému TL 200 do jediné skříně kontrolní jednotky. Po integraci elektroniky do CU ovšem nastaly problémy s rušením datové komunikace mezi jednotlivými částmi. Problémy byly způsobeny vznikem rušivých proudových smyček kvůli nevhodnému propojení společných zemnicích signálových a silových napájecích vodičů. Pro odstranění problému proto musel být navržen galvanický oddělovač vnitřní datové komunikace CU. Ve výsledku je v CU obsaženo celkem 7 samostatných desek plošných spojů (DPS). Svou vlastní DPS má základová deska s CPLD, řídicí deska termoregulátoru, výkonová deska termoregulátoru, měřicí deska teploty termoregulátoru, galvanický izolátor a dva panely s indikačními LED prvky. Velký počet DPS komplikuje výrobu a výsledné rozměry CU jsou poměrně velké. Dalším neduhem je zastaralost některých použitých součástek. Problém představují především použitá CPLD z rodiny XC9500, která jsou již těžce dostupná.

S problémy se potýkala také MU, kdy u některých vyrobených kusů docházelo k rozkmitávání světelného aktinického zdroje. Nevhodné uspořádání DPS s velkým množstvím konektorů ve stísněném prostoru MU navíc komplikuje výrobu. Intenzita

světelného saturačního zdroje není pro všechny aplikace zcela dostačující a zdrojem využívané výkonové LED diody Philips LXHL-PD09 nejsou k dostání. Naopak od zdroje aktinického světla jsou pro některé aplikace vyžadovány relativně slabé intenzity a zdroj neumožňuje přesné nastavení dostatečně nízkých světelných intenzit. U HT varianty dochází vlivem vysokých teplot k rychlejší degradaci Peltierova článku a po dlouhodobém používání byla u některých vyrobených kusů nutná jeho výměna. LT varianta se zase potýkala s problémem dotěsnění prostoru Peltierova článku pro chlazení dusíkem. Vlivem nízké teploty dusíku a tepelného rozpínání materiálu docházelo k únikům dusíku v nechtěných místech.

Zmíněné nedostatky a podněty byly motivací pro návrh nové verze systému TL 500.

### 1.2.5 Požadavky na návrh nové verze systému TL 500

Základní požadavky na návrh nové verze měřicího systému TL 500 jsou shrnuty do následujících bodů:

- Navrhnout základovou desku pro CU s využitím SOM (System On Module) MicroZed. Při návrhu klást důraz na univerzálnost pro budoucí využití i v jiných produktech.
- Navrhnout nové rozhraní pro propojení MU s CU, které umožní vyšší datovou propustnost a umožní sloučení napájecích a datových vodičů do jednoho kabelu.
- Vybrat a začlenit do CU vhodný 7" LCD displej s dotykovým ovládním, zmenšit rozměry CU.
- Provést revizi elektroniky MU, redukovat počet DPS a konektorů.
- Přidat do MU monitorovací prvky pro účely autodiagnostiky při výrobě a případném servisu. Implementovat nevolatilní paměť pro uchovávání kalibračních konstant.
- Zvýšit intenzitu saturačního světelného zdroje ze současných  $90\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  na  $250\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- Zvýšit dynamický rozsah aktinického světelného zdroje tak, aby byla intenzita nastavitelná v rozsahu alespoň od  $10\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $1\,500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- Nahrazení Peltierova článku u HT a LT varianty odporovými topnými elementy.

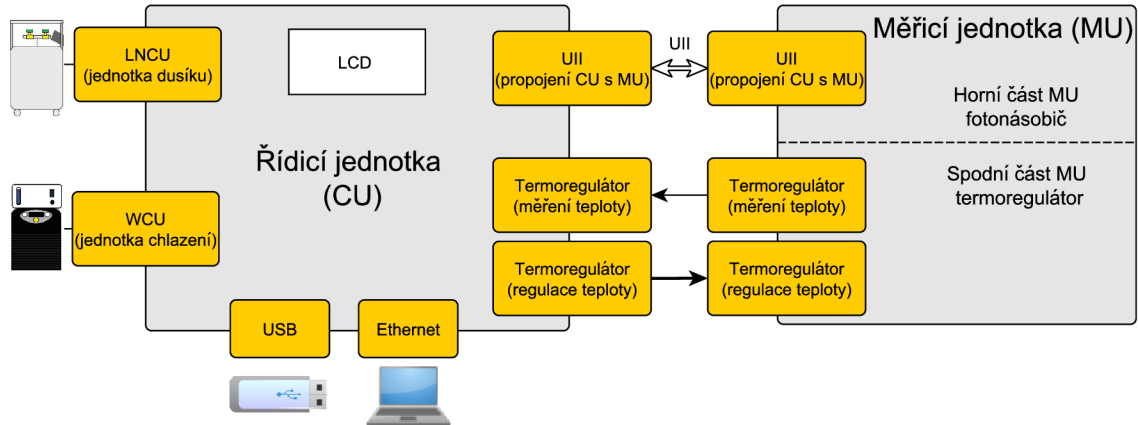
Nová verze přinese kromě odstranění nedostatků ze současné verze, zmenšení rozměrů a zjednodušení výroby také znatelné inovace. Požadovaný SOC MicroZed založený na platformě Xilinx Zynq v kombinaci s operačním systémem Linux nabízí nespočet nových možností při vývoji a umožní sloučení funkcionalit více samostatných částí

CU na jedinou DPS základové desky. LCD displej s dotykovým ovládním poskytne uživatelsky přívětivější prostředí pro obsluhu. Na displeji bude prezentován průběh i výsledky měření s možností uložení výsledků na USB. Zařízení tak bude schopno pracovat autonomně bez nutnosti připojení k PC. Nová CU nebude využitelná jen pro měřicí systém termoluminiscence. Do budoucna se počítá s využitím CU i pro další produkty. Za tímto účelem má být definované nové rozhraní pro připojení MU, které bude kompatibilní i s budoucími produkty.

Náplní této práce má být především provedení zmíněných HW změn a jejich otestování na realizovaném prototypu. Záměrem práce není vytvoření finální podoby SW pro CU, ale realizace testovací verze SW bez grafického uživatelského rozhraní a s omezenými funkcionalitami primárně za účelem ověření funkčnosti realizovaných HW změn.

## 2 NÁVRH NOVÉ VERZE MĚŘICÍHO SYSTÉMU

Následující kapitola se zabývá návrhem a úpravami pro novou verzi měřicího systému termoluminiscence PSI TL 500.



Obr. 2.1: Blokové schéma zapojení nové verze systému PSI TL 500.

Na obrázku 2.1 je na úvod blokově znázorněno fyzické zapojení nové verze měřicího systému. První část kapitoly (2.1) se zabývá návrhem rozhraní UII, které slouží pro vzájemné propojení a komunikaci mezi řídicí a měřicí jednotkou. Druhá část kapitoly se zabývá návrhem a úpravami řídicí jednotky (2.2) a poslední část kapitoly se věnuje úpravám měřicí jednotky (2.3).

### 2.1 Rozhraní UII pro propojení měřicí a kontrolní jednotky

Při návrhu muselo být v první řadě definováno vhodné rozhraní pro vzájemné propojení a přenos informací mezi CU a MU. Toto rozhraní je dále popisováno pod označením UII (Universal Interconnecting Interface). Při návrhu byl kladen důraz na univerzálnost, cílem bylo, aby stejné rozhraní mohly v budoucnu využívat i další produkty.

UII zahrnuje napájení, I2C sběrnici, sériový kanál pro vyčítání dat z AD převodníku a šest spouštěcích (trigrovacích) signálů. Pro účely UII byl vybrán stíněný kabel od výrobce Igus pod označením CF111-020-D. Kabel obsahuje 3 kroucené páry, 8 signálových vodičů a dva zesílené napájecí vodiče [10]. V tabulce 2.1 je znázorněno a popsáno využití jednotlivých signálů UII v případě termoluminiscence. Jednotlivé části UII jsou pak dále popsány samostatně.

Tab. 2.1: Popis signálů UII a jejich využití u systému termoluminiscence.

Signál UII	Využití u termoluminiscence	Vstup / výstup (z pohledu CU)	Logický standart	Využití vodiče kabelu
ADC_SDOUT+	Sériové rozhraní - vyčítání hodnot z měřicího ADC.	Vstup	M-LVDS	3x kroucený pár o průřez vodičů 0,14 mm <sup>2</sup>
ADC_SDOUT-				
ADC_SCLK+				
ADC_SCLK-				
ADC_/CNVST+	Synchronizace ADC – zahájení konverze.	Výstup		
ADC_/CNVST-				
CU_I2C_SDA	I2C	-	-	
CU_I2C_SCL				
CU_IN/OUT0	Detekce zavření MU.	Vstup	5 V CMOS	8x vodič průřezu 0,14 mm <sup>2</sup>
CU_IN/OUT1	Přerušení z monitorovacího ADC.	Vstup		
CU_IN/OUT2	Řízení clony fotonásobiče.	Výstup		
CU_OUT0	Spínání saturačního zdroje světla	Výstup		
CU_OUT1	Spínání aktinického zdroj světla 1.	Výstup		
CU_OUT2	Spínání aktinického zdroj světla 2.	Výstup		
GND	Společný zemnicí vodič.	-	-	2x vodič o průřezu 0,5 mm <sup>2</sup>
VCC	Napájení 15 V / 1,5 A pro MU.	-	-	

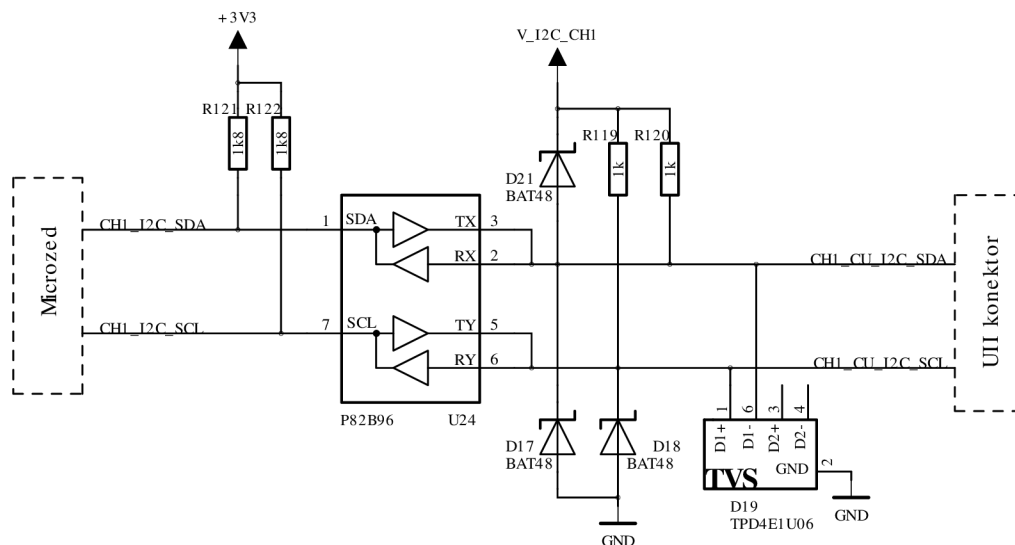
Hlavními přínosy oproti původnímu propojení MU s CU je sloučení datových a napájecích vodičů do jednoho kabelu. Druhou výraznou změnou je použití diferenciálního standardu pro přenos dat sériového kanálu z AD převodníku pro dosažení vyšší spolehlivosti a propustnosti.

### 2.1.1 I2C sběrnice

Součástí UII je I2C sběrnice sloužící primárně pro konfiguraci MU. V případě MU u systému termoluminiscence jsou na I2C sběrnici připojeny například DA převodníky nastavující intenzity světelných zdrojů nebo nastavující napájecí napětí pro fotonásobič (více informací o návrhu MU v sekci 2.3). Na I2C sběrnici je také v MU připojena paměť EEPROM, kde jsou uloženy informace identifikující MU a kalibrační konstanty specifické pro konkrétní MU.

Pro zvýšení odolnosti I2C sběrnice vůči rušení při přenosu přes kabel je využíván integrovaný obvod P82B96 od výrobce NXP [11]. P82B96 umožňuje použít pro přenos přes kabel nízké hodnoty pull-up rezistorů a zároveň posouvá logické úroveň z 3,3 V na 5 V. Tím je zaručena spolehlivost I2C sběrnice i v kombinaci s několik metrů dlouhým kabelem. Komunikace po I2C sběrnici je provozována na kmitočtu 100 kHz.

Na obrázku 2.2 je znázorněno zapojení IO P82B96 na straně CU, v případě MU je zapojení shodné. Celková hodnota pull-up rezistorů pro část I2C sběrnice vedené přes kabel je 320 Ω. Tato hodnota je tvořena paralelní kombinací pull-up rezistorů 1 kΩ na straně CU a 470 Ω na straně MU. Hodnota pull-up rezistorů je



Obr. 2.2: Schematické zapojení I2C pro UII.

zvolena asymetricky kvůli možnosti detekce události, kdy je uživatelem MU fyzicky připojena k CU. Pro účely detekce připojení MU slouží i dioda D21, která plní svou funkci pouze na straně MU a u CU nemusí být osazena. Princip detekce připojení MU je popsán v podkapitole 2.1.4. Diody D17 a D18 jsou použity na doporučení výrobce jako přídatná ochrana pro potlačení případných napěťových zákmitů [11].

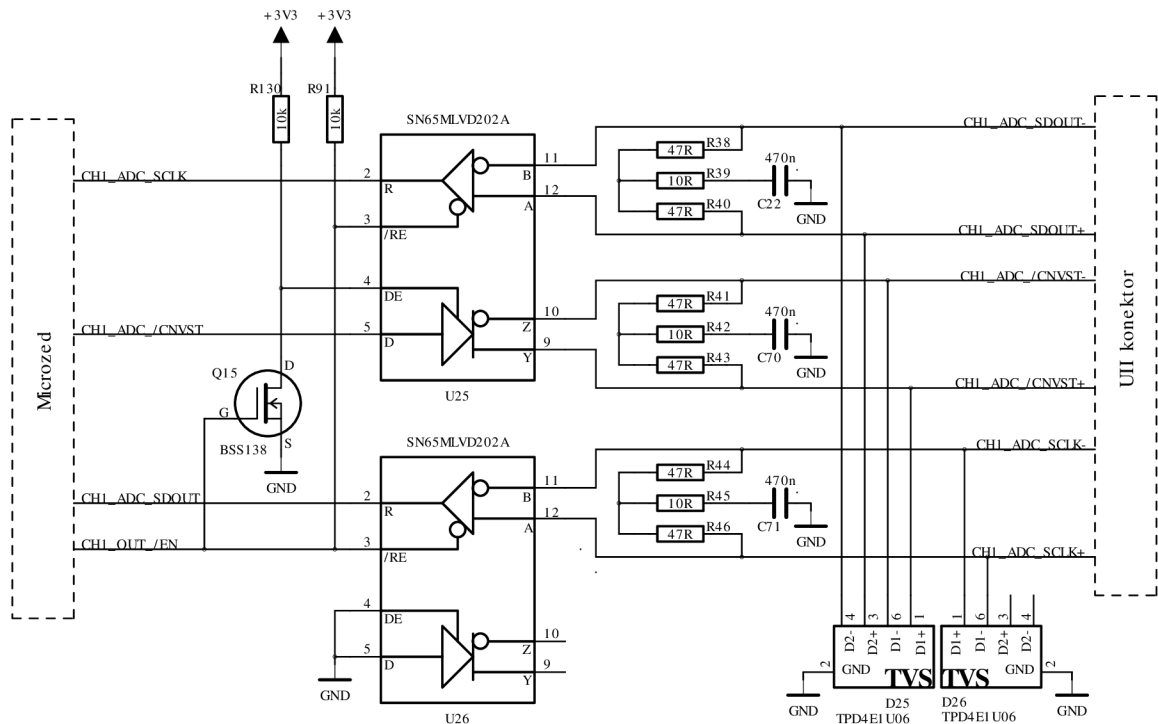
Pro zvýšení odolnosti vůči ESD je použit ochranný integrovaný obvod TPD4E1U06 (D19), který je zároveň použit pro ochranu u všech signálů UII.

## 2.1.2 Sériový kanál

UII dále obsahuje sériové rozhraní sloužící pro synchronizaci a vyčítání dat z AD převodníku. V případě termoluminiscence je to AD převodník konvertující analogový signál fotonásobiče. Použitý AD převodník pracuje v režimu master a je zdrojem hodinového signálu komunikace (signál SCK) o kmitočtu až 20 MHz. V původním řešení se využívalo pro sériové rozhraní 5 V CMOS standard. Z důvodu spolehlivosti mohla být provozována komunikace přes 1,5 m dlouhý kabel maximálně na kmitočtu 5 MHz a nebylo tak možné plně využít rychlost AD převodníku.

Pro přenos signálů sériového kanálu přes kabel je proto nově použit standard M-LVDS (multipoint low voltage differential signaling). M-LVDS podobně jako LVDS využívá pro přenos diferenční pár buzený proudovými zdroji. Na rozdíl od LVDS využívá M-LVDS terminaci na obou stranách vedení a pracuje s diferenčním napětím 540 mV (u LVDS je to 350 mV). M-LVDS je určeno pro vícebodové komunikace nebo jako alternativa LVDS v prostředí s větším rušením [13]. Větší rušení je v tomto případě způsobeno tím, že kroucené diferenční páry M-LVDS jsou vedeny kabelem

společně s dalšími nediferenciálními (single ended) signály.



Obr. 2.3: Schéma zapojení M-LVDS rozhraní UII.

Na obrázku 2.3 je schematicky znázorněno zapojení M-LVDS sériového rozhraní UII na straně CU. Použitý IO SN65MLVD202A slouží k převodu signálu standardu 3,3 V CMOS na standard M-LVDS a obsahuje v jednom pouzdře přijímač i vysílač [16]. Pro MU je zapojení obdobné, pouze je směr komunikace orientován opačným směrem. Na straně CU je navíc využíván signál pro přepnutí výstupu SN65MLVD202A do stavu vysoké impedance v případě, že je daný UII kanál nevyužíván.

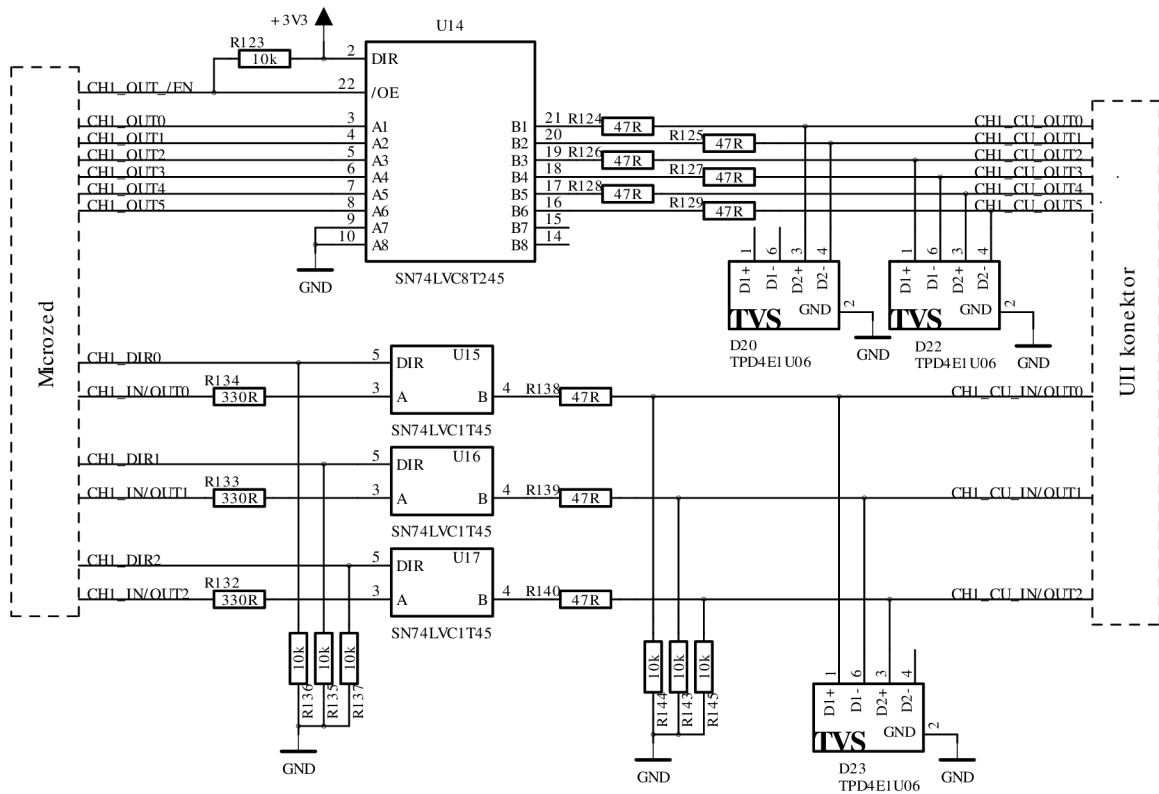
Parazitní kapacitní a induktivní vazba diferenčních párů s ostatními signály vytváří souhlasnou složku rušení na diferenčních párech. Pro eliminaci vlivů souhlasného (common mode) rušení je použita metoda terminace s vyvedeným středovým kapacitorem [12]. Kapacitor tvoří se zakončovacími rezistory symetrický RC článek a napomáhá tak k odfiltrování souhlasné složky rušení. U SN65MLVD202A je navíc vyšší odolnost vůči souhlasné složce rušení dosažena zvýšeným dovoleným rozsahem souhlasného napětí od -1 V do 3,3 V (u LVDS běžně pouze 0,2 V až 2,2 V).

### 2.1.3 Trigrovací signály

Poslední součástí UII je 6 spouštěcích (trigrovacích) signálů. Jde o 6 vodičů využívajících 5 V CMOS standard. Tři signály jsou výstupní (z pohledu CU) a u zbylých



třech signálů lze směr určit programově. Trigrovací signály jsou primárně určeny pro řízení časově kritických událostí, jako je například spínání saturačního zdroje světla v případě termoluminiscence. Trigrovací signály musí zaručit přesnost časování v řádu stovek až desítek ns, proto není možné tyto signály nahradit například expanderem. Použití diferenciálního M-LVDS by sice umožnilo ještě přesnější časování, ale zároveň by bylo potřeba velké množství vodičů (12 namísto 6). Proto byl jako kompromis zvolen 5 V CMOS standard.



Obr. 2.4: Schéma zapojení budičů trigrovacích signálů.

Na obrázku 2.4 je znázorněno schéma zapojení budičů trigrovacích signálů na straně CU. Pro tyto účely jsou použity integrované obvody SN74LVC1T45 [14] a SN74LVC8T245 [15], které umožňují posun logických úrovní na 5 V.

### 2.1.4 Proces detekce a inicializace MU

Pomocí UII je možné automaticky detekovat připojení MU k CU. Proces detekce a inicializace MU je následující:

1. Připojení MU je detekováno pomocí nízké logické úrovně na vodiči SDA sběrnice I2C. V nezapojeném stavu drží pull-up rezistory na I2C vysokou logickou úroveň. V MU je zapojena na signálu SDA ochranná (clamp) dioda vůči napájení. MU není při připojení k CU napájena, proto je ochrannou diodou staženo

napětí na SDA vodiči na nízkou logickou úroveň. Při detekci této události je v CU vyvoláno přerušení a je sepnuto napájecí napětí 15 V pro MU. Po sepnutí napájení pro MU je signál SDA opět uvolněn do vysoké úrovně a je možné navázat komunikaci po I2C sběrnici.

2. Druhou částí je identifikace MU. Po detekci připojení je adresována EEPROM paměť v MU. Z paměti jsou vyčteny informace identifikující typ a konfiguraci MU. Dále jsou z paměti načteny kalibrační konstanty specifické pro danou MU.
3. Poslední částí je inicializace zařízení na I2C sběrnici CU.

V případě odpojení MU v průběhu provozu je odpojení detekováno až ve chvíli, kdy se CU bude snažit komunikovat po I2C a neobdrží od MU platný ACK bit.

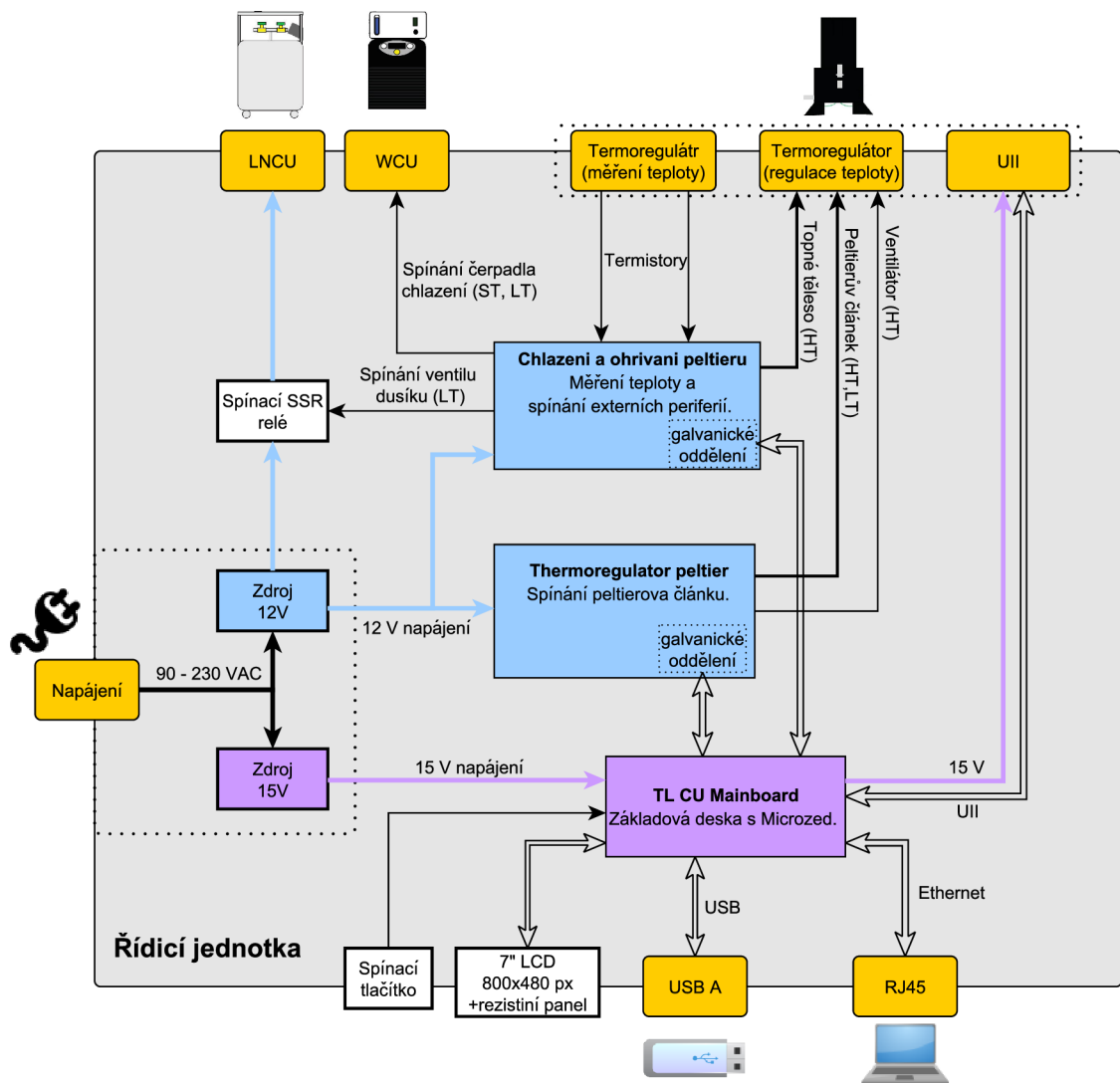
## 2.2 Návrh řídicí jednotky

Na obrázku 2.5 je blokově znázorněno vnitřní zapojení nové verze CU. Žluté bloky po obvodu znázorňují konektory. Bloky uvnitř jsou barevně odlišeny podle napájecích domén, propojení jednotlivých bloků je znázorněno čarami. Tlustou čarou jsou znázorněny silové spoje a dvojitou čarou datové spoje.

U nové verze je rozhraní RS232/USB pro komunikaci s PC nahrazeno rozhraním Ethernet. Nově je k dispozici USB konektor typu A pro připojení flash disku. V budoucích verzích SW bude kromě přímého propojení s PC také možné pomocí flash disku nahrávat do zařízení měřicí protokoly a následně na flash disk ukládat naměřená data.

Na předním panelu CU je umístěn 7" LCD TFT displej s rozlišením 800x480 pixelů doplněný o dotykový kapacitní panel. Displej nahrazuje původní signalizační ovládací prvky a poskytuje uživateli komplexní informace o stavu měření a prezentuje naměřená data v grafické podobě. Použitý displej je ER-TFTM070-5 od čínskému výrobce EastRising. Součástí displeje je grafický řadič RA8875, který zahrnuje i kontrolér pro kapacitní dotykový panel. Komunikace s displejem je prováděna pomocí 16-ti bitového paralelního rozhraní (označováno také jako rozhraní 6800) [17]. Tento displej byl zvolen pro jeho snadnou implementaci díky zmíněnému řadiči RA8875.

Modul pod interním označením „Chlazení a ohřívání peltieru“ slouží pro měření a digitalizaci údajů o teplotě prostřednictvím termistorů umístěných v MU. Modul také obsahuje spínače pro AHU (topné těleso), WCU (cirkulační čerpadlo chladicí kapaliny) a LNCU (ventil tekutého dusíku). Modul s označením „Thermoregulator peltier“ pak zahrnuje výkonové spínače pro generování PWM a přepínání polarity



Obr. 2.5: Blokové schéma řídicí jednotky.

Peltierova článku. Modul dále zahrnuje spínač pro spínání ventilátoru v MU. Více informací o využití ventilátoru u nové verze MU je uvedeno v podkapitole 2.3. Zmíněné moduly jsou převzaty z původní verze systému TL 500, a proto nejsou dále diskutovány.

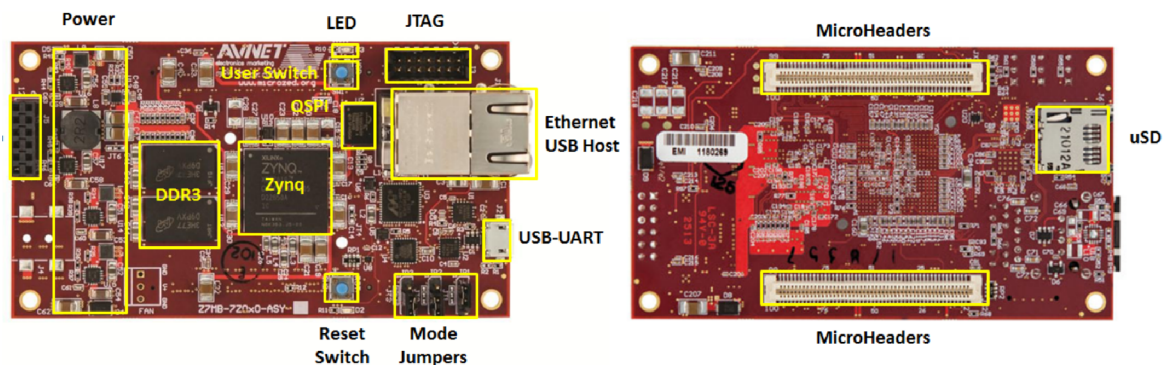
Nově byla navržena základová deska pod označením „TL CU Mainboard“. Základová deska využívá SOM (system on module) MicroZed a je řídicím jádrem celého systému. O návrhu základové desky pojednává samostatná podkapitola 2.2.2. Informace o použitém SOM MicroZed jsou pak uvedeny v podkapitole 2.2.1.

O napájení CU se stará dvojice napájecích zdrojů Mean Well. První zdroj typu SP-15-12 o výkonu 150 W poskytuje napájení 12 V pro moduly „Thermoregulator peltier“ a „Chlazení a ohřívání peltieru“. Tento zdroj dodává potřebný výkon pro Peltierův článek a topná tělesa v MU, proto byl zvolen s dostatečnou výkonovou

rezervou. Druhý zdroj je typu SP-75-15 o výkonu 75 W a poskytuje napájení 15 V pro modul základové desky „TL CU Mainboard“ a zároveň napájí měřicí jednotku MU. Hodnota 15 V byla zvolena na základě požadavku napájecího napětí vysokonapěťového zdroje fotonásobiče v MU.

### 2.2.1 MicroZed

Jednou z hlavních motivací pro tvorbu nové verze CU byla náhrada dnes již zastaralých a těžce dostupných CPLD z rodiny XC9500. Namísto původních CPLD nová verze základové desky CU disponuje SOM (system on module) MicroZed od společnosti Avnet. MicroZed je znázorněn na obrázku 2.6 a jeho jádrem je Zynq-7000 All Programmable SoC (system on chip) společnosti Xilinx. Zynq-7000 představuje kombinaci procesoru architektury ARM s FPGA v jednom pouzdře [18]. MicroZed kromě Zynq-7000 již zahrnuje spoustu doplňujících periférií jako USB, Ethernet, QSPI flash paměť, DDR3 RAM, slot na microSD kartu apod. Použití SOM jako je MicroZed tak výrazně usnadňuje a zrychluje návrh HW a pro malé výrobní série se tak jeví jako ekonomicky výhodnější varianta, oproti použití pouze samotného SoC s nutností návrhu vlastních periférií.



Obr. 2.6: SOM MicroZed, pohled shora (vlevo) a pohled zespodu (vpravo). [20]

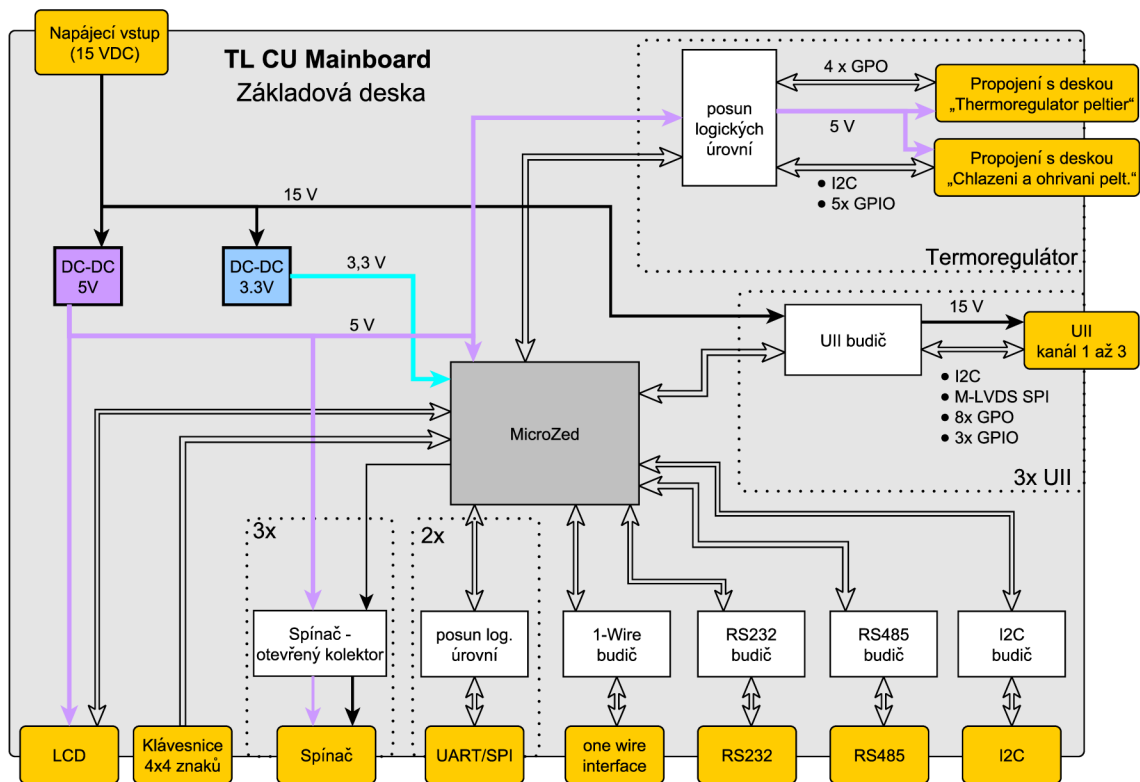
MicroZed je k dostání v několika verzích. Použitá verze je MicroZed 7020, která obsahuje SoC Zynq Z-7020 s dvoujádrovým procesorem architektury ARM Cortex A9 s taktem až do 866 MHz v kombinaci s programovatelnou logickou částí architektury Artix-7. Na MicroZed 7020 je dále v této verzi osazena paměť DDR3 SDRAM o kapacitě 1 GB [20].

Na trhu je několik SOM podobných MicroZedu. MicroZed je ve společnosti PSI standardně používanou komponentou, proto bylo užití právě SOM MicroZed jedním z požadavků. Nová verze systému termoluminiscence pravděpodobně zdaleka nevyužije veškeré prostředky nabízené MicroZedem. S budoucím využitím navržené

základové desky s MicroZedem i pro jiné produkty bude však využití dostupných prostředků narůstat.

## 2.2.2 Návrh základové desky CU

Na obrázku 2.7 je znázorněno blokové schéma základové desky CU pod označením „TL CU Mainboard“. Při návrhu byl kladen velký důraz na univerzálnost kvůli budoucímu využití i v dalších produktech. Základová deska je navíc doplněna o rozhraní UART, SPI, RS232, 1-Wire a RS485. Dále je k dispozici také možnost připojení maticové klávesnice o velikosti 4x4 znaků nebo možnost využití až tří spínačů pro spínání externích periférií typu relé, ventilátor apod. Zmíněná rozhraní nebudou v případě systému termoluminiscence využita, a proto nejsou dále diskutována.



Obr. 2.7: Blokové schéma základové desky „TL CU Mainboard“.

Systém termoluminiscence využívá jeden z kanálů U11 (U11 bylo popisováno v sekci 2.1) k propojení s měřicí jednotkou. U11 je na základové desce obsaženo celkem třikrát (3 nezávislé kanály), při budoucím využití v jiných produktech se uvažuje využití až tří kanálů současně.

Na základové desce je také k dispozici jeden kanál pro propojení s externími moduly termoregulátoru. Jsou zde dva konektory pro připojení modulu „Chlazení a ohřívání peltieru“ a „Thermoregulator peltier“ (viz blokové schéma CU na obrázku

2.5). Regulace teploty probíhá pomocí softwarově implementovaného regulátoru v MicroZedu.

Základová deska je napájena pomocí 15 V zdroje, který zároveň napájí i MU. Pro interní napájení základové desky jsou použity DC-DC step down regulátory na 5 V a 3,3 V. 5 V zároveň napájí LCD displej a externí moduly termoregulátoru.

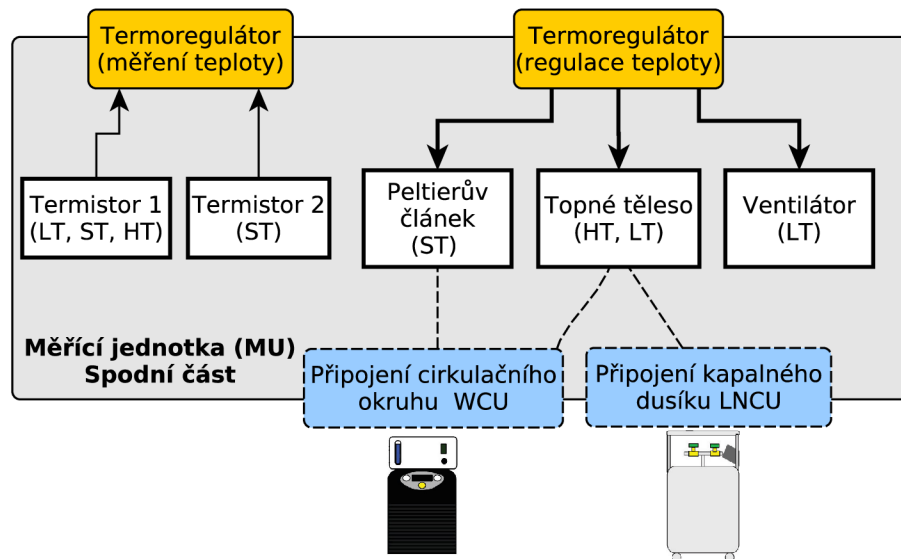
Na základové desce je dále k dispozici konektor pro připojení LCD displeje a jeho napájení. Schéma kompletního zapojení základové desky, motiv DPS a osazovací plány jsou k dispozici v příloze A.

## 2.3 Návrh měřicí jednotky

Výraznější koncepční změnou prošla MU v případě HT a LT varianty systému TL 500. HT varianta má nově teplotní rozsah od  $-15^{\circ}\text{C}$  do  $+300^{\circ}\text{C}$  (původní rozsah byl od  $-15^{\circ}\text{C}$  do  $+170^{\circ}\text{C}$ ). Původní HT varianta obsahovala Peltierův článek doplněný o přídavné topné elementy. Maximální dovolená teplota u HT verze byla limitována maximální dovolenou provozní teplotou Peltierova článku. Provozování Peltierova článku na vysokých teplotách však znatelně omezovala jeho životnost. Nově proto není v HT variantě použit Peltierův článek a vysokých teplot je dosahováno pouze pomocí topných těles. Dosažení záporných teplot je podmíněno použitím výkonnější WCU v kombinaci s nemrznoucí směsí kapaliny pro cirkulační okruh. Výhodou nového řešení je, že maximální teplota není omezena Peltierovým článkem a lze tak dosáhnout daleko vyšších teplot.

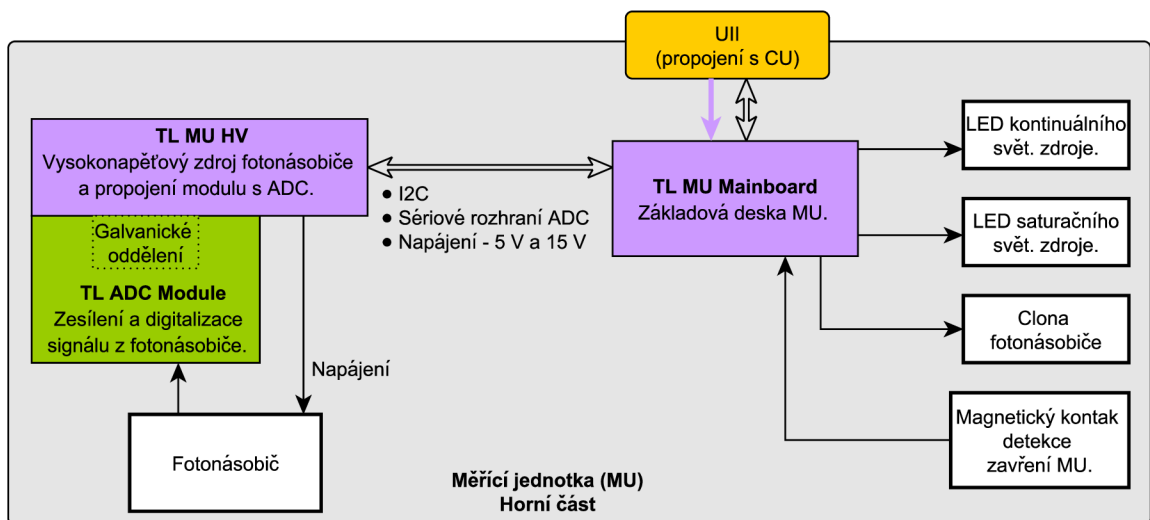
Ani v LT variantě není Peltierův článek nově použit. LT varianta je shodná s HT variantou, s tím rozdílem, že místo chladicího okruhu WCU je přiveden kapalný dusík (LNCU). Měřicí ploška včetně otvorů pro topné těleso a průchod dusíku (nebo chladicí kapaliny) je obrobena z jednoho kusu mědi a následně pozlacena. Díky tomuto řešení nemůže docházet k úniku dusíku vlivem tepelného rozpínání materiálu a vznikání netěsností jako tomu bylo u předchozího řešení, také je zaručen minimální tepelný odpor s měřicí ploškou. Pro úsporu dusíku při ochlazování z vysokých teplot na konci měření je nově do spodní části MU zabudován ventilátor.

HT, LT a ST varianty měřicího systému se liší pouze rozdílnou spodní částí MU. Spodní část MU je při výrobě vybavena požadovanými bloky v závislosti na zákazníkem stanovené verzi teplotního rozsahu. V případě HT varianty je spodní část MU vybavena pouze jedním termistorem, topnými elementy a cirkulačním okruhem WCU. ST varianta je vybavena oběma termistory, cirkulačním okruhem WCU a Peltierovým článkem. LT varianta je shodná s HT variantou, pouze je nahrazena WCU za LNCU. K přechodu mezi variantami HT a LT bude stačit pouze zaměnit LNCU za WCU nebo naopak.



Obr. 2.8: Blokové schéma spodní části MU.

Na obrázku 2.8 je znázorněno blokové schéma spodní části MU. Peltierův článek, topné elementy i ventilátor jsou připojeny k CU pomocí společného kabelu. Termistory jsou k CU připojeny samostatným kabelem kvůli rušení způsobenému spínáním Peltierova článku. Dále zde jsou univerzální koncovky pro připojení hadiček cirkulačního okruhu WCU nebo jednotky tekutého dusíku LNCU.



Obr. 2.9: Blokové schéma horní části MU.

Na obrázku 2.9 je znázorněno blokové schéma horní části MU s fotonásobičem. Elektronika MU se skládá ze tří modulů (samostatných DPS). Modul označený jako „TL MU Mainboard“ slouží k propojení s CU pomocí rozhraní UUI (UUI je

popisováno v sekci 2.1). Modul zahrnuje regulátory napájecího napětí a regulátory pro buzení aktinického a saturačního světla. Dále zahrnuje spínače optické clony fotonásobiče a vstup z magnetického relé detekujícího zavření (přiklopení) MU. Modul označený jako „TL MU HV“ zahrnuje říditelný vysokonapěťový zdroj pro fotonásobič. Modul „TL ADC Module“ pak zahrnuje transimpedanční zesilovač s programově nastavitelným ziskem a AD převodníkem pro vzorkování výstupního signálu fotonásobiče.

Moduly „TL MU HV“ a „TL ADC Module“ jsou mimo rozsah náplně této práce. Tyto moduly proto nebudou více diskutovány a dále jsou probírány jen změny provedené u základové desky MU „TL MU Module“. V příloze D je poskytnuto kompletní schéma zapojení, motiv DPS a osazovací plány.

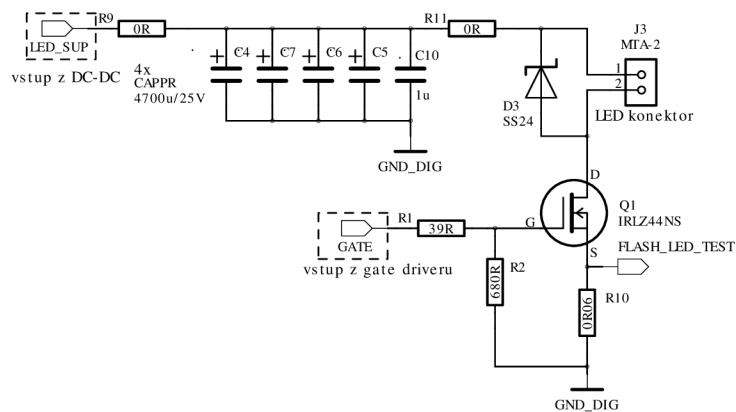
### 2.3.1 Světelný zdroj saturačních pulsů

Původní verze systému TL 500 využívala dnes již nedostupné LED diody Philips LXHL-PD09. Celkem bylo využito pro účely zdroje aktinických saturačních pulsů 6 diod zapojených paralelně. Maximální dosažitelná světelná intenzita působící na vzorek byla  $90\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  při celkovém proudu diodami 38 A a maximální periodě saturačního pulsu 150  $\mu\text{s}$ .

Tyto LED již nejsou dostupné, jako náhrada byly zvoleny LED diody LZ4-00R108 od výrobce LED Engin [21]. LZ4 obsahuje v jednom pouzdře čtyři čipy (čtyři samostatné LED), každý ze čtyř čipů má v pouzdře samostatné vývody. Celkem je uvažováno použití šesti LED diod zapojených paralelně. Zapojení čipů uvnitř diody je uvažováno jako sériové propojení dvou paralelně zapojených dvojic čipů. Předpokládaná dosažitelná intenzita je  $350\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  při proudu 27 A.

Volba LED a předpokládané parametry byly určeny na základě předběžných srovnávacích testů. Celkem bylo testováno 6 výkonových LED diod. Při testu byla orientačně stanovena maximální pulsní proudová zatížitelnost testované diody. Během pulsu trvajícího 150  $\mu\text{s}$  dochází k rychlému ohřevu polovodičového přechodu a LED dioda ztrácí účinnost. Maximální hodnota přípustného proudu byla stanovena jako hodnota proudu diodou, při které dojde k poklesu intenzity během trvání pulsu maximálně o 6 %. Moderní LED dosahují ve srovnání se zastaralou LXHL-PD09 daleko vyšších účinností. Testované LED však narážely na problém nízké pulsní proudové zatížitelnosti ve srovnání s LXHL-PD09. Požadavkem pro novou verzi systému TL-500 je dosažení intenzity alespoň  $250\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Předpokladu pro splnění požadavku dosáhla pouze LED dioda LZ4, jako jediná vícečipová z testovaných LED diod, a to díky její velké celkové aktivní ploše. Ostatními testovanými LED diodami byly LED Engin LZ1-00R102, CREE XPEBRD-L1, CREE XBDRDO, CREE XP-G2 a LUXEON Rebel.



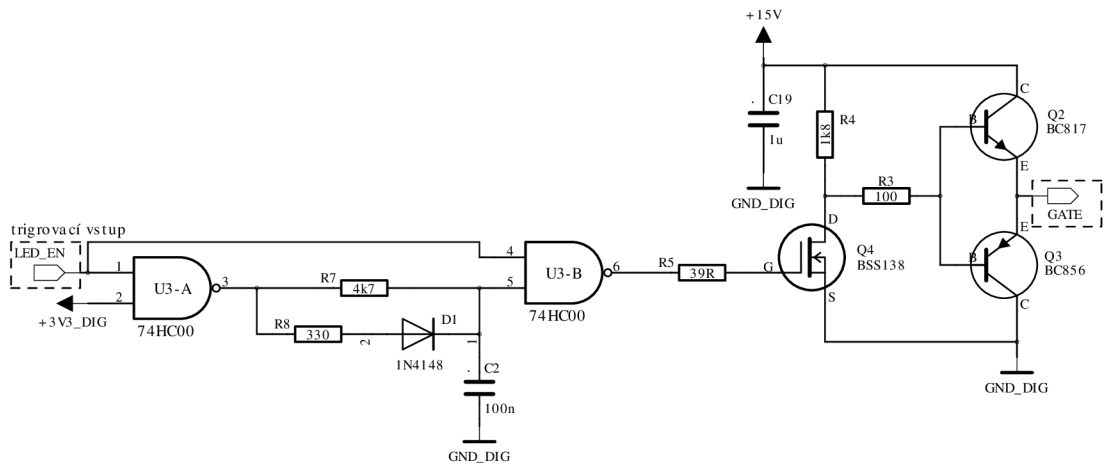


Obr. 2.10: Spínání LED saturačního světla pomocí NMOS tranzistoru.

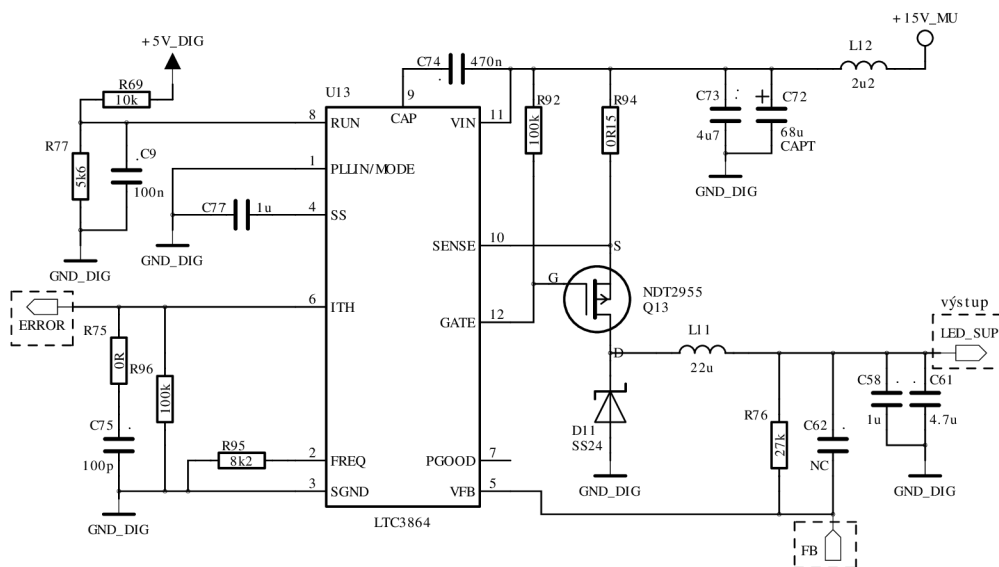
Pro buzení saturačních pulsů je vyžadována přesnost v řádu stovek ns. Vzhledem k požadavkům na časování a velikost dosažitelných proudů by bylo obtížné realizovat vyhovující zpětnovazební zdroj proudu. Buzení LED diod je proto realizováno výkonovým NMOS tranzistorem, který spíná LED diody přes sériový rezistor malé hodnoty k nabitým kondenzátorům. Schéma spínací části je znázorněno na obrázku 2.10. Celková kapacita kondenzátorů je 18,8 mF. Při této hodnotě kapacity a uvážení 30 A s šířkou 150  $\mu$ s dojde k poklesu napětí na kondenzátorech během trvání pulsu o 240 mV. Vliv poklesu napětí je minimální, pokles napětí je totiž do jisté míry kompenzován snížením úbytku napětí na LED diodách vlivem ohřevu jejich polovodičových přechodů. Proud LED diodami během trvání pulsu lze tak považovat téměř za konstantní. Nevýhodou je nelineární závislost mezi nastaveným napětím na kondenzátorech a proudem LED diodou. Po realizaci prototypu bude experimentálně zjištěna optimální hodnota sériového rezistoru (R11) a bude změřena závislost budícího proudu na nastaveném napětí. Nelinearita bude kompenzována programově.

Pro přesnější a rychlejší spínání byl nově navržen push-pull gate driver výkonového NMOS tranzistoru. Dále byl navržen omezovač doby sepnutí tranzistoru. Omezovač slouží jako doplňující ochrana LED diod v případě, kdy dojde k nechtěnému sepnutí tranzistoru po delší dobu než 150  $\mu$ s. Tato situace může nastat například během testování nebo důsledkem chyby v kódu. V takovém případě omezovač zaručí, aby přibližně po 350  $\mu$ s došlo k rozepnutí tranzistoru a nedošlo k nevratnému poškození LED diod. Schéma zapojení omezovače i gate driveru je znázorněno na obrázku 2.11.

Na obrázku 2.12 je znázorněno schéma snižujícího DC-DC měniče určeného pro nabíjení kondenzátorů zdroje saturačních pulsů. Pro tyto účely byl namísto původní IO LT1765 nově vybrán IO LTC3864. Výhodou LTC3864 je možnost nastavení limitu spínacího proudu pomocí externího rezistoru [22]. U LT1765 bylo omezení spínacího proudu fixně nastaveno na 3 A [23]. Velký spínací proud způsoboval náhlé proudové



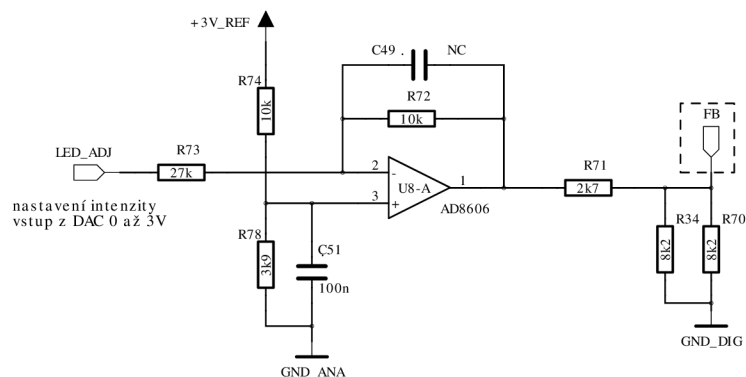
Obr. 2.11: HW omezení doby pulsu a řízení výkonového NMOS tranzistoru.



Obr. 2.12: DC-DC měnič pro nabíjení kondenzátorů pulsního světelného zdroje.

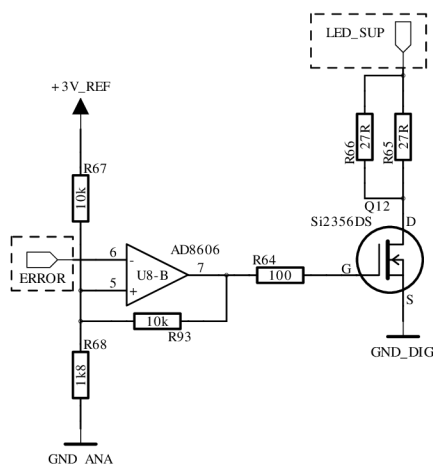
odběry, a tak byla zbytečně zatěžována a rušena napájecí větev MU. Nově je tento proud omezen na hodnotu 650 mA. Omezení proudu zároveň prodlouží dobu nabíjení kondenzátorů. Po vyvolání saturačního světelného pulsu s maximální povolenou dobou trvání 150  $\mu$ s je ale nutné dodržet ochranný interval (přibližně 5 až 10 ms), během kterého dojde k odvedení naakumulovaného tepla z polovodičových přechodů LED diod. Proto prodloužená doba nabíjení kondenzátorů nijak neomezí funkčnost. Další výhodou LTC3864 je schopnost možného dosažení až 100 % pracovního cyklu, tak se zvýší nastavitelný rozsah výstupního napětí.

Na obrázku 2.13 je znázorněno schéma zapojení operačního zesilovače pro nastavení výstupního napětí snižujícího měniče. Signál „LED ADJ“ je výstupem 10 bitového DA převodníku a signál „FB“ je zapojen do zpětné vazby snižujícího měniče



Obr. 2.13: Obvod pro nastavení výstupního napětí DC-DC měniče.

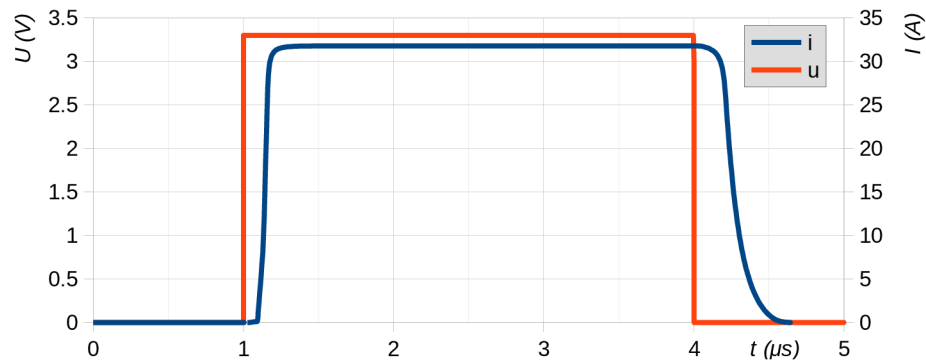
(viz obr. 2.12). Nastavitelný rozsah výstupu je od 2 V do 14 V.



Obr. 2.14: Komparátor pro spínání zátěže.

Na obrázku 2.14 je znázorněno schéma zapojení komparátoru, který spíná přídatnou zátěž o hodnotě  $13,5 \Omega$  na výstup snižujícího měniče. Připojením zátěže je urychleno vybíjení výstupních kondenzátorů vysoké kapacity ( $18,8 \text{ mF}$ ). Tato situace nastane například během snížení požadované hodnoty napětí na výstupu měniče. Výstupní kondenzátory by za normální situace zůstaly nabité na původní hodnotu napětí a k jejich vybíjení by docházelo jen velmi pomalu vlivem jejich izolačního odporu. Proto je vstup komparátoru připojen na výstup chybového zesilovače obvodu LTC3864 (signál „ERROR“). Pokud nastane situace, že výstupní napětí měniče je vyšší než požadované, klesne napětí na výstupu chybového zesilovače a komparátor sepne zátěž. Tato situace nastane při poklesu napětí na výstupu chybového zesilovače pod úroveň  $0,4 \text{ V}$ , to odpovídá přibližně rozdílu  $0,3 \%$  mezi nastavenou a skutečnou hodnotou napětí na výstupu. Oproti původnímu řešení byl navíc komparátor doplněn o hysterezi  $0,4 \text{ V}$  tak, aby se eliminovalo riziko rozkmitání

zdroje. Parametry komparátoru a zisk chybového zesilovače zdroje budou v případě potřeby experimentálně doladěny po realizaci prototypu.



Obr. 2.15: Časová odezva zdroje aktinického saturačního světla.

Na grafu obrázku 2.15 je znázorněna simulace časové odezvy výstupního proudu zdroje aktinického saturačního světla na řídicí signál (signál „ERROR“ na obrázku 2.11). Z grafu je patrné, že při aktivaci zdroje je odezva přibližně 200 ns a při deaktivaci přibližně 500 ns.

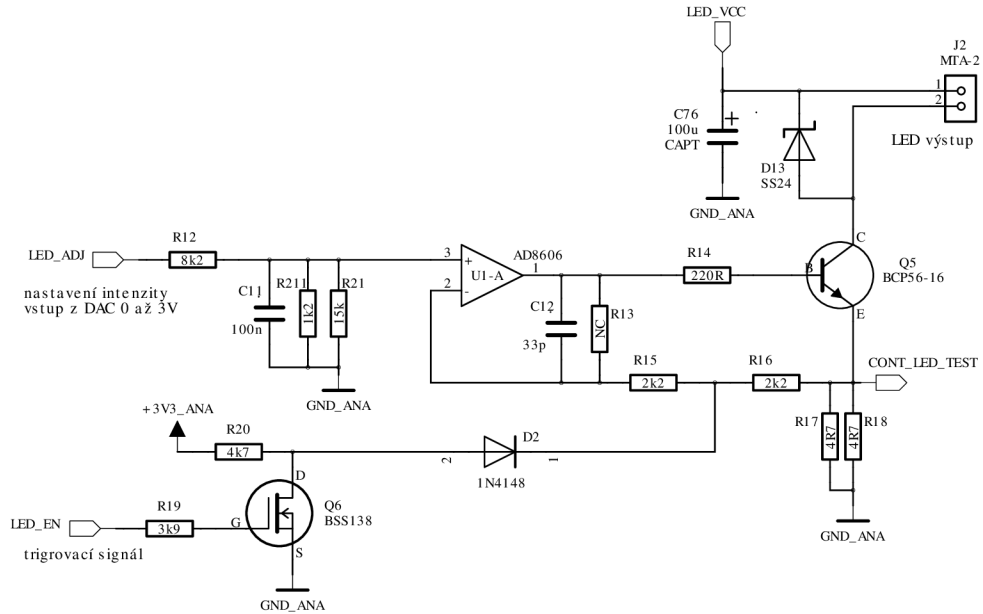
### 2.3.2 Zdroj aktinického světla

V původní verzi systému TL-500 docházelo u některých vyrobených kusů k nechtěnému rozkmitávání proudového zdroje. Původně byl v návrhu použit N-MOSFET tranzistor IRF7303 a bylo experimentálně ověřeno, že rozkmitávání způsobovala vstupní kapacita tranzistoru připojená přímo na výstup operačního zesilovače. Nově je použit bipolární tranzistor BCP56-16. Na základě simulací bylo odvozeno, že s nově zvoleným tranzistorem je dosaženo lepších časových vlastností zdroje. BCP56-16 také dovoluje díky pouzdru SOT-223 vyšší ztrátový výkon.

Další změnou je použití operačního zesilovače AD8606 namísto původního AD8051. Hlavním důvodem je výrazně menší vstupní proud (1 pA oproti  $1,4 \mu\text{A}$ ) a menší ofsetové napětí ( $65 \mu\text{V}$  oproti 1,7 mV) [24]. Tyto vlastnosti zaručují při nízkých hodnotách proudu vyšší přesnost nastavení. Předností AD8051 byla velká šířka pásma, která ovšem měla v tomto případě jen zanedbatelný přínos [25].

Na obrázku 2.16 je znázorněno schéma zdroje proudu řízeného napětím pro buzení LED diod aktinického zdroje světla. Pro zdroj aktinického světla je použita LED dioda LZ1-00R108, jde o jednočipovou verzi LZ4-00R108 použitou u světelného pulsního saturačního zdroje. Celkem jsou užity dvě sériově zapojené LED.

Signál „LED ADJ“ slouží pro nastavení výstupní hodnoty proudu. Tento signál je výstupem 10-ti bitového DA převodníku. Závislost mezi nastavenou hodnotou DA



Obr. 2.16: Schéma zapojení zdroje proudu pro aktinické kontinuální světlo.

převodníku a výstupním proudem je dán vztahem:

$$I_{LED} = \frac{U_{REF}}{R_{SENS}} \cdot \frac{D}{2^N} \cdot \frac{R_{D2}}{R_{D1} + R_{D2}} \quad (2.1)$$

Kde  $U_{REF}$  je referenční napětí DA převodníku (3 V),  $R_{SENS}$  je paralelní kombinace rezistorů  $R_{17}$  s  $R_{18}$  (0,9  $\Omega$ ),  $D$  je nastavená hodnota DA převodníku (z rozsahu 0 až 1023),  $D$  je počet bitů DA převodníku (10 bitů),  $R_{D2}$  je paralelní kombinace odporů  $R_{11}$  s  $R_{21}$  (1,111 k $\Omega$ ) a hodnota  $R_{D1}$  odpovídá rezistoru  $R_{12}$  (8,2 k $\Omega$ ). Maximální výstupní proud je 400 mA.

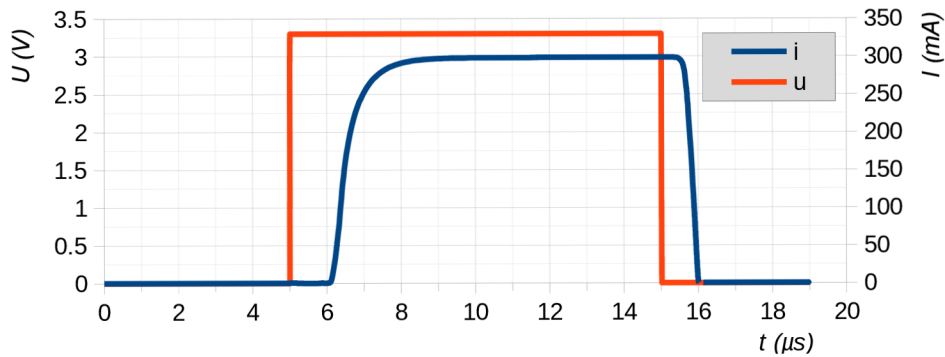
Signál „LED VCC“ je výstup DC-DC měniče, který je vyhrazen přímo pro napájení LED diod kontinuálního světelného zdroje. Napětí zdroje bude určeno experimentálně tak, aby byl na tranzistoru Q5 co nejmenší úbytek napětí při maximálním proudu diodou a minimalizoval se ztrátový výkon. Z termálních parametrů použitého tranzistoru a uvažované okolní teploty 50 °C byl určen maximální ztrátový výkon tranzistoru 0,7 W. Napětí zdroje by se mělo pohybovat okolo 4,5 V.

Aktivace zdroje je prováděna signálem „LED EN“ s logickou úrovní 3,3 V. Jelikož je kladen důraz na přesné časování, je aktivace a deaktivace zdroje prováděna zásahem do zpětné vazby zdroje. Na obrázku 2.17 je znázorněna simulace odezvy proudového výstupu zdroje na 10  $\mu$ s široký aktivační puls signálu „LED EN“.

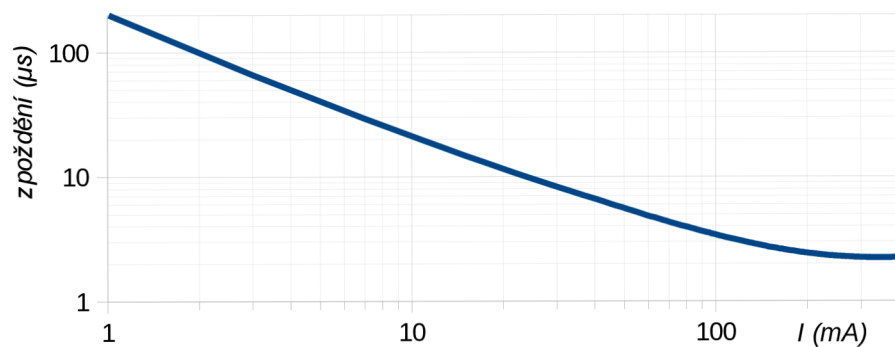
Zpoždění, kdy dojde k ustálení výstupního proudu po aktivaci, není konstantní, ale je závislé na hodnotě nastaveného proudu. Se snižujícím proudem se zpoždění zvyšuje. Toto zpoždění je způsobeno vlivem zpětnovazebního kompenzačního kondenzátoru C12. Výsledek simulace zpoždění na hodnotě nastaveného proudu je zná-

zorněna na obrázku 2.18, kde výsledná hodnota zpoždění odpovídá dosažení výstupního proudu 80-ti % nastavené hodnoty proudu.

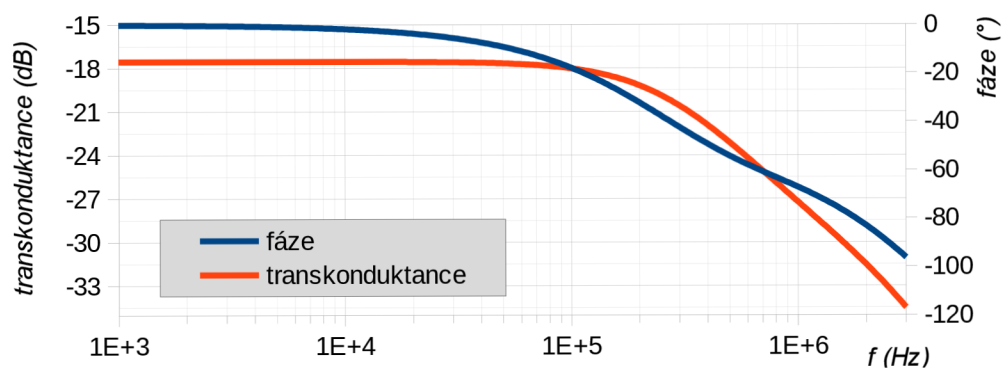
Na obrázku 2.19 je znázorněna frekvenční a přenosová charakteristika zdroje ze vstupu (signál „LED ADJ“) na výstup (proud LED diodami). Dosažená šířka pásma zdroje je 300 kHz pro pokles přenosu o 3 dB.



Obr. 2.17: Časová odezva zdroje proudu.



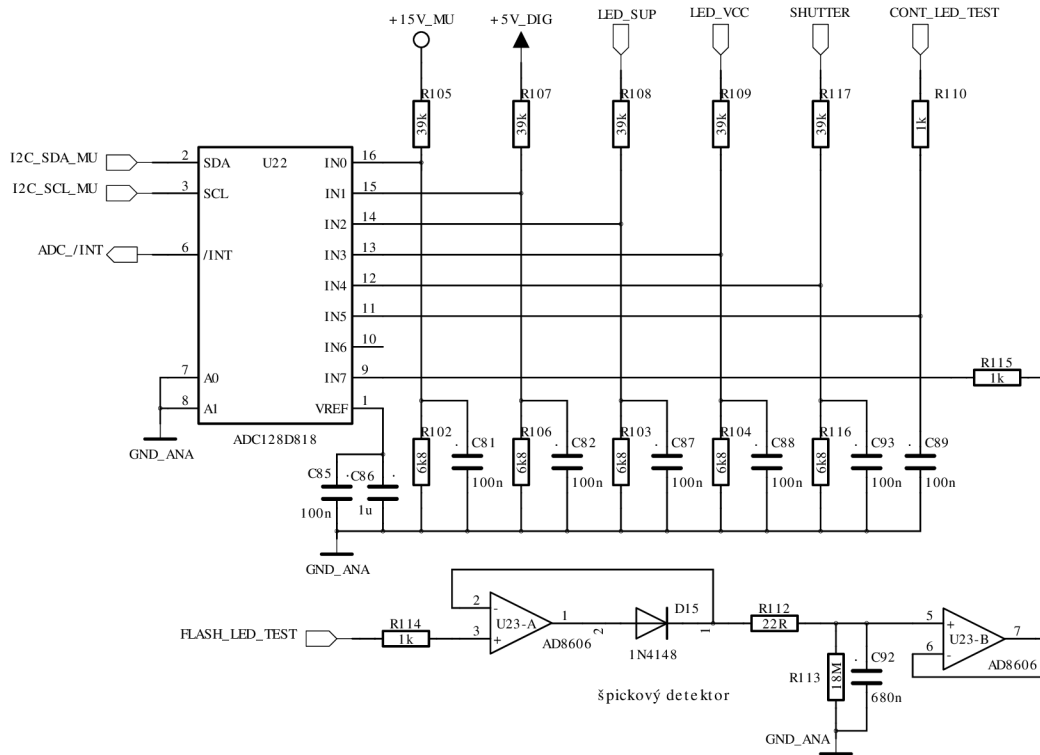
Obr. 2.18: Závislost zpoždění proudového výstupu na hodnotě nastaveného proudu.



Obr. 2.19: Frekvenční přenosová a fázová charakteristika zdroje.

### 2.3.3 Monitorovací ADC

Do měřicí jednotky byl nově implementován monitorovací ADC. Pro tyto účely byl vybrán 12-ti bitový osmikanálový AD převodník ADC128D818 a jeho zapojení je znázorněno na obrázku 2.20. V tabulce 2.2 jsou vypsány veškeré monitorované signály v MU.



Obr. 2.20: Schéma zapojení monitorovacího ADC.

Jeden z možných režimů funkce ADC spočívá v automatickém kontinuálním monitorování všech jeho vstupů. ADC obsahuje registry, kde jsou zapsány rozsahy tolerovaných hodnot napětí na jednotlivých vstupech ADC. Pokud sledovaná hodnota vybočí z definovaného rozsahu, vyvolá ADC přerušení. Následně je možné zpětně vyčíst, který ze vstupů vybočil z definovaného rozsahu, a jaká byla hodnota napětí na jeho vstupu. ADC také zahrnuje senzor teploty a lze jej tak využít i pro monitorování okolní teploty [26].

Vzorkovací perioda při všech aktivovaných vstupech je přibližně 89 ms. Maximální trvání pulsu aktinického saturačního světla je 150  $\mu$ s. Takto malý časový interval by ADC nebyl schopen detekovat. Před vstupem ADC kanálu pro monitorování proudu LED diodami saturačního zdroje je tudíž umístěn špičkový detektor (viz obr. 2.20). Časová konstanta špičkového detektoru je přibližně 12 s, a je tak zaručeno, že proud bude LED diodami spolehlivě detekován.

Díky použitému ADC bude možné vytvořit programovou funkci pro automatickou diagnostiku měřicí jednotky. Tato funkce umožní automaticky ověřit funkčnost většiny funkčních bloků MU a urychlí tak proces výroby. V případě poruchy pak napomůže k rychlému odhalení její příčiny.

Tab. 2.2: Přehled monitorovaných signálů MU.

Monitorovaný signál	Popis signálu
+15V MU	Vstupní napájecí napětí MU (15 V).
+5V DIG	Výstup DC-DC měniče pro napájení MU (5 V).
LED SUP	Výstup nastavitelného DC-DC měniče zdroje saturačního světla (viz obr 2.12).
LED VCC	Výstup DC-DC měniče pro napájení zdroje aktinického kontinuálního světla.
SHUTTER	Výstup DC-DC měniče pro napájení spínače clony fotonásobiče (12 V).
CONT LED TEST	Propojení se snímacím odporem proudu zdroje aktinického kontinuálního světla (viz obr 2.16) za účelem měření proudu LED.
FLASH LED TEST	Propojení se snímacím odporem proudu spínače saturačního světla (viz obr 2.11) za účelem měření proudu LED.



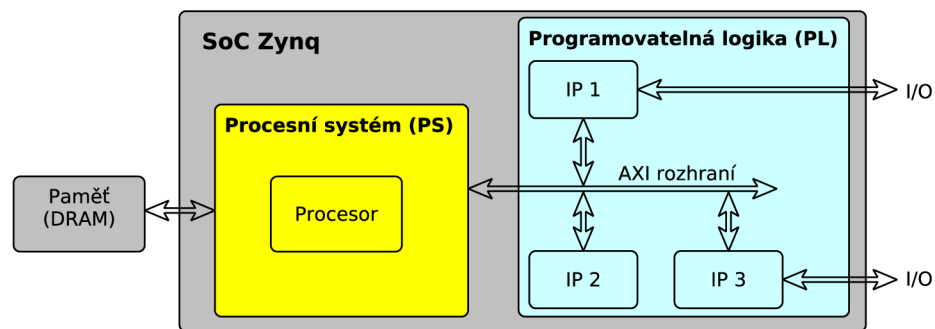
### 3 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ PRO SOC ZYNQ

Kapitola se zabývá zvolenými vývojovými nástroji a postupy pro SoC Zynq. V první části kapitoly je provedeno stručné seznámení s obecnými postupy při vývoji s SoC Zynq a jsou diskutovány zvolené nástroje. V druhé části kapitoly je vývojový proces znázorněn na praktické ukázce. Kompletní softwarové řešení není hlavní náplní práce, proto se kapitola této problematice věnuje jen okrajově.

#### 3.1 Platforma SoC Zynq

Jak již bylo nastíněno v kapitole 2.2.1 „MicroZed“, nová základová deska CU je založena na platformě SoC Zynq společnosti Xilinx. Použitý Zynq představuje kombinaci dvoujádrového ARM Cortex-A9 procesoru (CPU) a programovatelného hradlového pole (FPGA) obsaženou na jediném čipu. Předností takové kombinace je velká univerzálnost s širokým spektrem možných aplikací.

Na obr. 3.1 je znázorněno obecné zjednodušené vnitřní blokové schéma SoC Zynq. Zynq je rozdělen do dvou částí. První částí je „procesní systém“ (processing system, dále jen PS) a druhou částí je „programovatelná logika“ (programmable logic, dále jen PL). PS zahrnuje CPU a s ním spojené periferie jako je kontrolér přerušení, kontrolér paměti, DMA kontrolér, generátory hodin, vyrovnávací paměť apod. Součástí PS jsou i některé vstupně-výstupní periferie, jako je USB 2.0, Ethernet, UART, SPI, I2C a další. PL pak představuje standardní FPGA s architekturou Artix-7 (případně Kintex-7 u výkonnějších řad Zynq) a vstupně-výstupními bankami.



Obr. 3.1: Obecné vnitřní blokové scéma SoC Zynq.

Propojení mezi PL a PS je realizované pomocí AXI4 rozhraní, které je součástí AMBA standardu definovaného společnostmi ARM. AXI4 rozhraní se využívá nejenom pro přenos dat mezi PL a PS, ale i pro propojení jednotlivých IP bloků (periferií) v rámci PL. Existují tři typy AXI4 rozhraní, každé určené pro jinou aplikaci [19]:

- **AXI4** - slouží pro vysokorychlostní paměťově mapovanou komunikaci.
- **AXI4-Lite** - jak název napovídá, jedná se o „odlehčenou“ variantu AXI4. Tato varianta je úspornější z pohledu využitých prostředků FPGA, ale umožňuje pouze relativně malé datové propustnosti.
- **AXI4-Stream** - je určen pro vysokorychlostní přenos dat, které nejsou paměťově mapovány. Při přenosu jsou tedy přenášena čistě data bez nutnosti adresování.

Příkladem využití AXI4 je zápis navzorkovaných dat AD převodníkem do paměti prostřednictvím DMA (Direct Memory Access, přímý přístup do paměti), data jsou dále zpracovávána pomocí PS. Typické využití AXI4-Lite je pro konfiguraci a ovládání IP bloků v PL prostřednictvím PS. Rozhraní AXI4-Stream je určeno pro jednoduché propojení a vysokorychlostní přenos dat mezi IP bloky v rámci PL.

PS umožňuje běh operačního systému reálného času (například FreeRTOS), vestavěného Linuxu nebo jen prosté vykonávání kódu bez využití operačního systému (tzv bare-metal řešení). PS je natolik flexibilní, že umožňuje využít například jedno jádro CPU pro běh Linuxu a druhé pro bare-metal řešení. Jednotlivá jádra spolu můžou pak komunikovat přes sdílenou paměť. Každé řešení má své výhody a nevýhody. Výhodou Linuxu je velké množství volně dostupných ovladačů, aplikací a nástrojů, což může ušetřit spoustu času při vývoji. Sám Xilinx dodává pro některá své IP jádra i Linuxové ovladače. Linux sám o sobě není operační systém reálného času, existují však i různé modifikace jádra Linuxu. Tyto modifikace zlepšují jeho časovou odezvu a umožňují tak plnit funkce reálného času. Nevýhodou Linuxu je jeho komplexnost, a tudíž i „složitost“. Například při použití vlastních IP bloků, nebo IP bloků s nedostupnými ovladači, je nutné si vytvořit vlastní ovladač. To vyžaduje alespoň základní znalosti jádra Linuxu.

Pro účely základové desky CU je použit operační systém Linux a jsou pro něj vyhrazeny obě jádra CPU. Veškeré časově kritické operace jsou implementovány čistě v PL, a proto není od Linuxu vyžadována odezva reálného času. Základová deska má být schopna mimo jiné komunikace přes Ethernet nebo ukládat a vyčítat data z USB flash disku. Linux již zahrnuje veškeré potřebné ovladače, sadu protokolů TCP/IP, souborový systém a vše potřebné pro zmíněné funkcionality. Další výhodou je dostupný ovladač pro grafický výstup, který bude využit pro LCD displej a množství dostupných nástrojů pro tvorbu grafického uživatelského prostředí (GUI).

### 3.1.1 Použité vývojové nástroje a postupy

Zjednodušený postup vývoje pro SoC Zynq v kombinaci s vestavěným systémem Linux lze shrnout do tří základních bodů:

1. Tvorba, testování a implementace IP bloků pro PL část. Pro tyto účely bylo využíváno vývojové prostředí Vivado Design Suite. Po úspěšné syntéze návrhu je pomocí nástroje Vivado generován tzv. HDF soubor (hardware definition file), který zahrnuje veškeré potřebné informace o syntetizované PL.
2. Tvorba ovladačů a sestavení Linuxové distribuce. Pro tyto účely bylo využíváno sady nástrojů PetaLinux. Pomocí nástrojů je importován HDF soubor a je automaticky generován strom zařízení (device tree). Je provedena kompletní konfigurace systému a jsou zahrnuty potřebné ovladače a aplikace. Následně je provedena kompilace systému a generuje se spustitelný obraz systému.
3. Tvorba a testování aplikací. Pro tyto účely bylo použito vývojové prostředí XSDK. Prostředí umožňuje snadné sestavení a ladění aplikace běžící na vzdáleném Linuxovém zařízení. Aplikace byly programovány v jazyce C.

Zmíněné použité nástroje jsou poskytovány společností Xilinx a byly použity ve verzi 2017.2. Celý postup vývoje je v následující podkapitole znázorněn na praktické ukázce implementace termoregulátoru.

## 3.2 Implementace termoregulátoru

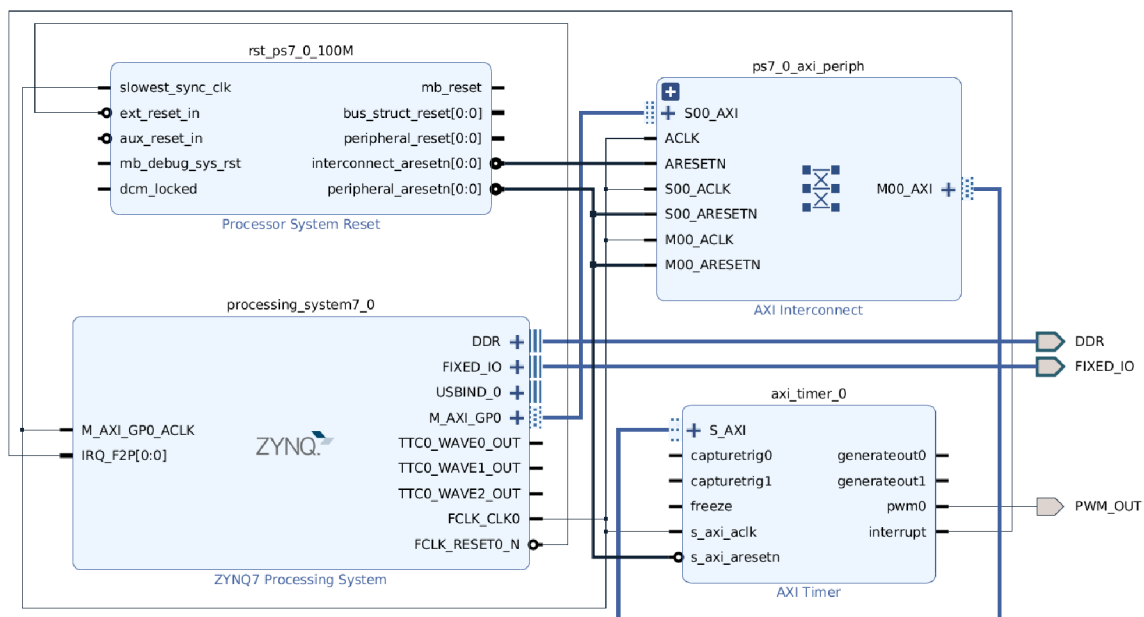
Termoregulátor je v měřicím systému termoluminiscence použit pro regulaci teploty pozlacené měřicí plošky MU. V CU jsou použity samostatné bloky pro řízení Peltierova článku a pro vyčítání měřené teploty. Oba bloky jsou připojeny k základové desce CU (viz blokové schéma CU na obr. 2.5). Vstupem pro SoC je tedy měřená teplota vyčítaná po I2C sběrnici a výstupem je PWM signál definující výkon Peltierova článku.

### 3.2.1 Programovatelná logika

V PL části je pro účely termoregulátoru použit volně dostupný IP blok časovače „AXI Timer v2.0“. IP blok využívá rozhraní AXI4-Lite a je konfigurován prostřednictvím PS. Blok umožňuje generovat PWM signál s konfigurovatelnou periodou a střídou. Blok zároveň generuje přerušení vždy po uplynutí časové periody. Na obr. 3.2 je blokové schéma znázorňující zapojení časovače v PL.

### 3.2.2 Jádro Linuxu

Pro účely termoregulátoru byl vytvořen modul ovladače typu „Character Device“. IP blok v PL části je namapován na určitou fyzickou adresu operační paměti. Ovladač přemapuje fyzickou adresu do virtuálního adresního prostoru jádra Linuxu.



Obr. 3.2: Zapojení časovače v PL SoC Zynq.

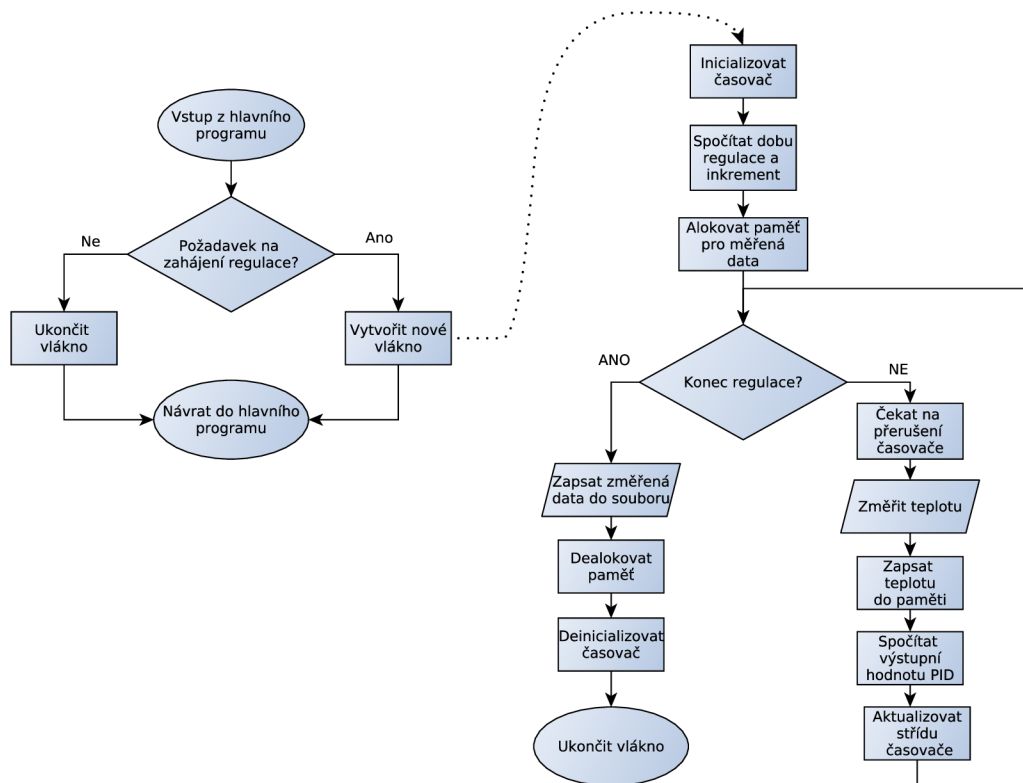
Jednotlivé konfigurační registry IP bloku je pak možné adresovat jako součet virtuální adresy a adresového offsetu daného registru.

Pro přístup k modulu ovladače z uživatelského prostoru Linuxu je použito systémových volání `write()`, `ioctl()` a `read()`. Pomocí volání funkce `ioctl()` z aplikace v uživatelském prostoru se definuje offset registru, do jakého je třeba zapisovat. Pomocí volání funkce `write()` je následně proveden zápis do zvoleného registru. Z registrů časovače není v případě termoregulátoru nutné vyčítat žádné hodnoty. Proto není systémové volání `read()` využito pro vyčítání hodnot registrů, ale je využito k blokování kódu do doby, než nastane přerušení časovače. Pokud je z aplikace volána funkce `read()`, nedojde k návratu z funkce dřív než nastane přerušení z časovače. Pokud bylo přerušení vyvoláno ještě před voláním `read()`, je navracena hodnota odpovídající počtu zmeškaných přerušení. Touto metodou je dosaženo synchronizace softwarově implementovaného termoregulátoru v uživatelském prostoru Linuxu s časovačem v PL. Zdrojový kód celého modulu ovladače je obsažen v elektronické příloze G.

### 3.2.3 Uživatelský prostor Linuxu

Nejvyšší vrstvou je uživatelský prostor Linuxu, kde je regulace teploty dosaženo pomocí softwarově implementovaného PID regulátoru. Termoregulátor běží ve vlastním vlákne tak, aby neovlivňoval běh hlavního programu. Princip funkce je znázorněn na vývojovém diagramu na obr. 3.3. V podkapitole 4.2.4 jsou pak prezentovány

výsledky měření s takto implementovaným termoregulátorem. Kompletní zdrojový kód je obsažen v elektronické příloze G.



Obr. 3.3: Vývojový diagram softwarově implementovaného termoregulátoru v uživatelském prostoru Linuxu.

## 4 REALIZACE A TESTOVÁNÍ

V první části kapitoly je provedeno seznámení s vytvořeným prototypem nové verze měřicího systému termoluminiscence PSI TL 500. Následně jsou diskutovány výsledky testování a měření na dílčích částech měřicího systému. Na závěr kapitoly jsou pak uvedeny výsledky měření na vzorcích rostlin.

### 4.1 Realizovaný prototyp

Pro účely ověření funkcionalit byl vytvořen prototyp nové verze měřicího systému TL 500. Zatímco mechanické provedení MU zůstalo shodné s původní verzí systému, pro CU byla použita skříň s menšími rozměry.

#### 4.1.1 Řídicí jednotka

Rozměry nové verze CU jsou 36 x 15 x 39 cm, zatímco rozměry původní verze byly 47 x 20 x 45 cm. Došlo tak k redukci objemu skříně na polovinu. Zmenšení bylo možné dosáhnout díky sloučení funkcionalit dříve samostatných DPS na nově navrženou základovou desku. Realizovaná CU je znázorněna na obr. 4.1 a 4.2.

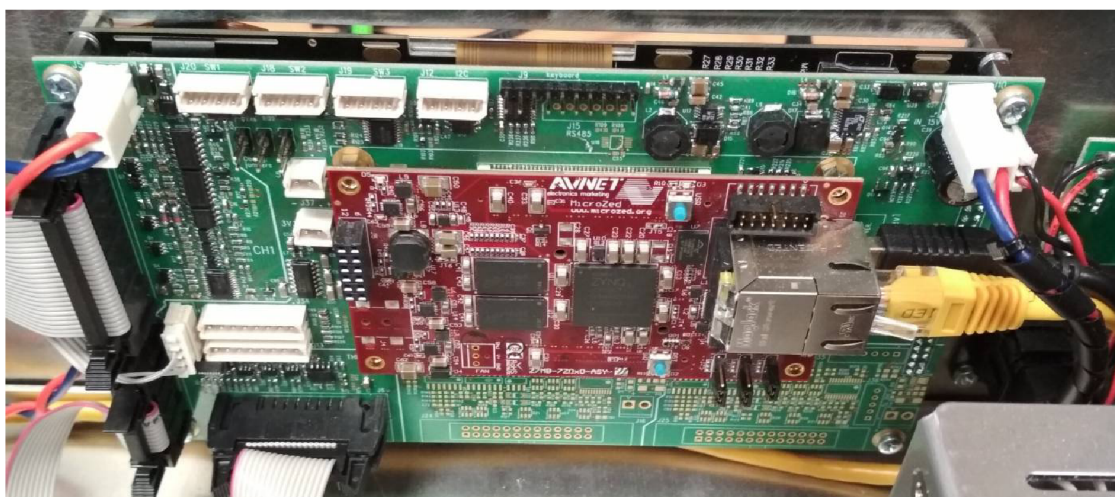
Základová deska je spolu s displejem uchycena ze zadní strany předního panelu CU a její podoba je znázorněna na obr. 4.3.



Obr. 4.1: Realizovaný prototyp CU, pohled zepředu.



Obr. 4.2: Realizovaný prototyp CU, pohled zezadu.

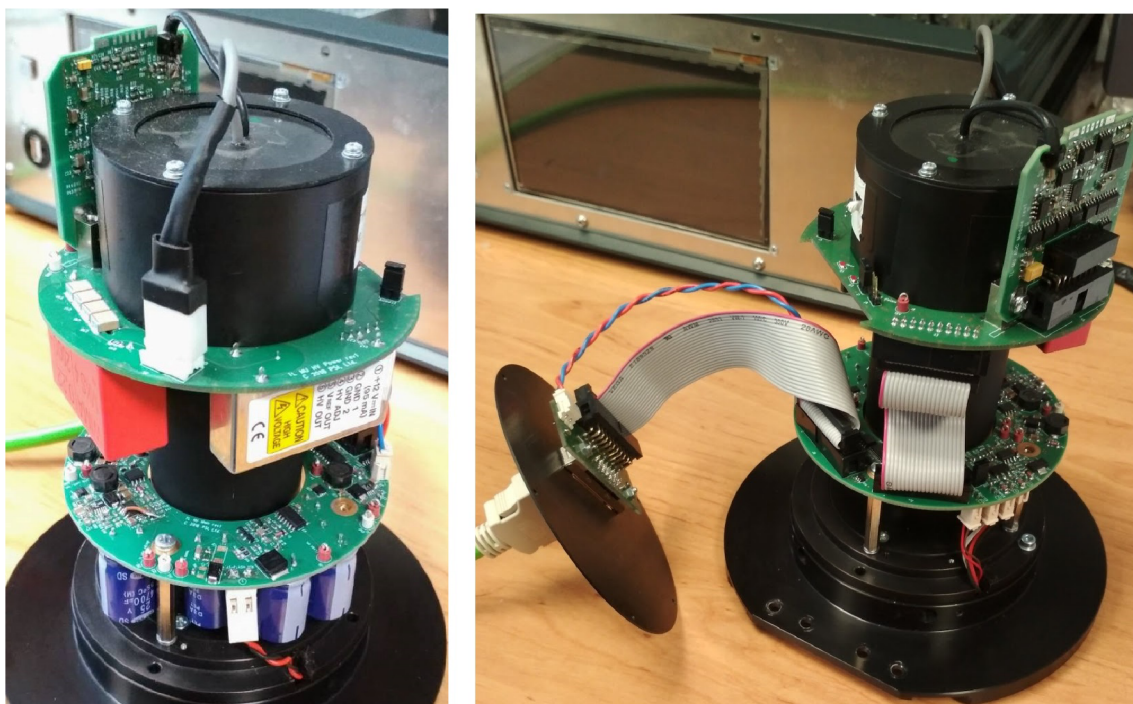


Obr. 4.3: Realizovaná základová deska CU.

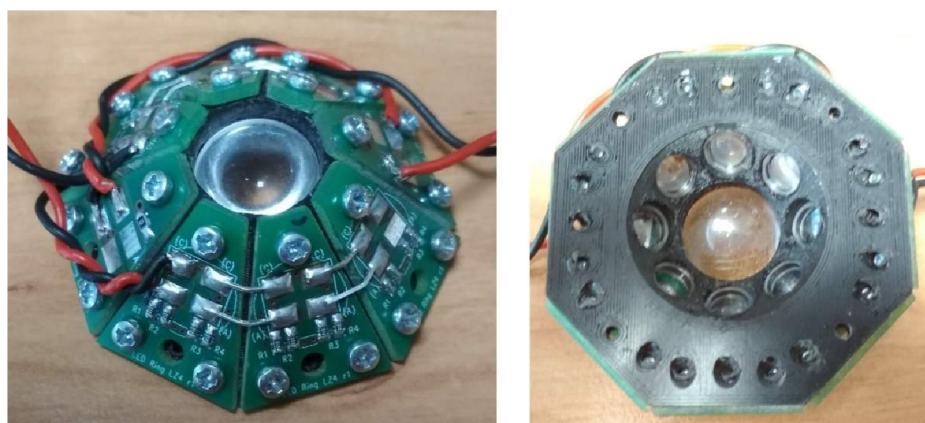
### 4.1.2 Měřicí jednotka

Realizovaný prototypu MU je znázorněn na obr. 4.1. V původní verzi MU byly celkem tři kruhové DPS uchyceny nad sebou v prostoru kolem fotonásobiče. V nové verzi MU je použito větší množství součástek v důsledku přidání nových funkcionalit. I přesto se díky optimálnějšímu rozmístění součástek a použití čtyřvrstvé DPS podařilo redukovat počet DPS ze tří na dvě.

Na obr. 4.5 je znázorněno mechanické upevnění LED světelného aktinického a saturačního zdroje společně s optikou. Pro účely prototypu byl díl vytištěn na 3D tiskárně, pro produkční verzi bude tento díl vyroben ze slitiny hliníku.



Obr. 4.4: Realizovaný prototyp MU.



Obr. 4.5: Mechanické uchytení LED světelných zdrojů a optických čoček.

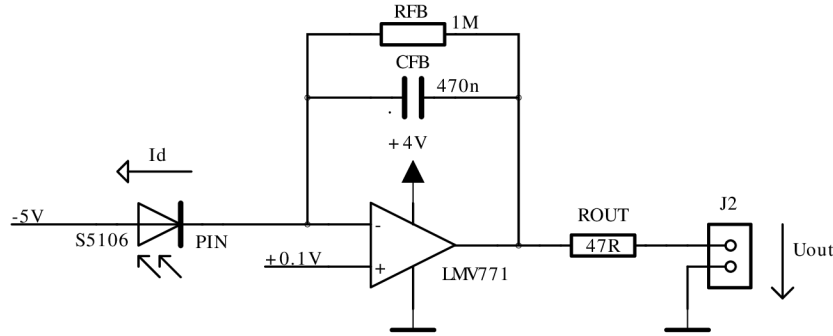
## 4.2 Testování světelných zdrojů

V původní verzi měřicího systému nebyly aktinické a saturační světelné zdroje při výrobě kalibrovány. Výsledné světelné intenzity se u různých vyrobených kusů lišily v mezích výrobních tolerancí použitých součástek a především v závislosti na přesnosti mechanického upevnění LED diod. Nově budou světelné zdroje při výrobě kalibrovány a kalibrační konstanty budou ukládány do paměti EEPROM v MU. Pro snazší a přesnější měření světelných intenzit při výrobě byl proto vyroben nový měřicí přípravek.



### 4.2.1 Přípravek pro měření světelné intenzity

Pro výrobu měřicího přípravku byla použita spodní část MU. Pozlacená měřicí ploška byla nahrazena teflonovým válečkem o výšce 30 mm. Na spodní straně válečku je upevněna PIN fotodioda Hamamatsu S5106 s aktivní plochou 25 mm<sup>2</sup>. Teflon slouží pro rozptyl světla tak, aby nebylo měření ovlivněno nehomogenitou světla a faktem, že PIN fotodioda nezabírá celou plochu měřicí plošky. Teflon i fotodioda jsou upevněny pomocí plastových dílů vytištěných na 3D tiskárně.



Obr. 4.6: Schematické zapojení transimpedančního zesilovače s PIN fotodiódou pro měření světelné intenzity.

PIN fotodioda je připojena na vstup transimpedančního zesilovače realizovaného pomocí OZ LMV771 viz schéma zapojení na obr. 4.6. Výstupní napětí zesilovače lze vyjádřit vztahem:

$$U_{OUT} = U_{BIAS} + U_{OS} + (I_D + I_{D0}) \cdot R_{FB} \quad (4.1)$$

Kde  $U_{BIAS}$  (V) je stejnosměrné předpětí neinvertujícího vstupu OZ,  $U_{OS}$  (V) je offsetové napětí OZ,  $I_0$  (A) je proud fotodiódou za tmy,  $I_D$  (A) proud fotodiódou pro měřenou světelnou intenzitu a  $R_{FB}$  ( $\Omega$ ) je hodnota zpětnovazebního rezistoru zesilovače. Za předpokladu, že proud fotodiódou je přímo úměrný měřené světelné intenzitě, lze měřenou intenzitu  $E$  ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) vyjádřit vztahem:

$$E = \frac{U_{OUT} - U_{OUT0}}{R_{FB}} \cdot K = \frac{U_{OUT} - U_{OUT0}}{1 \cdot 10^6} \cdot 1,1606 \cdot 10^9 = \frac{U_{OUT} - U_{OUT0}}{1,1606 \cdot 10^3} \quad (4.2)$$

Kde  $U_{OUT}$  (V) je výstupní napětí zesilovače pro měřenou světelnou intenzitu,  $U_{OUT0}$  (V) je konstanta odpovídající výstupnímu napětí zesilovače za tmy a  $K = 1,1606 \cdot 10^9$  ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1}$ ) je experimentálně zjištěná konstanta vyjadřující poměr detekované hodnoty světelné intenzity k odpovídajícímu proudu fotodiódou.

Vztah 4.2 je použitelný pouze pro měření intenzity kontinuálního světla. Pro měření intenzity krátkých saturačních pulsů je situace odlišná. Záměrně byla zvolena zpětná vazba transimpedančního zesilovače s velkou časovou konstantou  $\tau$ :

$$\tau = R_{FB} \cdot C_{FB} = 1 \cdot 10^6 \cdot 470 \cdot 10^{-9} = 470 \text{ ms} \quad (4.3)$$

Pro měření intenzity saturačních pulsů je uvažováno periodické opakování pulsů s periodou  $T$  za předpokladu, že perioda opakování je výrazně menší než časová konstanta ( $T \ll \tau$ ). Transimpedanční zesilovač pak plní funkci integrátoru a výstupní napětí je úměrné střední hodnotě světelné intenzity. Přepočtení střední hodnoty na intenzitu světelných pulsů lze pak provést pomocí vztahu:

$$E = \frac{U_{OUT} - U_{OUT0}}{R_{FB}} \cdot \frac{T_{FLASH}}{T} \cdot K = \frac{U_{OUT} - U_{OUT0}}{1,1606 \cdot 10^3} \cdot \frac{T_{FLASH}}{T} \quad (4.4)$$

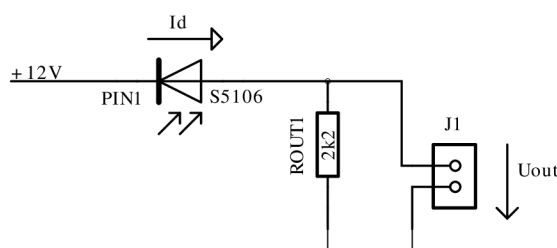
Kde  $T$  (s) je perioda opakování pulsů a  $T_{FLASH}$  (s) je doba trvání světelného pulsu. Výhodou této metody je, že rozsah měřitelných intenzit lze upravovat změnou periody opakování  $T$ . Lze tak měřit velký dynamický rozsah intenzit bez nutnosti změny zpětnovazebního odporu  $R_{FB}$ .

Pro měření poklesu světelné intenzity během doby trvání saturačních pulsů vlivem nárůstu teploty polovodičového přechodu LED je fotodioda zapojena do série s odporem  $R_{OUT} = 2,2 \text{ k}\Omega$  viz schéma na obr. 4.7. Výstup je následně připojen k osciloskopu. Připojením 12 V předpětí k fotodiodě byla minimalizována její parazitní kapacita  $C_D$  na hodnotu přibližně  $35 \text{ pF}$  [27]. Časová konstanta je pak definována jako:

$$\tau = R_{OUT} \cdot C_D = 2,2 \cdot 10^3 \cdot 35 \cdot 10^{-12} = 77 \text{ ns} \quad (4.5)$$

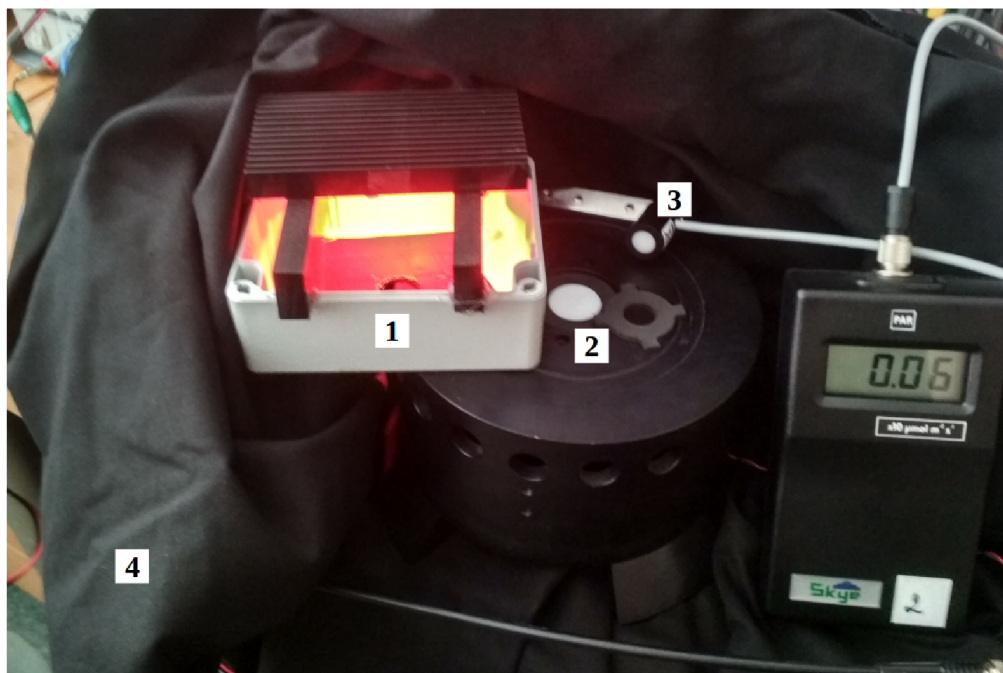
za předpokladu, že vstupní kapacita měřicí sondy osciloskopu je výrazně menší než kapacita fotodiody tak, aby nebyla časová konstanta výrazně prodloužena. Odezva na světelný puls je tedy dostatečně rychlá, aby bylo možné pozorovat pulsy s dobou trvání v řádu jednotek  $\mu\text{s}$ . Výsledná intenzita odpovídá vztahu:

$$E \approx \frac{U_{OUT}}{R_{OUT}} \cdot K \approx \frac{U_{OUT}}{2200} \cdot 1,1606 \cdot 10^9 \approx U_{OUT} \cdot 5,2754 \cdot 10^5 \quad (4.6)$$



Obr. 4.7: Zapojení PIN fotodiody pro měření pomocí osciloskopu.

Pro zjištění převodní konstanty  $K$  byl použit měřič světelné intenzity Skye SKP 200 a referenčního zdroje světla vytvořený z LED diody Ledengin LZ4-00R108 (stejný typ je použit pro saturační světelný zdroj). LED je umístěna na chladiči v plastové krabici s otvorem ve dně o průměru měřicí plošky. Krabice zajišťuje



Obr. 4.8: Kalibrace měřicího přípravku. Referenční světelný zdroj (1), měřicí přípravek s teflonovým válečkem (2), senzor referenčního měřiče světelné intenzity Skye (3) a světlonepropustná překrývka (4).

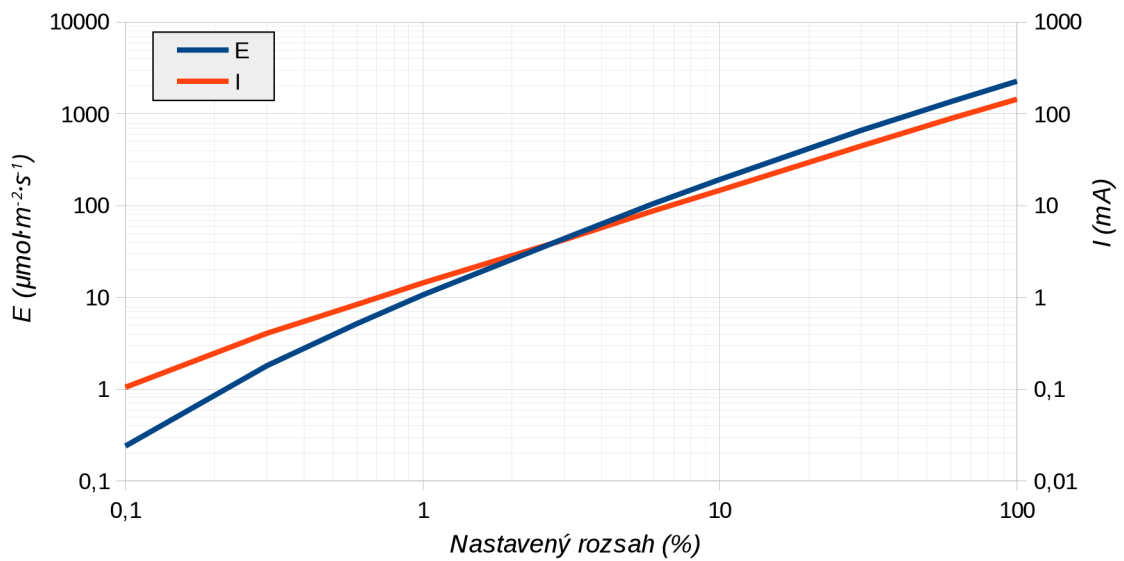
stejnou vzdálenost a tedy shodnou světelnou intenzitu při umístění referenčního světelného zdroje na měřicí přípravek i při umístění na senzor měřiče světelné intenzity. Při konstantním proudu LED byla nejprve pomocí měřiče Skye zjištěna intenzita referenčního světelného zdroje. Následně byl pomocí transimpedančního zesilovače změřen proud fotodiodou měřicího přípravku odpovídající dané intenzitě. Hodnota převodní konstanty  $K = 1,1606 \cdot 10^9 (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1})$  byla stanovena jako poměr světelné intenzity k proudu fotodiodou. Měření bylo opakováno několikrát v rozsahu intenzit 10 až  $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  pro ověření správnosti měření. Podoba měřicího přípravku je znázorněna na obr. 4.8.

#### 4.2.2 Měření parametrů zdroje aktinického světla

Maximální intenzita aktinického světla u současné verze měřicího systému TL 500 je  $1\,500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  a minimální nastavitelná hodnota není definována. Hlavním požadavkem na novou verzi byla především přesnost na nízkých intenzitách tak, aby byl zdroj nastavitelný v rozsahu od  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  do  $1\,500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

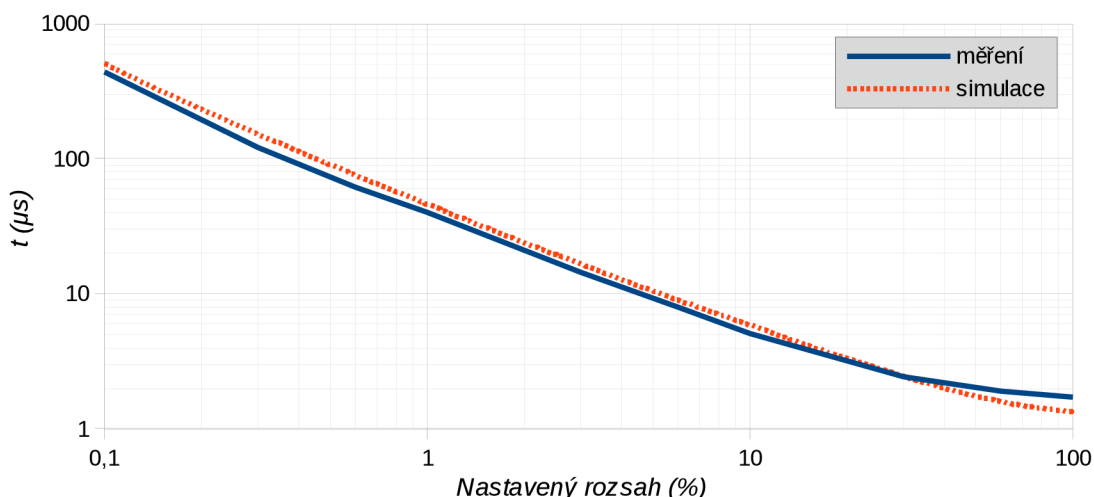
Na obr. 4.9 je znázorněna závislost změřené intenzity a proudu LED na relativní nastavené hodnotě z rozsahu DAC sloužícího pro nastavení výstupního proudu zdroje aktinického světla (viz sekce návrhu zdroje aktinického kontinuálního světla

2.3.2). Při nastavené hodnotě 0,1 % (hodnota 1 použitého 10b DAC) byla naměřená intenzita  $0,25 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a při nastavené hodnotě 100 % (hodnota 1 023 použitého 10b DAC) intenzita  $2\,300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Aby byla část rozsahu DAC vyhrazena jako rezerva pro softwarovou kalibraci při výrobě, je uvažován **výsledný nastavitelný rozsah intenzit od 10 do 2 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$** . Při intenzitě  $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  připadá u DAC na 1 LSB přibližně  $1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , chyba nastavení se tak vlivem rozlišení DAC může pohybovat až okolo 10-ti %. Tato chyba je akceptovatelná, pro případné zvýšení přesnosti nastavení při nízkých hodnotách intenzit by musel být použit DAC s vyšší bitovou hloubkou.



Obr. 4.9: Změřená světelná intenzita a proud LED aktinického světelného zdroje v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC.

Na obr. 4.10 je znázorněna závislost měřeného a simulovaného zpoždění proudového výstupu aktinického světelného zdroje po jeho aktivaci trigrovacím signálem. Naměřené hodnoty odpovídají předpokladu vycházejícího ze simulací.



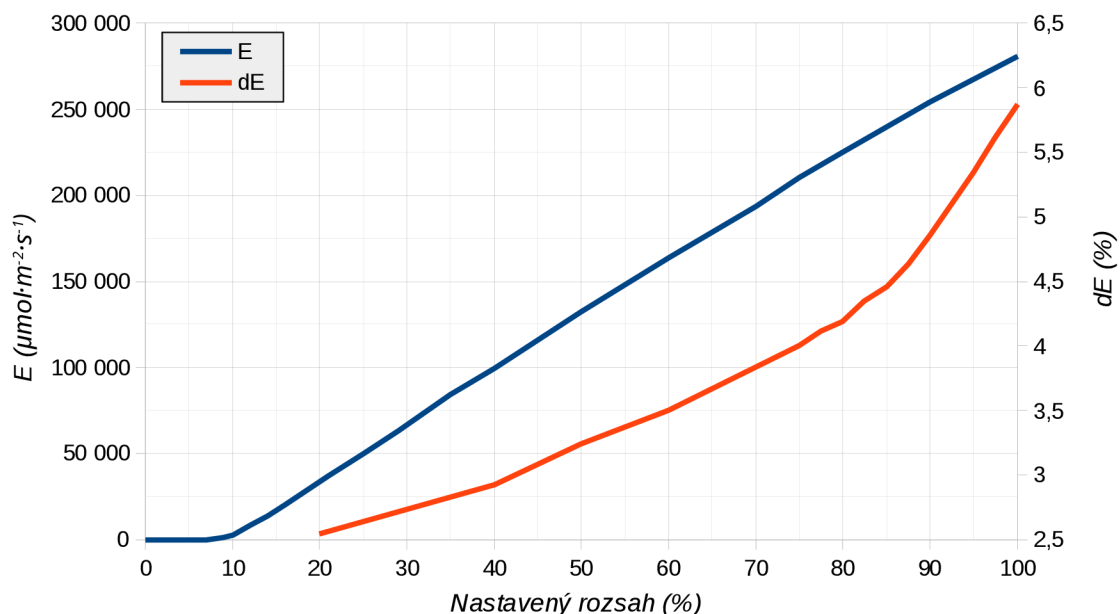
Obr. 4.10: Zpoždění proudového výstupu aktinického světelného zdroje v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC.

### 4.2.3 Měření parametrů světelného saturačního zdroje

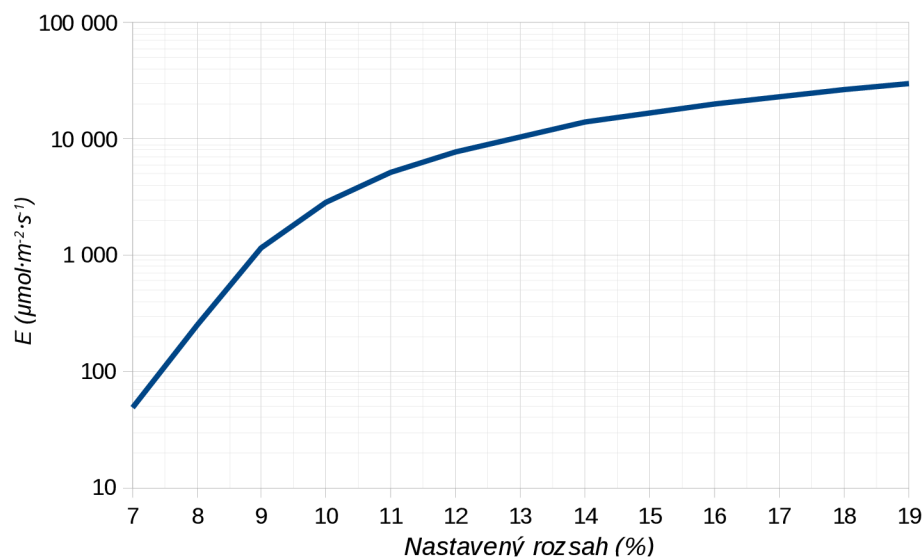
Maximální intenzita aktinických saturačních světél je u současné verze měřicího systému  $90\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  při maximální možné době trvání pulsu  $150\ \mu\text{s}$ . Požadavkem na novou verzi měřicího systému bylo dosažení intenzity alespoň  $250\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  při zachování maximální doby trvání pulsu  $150\ \mu\text{s}$ . Na obr. 4.11 a 4.12 je znázorněna změřená intenzita a relativní změna intenzity během trvání světelného pulsu v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC. Maximální dosažitelná intenzita s novými LED je  $281\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vzhledem k vyhrazení části rozsahu DAC pro kalibraci je uvažován **výsledný nastavitelný rozsah intenzit od 1 000 do 250 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$** . Spodní nastavitelná hranice intenzity byla zvolena tak, aby se z části překrývala se zdrojem aktinického světla.

Maximální intenzita je dosažitelná při proudu LED  $37,5\ \text{A}$  a napětí zdroje  $13,6\ \text{V}$ , špičkový výkon napěťového zdroje je tedy  $510\ \text{W}$ . Měřené napětí zdroje a výsledný proud LED v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC jsou znázorněny na obr. 4.13.

Na obr. 4.14 je znázorněn oscilogram, kde je zachycen časový průběh světelné intenzity, napětí a proudu LED během trvání pulsu. Z průběhu světelné intenzity je patrný pokles intenzity vlivem zahřívání polovodičového přechodu LED a poklesem napětí. Pokles napětí je způsoben vybíjením výstupních kapacitorů napěťového zdroje. Z průběhu výstupního napětí zdroje je patrný náhlý propad napětí o přibližně  $170\ \text{mV}$  na začátku světelného pulsu, tento propad je způsobený úbytkem napětí na ekvivalentním sériovém odporu (ESR) výstupních kapacitorů. Při proudu  $33\ \text{A}$  lze tedy odvodit celkovou hodnotu ESR přibližně  $5\ \text{m}\Omega$ . Další, téměř lineární pokles napětí během trvání pulsu je důsledkem vybíjení kapacitorů konstantním



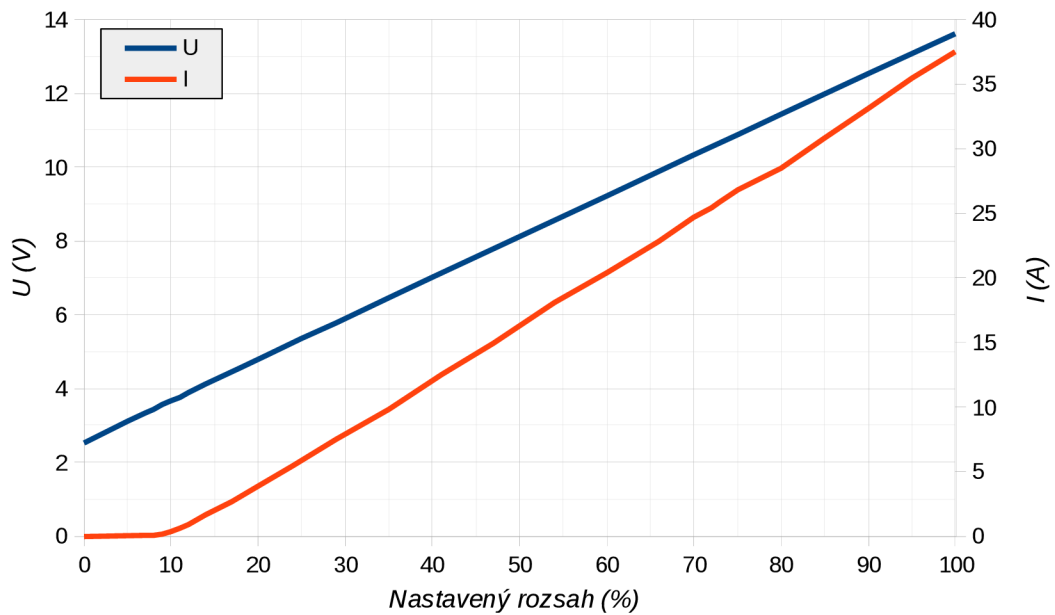
Obr. 4.11: Změřená světelná intenzita a relativní pokles intenzity během trvání světelného pulsu v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC pro saturační světelný zdroj. Doba trvání pulsu je  $150 \mu\text{s}$ .



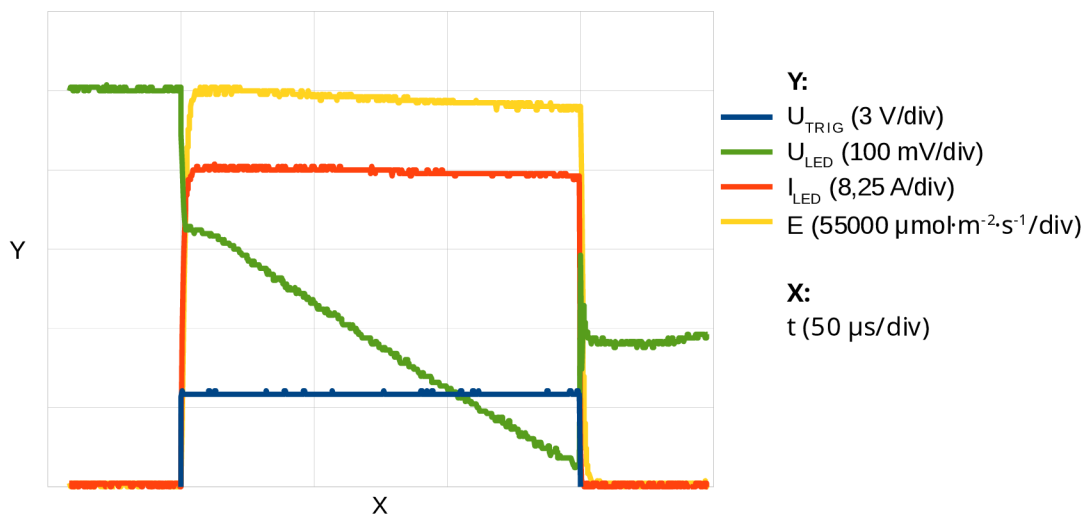
Obr. 4.12: Změřená světelná intenzita v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC pro saturační světelný zdroj. Detail nelineární oblasti z obr. 4.11 v logaritmickém měřítku.

proudem.

Oscilogram na obr. 4.15 znázorňuje podobnou situaci jako v předchozím případě, s tím rozdílem, že doba trvání pulsu je pouze  $10 \mu\text{s}$ . Z průběhů je patrná přibližně  $2 \mu\text{s}$  dlouhá odezva výstupu saturačního zdroje na trigovací signál. Odezva



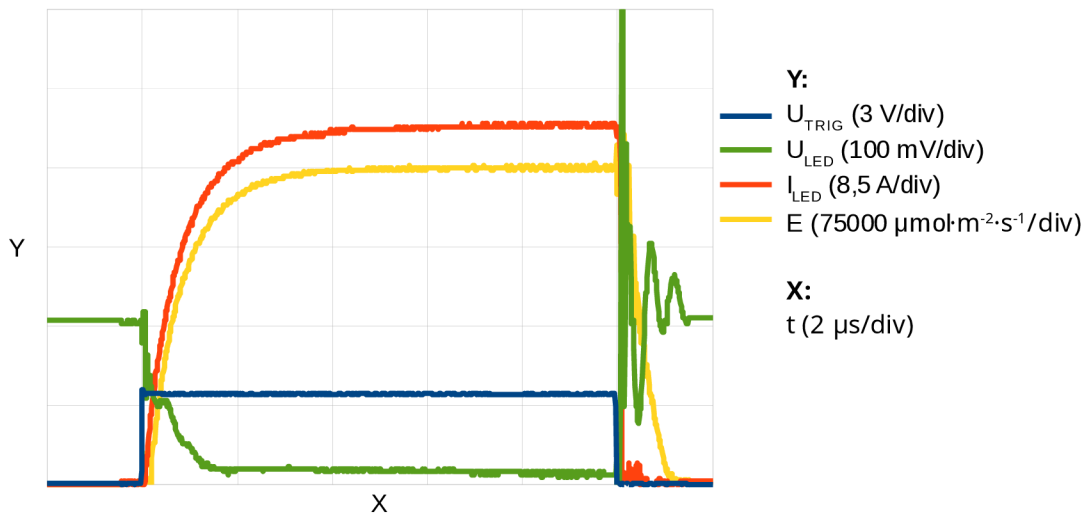
Obr. 4.13: Změřené výstupní napětí zdroje a výsledný proud LED saturačního světelného zdroje v závislosti na nastavené hodnotě z rozsahu DAC. Doba trvání pulsu je  $150 \mu\text{s}$ .



Obr. 4.14: Oscilogram znázorňující časový průběh trigovacího signálu ( $U_{TRIG}$ ), proudu LED ( $I_{LED}$ ), výstupního napětí zdroje ( $U_{LED}$ ) a světelné intenzity ( $E$ ) pro saturační světelný zdroj. Nastavená hodnota je 90 % z rozsahu DAC a doba trvání pulsu  $150 \mu\text{s}$ .

je výrazně delší oproti zpoždění předpokládaného na základě simulací ( $0,2 \mu\text{s}$ ). Rozdíl je pravděpodobně způsoben ekvivalentní sériovou indukčností (ESL) výstupních elektrolitických kapacitorů. Hodnota ESL nebyla v katalogovém listu definována, a proto nemohla být do simulace zahrnuta, simulace uvažovala pouze in-

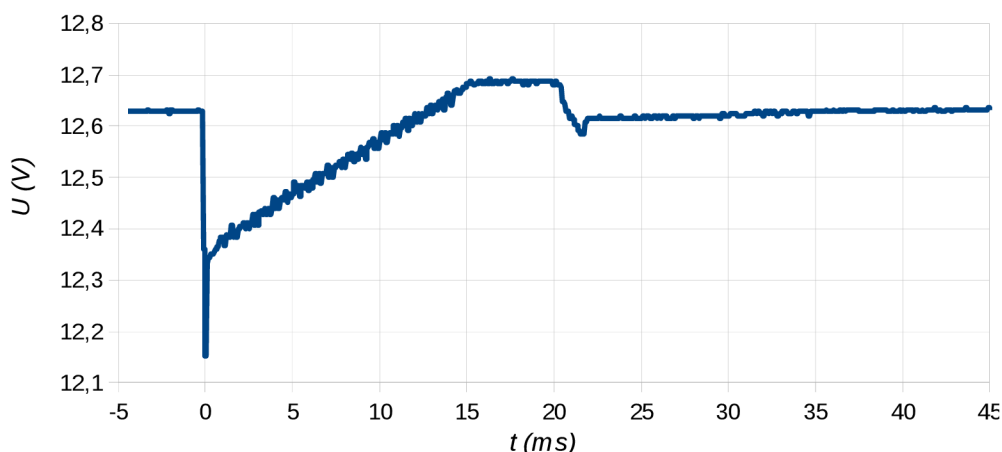
dukčnost přívodních vodičů k LED. Odezva znemožňuje generování světelných pulsů s dobou trvání v řádu jednotek  $\mu s$ , při reálném měření se ovšem takto krátkých pulsů nevyužívá, proto odezva nepředstavuje omezení.



Obr. 4.15: Oscilogram znázorňující časový průběh trigovacího signálu ( $U_{TRIG}$ ), proudu LED ( $I_{LED}$ ), výstupního napětí zdroje ( $U_{LED}$ ) a světelné intenzity ( $E$ ) pro saturanční světelný zdroj. Nastavená hodnota je 100 % z rozsahu DAC a doba trvání pulsu 10  $\mu s$ .

Na obr. 4.16 je znázorněn průběh výstupního napětí saturačního světelného zdroje v delším časovém úseku, který znázorňuje nabíjení výstupních kondenzátorů zdroje na svou původní hodnotu napětí po skončení světelného pulsu. Doba nabíjení je při maximální intenzitě a maximálním trvání pulsu přibližně 14  $ms$ . Tato doba je definována hodnotou proudu limitujícího rezistoru DC-DC měniče (viz rezistor R94 na obr. 2.12). Z průběhu je zřejmý nepatrný překmit v čase mezi 14  $ms$  a 22  $ms$ . Překmit je způsoben faktem, že zdroj je zatížen velkou, čistě kapacitní zátěží (18,8  $mF$ ) a podobné typy DC-DC měničů nejsou pro takové užití předurčeny. Překmit se nepodařilo eliminovat ani úpravami kompenzace regulační smyčky DC-DC měniče. Propad napětí na ustálenou hodnotu v čase 21  $ms$  je způsoben sepnutím odporové zátěže komparátorem sledujícím chybový signál regulační smyčky DC-DC měniče (viz obr. 2.14). Překmit přesahuje ustálenou úroveň napětí pouze o 70  $mV$ , proto je jeho vliv zanedbatelný. Intenzita případného následujícího pulsu ještě před ustálením hodnoty napětí (např. v čase 15  $ms$ ), bude ovlivněna jen minimálně. Perioda pulsů při reálném měření se pohybuje v řádu stovek  $ms$ .



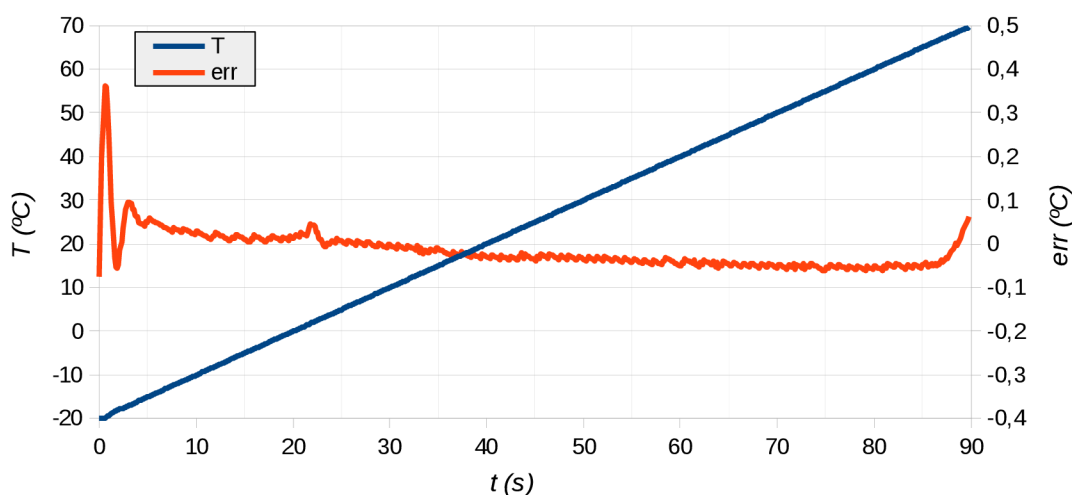


Obr. 4.16: Změřený průběh výstupního napětí světelného saturačního zdroje po světelném pulsu v čase  $t = 0$  s délkou trvání  $150 \mu\text{s}$  a při nastavené hodnotě 90 % z rozsahu DAC.

#### 4.2.4 Testování termoregulátoru

Pro účely testování byla použita standardní (ST) varianta termoregulátoru s teplotním rozsahem od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+70^\circ\text{C}$ . Na obr. 4.17 je znázorněn průběh měřené teploty a chyby regulace v závislosti na čase. Regulace probíhala přes celý teplotní rozsah v režimu lineárního ohřevu se strmostí  $1^\circ\text{C}/\text{s}$ .

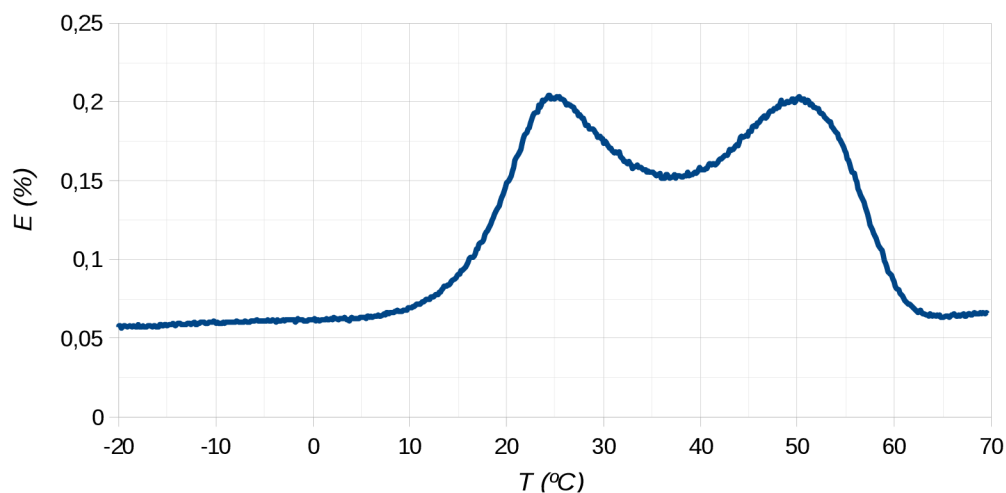
Konstanty softwarového PID regulátoru byly zjištěny experimentálně a jejich konečné hodnoty jsou:  $P = 0,9$   $I = 0,08$   $D = 0,4$ . V porovnání s původní verzí systému TL 500 bylo dosaženo menší chyby regulace.



Obr. 4.17: Průběh regulované teploty měřicí plošky u standardní verze termoluminiscence s Peltierovým článkem. Závislost měřené teploty a chyby vůči požadované teplotě při lineárním ohřevu se strmostí  $1^\circ\text{C}/\text{s}$ .

## 4.2.5 Měření termoluminiscence fotosyntetických vzorků

Na závěr práce je znázorněn výsledek měření realizovaným prototypem na reálném fotosyntetickém vzorku pro demonstraci funkčnosti prototypu. Vzorek podchlazený na teplotu  $-20^{\circ}\text{C}$  byl vystaven jednomu světelnému saturačnímu pulsu s intenzitou  $150\,000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a dobou trvání  $150\ \mu\text{s}$ . Následoval lineární ohřev se strmostí  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$  až na konečnou teplotu  $+70^{\circ}\text{C}$ . Z výsledného průběhu na obr. 4.18 jsou patrná dvě maxima při teplotách  $+25^{\circ}\text{C}$  a  $+50^{\circ}\text{C}$ . Měřeným vzorkem byl list rostliny z rodu Hibiscus (Ibišek).



Obr. 4.18: Změřená termoluminiscenční křivka u rostliny Ibišek.

Termoluminiscenční křivka řasy z rodu *Chlorella* na obr. 1.3 z teoretického úvodu práce byla rovněž změřena pomocí realizovaného prototypu.

## 5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést modernizaci měřicího systému termoluminiscence PSI TL 500. V rámci modernizace měl být proveden návrh nové řídicí jednotky za účelem zlepšení parametrů, zvýšení uživatelského komfortu obsluhy a náhrady zastaralých komponentů. Dále měla být provedena revize elektroniky měřicí jednotky systému pro její kompatibilitu s novou verzí kontrolní jednotky, dosažení lepších parametrů světelných zdrojů a zavedení nových funkcionalit pro účely monitorování vnitřních parametrů a softwarové kalibrace.

V rámci návrhu nové řídicí jednotky založené na platformě Xilinx Zynq bylo definováno rozhraní pro propojení s měřicí jednotkou systému. Nové rozhraní přináší sloučení datových a napájecích vodičů do jednoho kabelu, vyšší datovou propustnost a vyšší spolehlivost přenosu oproti původnímu řešení. Toto rozhraní i celá řídicí jednotka byly navrženy s důrazem na univerzálnost pro jejich budoucí využití v dalších produktech. Rozměry řídicí jednotky byly redukovány na poloviční hodnotu objemu a přívětivější uživatelské prostředí zajišťuje nově použitý 7" LCD displej s kapacitním dotykovým panelem.

Světelná intenzita saturačního pulsního zdroje měřicí jednotky byla navýšena z původních 90 000 na 250 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . U aktinického světelného zdroje bylo dosaženo navýšení intenzity z 1 500 na 2 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  a zvýšený dynamický rozsah zdroje navíc umožňuje nastavovat hodnoty intenzit již od 10  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Měřicí jednotka byla dále rozšířena o paměť EEPROM pro uchovávání kalibračních konstant a o monitorovací ADC pro účely automatické diagnostiky při výrobě nebo případném servisu.

Na realizovaném prototypu byl odladěn software a byla ověřena funkčnost dílčích částí systému. Během testování bylo odhaleno i několik drobných návrhových chyb typu chybějících pull-up rezistorů a nedefinovaných logických úrovní na nevyužitých vstupech integrovaného obvodu. Tyto chyby ovšem nepředstavovaly závažný problém a v další revizi budou snadno odstraněny. Na závěr bylo úspěšně provedeno měření s reálnými fotosyntetickými vzorky.

V diplomové práci bylo dosaženo stanovených cílů a došlo k výraznému vylepšení elektrických i optických parametrů systému. Dalším postupem v návaznosti na diplomovou práci bude vytvoření grafického uživatelského rozhraní pro displej a vytvoření „předsériového“ prototypu s finálním vzhledem.

## LITERATURA

- [1] CHEMISTRY LibreTexts. *Fluorescence and Phosphorescence*, Diana Wong [online]. 2017 [cit. 1. 5. 2018]. Dostupné z URL: <[https://chem.libretexts.org/Core/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry/Spectroscopy/Electronic\\_Spectroscopy/Fluorescence\\_and\\_Phosphorescence](https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Fluorescence_and_Phosphorescence)>.
- [2] ENCYCLOPEDIA BRITANICA. *Luminescence*, Karl-Dietrich Gundermann [online]. 2011 [cit. 1. 5. 2018]. Dostupné z URL: <<https://www.britannica.com/science/luminescence#ref68946>>.
- [3] *Thermoluminescence Dosimetry (TLD) and its Application in Medical Physics*, Juan Azorin Nieto [online]. 2004 [cit. 10. 5. 2018]. Dostupné z URL: <<https://pdfs.semanticscholar.org/3718/de28695045712c4c5956b14185e9e2da1b12.pdf>>
- [4] Pokroky matematiky, fyziky a astronomie. *Nové využití termoluminiscence: datování*, Zdeněk Spurný, Praha [online]. 1979 [cit. 10. 5. 2018]. Dostupné z URL: <[https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139438/PokrokyMFA\\_24-1979-1\\_2.pdf](https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139438/PokrokyMFA_24-1979-1_2.pdf)>
- [5] *Thermoluminescence Basics Theory and Applications* [online]. [cit. 10. 5. 2018]. Dostupné z URL: <<http://www.nucleonix.com/Manuals/TLDExpManual.pdf>>
- [6] Amarendra Narayan Misra, Meena Misra and Ranjeet Singh. *Thermoluminescence in Chloroplast Thylakoid*, Dr. Prof. Dr. A.N. Misra [online]. [cit. 23. 11. 2017]. Dostupné z URL: <<https://www.intechopen.com/books/biophysics/thermoluminescence-in-chloroplast-thylakoid>>.
- [7] PSI PRODUCT CATALOG 2018. *Thermoluminescence Instruments*, PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o. [online]. 2018 [cit. 13. 5. 2018]. Dostupné z URL: <<http://psi.cz/download/document/catalogue/PSI-Catalogue-2018.pdf>>.
- [8] Photon Systems Instruments. *Thermoluminescence System TL 500* [online]. [cit. 25. 11. 2017]. Dostupné z URL: <<http://psi.cz/products/thermoluminescence/thermoluminescence-system-tl-500>>.
- [9] Photon Systems Instruments. *System TL 500 manual*. 2016 [cit. 26. 11. 2017]. Veřejně nedostupné.

- [10] IGUS, Kabley chainflex [online]. [cit. 29. 11. 2017]. Dostupné z URL: <[https://www.igus.cz/contentData/Product\\_Files/Download/pdf/CZ\\_chainflex\\_05\\_Kabley\\_pro\\_m%C4%9B%C5%99ic%C3%AD\\_syst%C3%A9my.pdf](https://www.igus.cz/contentData/Product_Files/Download/pdf/CZ_chainflex_05_Kabley_pro_m%C4%9B%C5%99ic%C3%AD_syst%C3%A9my.pdf)>.
- [11] NXP, P82B96: I2C buffer [online]. 2009 [cit. 29. 11. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7091.PDF>>.
- [12] LVDS Owner's Manual: Low-Voltage Differential Signaling, National Semiconductor [online]. 2. vydání, 2000 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z URL: <[https://web.pa.msu.edu/hep/d0/ftp/run2b/l1cal/hardware/component\\_information/national\\_lvds\\_owners\\_manual.pdf](https://web.pa.msu.edu/hep/d0/ftp/run2b/l1cal/hardware/component_information/national_lvds_owners_manual.pdf)>.
- [13] LVDS Application and Data Handbook: High-Performance Linear Products Technical Staff, Texas Instruments [online]. 2002 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z URL: <[https://web.pa.msu.edu/hep/d0/ftp/run2b/l1cal/hardware/component\\_information/national\\_lvds\\_owners\\_manual.pdf](https://web.pa.msu.edu/hep/d0/ftp/run2b/l1cal/hardware/component_information/national_lvds_owners_manual.pdf)>.
- [14] Texas Instruments, SN74LVC1T45 Single-Bit Dual-Supply Bus Transceiver [online]. 2017 [cit. 5. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc1t45.pdf>>.
- [15] Texas Instruments, SN74LVC8T245 8-Bit Dual-Supply Bus Transceiver [online]. 2014 [cit. 5. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65mlvd205a.pdf>>.
- [16] Texas Instruments, SN65MLVD20xx Multipoint-LVDS Line Driver and Receiver [online]. 2015 [cit. 5. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65mlvd205a.pdf>>.
- [17] EastRising, ER-TFTM070-5 TFT LCD Module Datasheet [online]. 2013 [cit. 8. 12. 2017]. Dostupné z URL: <[http://www.buydisplay.com/download/manual/ER-TFTM070-5\\_Datasheet.pdf](http://www.buydisplay.com/download/manual/ER-TFTM070-5_Datasheet.pdf)>.
- [18] Xilinx, Zynq-7000 All Programmable SoC [online]. 2017 [cit. 8. 12. 2017]. Dostupné z URL: <[https://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds190-Zynq-7000-Overview.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds190-Zynq-7000-Overview.pdf)>.
- [19] THE ZYNQ BOOK [online]. 2014 [cit. 8. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.zynqbook.com/>>.
- [20] AVNET, MicroZed Getting Started Guide, [online]. 2017 [cit. 8. 12. 2013]. Dostupné z URL: <<http://zedboard.org/sites/default/files/documentations/5164-MicroZed-GettingStarted-V1.pdf>>.

- [21] LED ENGIN,LZ4-00R108 [online]. 2017 [cit. 3. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://www.ledengin.com/files/products/LZ4/LZ4-00R108.pdf>>.
- [22] LINEAR TECHNOLOGY, LTC3864, Step-Down DC/DC Controller [online]. [cit. 3. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3864fa.pdf>>.
- [23] LINEAR TECHNOLOGY, LT1765, Step-Down Switching Regulator [online]. [cit. 3. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1765fd.pdf>>.
- [24] ANALOG DEVICES, AD8606, Operational Amplifiers [online]. 2017 [cit. 5. 12. 2017]. Dostupné z URL: <[http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8605\\_8606\\_8608.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8605_8606_8608.pdf)>.
- [25] ANALOG DEVICES, AD8051, Operational Amplifiers [online]. 2009 [cit. 5. 12. 2017]. Dostupné z URL: <[http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8051\\_8052\\_8054.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8051_8052_8054.pdf)>.
- [26] Texas Instruments, ADC128D818, ADC System Monitor With Temperature Sensor [online]. 2015 [cit. 6. 12. 2017]. Dostupné z URL: <<http://http://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc128d818.pdf>>.
- [27] HAMAMATSU, S5106 [online]. 2018 [cit. 8. 5. 2018]. Dostupné z URL: <[https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s5106\\_etc\\_kpin1033e.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s5106_etc_kpin1033e.pdf)>.

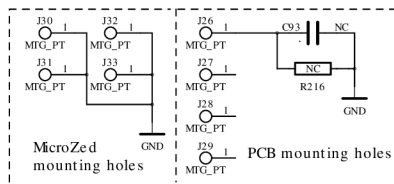
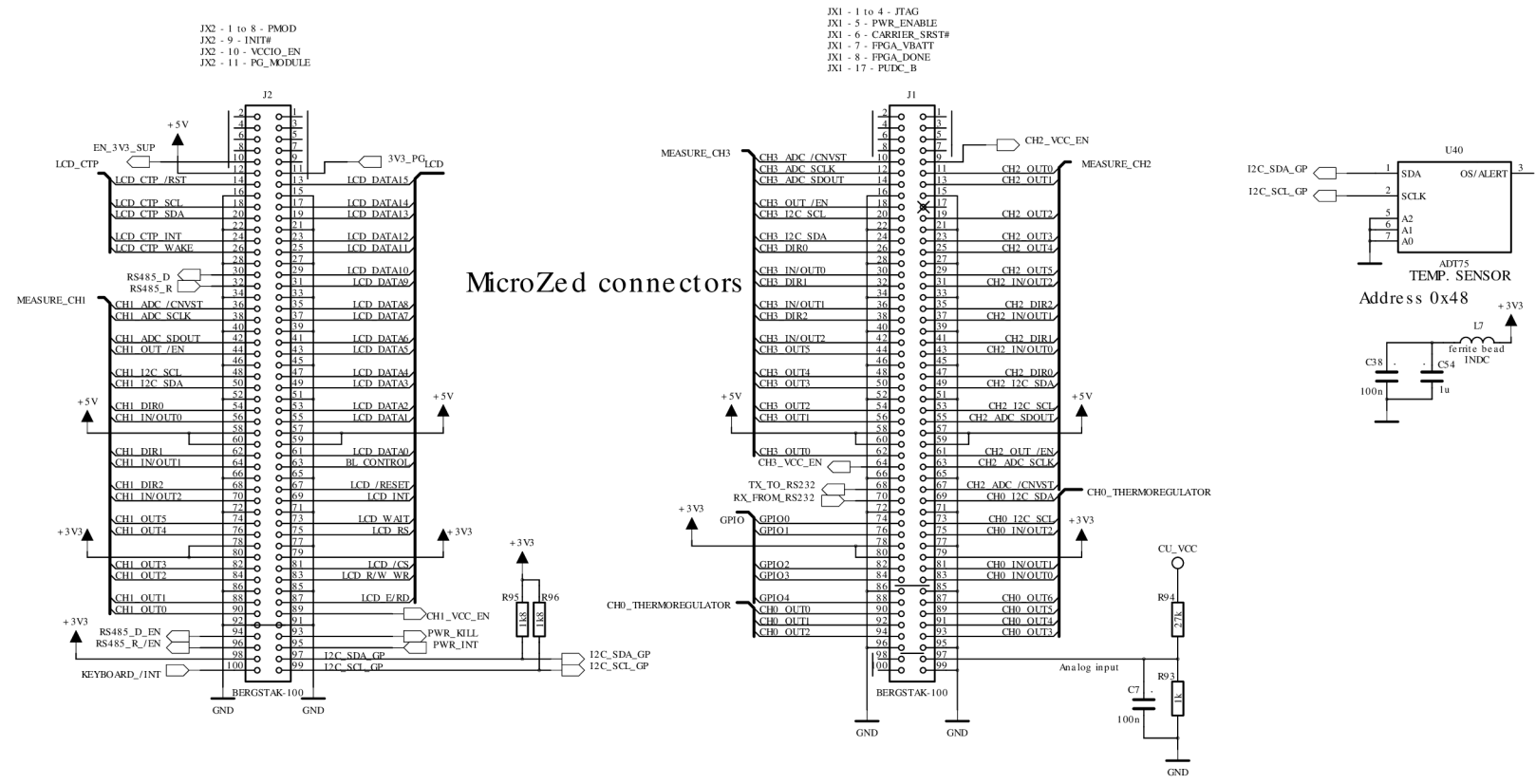
## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

PSI	Photon Systems Instruments, spol. s r.o.
CU	řídící jednotka (Control Unit)
MU	měřicí jednotka (Measure Unit)
LT	verze systému TL 500 pro nízké teploty (Low Temperature)
ST	standardní verze systému TL 500 (Standard Temperature)
HT	verze systému TL 500 pro vysoké teploty (High Temperature)
WCU	vodní chladič jednotka (Water Cooling Unit)
LNCU	chladič jednotka tekutého dusíku (Liquid Nitrogen Cooling Unit)
AHU	přídavná topná jednotka (Additional Heating Unit)
PWM	pulsně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
ESD	elektrostatický výboj (Electrostatic Discharge)
UII	univerzální rozhraní pro propojení měřicí a řídicí jednotky (Universal Interconnecting Interface)
LED	světlo emitující dioda (Light Emitting Diode)
CPLD	programovatelný logický obvod (Complex Programmable Logic Device)
FPGA	programovatelná hradlová pole (Field Programmable Gate Array)
DPS	deska plošných spojů
LCD	displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
IO	integrováný obvod
ADC	analogově digitální převodník (Analog-to-Digital Converter)
DAC	digitálně analogový převodník (Digital-to-Analog Converter)
TFT	Thin-Film Transistors
QSPI	čtyřnásobné sériové rozhraní (Quad serial peripheral interface)
SoC	systém na čipu (System on a Chip)
SoM	systém na modulu (System on a Module)

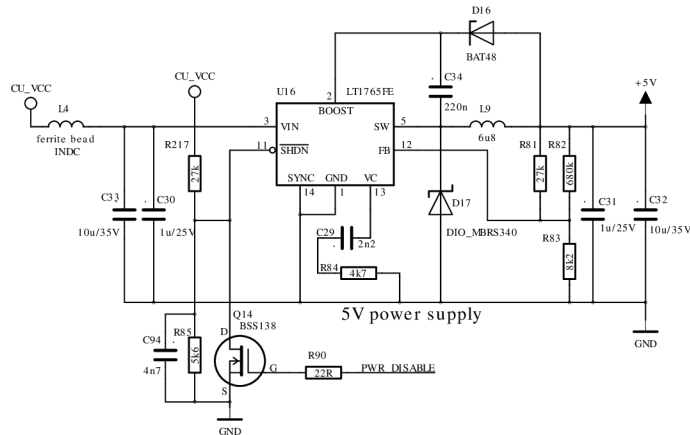
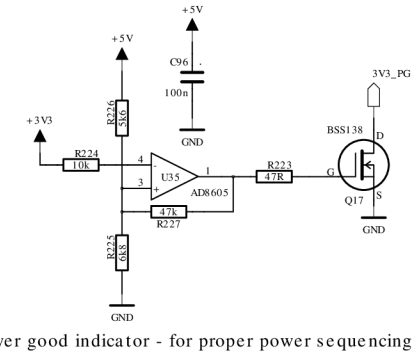
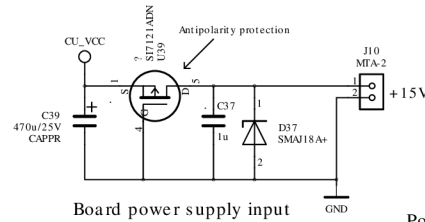
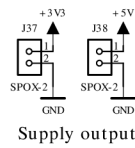
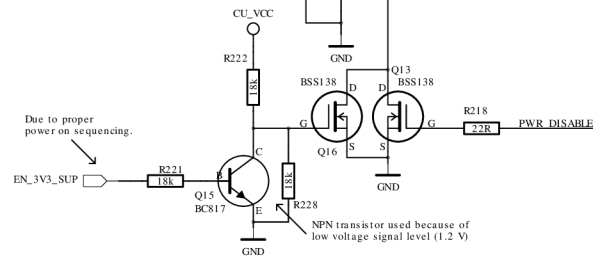
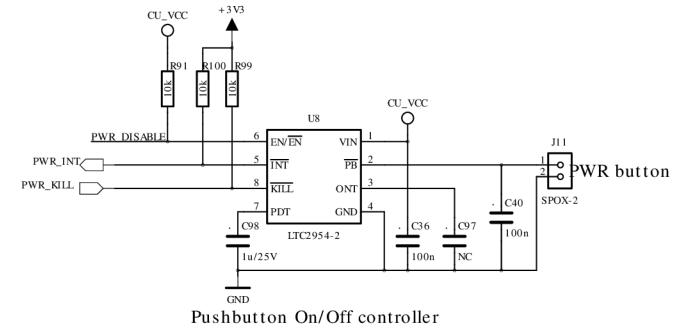
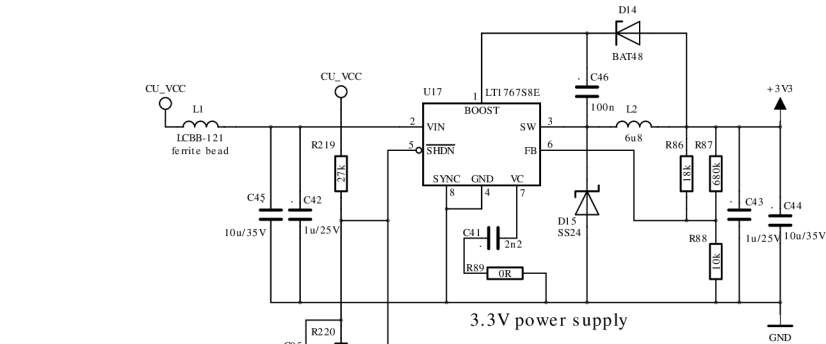
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>TL CU Maiboard - schéma zapojení</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>TL CU Maiboard - osazovací výkres</b>	<b>68</b>
<b>C</b>	<b>TL CU Maiboard - DPS</b>	<b>69</b>
C.1	Vrstva 1 . . . . .	69
C.2	Vrstva 2 . . . . .	69
C.3	Vrstva 3 . . . . .	70
C.4	Vrstva 4 . . . . .	70
<b>D</b>	<b>TL MU Maiboard - schéma zapojení</b>	<b>71</b>
<b>E</b>	<b>TL CU Maiboard - osazovací výkres</b>	<b>78</b>
E.1	Horní vrstva . . . . .	78
E.2	Spodní vrstva . . . . .	79
<b>F</b>	<b>TL MU Maiboard - DPS</b>	<b>80</b>
F.1	Vrstva 1 . . . . .	80
F.2	Vrstva 2 . . . . .	80
F.3	Vrstva 3 . . . . .	81
F.4	Vrstva 4 . . . . .	81
<b>G</b>	<b>Seznam elektronických příloh</b>	<b>82</b>



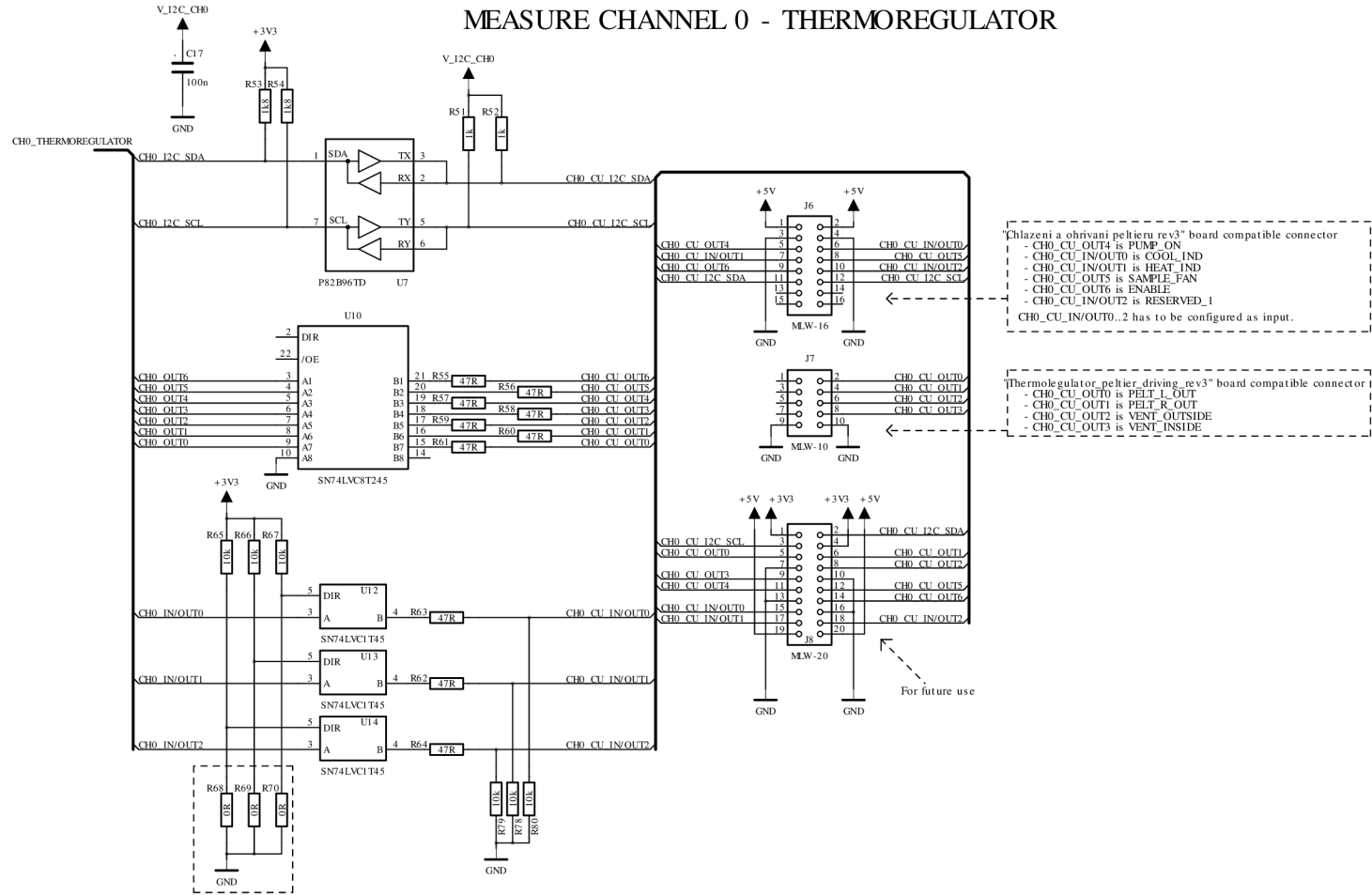


DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8. 3. 2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>	
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-CU-Mainboard</b>	
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO: <b>MICROZED</b>
SCALE:		SHEET: <b>1</b> OF <b>8</b>	



DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8. 3. 2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>			
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-CU-Mainboard</b>			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>POWER</b>	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: <b>2</b> OF <b>8</b>

## MEASURE CHANNEL 0 - THERMOREGULATOR



Chlazení a ohřívání peltieru rev3" board compatible connector

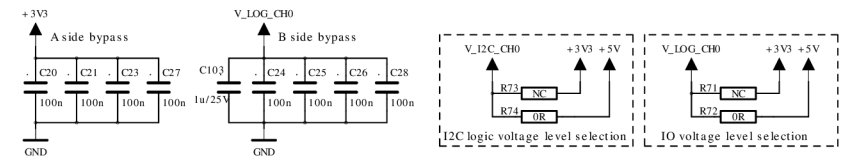
- CH0\_CU\_OUT4 is PUMP\_ON
- CH0\_CU\_IN/OUT0 is COOL\_IND
- CH0\_CU\_IN/OUT1 is HEAT\_IND
- CH0\_CU\_OUT5 is SAMPLE\_FAN
- CH0\_CU\_OUT5 is ENABLE
- CH0\_CU\_IN/OUT2 is RESERVED\_1

CH0\_CU\_IN/OUT0..2 has to be configured as input.

Thermoregulator\_peltier\_driving\_rev3" board compatible connector

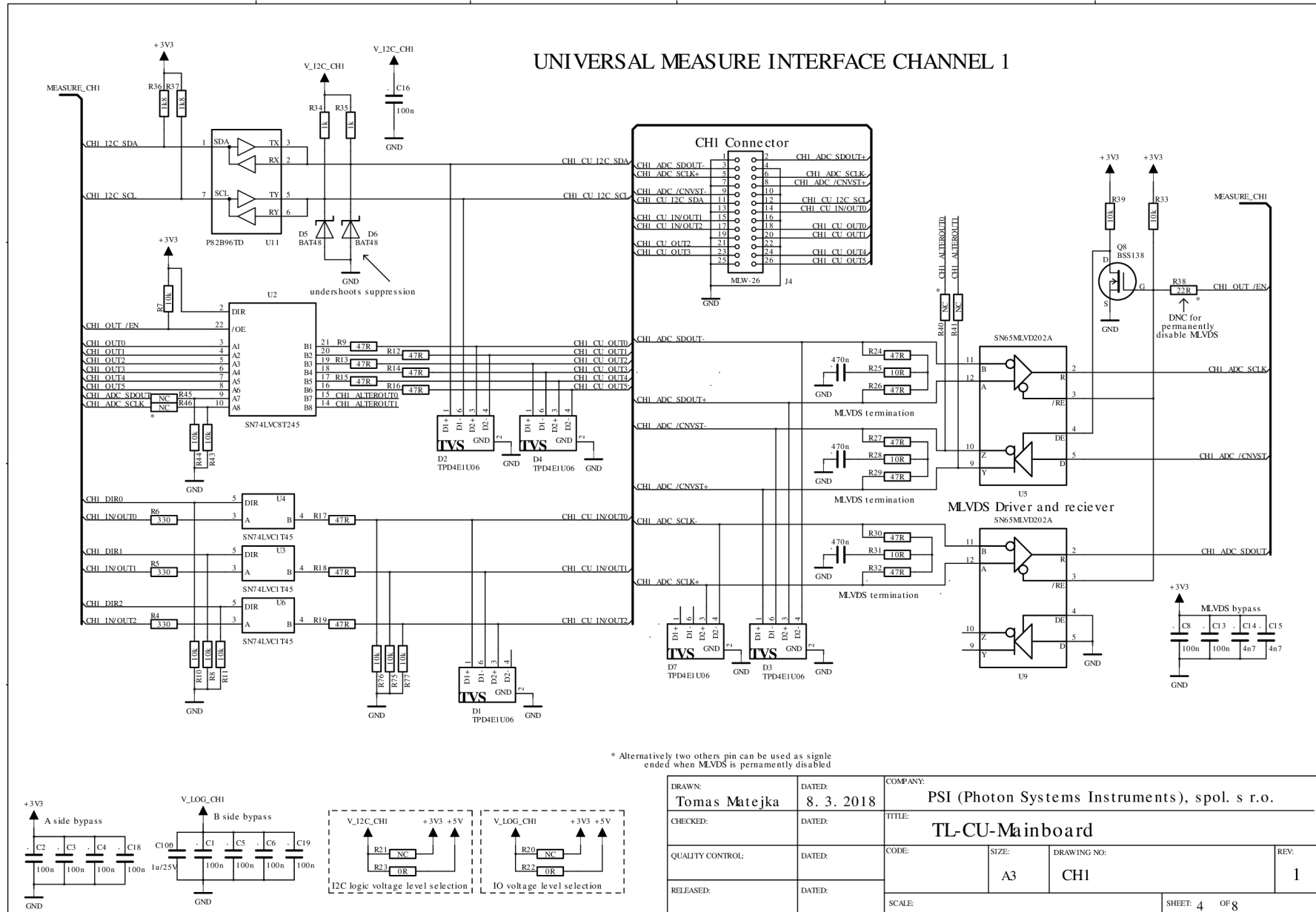
- CH0\_CU\_OUT0 is PELT\_I\_OUT
- CH0\_CU\_OUT1 is PELT\_R\_OUT
- CH0\_CU\_OUT2 is VENT\_OUTSIDE
- CH0\_CU\_OUT3 is VENT\_INSIDE

Direction selection input to CU when OR and output from CU when NC

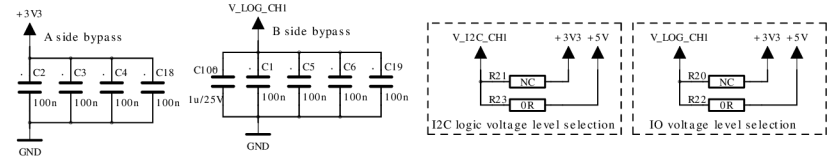


DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8. 3. 2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>		
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-CU-Mainboard</b>		
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>CH0-THERMOREGULATOR</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:		REV: <b>1</b>
			SHEET: 3 OF 8	

# UNIVERSAL MEASURE INTERFACE CHANNEL 1

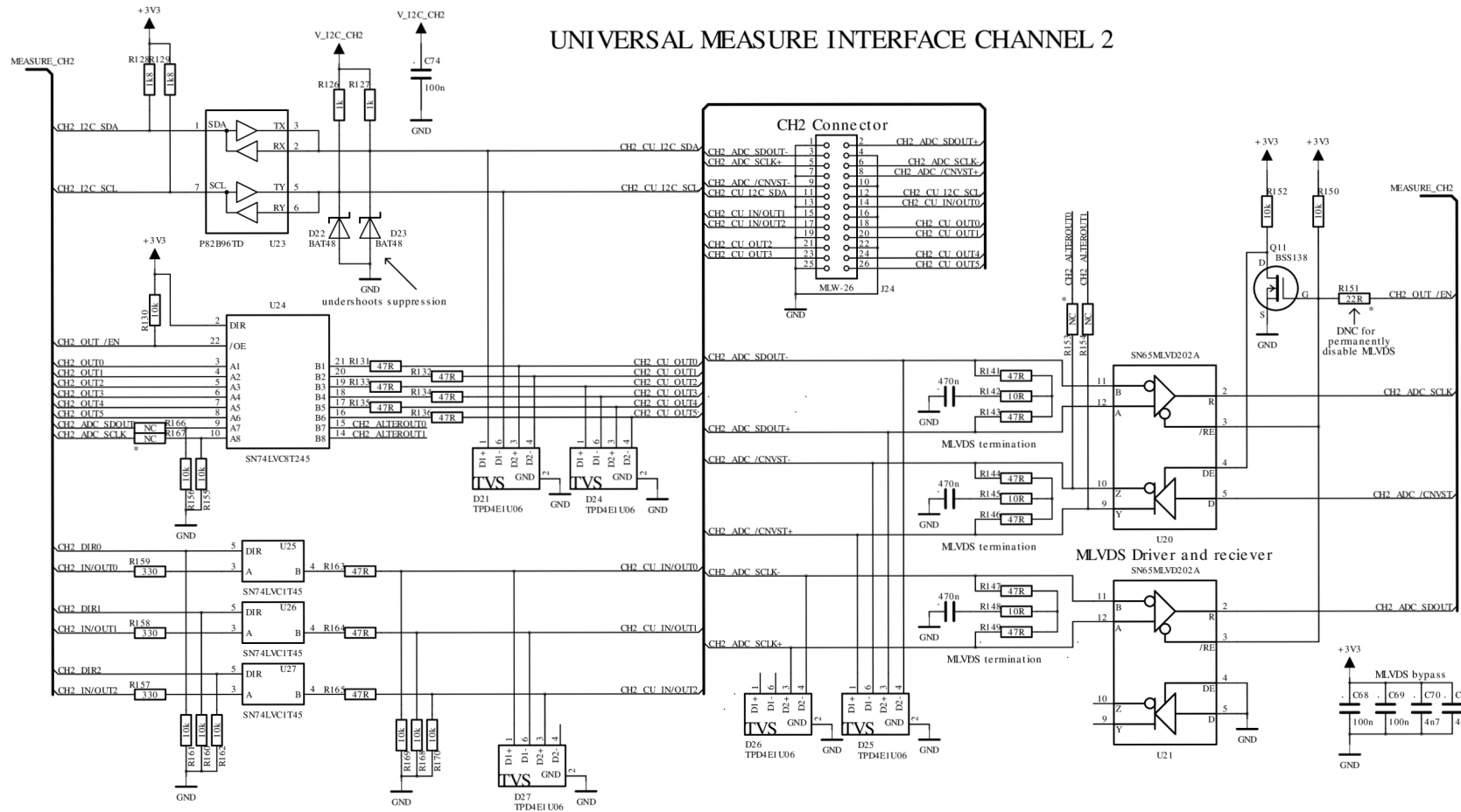


\* Alternatively two others pin can be used as single ended when MLVDS is permanently disabled

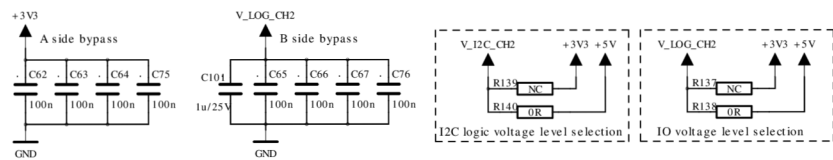


DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8. 3. 2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>		
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-CU-Mainboard</b>		
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>CHI</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:		REV: <b>1</b>
				SHEET: <b>4</b> OF <b>8</b>

# UNIVERSAL MEASURE INTERFACE CHANNEL 2

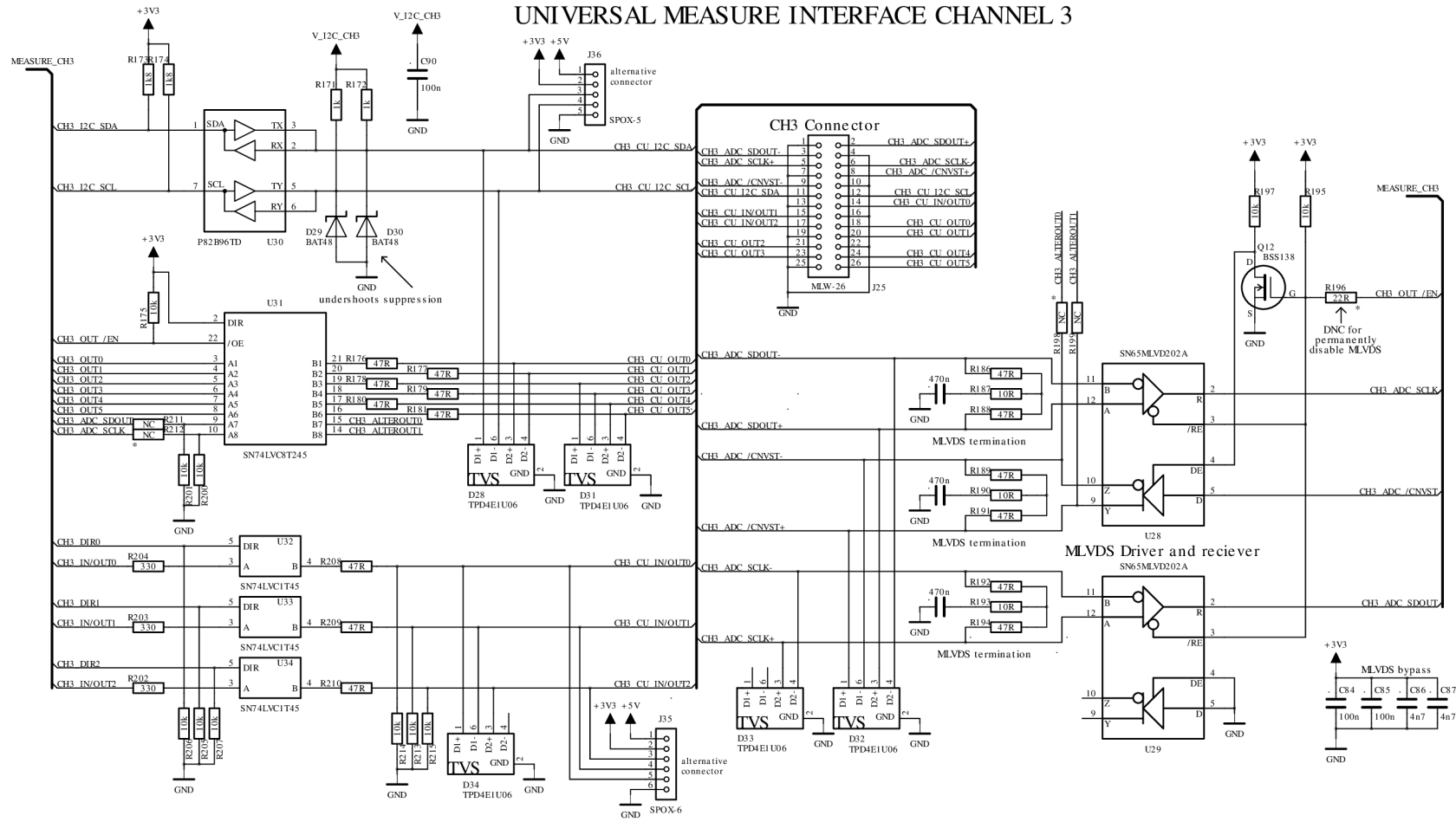


\* Alternatively two others pin can be used as single ended when MLVDS is permanently disabled

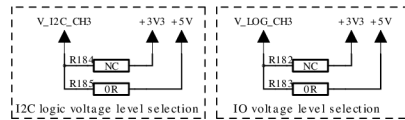
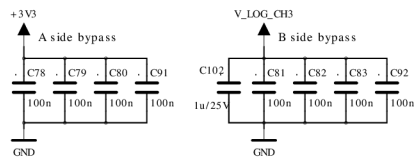


DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8. 3. 2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>		
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-CU-Mainboard</b>		
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>CH2</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:		REV: <b>1</b>
				SHEET: <b>5</b> OF <b>8</b>

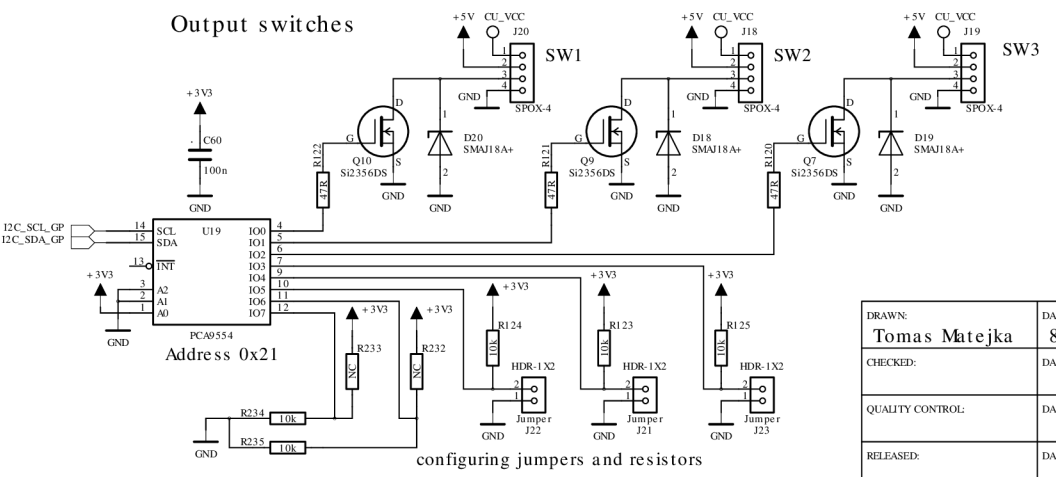
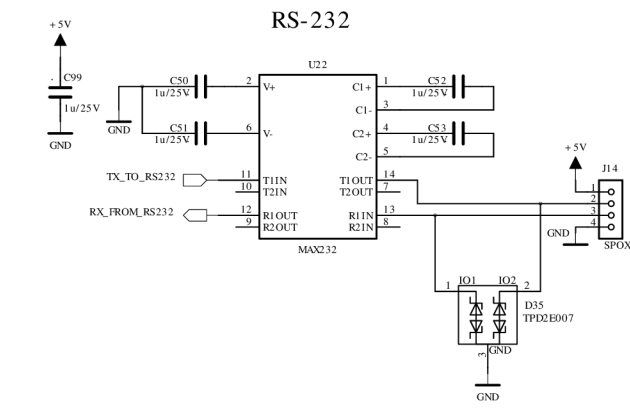
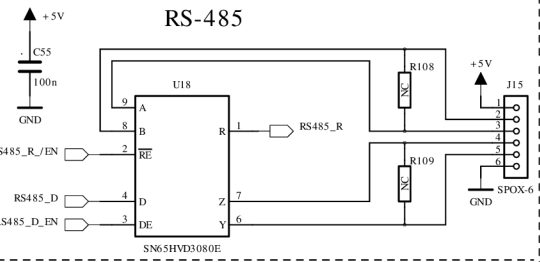
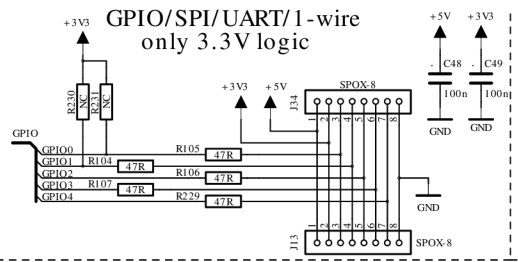
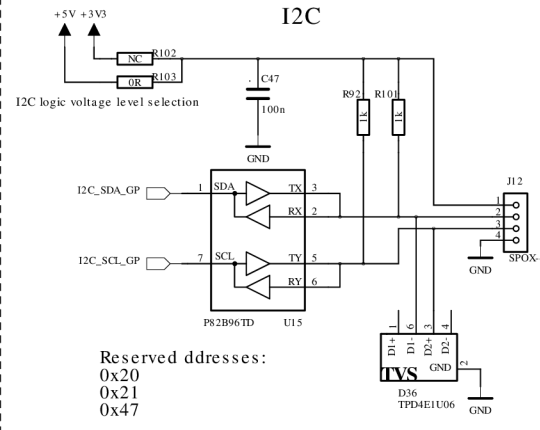
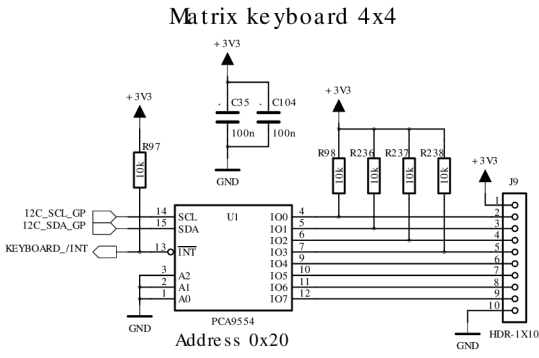
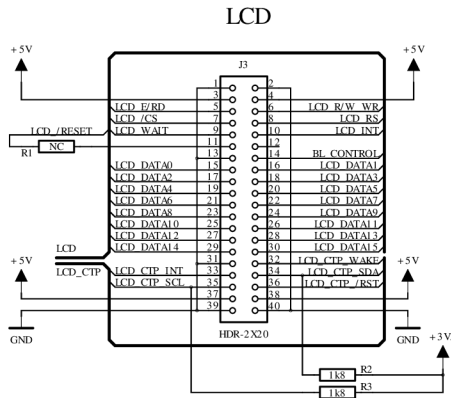
# UNIVERSAL MEASURE INTERFACE CHANNEL 3



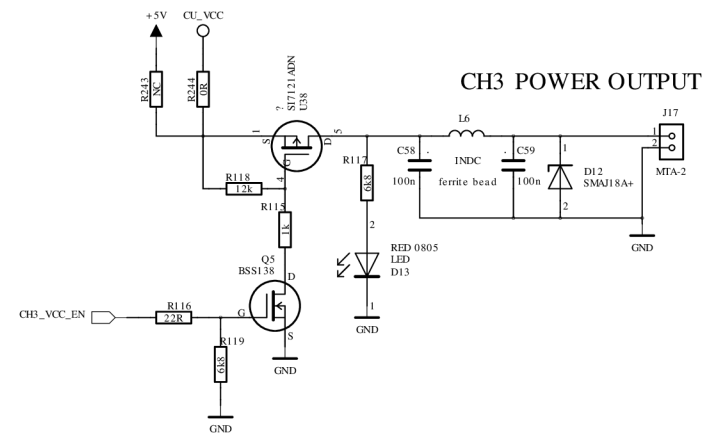
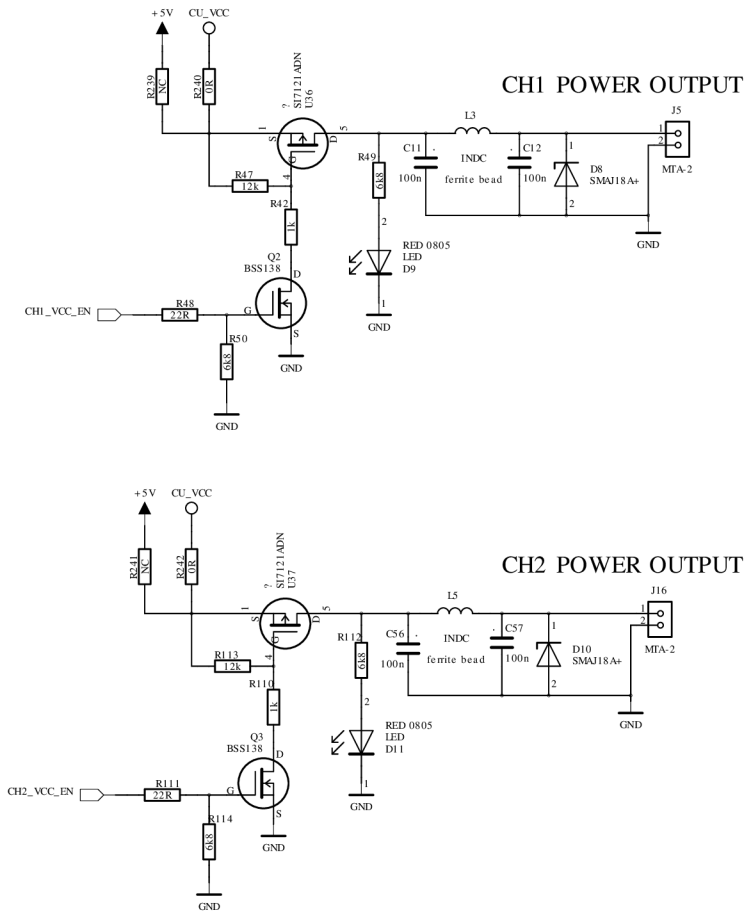
\* Alternatively two others pin can be used as single ended when MLVDS is permanently disabled



DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8. 3. 2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>		
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-CU-Mainboard</b>		
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>CH3</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:		REV: <b>1</b>
				SHEET: <b>6</b> OF <b>8</b>



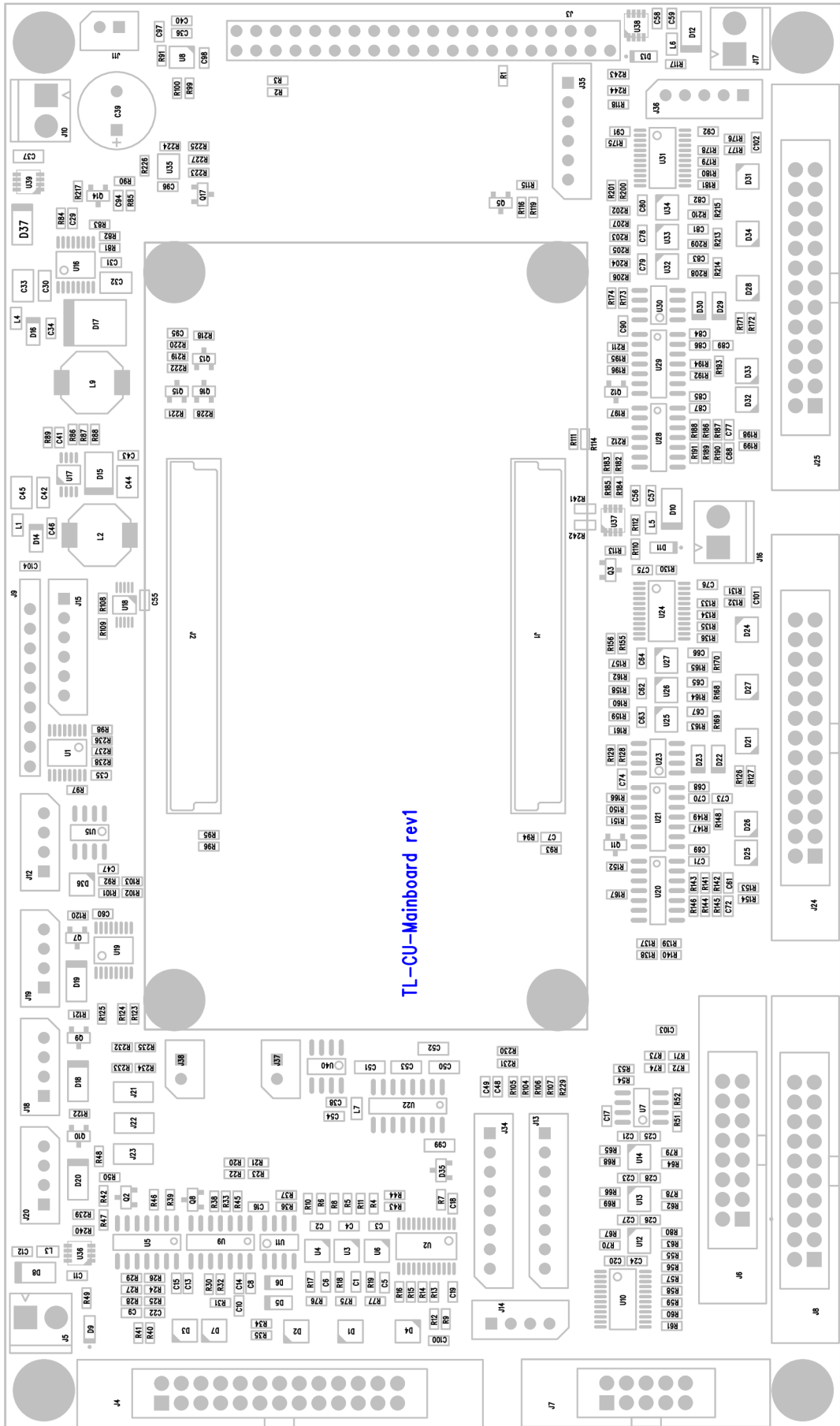
DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8. 3. 2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>		
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-CU-Mainboard</b>		
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>GENERAL_IO</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:		REV: <b>1</b>
				SHEET: <b>7</b> of <b>8</b>



DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8. 3. 2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>			
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-CU-Mainboard</b>			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO: <b>POWER_CH_OUT</b>	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: <b>8</b> OF <b>8</b>

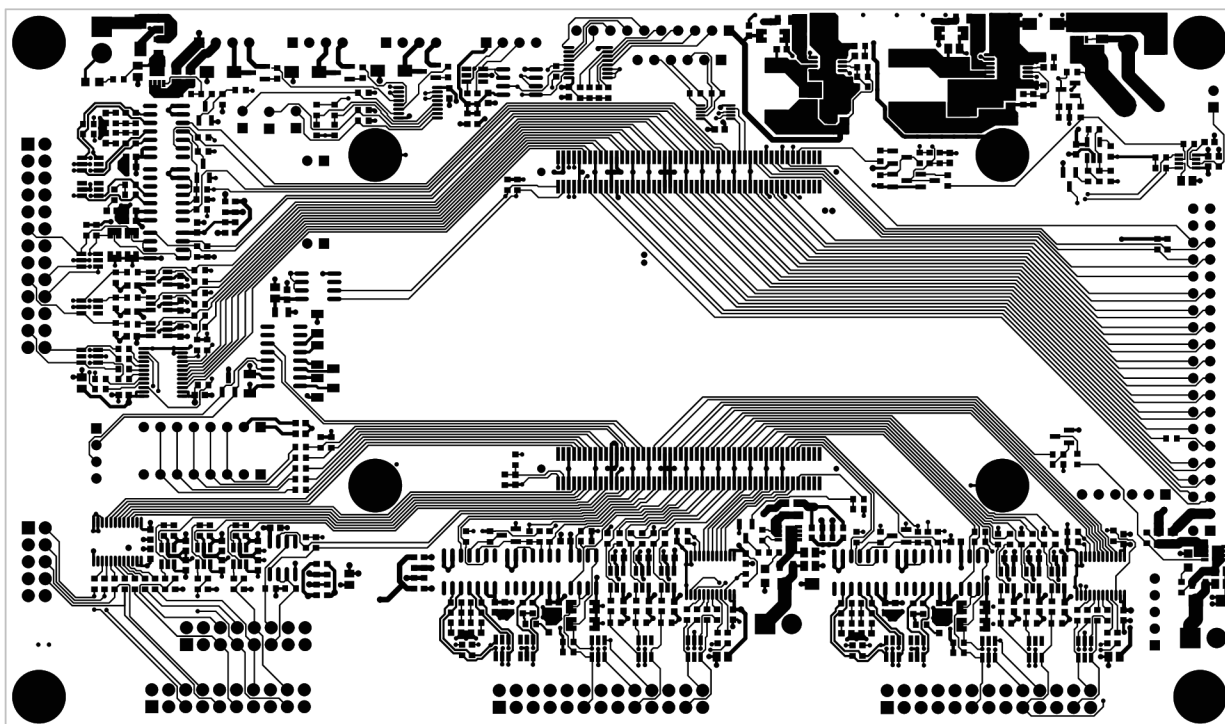


# B TL CU MAIBOARD - OSAZOVACÍ VÝKRES

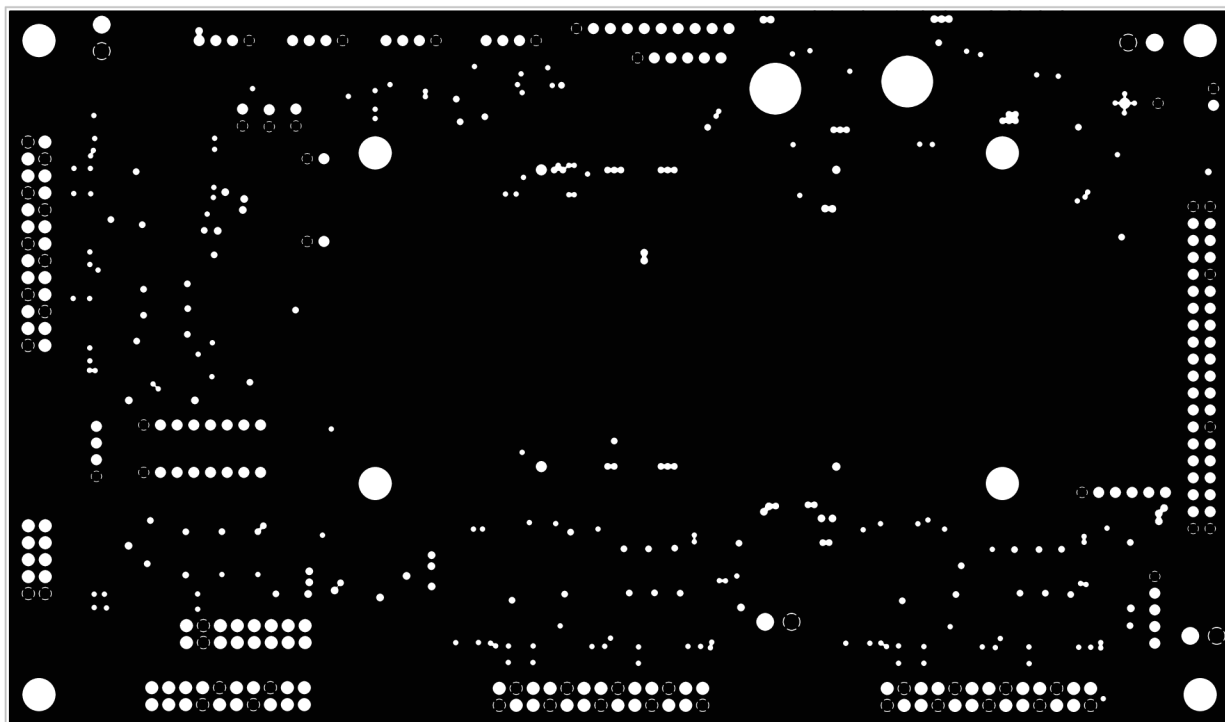


# C TL CU MAIBOARD - DPS

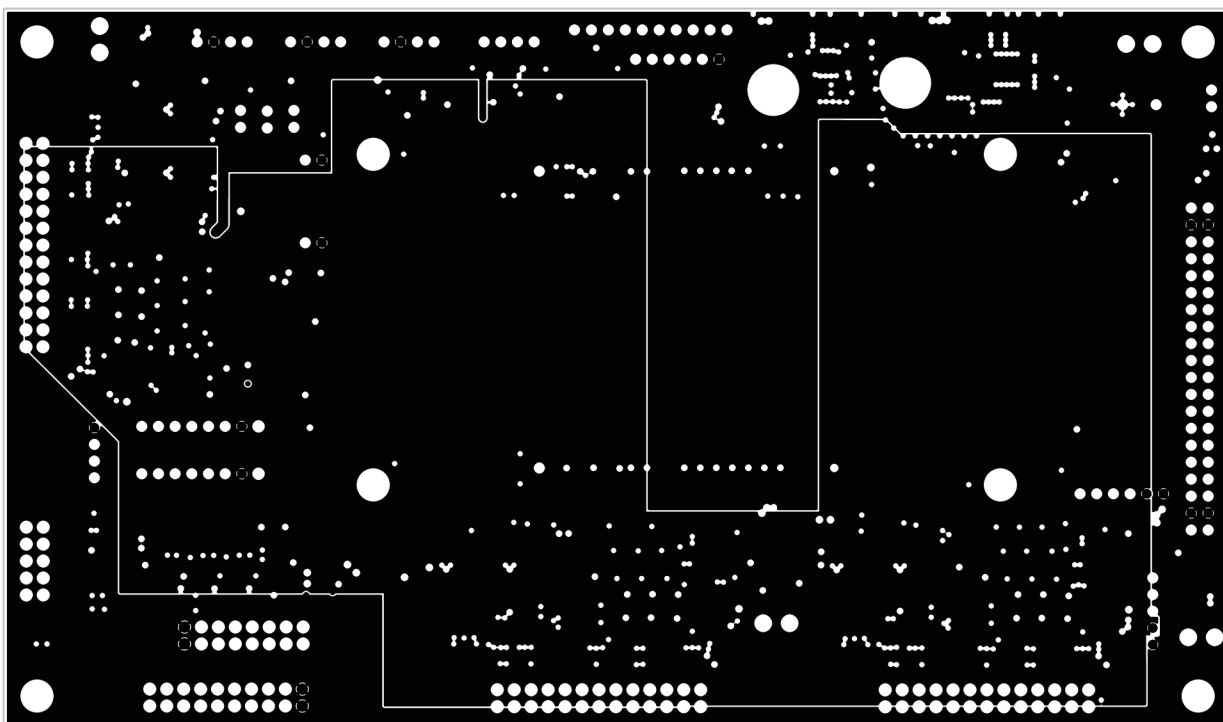
## C.1 Vrstva 1



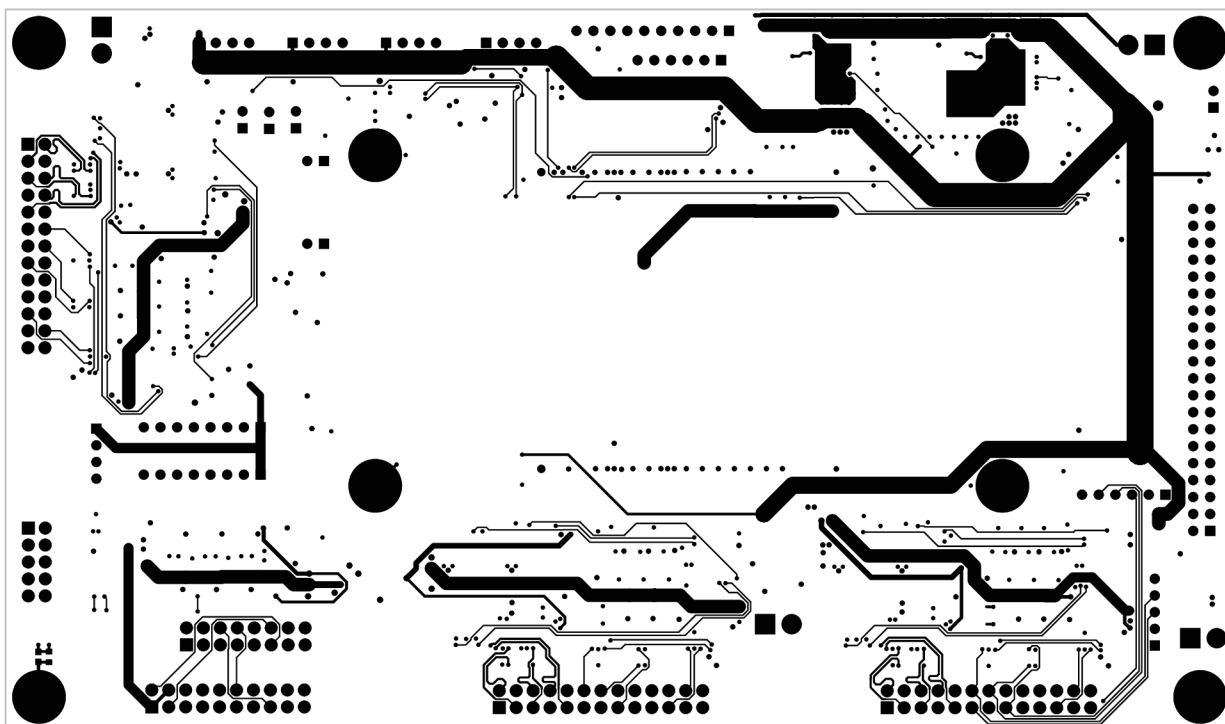
## C.2 Vrstva 2



### C.3 Vrstva 3



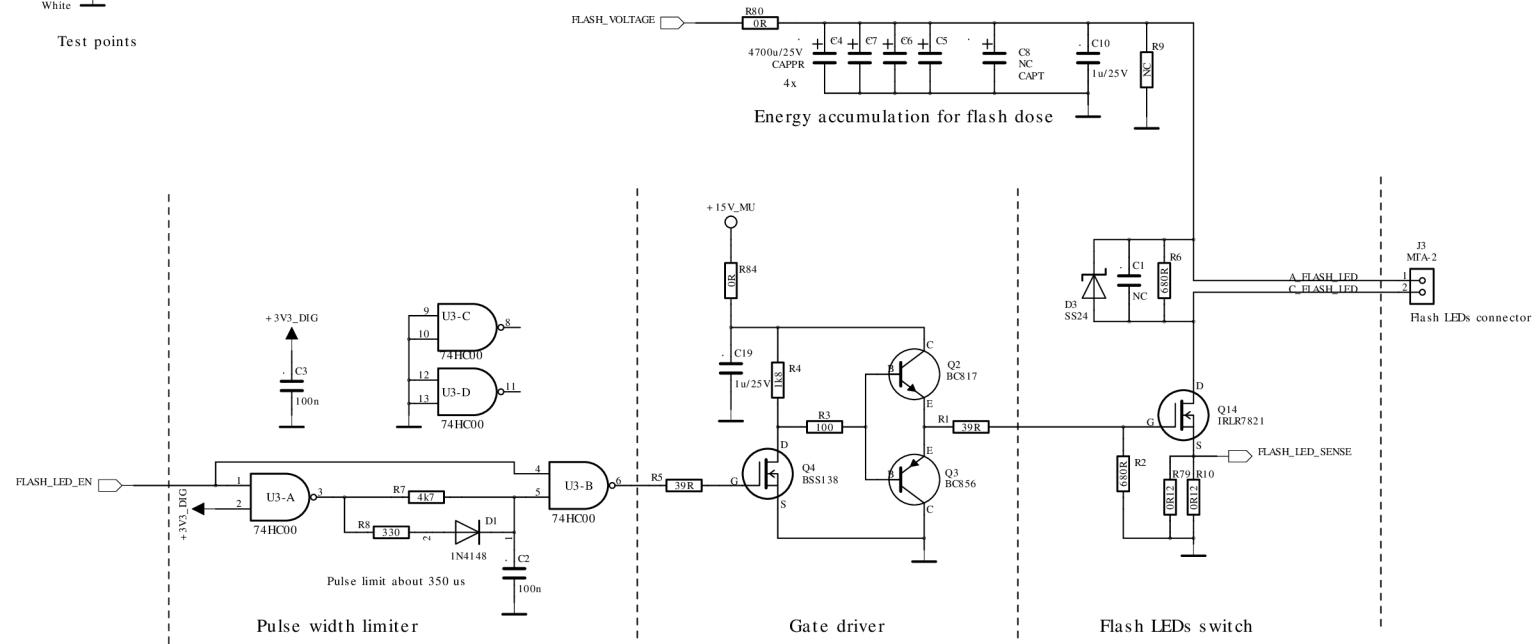
### C.4 Vrstva 4



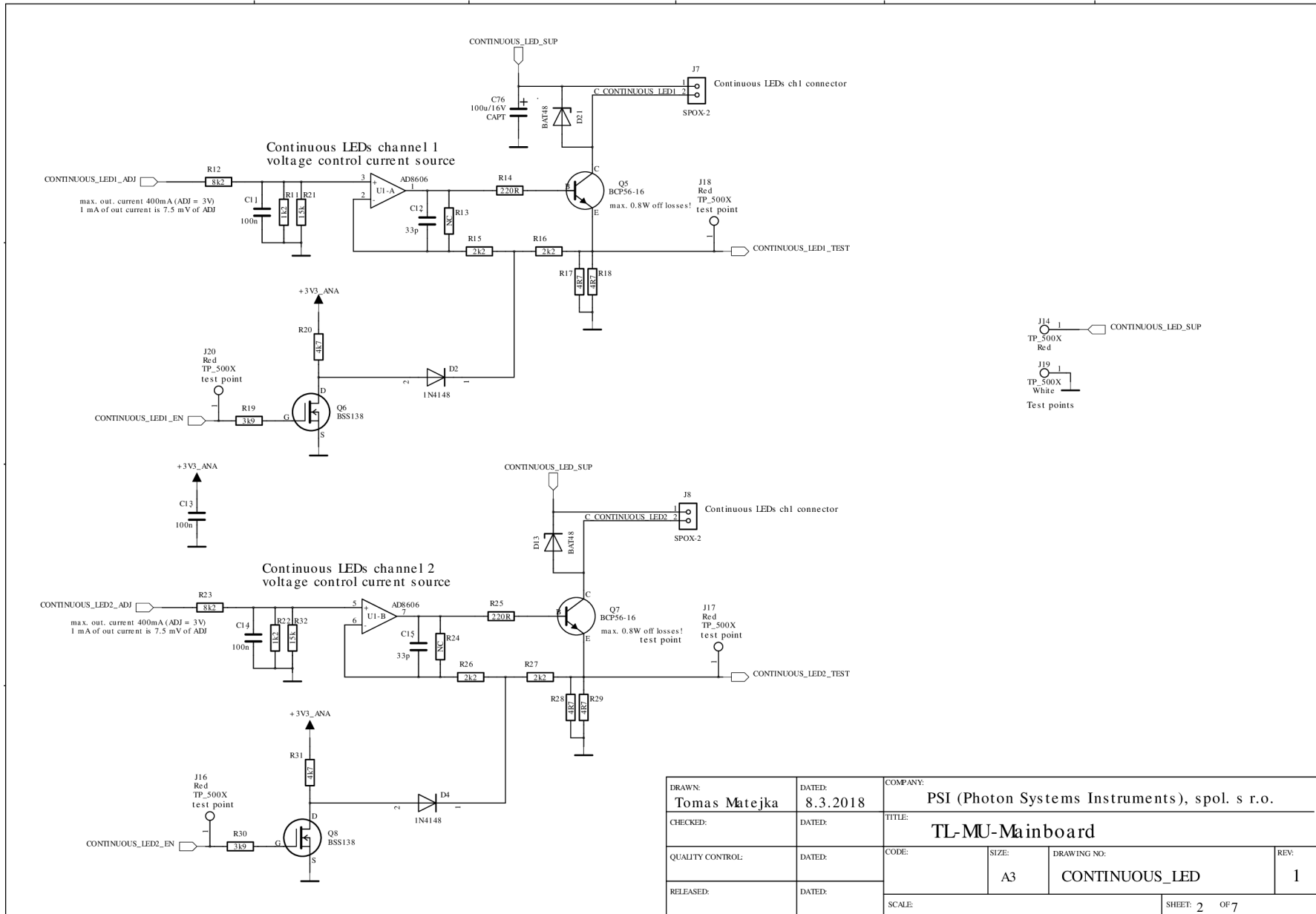
D TL MU MAIBOARD - SCHEMA ZAPOJENI

- J13 1 FLASH\_LED\_SENSE
- TP\_500X Red
- J9 1 FLASH\_LED\_EN
- TP\_500X Red
- J12 1 FLASH\_VOLTAGE
- TP\_500X Red
- J22 1
- TP\_500X White

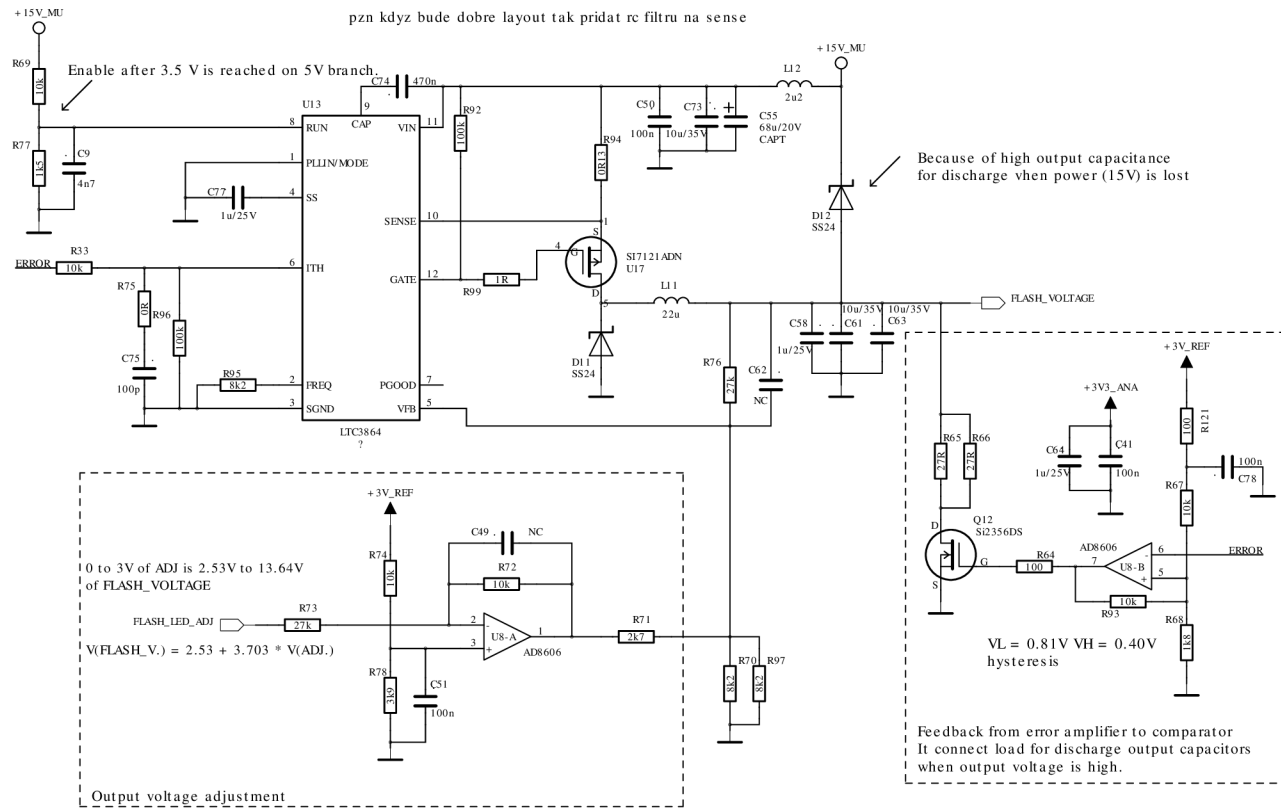
Test points



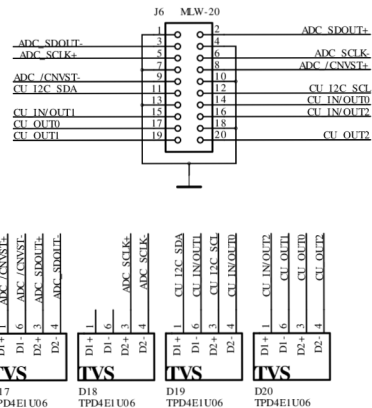
DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8.3.2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>			
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-MU-Mainboard</b>			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO: <b>FLAH_LED_SWITCH</b>	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: <b>1</b> OF <b>7</b>



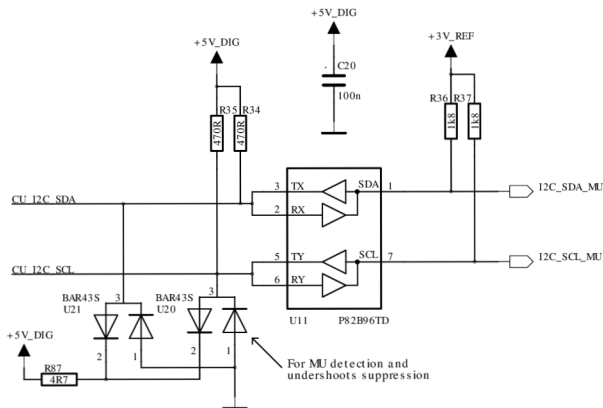
DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8.3.2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>			
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-MU-Mainboard</b>			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>CONTINUOUS_LED</b>	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: <b>2</b> OF <b>7</b>



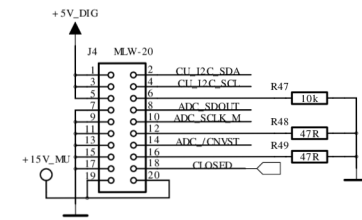
DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8.3.2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>			
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-MU-Mainboard</b>			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>FLASH_LED_POWER</b>	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: <b>3</b> OF <b>7</b>



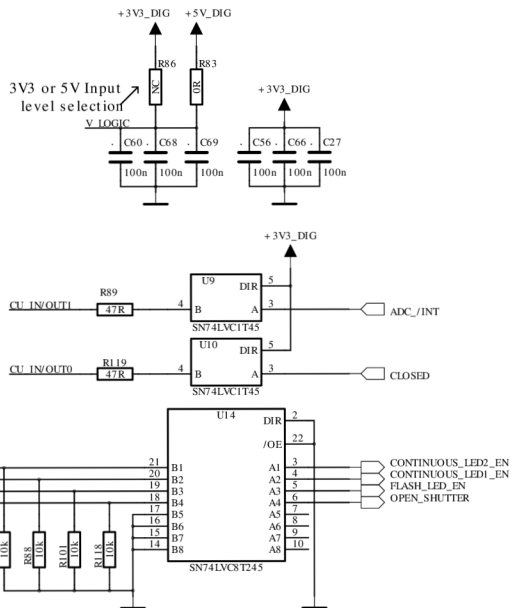
Data input connector from CU and ESD protection for each signal



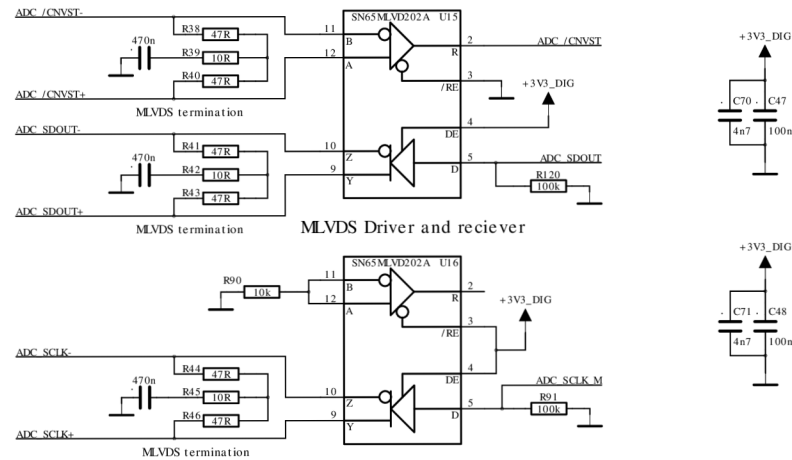
I2C BUS with buffer and periphery



Connector for TL\_MU\_HV board

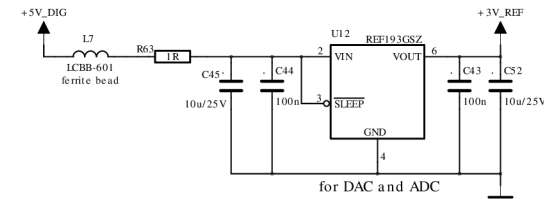
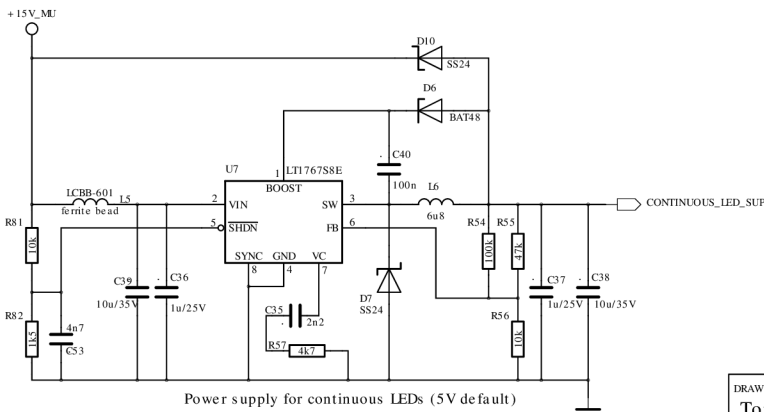
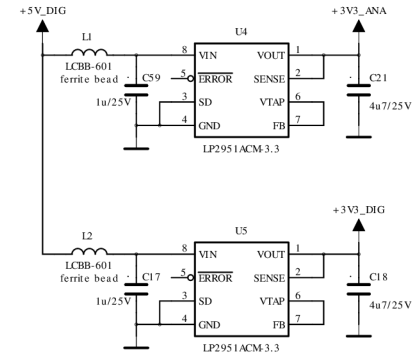
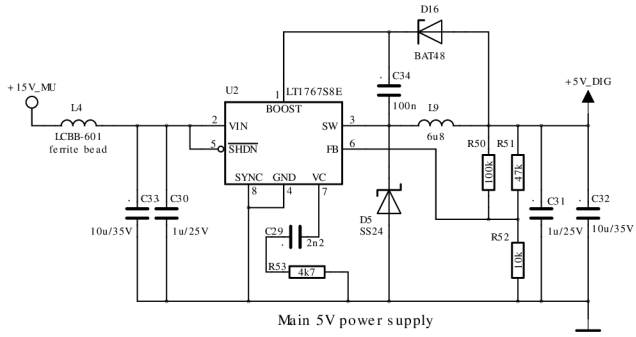
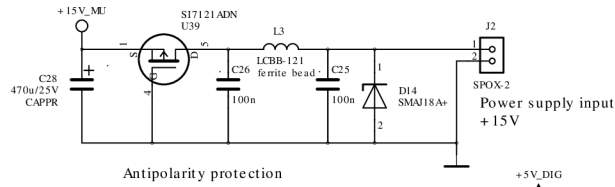
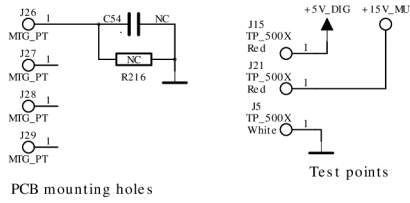


Voltage shifter and buffer for single ended signals



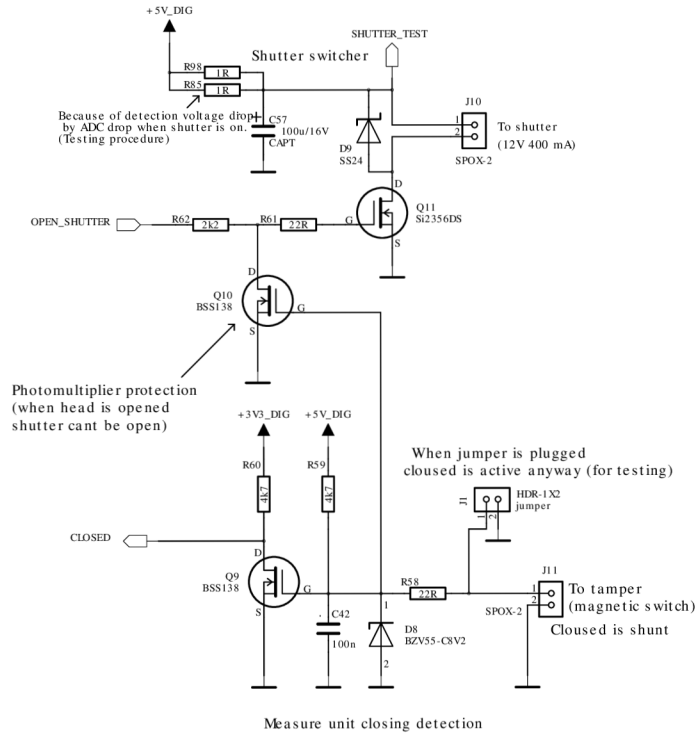
MLVDS Driver and receiver

DRAWN: Tomas Matejka	DATED: 8.3.2018	COMPANY: PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.			
CHECKED:	DATED:	TITLE: TL-MU-Mainboard			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: A3	DRAWING NO: IO	REV: 1
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: 4 OF 7

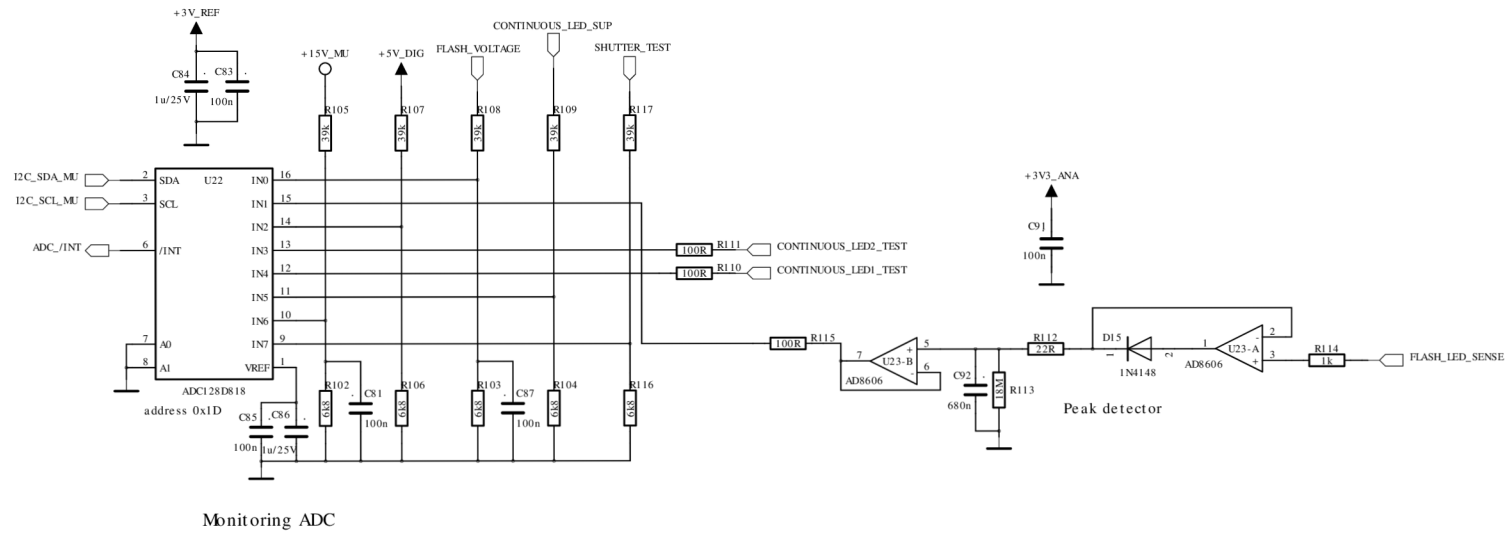


DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8.3.2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>			
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-MU-Mainboard</b>			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO.: <b>POWER</b>	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: <b>5</b> OF <b>7</b>

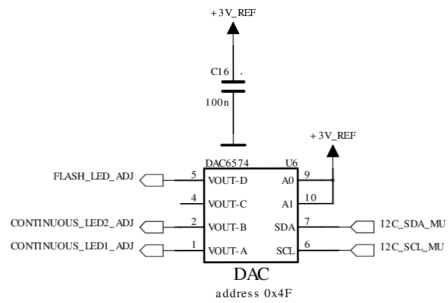




DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8.3.2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>			
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-MU-Mainboard</b>			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: A3	DRAWING NO: <b>SHUTTER+ CLOSING_DET</b>	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: <b>6</b> OF <b>7</b>



Monitoring ADC

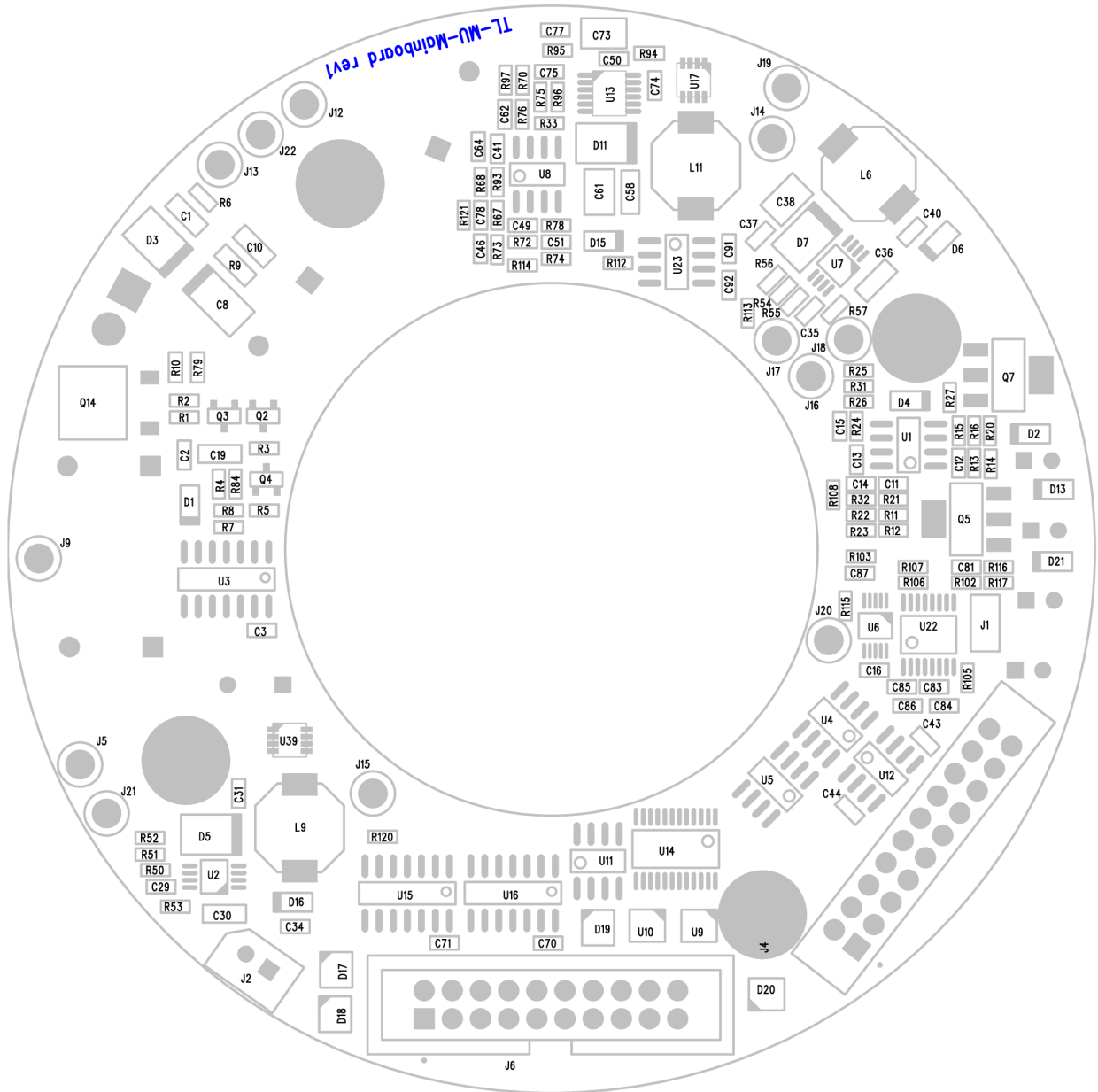


DAC

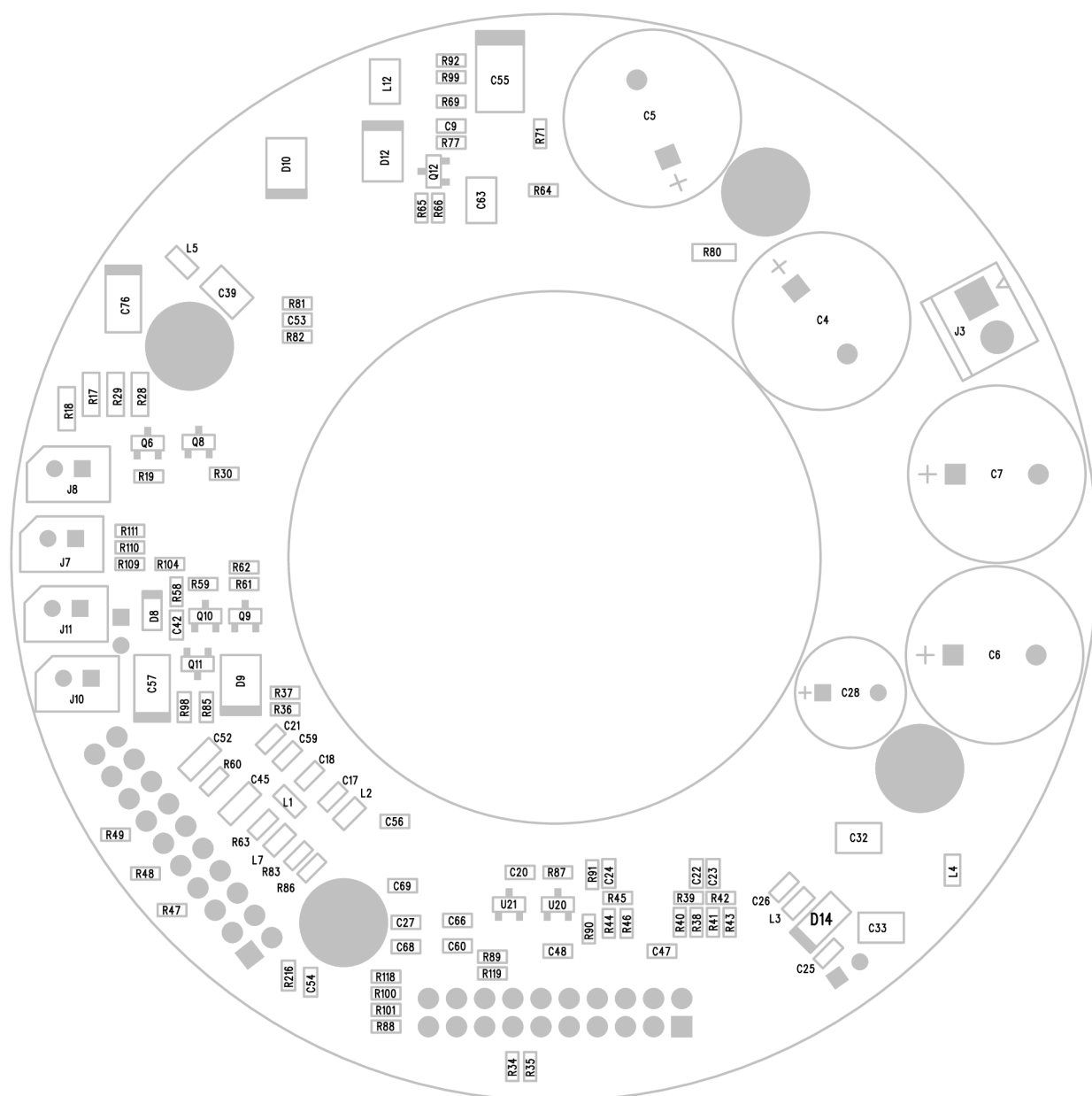
DRAWN: <b>Tomas Matejka</b>	DATED: <b>8.3.2018</b>	COMPANY: <b>PSI (Photon Systems Instruments), spol. s r.o.</b>			
CHECKED:	DATED:	TITLE: <b>TL-MU-Mainboard</b>			
QUALITY CONTROL:	DATED:	CODE:	SIZE: <b>A3</b>	DRAWING NO: <b>DAC+ MONITORING_ADC</b>	REV: <b>1</b>
RELEASED:	DATED:	SCALE:			SHEET: <b>7</b> OF <b>7</b>

# E TL CU MAIBOARD - OSAZOVACÍ VÝKRES

## E.1 Horní vrstva

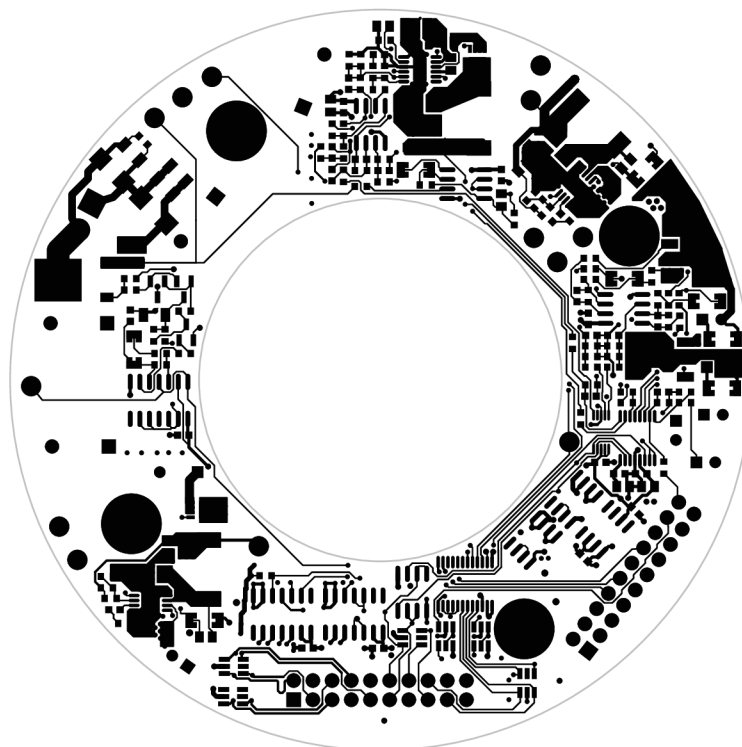


## E.2 Spodní vrstva

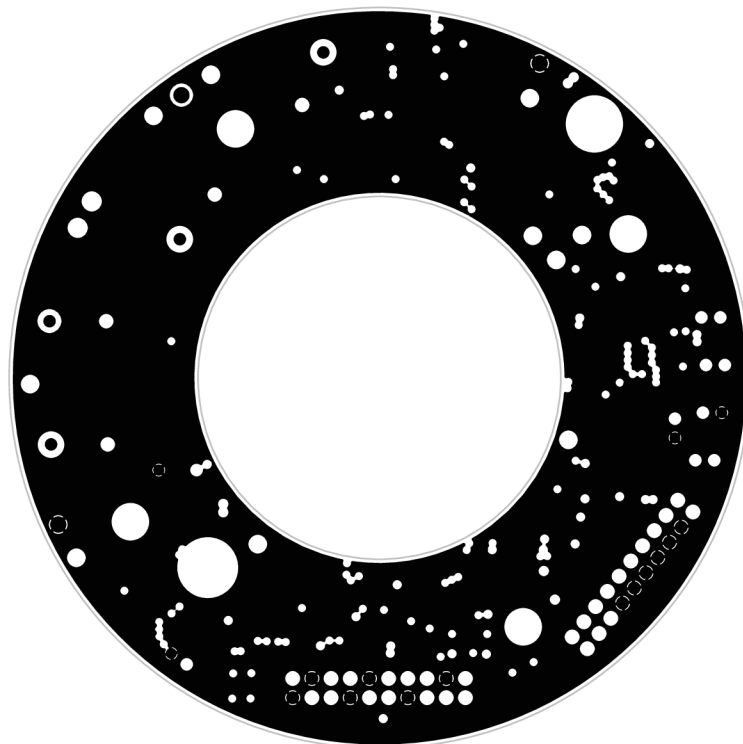


# F TL MU MAIBOARD - DPS

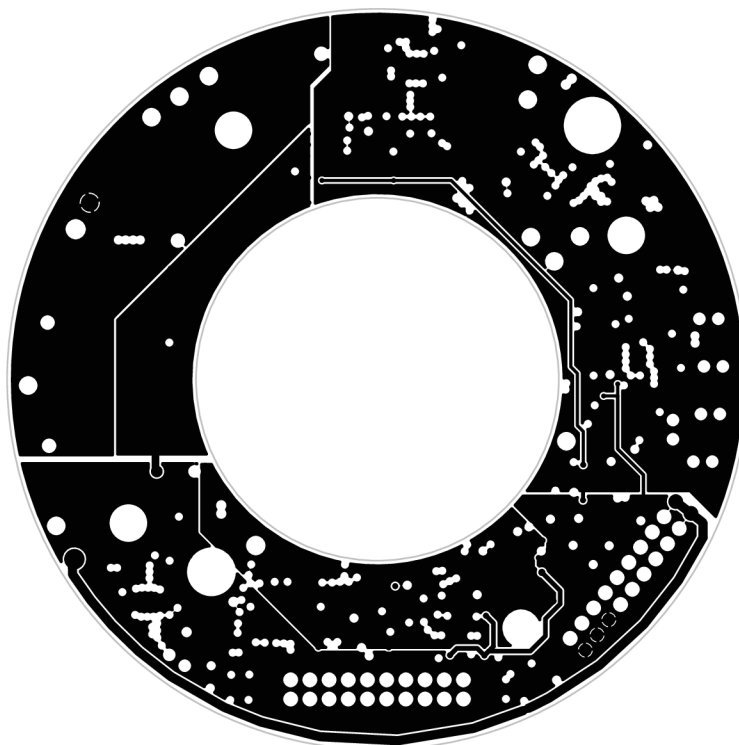
## F.1 Vrstva 1



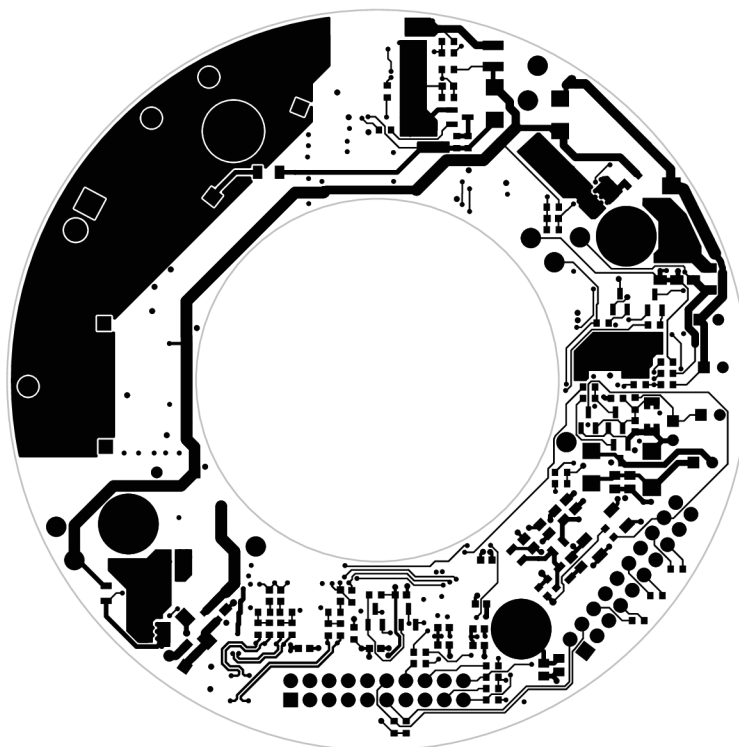
## F.2 Vrstva 2



F.3 Vrstva 3



F.4 Vrstva 4



## G SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH

1. Modul ovladače časovače
  - timer.c
2. Program termoregulátoru
  - thermoreg.c
  - thermoreg.h
3. Schémata zapojení
  - TL-MU-Mainboard.pdf
  - TL-CU-Mainboard.pdf