



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

MĚŘENÍ TEPLoty SNÍMAČEM PT100 PRO LETECKÉ APLIKACE

TEMPERATURE MEASUREMENTS WITH PT100 FOR AEROSPACE APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Závorka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Radek Závorka

ID: 186242

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření teploty snímačem PT100 pro letecké aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy přesného měření teploty se snímačem PT100. Navrhněte koncepci a obvodové zapojení jednobáňového přípravku s mikroprocesorem pro měření se snímači v třídě přesnosti B, který zároveň umožní detekovat libovolnou poruchu (přerušeni vodičů, zkrat, poškození PT100). Při návrhu se zaměřte na splnění požadavků letecké normy RTCA/DO-160G (napájení, napěťové jehlové impulsy, vyzařování vlnové energie, ovlivnitelnost přechodovými jevy způsobenými blesky). Přípravek navrhněte s mikroprocesorem řady ARM.

Navrhněte desku plošného spoje, realizujte přípravek a software mikroprocesoru a proveďte ověření dosažených parametrů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] RTCA, Inc. RTCA/DO-160G: Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. December 8, 2010. 542 s.

[2] HOROWITZ, P., HILL, W. The Art of Electronics. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 24. 5. 2018

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka



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

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 bakalářská práce se zabývá návrhem systému pro měření teploty, který bude vhodný pro letecké aplikace. Při návrhu je kladen důraz na plnění leteckých norem, především ochranu proti napětovým jehlovým impulzům a přechodovým jevům způsobenými blesky. Zařízení musí být taktéž odolné proti elektromagnetickému rušení. Jádrem zařízení je AD převodník s proudovým zdrojem od firmy Texas Instruments, který je vhodný pro připojení různých druhů senzorů a čidel. Činnost celého systému je řízena a vyhodnocována mikroprocesorem řady ARM. Změřené hodnoty jsou zobrazeny na obrazovce počítače, který je se zařízením propojen pomocí sériové linky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření teploty, letecké aplikace, ochranné obvody, snímač, AD převodník, MCU

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with design of temperature measurement system, which is focused on aviation applications. The design emphasizes fulfilment of aviation standards, especially protection against voltage needle pulses and transient phenomena caused by lightning. Device must be resistant against electromagnetic interference. The core of equipment is AD converter with current source from Texas Instruments, which is suitable for connect different type of sensors. The whole system is controlled by microcontroller from ARM series. The measurement values are display on monitor of computer, which is connect by serial line.

KEYWORDS

Temperature measurement, aerospace application, protective circuits, sensor, AD converter, MCU

ZÁVORKA, R. *Měření teploty snímačem PT100 pro letecké aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 74 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Měření teploty snímačem PT100 pro letecké aplikace jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. Ing. Zdeňkovi Kolkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| Seznam obrázků | ix |
| Seznam tabulek | xi |
| Úvod | 1 |
| 1 Teoretická část | 2 |
| 1.1 Metody měření teploty | 3 |
| 1.1.1 Termočlánky | 3 |
| 1.1.2 Termistory | 4 |
| 1.1.3 Odporová teplotní čidla | 4 |
| 1.2 Požadavky na zařízení | 5 |
| 1.2.1 Teplota a nadmořská výška, článek 4 | 6 |
| 1.2.2 Napájení, článek 16..... | 6 |
| 1.2.3 Napěťové jehlové impulzy, článek 17 | 7 |
| 1.2.4 Ovlivnitelnost nízkofrekvenčními signály vedenými po napájecím vedení, článek 18 | 7 |
| 1.2.5 Ovlivnitelnost indukovanými signály, článek 19 | 8 |
| 1.2.6 Ovlivnitelnost vysokofrekvenčními signály (vyzařovanými a vedenými), článek 20..... | 9 |
| 1.2.7 Vyzařování vysokofrekvenční energie, článek 21 | 9 |
| 1.2.8 Ovlivnitelnost přechodovými jevy způsobenými blesky, článek 22 .. | 10 |
| 1.2.9 Souhrn požadavků dle zadání a normy | 12 |
| 2 Návrh obvodového zapojení | 13 |
| 2.1 Převodník ADS1120 | 13 |
| 2.2 Procesor ARM STM32F0..... | 14 |
| 2.3 Zdroje napětí | 15 |
| 2.3.1 Odpojovač vysokého napětí s proudovým omezovačem..... | 16 |
| 2.3.2 Spínaný zdroj 5 V | 17 |
| 2.3.3 Lineární stabilizátor 3,3 V | 19 |
| 2.4 Ochranné obvody..... | 19 |
| 2.4.1 Dvoustupňové zapojení ochran..... | 20 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.4.2 | Výběr transilů | 20 |
| 2.4.3 | Problematika svodových proudů | 22 |
| 2.4.4 | Chybový model svodových proudů | 22 |
| 2.4.5 | Měření svodových proudů | 25 |
| 2.5 | Detekce poruchy | 30 |
| 3 | Realizace zařízení | 33 |
| 3.1 | Návrh DPS | 33 |
| 3.2 | Popis programu | 34 |
| 4 | Měření dosažených parametrů | 38 |
| 4.1 | Napájení | 38 |
| 4.2 | Přesnost | 38 |
| 4.3 | Elektromagnetická kompatibilita | 38 |
| 4.4 | Teplotní odolnost | 42 |
| 5 | Závěr | 45 |
| | Literatura | 46 |
| | Seznam symbolů, veličin a zkratk | 47 |
| A | Návrh zařízení | 48 |
| A.1 | Obvodové zapojení s převodníkem ADS1120..... | 48 |
| A.2 | Obvodové zapojení mikroprocesoru a převodníku úrovní MAX232 | 49 |
| A.3 | Obvodové zapojení napájecí části a odpojovače | 50 |
| B | Návrh desky plošných spojů | 51 |
| B.1 | Horní strana..... | 51 |
| B.2 | Spodní strana..... | 51 |
| C | Osazovací plán DPS | 52 |
| C.1 | Horní strana..... | 52 |
| C.2 | Spodní strana..... | 52 |
| D | Seznam součástek | 53 |
| E | Měření elektromagnetické kompatibility | 56 |
| E.1 | Vedené emise..... | 56 |
| E.2 | Vyzařované emise..... | 59 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| F | Foto dokumentace | 61 |
| F.1 | Fotografie výsledného zařízení | 61 |
| F.2 | Fotografie z měření svodových proudů | 61 |
| F.3 | Fotografie z měření EMC | 62 |
| F.4 | Fotografie z měření teplotní odolnosti | 63 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|--------------|---|----|
| Obrázek 1.1 | Blokové schéma obvodového zapojení | 2 |
| Obrázek 1.2 | Průběhy závislosti poměru odporů R k R_0 na teplotě pro různé typy odporových snímačů teploty [1] | 3 |
| Obrázek 1.3 | Blokové schéma čtyřvodičového zapojení odporového snímače teploty [4]5 | |
| Obrázek 1.4 | Metoda testování napěťových jehlových impulzů [5]..... | 7 |
| Obrázek 1.5 | Frekvenční charakteristika rušivého nízkofrekvenčního signálu [5] | 8 |
| Obrázek 1.6 | Způsob testování odolnosti vůči indukovanému elektrickému poli [5] | 9 |
| Obrázek 1.7 | Maximální úroveň rušivého vyzařování pro kategorii M [5]..... | 10 |
| Obrázek 1.8 | Průběh testovacího impulzu pro proud typu 1 [5]..... | 11 |
| Obrázek 1.9 | Průběh testovacího impulzu pro napětí typu 2 [5] | 11 |
| Obrázek 1.10 | Průběh testovacího impulzu pro napětí/proud typu 3 [5]..... | 12 |
| Obrázek 1.11 | Průběh testovacího impulzu pro napětí typu 4 [5] | 12 |
| Obrázek 2.1 | Zapojení a vnitřní blokové schéma převodníku ADS1120 [6] | 14 |
| Obrázek 2.2 | Zapojení převodníku úrovní MAX232..... | 15 |
| Obrázek 2.3 | Rozložení pinů na použitém procesoru STM32F030C6T6..... | 15 |
| Obrázek 2.4 | Blokové schéma napájení | 16 |
| Obrázek 2.5 | zapojení omezovače napětí s obvodem LT4363 | 17 |
| Obrázek 2.6 | Zapojení odrušovacího filtru | 18 |
| Obrázek 2.7 | Zapojení lineárního stabilizátoru napětí..... | 19 |
| Obrázek 2.8 | Dvoustupňové zapojení ochran | 19 |
| Obrázek 2.9 | Graf přepočtu proudu transilu pro vlnu typu 3 [7]..... | 21 |
| Obrázek 2.10 | Schéma simulace z programu PSpice..... | 23 |
| Obrázek 2.11 | Graf znázorňující chybu měření teploty v závislosti na velikosti svodového proudu | 25 |
| Obrázek 2.12 | Blokové schéma měření svodových proudů..... | 26 |
| Obrázek 2.13 | Zapojení TVS a ochranných diod na DPS | 26 |
| Obrázek 2.14 | Graf výsledku měření svodových proudů TVS pro $U = 1V$ | 27 |
| Obrázek 2.15 | Graf výsledku měření svodových proudů TVS pro $U = 10V$ | 28 |
| Obrázek 2.16 | Graf měření svodových proudů diod BAV23S pro $U = 1V$ | 29 |
| Obrázek 2.17 | Graf VACH transilu v pouzdře s diodami TPD4E001..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 2.18 Principiální schéma možných poruch | 31 |
| Obrázek 3.1 Vizualizace horní strany desky plošných spojů | 33 |
| Obrázek 3.2 Vizualizace spodní strany desky plošných spojů | 34 |
| Obrázek 3.3 Rozložení použitých pinů na mikroprocesoru STM32F030C6T6 | 35 |
| Obrázek 3.4 Ukázka výstupu programu v terminálu | 36 |
| Obrázek 3.5 Programové prostředí Keil uVision5..... | 37 |
| Obrázek 3.6 Vývojový diagram programu | 37 |
| Obrázek 4.1 Upořádání měřicího pracoviště při měření vedených emisí pomocí proudové sondy | 39 |
| Obrázek 4.2 Vedené emise kladný napájecí vodič- provoz..... | 40 |
| Obrázek 4.3 Upořádání měřicího pracoviště při měření vyzařovaných emisí ve stíněné komoře | 41 |
| Obrázek 4.4 Vyzařované emise vertikální polarizace antény- provoz | 41 |
| Obrázek 4.5 Upořádání měřicího pracoviště při měření teplotní odolnosti | 42 |
| Obrázek 4.6 Graf z měření teplotní odolnosti..... | 43 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1.1 Vybrané vlastnosti kovových materiálů [3]..... | 4 |
| Tabulka 1.2 Třídy přesnosti a příslušné hodnoty tolerancí platinových čidel [1] | 5 |
| Tabulka 1.3 Zadané požadavky dle normy RTCA DO- 160G | 6 |
| Tabulka 2.1 Souhrh výpočtů proudů pro transily a vlny typu 3,4 | 22 |
| Tabulka 2.2 Odchyly teploty v závislosti na velikosti svodových proudů | 24 |
| Tabulka 2.3 Výsledky měření TVS pro $U = 1V$ | 27 |
| Tabulka 2.4 Výsledky měření TVS pro $U = 10V$ | 28 |
| Tabulka 2.5 Výsledky měření svodových proudů pro diod BAV23S pro $U = 1V$ | 29 |
| Tabulka 2.6 Výsledky měření transilu v pouzdře s diodami TPD4E001 | 30 |
| Tabulka 4.1 Předepsané šířky pásma rozlišení RBW | 39 |
| Tabulka 4.2 Předepsané šířky pásma rozlišení RBW | 40 |
| Tabulka 4.3 Hodnoty měření napětí na AD převodníku při teplotní odolnosti | 44 |
| Tabulka D.5.1 Seznam součástek Rezistory | 53 |
| Tabulka D.5.2 Seznam součástek Cívky | 53 |
| Tabulka D.5.3 Seznam součástek Kondenzátory..... | 54 |
| Tabulka D.5.4 Seznam součástek Diody | 54 |
| Tabulka D.5.5 Seznam součástek IC a Tranzistory | 55 |
| Tabulka D.5.6 Seznam součástek Konektory | 55 |

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem obvodu pro přesné měření teploty. Na výsledné zařízení jsou kladeny nároky, aby splňovalo vybrané požadavky z letecké normy RTCA DO-160G, a bylo proto vhodné pro letecké aplikace. Zařízení má být zejména odolné proti napěťovým špičkám, přechodovým jevům způsobenými blesky, elektromagnetickému rušení a má správně pracovat v širokém rozmezí teplot od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Bylo navrženo kompletní obvodové zapojení včetně napájecího spínaného zdroje, který je možno napájet napětím od 10 V do 60 V, což je jeden z dalších požadavků, aby zařízení správně pracovalo i při kolísání napájecího napětí. Dále byl vybrán vhodný převodník pro převod analogové spojité veličiny na digitální data, která jsou zpracována v mikroprocesoru, v němž se vypočte měřená teplota.

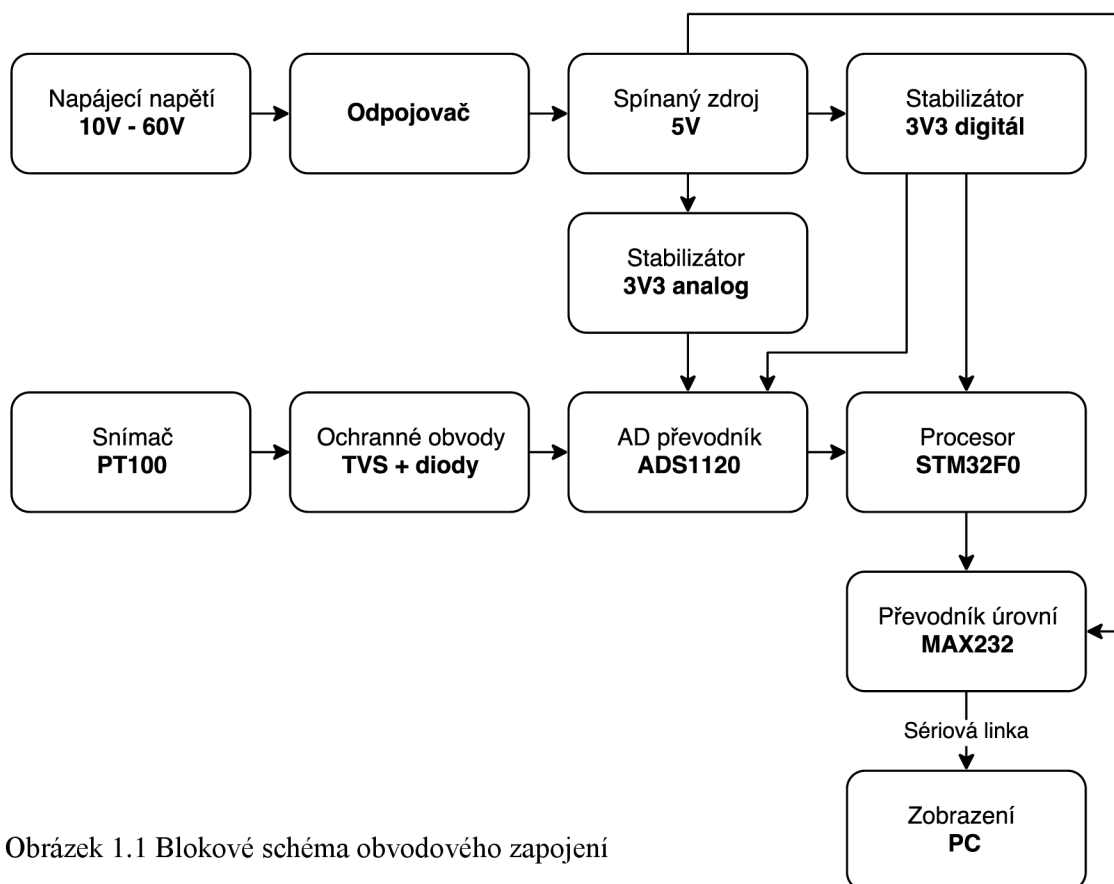
Jako čidlo byl zadán odporový platinový snímač teploty, který má nejvhodnější parametry z diskutovaných senzorů a široký rozsah měřených teplot. Zapojení čidla je realizováno čtyřvodičově, což je obecně považováno za nejpřesnější zapojení. Dále je popsán návrh ochranných obvodů, jenž mají zabezpečit funkčnost i za zhoršených pracovních podmínek.

Dosažení požadovaných parametrů bylo ověřeno měřeními, které je popsáno v závěru textu. Byly provedeny zkoušky elektromagnetické kompatibility, přesnost, určen rozsah napájecího napětí a ověřena funkčnost v celém rozsahu zadaných teplot.

Práce je členěna do 5 hlavních částí. V první kapitole je uvedena koncepce přesného měření a rozebrány požadavky na zařízení z pohledu letecké normy RTCA DO-160G. Další část je věnována návrhu obvodového zapojení a principu funkce. Ve třetí kapitole je popsána realizace zařízení a softwaru mikroprocesoru. V následující části jsou shrnuty výsledky z provedeného měření. Poslední kapitola se věnuje nejdůležitějším poznatkům celé práce.

1 TEORETICKÁ ČÁST

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu systému, který bude měřit teplotu v rozsahu -50 až +200 °C. Výsledné zapojení obsahuje kompletní řešení pro bezpečné měření teploty za letového provozu. Teplota je měřena odporovým snímačem teploty PT100. Zapojení je složeno z bloků na obr. 1.1 a hlavními celky jsou: 16- ti bitový AD převodník ADS1120 od firmy Texas Instruments, ARM procesor řady STM32F0, zdroje napětí 5 V a 3,3 V a ochranné obvody, které jsou klíčové z hlediska bezpečnosti a práce zařízení i za zhoršených podmínek, které mohou nastat při provozu.

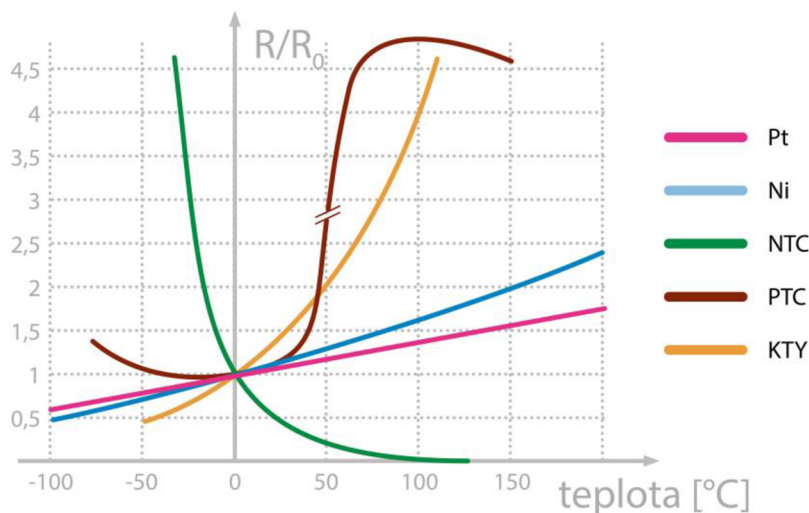


Obrázek 1.1 Blokové schéma obvodového zapojení

Jedná se o dotykové měření teploty, což znamená, že senzor musí být připevněn k objektu či látce, jehož teplotu má měřit. Využívá se zde přenosu tepla mezi dvěma předměty. Čidlo bude buzeno konstantním zdrojem proudu z převodníku ADS1120, který zároveň měří změnu napětí na odporu PT100. V převodníku dojde ke změně analogového signálu na digitální data, která se pošlou do procesoru architektury ARM, kde se získané údaje zpracují, aby mohla být na obrazovce zobrazena hodnota teploty ve stupních Celsia. Zařízení zároveň umožňuje detekovat libovolnou poruchu, jako je přerušení vodičů, zkrat nebo poškození snímače PT100. Vyhodnocení poruchy je realizováno v procesoru a signalizováno nápisem na obrazovce zároveň s upozorněním červené LED diody na DPS.

1.1 Metody měření teploty

Měření teploty patří v dnešní době k velice důležitým úkonům. Teplota je druhý nejčastěji měřený údaj, hned po čase, a kontroluje se napříč všemi oblastmi průmyslu od výroby v továrnách, v automobilovém průmyslu, potravinářství a v dalších. Na přesné měření teploty má vliv mnoho aspektů. Jedním z nich je výběr snímače, kdy každý druh je vhodný pro různé aplikace a nelze říci, že je pouze jeden univerzální. Při jeho výběru je nutné zvážit všechny možnosti použití, aby byl vybrán ten nejvhodnější. Dalším aspektem je závislost jednotlivých druhů snímačů na teplotě, tzn. jak velká změna odporu odpovídá změně teploty o jeden stupeň celsia a linearita materiálu, ze kterého je snímač vyroben. Na obrázku 1.1 je zobrazena taková závislost pro vybrané druhy. Křivka pro pozitivní termistor má ve skutečnosti horní ohyb až o 5 řádů výše než na tomto grafu, tzn. na hodnotě až 450 000, proto je naznačeno přerušení.



Obrázek 1.2 Průběhy závislosti poměru odporů R k R_0 na teplotě pro různé typy odporových snímačů teploty [1]

Zaměřím se na popis termočlánků, odporového teplotního čidla a termistoru. V této aplikaci se věnuji návrhu měření teploty s odporovým platinovým čidlem PT100.

1.1.1 Termočlánky

Termočlánky jsou jedny z nejčastěji používaných teplotních senzorů vůbec. Jejich funkce je založena na termoelektrickém nebo též Seebeckově jevu. Princip spočívá v tom, jsou-li spolu spojeny dva vodiče z různých kovů, v místě jejich propojení je generováno tzv. termoelektrické napětí. Výše tohoto napětí je závislá na teplotě a použitém materiálu. Při změně teploty dochází ke změně generovaného napětí tak, že určitá velikost napětí vždy odpovídá dané teplotě. Linearita závisí na typu použitého termočlánku a na rozsahu teplot, které je snímač schopen měřit. Při změně teploty generují termočlánky jen malou změnu napětí, proto musí být pro přesné aplikace použity kvalitní měřicí přístroje s dobrým rozlišením, aby snímaly i nepatrnou změnu napětí. Přesnost takového snímače je v řádu ± 1 až ± 2 °C, zaleží na kvalitě.

1.1.2 Termistory

Termistor je v podstatě rezistor citlivý na teplotu (temperature sensitive resistor). Velikost odporu termistoru se mění nelineárně s teplotou. Termistory jsou dvojího typu: se záporným teplotním koeficientem (NTC), jehož hodnota odporu s rostoucí teplotou klesá; a tzv. pozitivní termistor (PTC), jehož teplotní koeficient je kladný a odpor se s rostoucí teplotou zvyšuje. U termistorů je změna odporu vyšší než u odporových teplotních čidel, avšak rozsah teplot, ve kterém jsou tyto čidla schopna měřit, je menší. Termistory mají horší časovou stálost a při vyšších teplotách se začíná projevovat nestabilita, proto se obecně nedoporučuje používat termistory pro měření teploty vyšší, než je 100 °C.

1.1.3 Odporová teplotní čidla

Tato čidla fungují na principu změny odporu při výchylce teploty. Hodnota rezistivity jednotlivých materiálů se odvozuje od koncentrace volných nosičů elektrického náboje a jejich pohyblivosti. Zatímco u kovů dochází se zvyšující se teplotou k nárůstu amplitudy kmitů krystalové mřížky a tím i k pravděpodobnosti srážky volných nosičů náboje, pro polovodičové materiály je charakteristický exponenciální nárůst koncentrace těchto nosičů [2]. Odpor teplotního senzoru se však nemění nějak výrazně, proto je nutné používat přesné měřicí přístroje. Samotný snímač je často sestaven z kovových drátků, nebo tenkých vrstev. Jako materiál se nejčastěji využívá platina, ale jsou i čidla z jiných kovů nebo slitin. Například nikl, slitina nikl/železo nebo měď. Vlastnosti vybraných kovových materiálů jsou zobrazeny v tabulce 1.1. Odpor snímače je v principu možné měřit ohmmetrem, avšak odpor přívodních vodičů a kontaktů by do měření a vyhodnocení vnášel velkou chybu, proto je vhodné provádět měření čtyřvodičově, jak je zobrazeno na obr. 1.2. Přes dva vodiče se vede budící proud a na další dva je připojen přesný voltmetr. Pokud má voltmetr vysokou impedanci, je možno chybu několika ohmů, způsobenou malým odporem vedení, zanedbat. V důsledku průchodu budícího proudu je nutné zabránit vlastnímu ohřívání odporového snímače. Proud by proto neměl být vyšší než jednotky miliampér.

Tabulka 1.1 Vybrané vlastnosti kovových materiálů [3]

| Kov | Rezistivita | Teplotní koeficient odporu | Poměr odporů | Měřicí rozsah |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------------|
| | ρ ($10^{-6} \Omega \cdot m$) | α ($10^{-3} K^{-1}$) | W_{100} (-) | $\Delta\theta$ (°C) |
| Cu | 0,01724 | 4,26 až 4,33 | 1,4260 | -50 až 150 |
| Ni | 0,0684 | 6,17 až 6,70 | 1,6180 | -60 až 200 |
| Pt | 0,105 | 3,85 až 3,93 | 1,3850 | -200 až 850 |

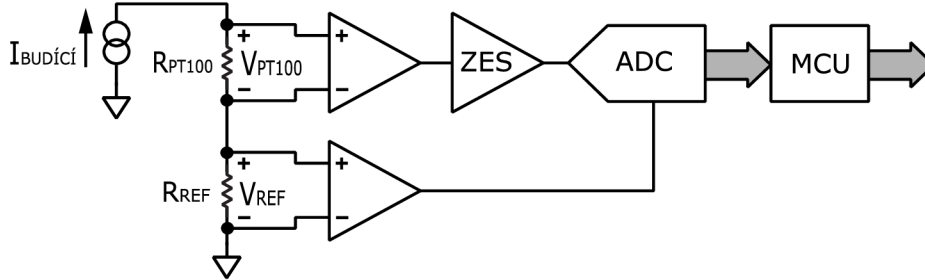
Odporové teplotní čidlo PT100 je z platiny. Jeho odpor je při teplotě 0 °C 100 Ω , odtud pochází jeho název. Změna odporu je jen 0,385 Ω při změně teploty o 1 °C. Platina je výhodná z několika důvodů, má chemickou stálost a vysokou teplotu tání. Platina se také využívá jako etanolový teploměr. Pro záporné teploty (-200 až 0 °C), podle normy IEC-751, lze vyjádřit teplotní závislost odporu platinového čidla polynomem ve tvaru [2]:

$$R = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C(\vartheta - 100)\vartheta^3] \quad (1.1)$$

Pro rozsah teplot 0 až 850 °C pak platí vztah:

$$R = R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2) \quad (1.2)$$

kde: R_0 je základní odpor 100 Ω , $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$,
 $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$.



Obrázek 1.3 Blokové schéma čtyřvodičového zapojení odporového snímače teploty [4]

Snímače PT100 se vyrábí v několika základních třídách přesnosti, kde jsou toleranční intervaly vyjádřeny vztahy, které jsou uvedeny v tabulce 1.2. Dle zadání má být pro práci použito čidlo v třídě přesnosti B.

Tabulka 1.2 Třídy přesnosti a příslušné hodnoty tolerancí platinových čidel [1]

| Třída přesnosti | Teplotní tolerance $\Delta\vartheta$ | Teplotní rozsah |
|-----------------|--------------------------------------|-----------------|
| 1/10 B | $\pm (0,03 + 0,0005 \vartheta)$ | 0 až 100 °C |
| 1/3 B (AA) | $\pm (0,10 + 0,0017 \vartheta)$ | -50 až 250 °C |
| A | $\pm (0,15 + 0,002 \vartheta)$ | -50 až 650 °C |
| B | $\pm (0,3 + 0,005 \vartheta)$ | -200 až 850 °C |
| C | $\pm (0,60 + 0,01 \vartheta)$ | -200 až 850 °C |

1.2 Požadavky na zařízení

Měřicí zařízení je konstruováno pro letecké aplikace, proto je nutné dodržet několik zadaných bodů dle letecké normy RTCA DO-160G. Tato norma obsahuje celkem dvacet tři kapitol, které se věnují leteckým požadavkům. Pro naše zařízení jsou zadány jen některé, které musí splňovat. Tabulka 1.3 shrnuje vybrané články, podle kterých bude zařízení navrhováno. Tyto požadavky budou rozebrány v následujících podkapitolách, kde bude vymezeno, co je nutné dodržet a jakých parametrů se musí dosáhnout.

Tabulka 1.3 Zadané požadavky dle normy RTCA DO- 160G

| Článek | Okolní podmínky | Kategorie |
|--------|---|----------------------------|
| 4 | Teplota a nadmořská výška | D2 / D3 (motorový prostor) |
| 16 | Napájení | B |
| 17 | Napěťové jehlové impulzy | A |
| 18 | Ovlivnitelnost nízkofrekvenčními signály vedenými po napájecím vedení | B |
| 19 | Ovlivnitelnost indukovanými signály | BC |
| 20 | Ovlivnitelnost vysokofrekvenčními signály (vyzařovanými a vedenými) | TT |
| 21 | Vyzařování vysokofrekvenční energie | M |
| 22 | Ovlivnitelnost přechodovými jevy způsobenými blesky | A2C2 |

1.2.1 Teplota a nadmořská výška, článek 4

Požadavky na zařízení jsou, aby splňovalo kategorii D2, na kterou jsou kladeny následující nároky:

- zařízení musí správně pracovat až do nadmořské výšky 15 200 m
- zařízení je určeno pro instalaci v místě, kde není regulován tlak, ani teplota

S rostoucí nadmořskou výškou tlak klesá a může dosáhnout až 57,18 kPa, s čímž souvisí především volba izolačních mezer na plošném spoji. Problém je v tom, že s nadmořskou výškou klesá izolační pevnost vzduchu, která je v normálních podmínkách 3 MV/m. Proto bude při návrhu DPS tato problematika brána v potaz a izolační mezery budou voleny s dostatečnou rezervou.

Minimální a maximální teplota, která může v místě, kde je zařízení umístěno nastat je stanovena normou a hodnoty jsou $T_{\min} = -55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T_{\max} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.2.2 Napájení, článek 16

Zařízení má být napájeno dle kategorie B, která zahrnuje napětí 14 V a 28 V stejnosměrných. Napětí má být dodáváno alternátorem s usměřovačem, stejnosměrným generátorem nebo baterií.

Při normálním provozu může dojít k následujícím okolnostem daných normou RTCA DO-160G, kterým musí zařízení odolat:

- napájecí napětí se může měnit od 22,0 V až do 30,3 V a při nouzovém režimu může dojít k poklesu až na hodnotu 18 V
- může dojít k výpadku napájení až po dobu 50 ms

- napájecí napětí se může zvýšit na hodnotu 47 V $-0/+2$ V až na dobu 5 ms, poklesnout na hodnotu 40 V $-0/+2$ V na dobu až 30 ms nebo může napájecí napětí klesnout na hodnotu 17 V $-0,7/+0$ V na dobu 30 ms
- při startu motoru může dojít k poklesu napájecího napětí od 10,0 V do 20,5 V až po dobu 35 s

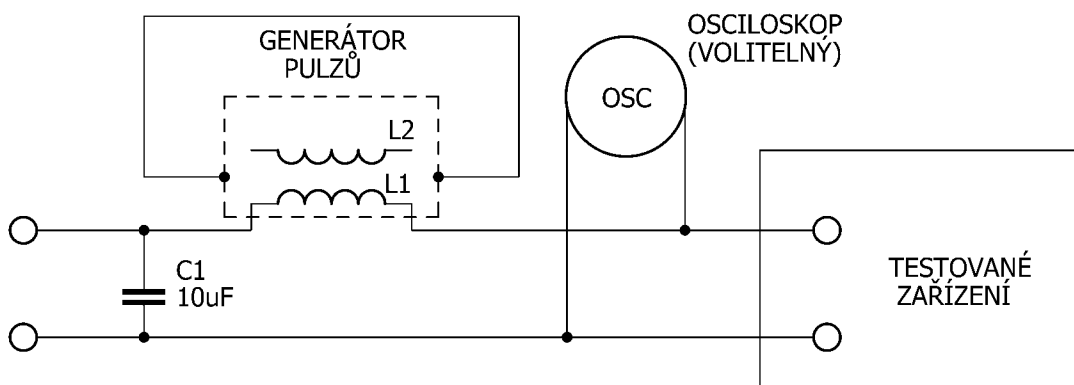
Při výjimečných podmínkách může dojít k následujícím okolnostem:

- napájecí napětí může vzrůst až na hodnotu 32,2 V nebo naopak poklesnout k hodnotě 20,5 V
- může dojít k poklesu napájecího napětí od 0 V do 20,5 V až po dobu 10 min., při stavu nízkého napájecího napětí
- pokles napájecího napětí na 12,0 V $\pm 0,24$ V až na dobu 7 s
- nastat přepětí 60 V $-0/+3$ V po dobu až 100 ms a 40 V $-0/+2$ V až na 1 s

1.2.3 Napěťové jehlové impulzy, článek 17

Zařízení musí splňovat vysoký stupeň ochrany proti napěťovým jehlovým impulzům, což podle normy RTCA DO- 160G odpovídá kategorii A. Norma dále říká, že zařízení musí odolat 50 pozitivním nebo záporným impulzům, které přijdou v rozmezí jedné minuty. Tyto napěťové impulzy mohou mít velikost až 600 V a doba trvání jednoho by neměla překročit 10 μ s. Náběžná hrana nemá být delší než 2 μ s. Na obrázku 1.2 je znázorněn způsob testování.

V sestaveném zařízení se dbá na to, aby tyto požadavky byly splněny. Bude použito několik stupňů ochrany, a to nejdříve hrubě pomocí transilů a následně jemně využitím ochranných diod, které zabrání pronikání napěťových impulzů. O výběru a funkci ochrany bude pojednáno dále.



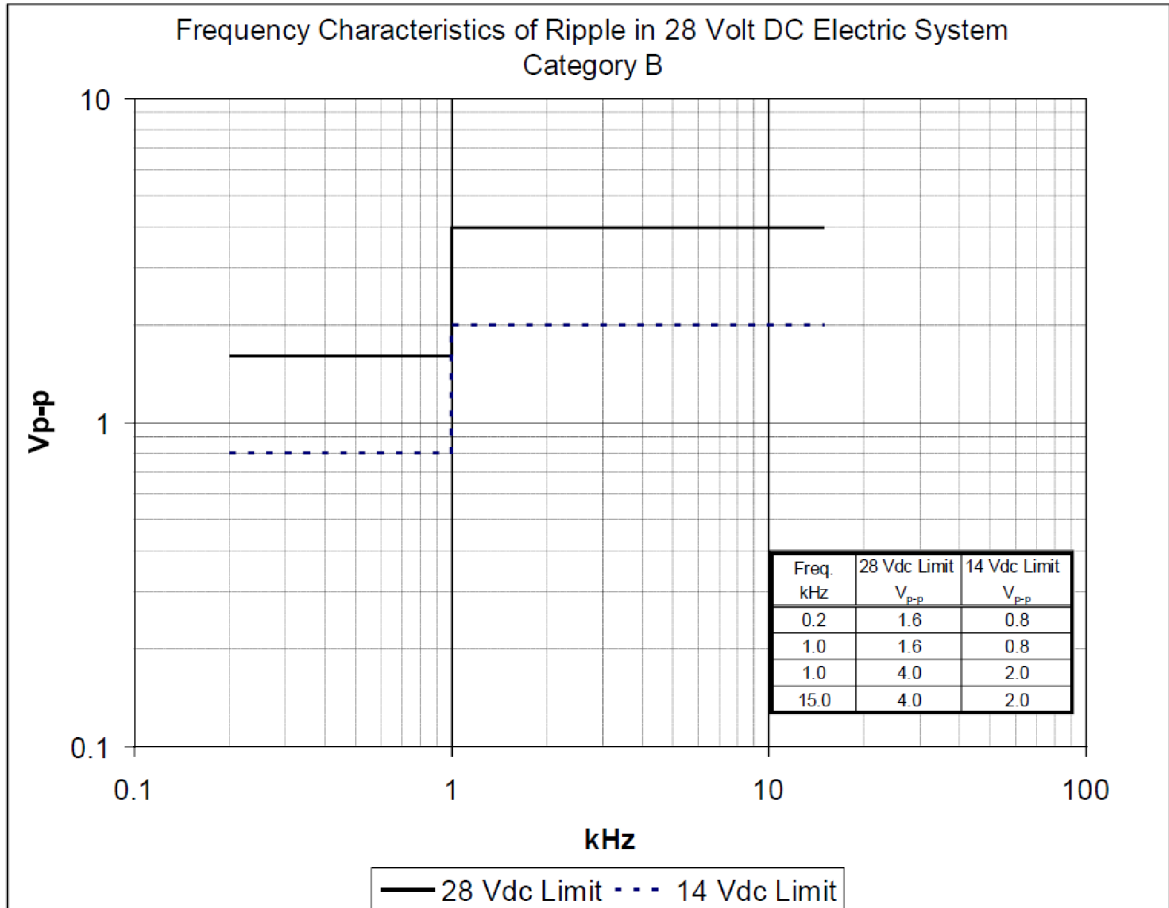
Obrázek 1.4 Metoda testování napěťových jehlových impulzů [5]

1.2.4 Ovlivnitelnost nízkofrekvenčními signály vedenými po napájecím vedení, článek 18

Zařízení musí splňovat odolnost vůči nízkofrekvenčnímu rušení vedenému po napájecím vedení a podle normy RTCA DO- 160G spadá do kategorie B. Dále se uvádí parametry, kterých může rušivý signál dosahovat. Může jít o napětí o frekvenci od 200 Hz do 1 kHz

a napětí špička – špička 1,6 V nebo o napětí o frekvenci od 1 kHz do 15 kHz a velikosti napětí špička – špička 4,0 V, které se může objevit na neuzemněném napájecím vodiči a kterému musí odolat. Na obrázku 1.3 je zobrazena frekvenční charakteristika rušivého nízkofrekvenčního signálu.

Případné rušivé signály bude stabilizovat spínaný zdroj, kterým bude zařízení napájeno a filtry, jež budou na vstupu.



Obrázek 1.5 Frekvenční charakteristika rušivého nízkofrekvenčního signálu [5]

1.2.5 Ovlivnitelnost indukovanými signály, článek 19

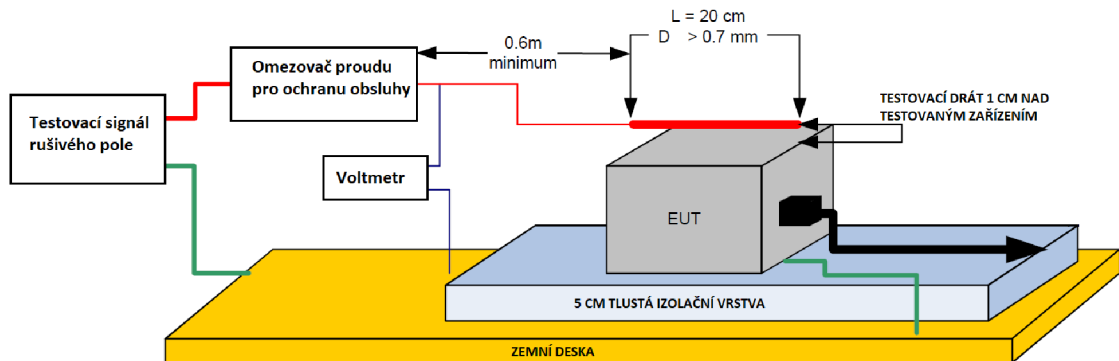
Rušivé signály se mohou do zařízení indukovat z okolí. Tomu je nutné zabránit a zařízení musí určitým rušivým signálům odolat. Jak velké rušivé signály musí zařízení zvládnout, udává norma RTCA DO- 160G. Ta stanovuje, že zařízení je určeno primárně pro provoz v místech, kde bylo rušení upraveno na přijatelnou úroveň. Spadá do kategorie BC, kde písmeno C udává, že zařízení bude instalováno pro letecké aplikace a je primárně napájeno napětím o konstantní frekvenci 400 Hz nebo napětím stejnosměrným.

Zařízení musí odolat těmto indukovaným signálům:

- magnetickému poli o intenzitě $20 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ při frekvenci 400 Hz

- elektrickému poli o intenzitě $170 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ při frekvenci 400 Hz

V zařízení se nevyskytují obvody citlivé na tyto úrovně indukovaných signálů, přesto bude v budoucnu při reálném použití umístěno v hliníkové krabici, která bude mít mimo jiné funkci stínění a měla by indukované signály potlačit. Na obrázku 1.4 je naznačeno, jak se měří indukované elektrické pole dle normy.



Obrázek 1.6 Způsob testování odolnosti vůči indukovanému elektrickému poli [5]

1.2.6 Ovlivnitelnost vysokofrekvenčními signály (vyzařovanými a vedenými), článek 20

Navrhované zařízení má splňovat kategorii T podle normy RTCA DO-160G. To znamená, že má být odolné vůči vysokofrekvenčním signálům v rozsahu frekvencí 100 MHz až 6 GHz.

Testování probíhá ve stíněné komoře, kde se umístí zařízení a zdroj vyzařování, který vysílá v daném pásmu. Následně se testuje, zda zařízení pracuje správně a není zdrojem rušivého signálu nijak ovlivněno.

Na vstupu převodníku bude zařazen VF filtr, který by měl rušivé signály odstranit.

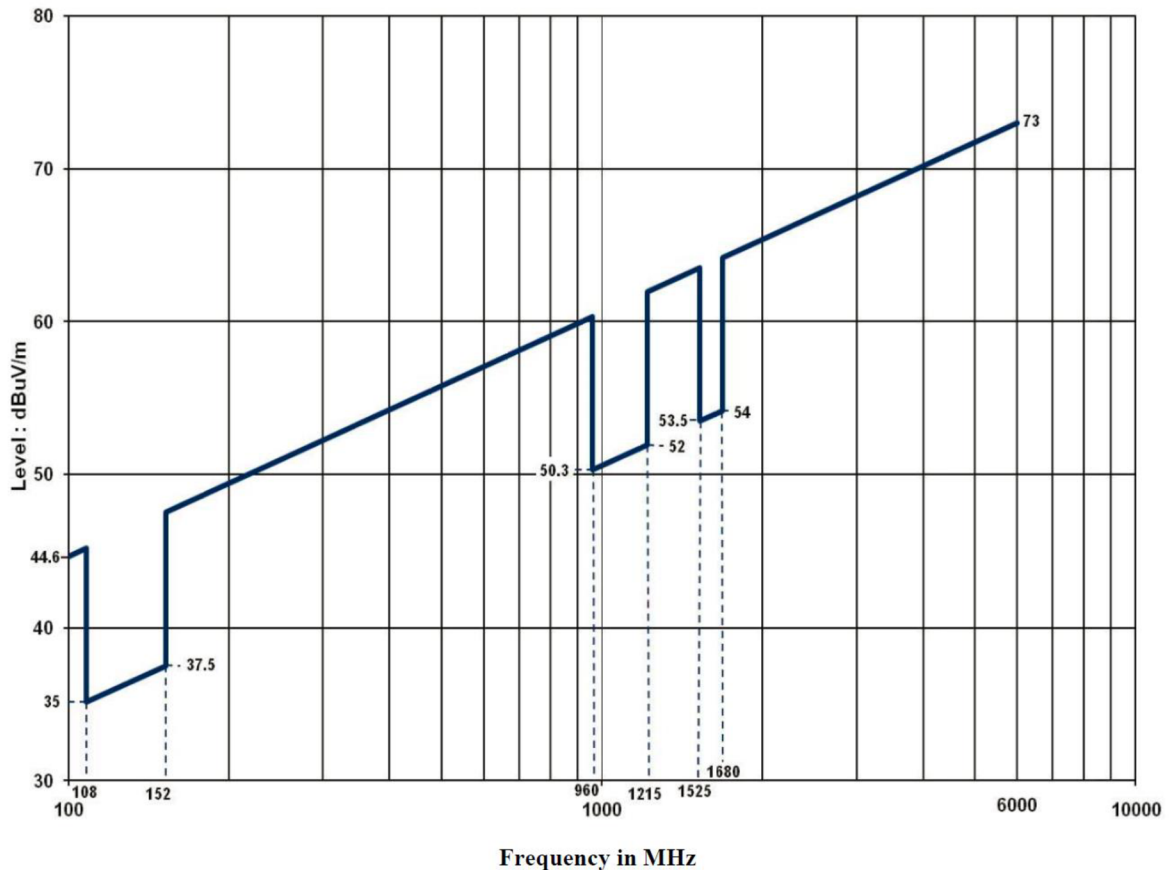
1.2.7 Vyzařování vysokofrekvenční energie, článek 21

Zařízení musí splňovat určité požadavky na vyzařování vysokofrekvenční energie. Podle normy RTCA DO-160G spadá do kategorie M, což znamená, že může být umístěno v kabině pro cestující nebo kokpitu letadla. Dále se předpokládá, že se nenachází v blízkosti rádiových přijímačů a vysílačů. Zařízení nesmí vyzařovat vysokofrekvenční energii, která by mohla negativně ovlivnit ostatní přístroje a techniku v letadle. Proto jsou stanoveny frekvence, na nichž vyzařovat nesmí.

Norma hlídá, aby zařízení nevyzařovalo na frekvencích, na které může být citlivá avionika letadla. Jedná se o frekvence vyšší než 100 MHz. Konkrétně jde zejména

o frekvence v pásmech 108-152 MHz, 960-1215 MHz a 1525-1680 MHz. To se měří ve speciální stíněné komoře, do které se umístí zařízení společně s přijímací širokopásmovou anténou, jež je připojena na spektrální analyzátor a snímá vyzařované signály ze zařízení. Na obrázku 1.5 je zobrazen graf ukazující maximální úroveň vyzařovaného rušení dle normy.

V zapojení je obsažen mikroprocesor, který pracuje až na frekvencích kolem 48 MHz. Proto bude nutné měřením ověřit, že nedochází k vyzařování vysokofrekvenční energie ze zařízení.



Obrázek 1.7 Maximální úroveň rušivého vyzařování pro kategorii M [5]

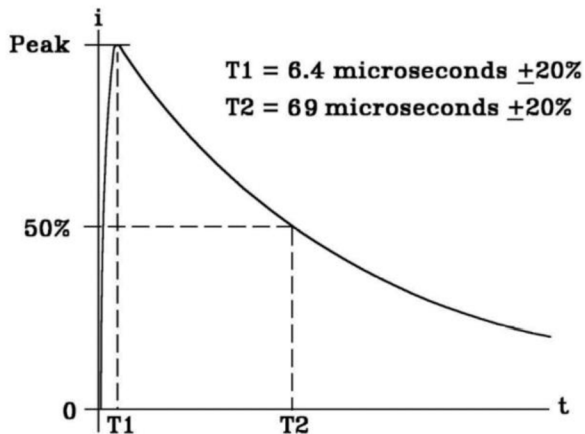
1.2.8 Ovlivnitelnost přechodovými jevy způsobenými blesky, článek 22

Na zařízení jsou kladeny požadavky, aby v případě výboje blesku odolalo způsobeným jevům. Velikost těchto impulzů je dána kategorií A2C2XX normy RTCA DO-160G. Znakategorie znamenají následující: písmeno A označuje testování pinů a patří k němu číslovka 2, jež udává stupeň testování; písmeno C značí kabelové svazky a číslovka 2 stanovuje stejnou funkci jako u písmene A. Stupně testování říkají, podle jakých napětových a proudových vln bude zařízení zkoušeno.

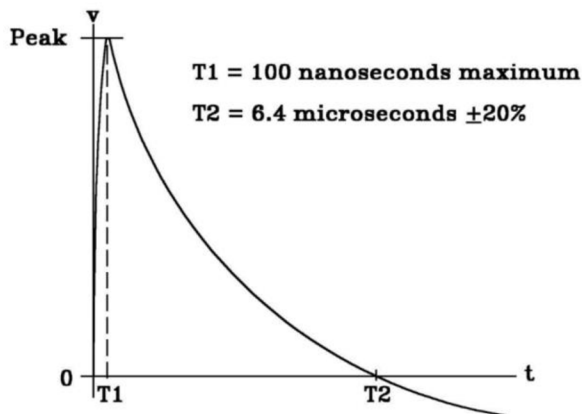
Zařízení musí odolat následujícím napětovým, respektive proudovým špičkám:

- pro úder do pinu a typ testovací vlny 3/3: 250 V a 10 A
- pro úder do pinu a typ testovací vlny 4/1: 125 V a 25 A
- pro úder do kabelového svazku a typ testovací vlny 2/1: 125 V a 250 A
- pro úder do kabelového svazku a typ testovací vlny 3/3: 250 V a 50 A

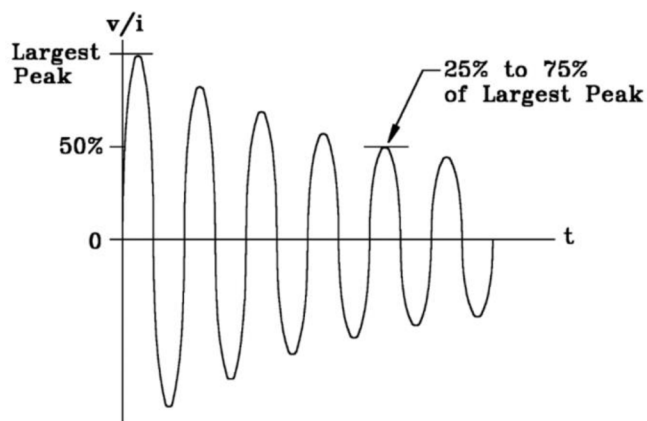
Na následujících obrázcích 1.8; 1.9; 1.10 a 1.11, jsou zobrazeny průběhy jednotlivých typů vln, podle kterých se má zařízení testovat.



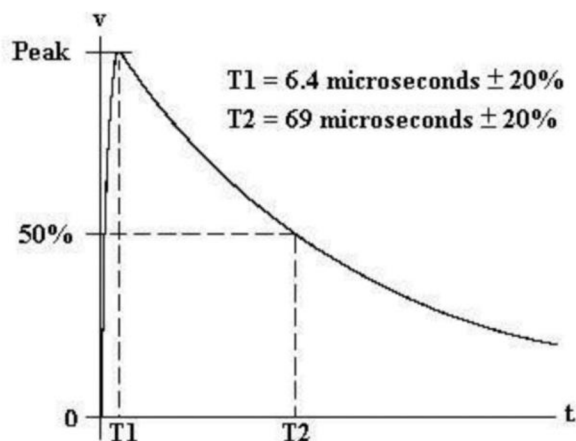
Obrázek 1.8 Průběh testovacího impulsu pro proud typu 1 [5]



Obrázek 1.9 Průběh testovacího impulsu pro napětí typu 2 [5]



Obrázek 1.10 Průběh testovacího impulsu pro napětí/proud typu 3 [5]



Obrázek 1.11 Průběh testovacího impulsu pro napětí typu 4 [5]

1.2.9 Souhrn požadavků dle zadání a normy

Zařízení musí pracovat do výšky 15 200 m a zvládat změny teploty od -55 do 70 °C. Správně pracovat při výkyvech napájení od 10 do 60 V. Odolat napěťovým jehlovým impulsům až o velikosti 600 V. Splňovat odolnost vůči nízkofrekvenčnímu a vysokofrekvenčnímu rušení. Zároveň samo zařízení nesmí vyzařovat vysokofrekvenční energii do okolí a ovlivňovat tak ostatní zařízení a avioniku letadla. V neposlední řadě odolnost vůči přechodovým jevům způsobenými blesky dle průběhů daných v kapitole 1.2.8 .

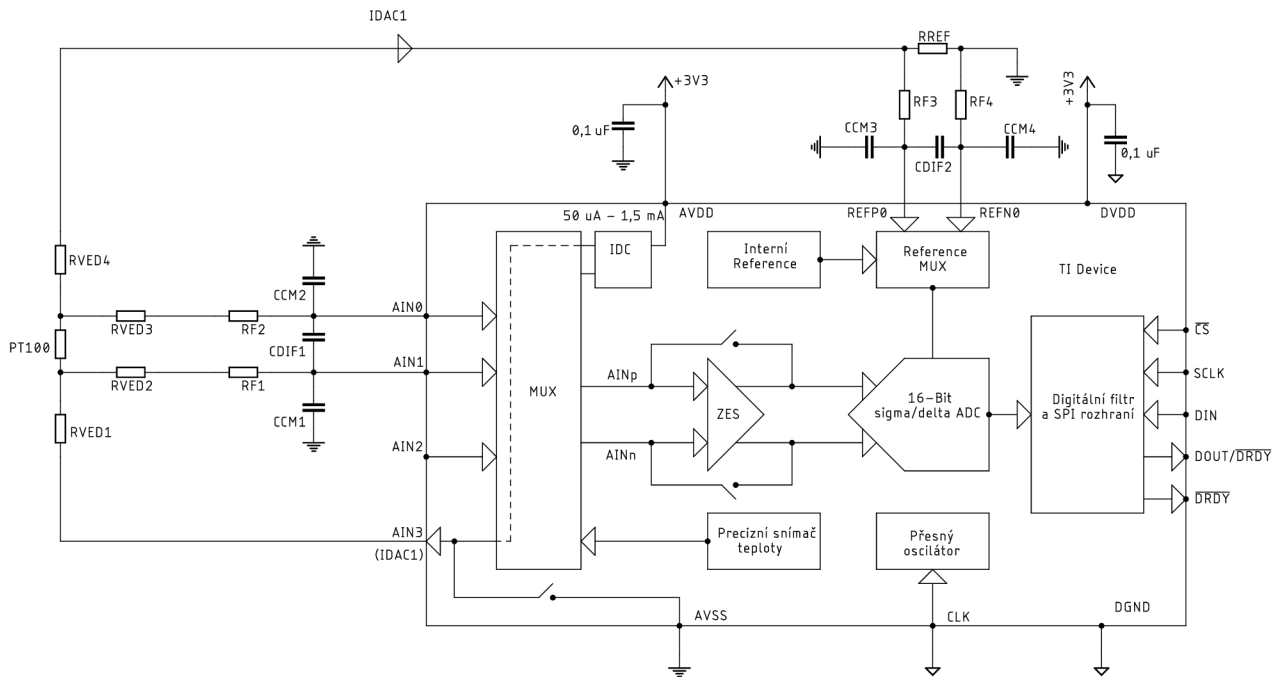
2 NÁVRH OBVODOVÉHO ZAPOJENÍ

Tato kapitola se zabývá návrhem zapojení pro přesné měření teploty s ohledem na plnění požadavků uvedených výše. Nejdříve bude rozebrána funkce jednotlivých bloků, jako jsou AD převodník, blok s mikroprocesorem pro zpracování naměřených dat, odpojovač vysokého napětí, zdroje napětí a návrh ochranných prvků, které zabezpečují funkčnost a ochranu výrobku i při nepříznivých jevech.

2.1 Převodník ADS1120

Tento převodník, jež vyrábí firma Texas Instruments, je určený nejen k měření teploty, ale obsahuje i řadu pomocných obvodů. Umožňuje připojení různých druhů čidel. Jednak lze snímač PT100 zapojit dvou, tří nebo čtyřvodičově, dále je možné použít termočlánek, nebo termistorový snímač teploty. Další možností je zapojení senzorů do můstku, např. tenzometry, snímače tlaku a hmotnosti.

Přednostmi tohoto obvodu jsou nízký šum, 16-ti bitový sigma/delta ADC, nízká proudová spotřeba, programovatelný zesilovač napětí, vnitřní zdroj referenčního napětí 2,048 V, oscilátor, programovatelný proudový zdroj a také interní senzor teploty, který má rozlišení 0,03125 °C. Rozsah teplot, ve kterých se může převodník používat dle výrobce, je od -40 do +125 °C. To nesplňuje spodní požadavky dané leteckou normou RTCA DO-160G, v níž je požadavek od -55 do 70 °C. Proto bude nutné správnou funkci zařízení ověřit měřením pro celou pracovní teplotu od zmíněných -55 do 70 °C. Na obrázku 2.1 je zobrazeno doporučené čtyřvodičové zapojení odporového snímače podle výrobce a vnitřní blokové schéma. Tohoto zapojení je využito s doplněním filtračních a ochranných obvodů, jejichž funkce bude popsána v kapitole 2.4. Převodník obsahuje dva diferenční vstupy, kterými se měří napětí na snímači PT100. Toto napětí je přes multiplexor připojeno na programovatelný zesilovač a podle potřeby zesíleno na požadovanou úroveň. Zesilovač umožňuje zesílení v mocninách dvou až do hodnoty 128krát. Dalším krokem je AD převod. Ten je realizován sigma/delta převodníkem. Jako referenční napětí slouží napětí získané z rezistoru R_{REF} . Jedná se o přesný rezistor se zvolenou tolerancí 0,05 %, aby byly splněny požadavky na minimální přesnost. Díky tomu, že je rezistor R_{REF} zapojen v sérii se snímačem teploty PT100 a tudíž jim protéká stejný proud, tak při výchylce referenčního proudu, který je 1 mA, nedojde k chybě měřené teploty. To je zapříčiněno tím, že pokles proudu způsobí výchylku napětí na obou rezistorech (R_{PT100} a R_{REF}) a chyba se tak vykompenzuje. Takové zapojení je proto vhodnější než využití vnitřní reference napětí. Převod probíhá s hodinovým taktem. Převedená data se následně pošlou přes digitální filtr na výstup obvodu. Výstupní data o změřené teplotě jsou v binárním kódu a je nutné je zpracovat v procesoru a převést na údaj o teplotě. Nastavení registrů a vyčítání dat z převodníku probíhá přes SPI (Serial Peripheral Interface) rozhraní.



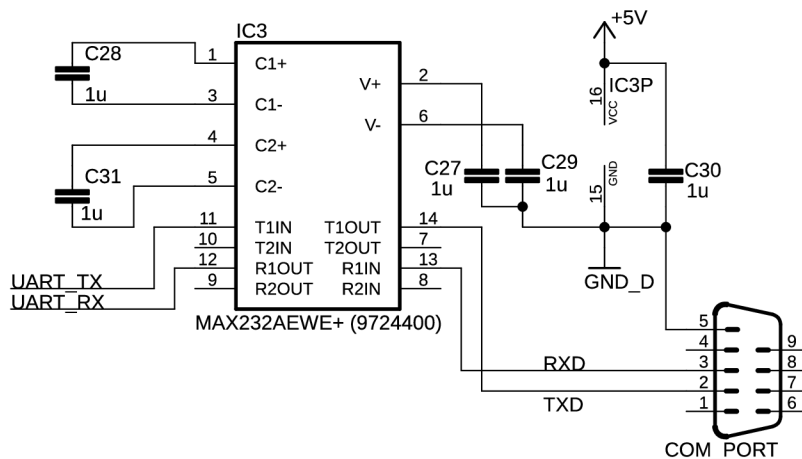
Obrázek 2.1 Zapojení a vnitřní blokové schéma převodníku ADS1120 [6]

2.2 Procesor ARM STM32F0

Procesor architektury ARM tvoří mezistupeň mezi převodníkem pro měření teploty a zobrazovacím zařízením – obrazovkou počítače. Přes sériovou komunikaci SPI se posílají data o teplotě do procesoru, který je musí zpracovat a vyslat na obrazovku počítače, k němuž je připojen přes sériovou linku RS-232. Využití této linky namísto dnes rozšířeného konektoru USB má několik důvodů. Jedním z nich je větší odolnost vůči rušení a přeslechům. To je dáno velikostí úrovní napětí jednotlivých stavů, kdy logické hodnotě 1 odpovídá -12 V a logické hodnotě 0 potom $+12\text{ V}$. Další výhodou je, že jednotlivé bity přenášených dat jsou vysílány postupně za sebou po jednom páru vodičů v přesně definované struktuře. Tomu odpovídá na začátku komunikace jeden start bit, poté nejčastěji osm datových bitů a následuje paritní bit pro ověření základní správnosti přenosu. Nakonec je vyslán jeden nebo dva stop bity.

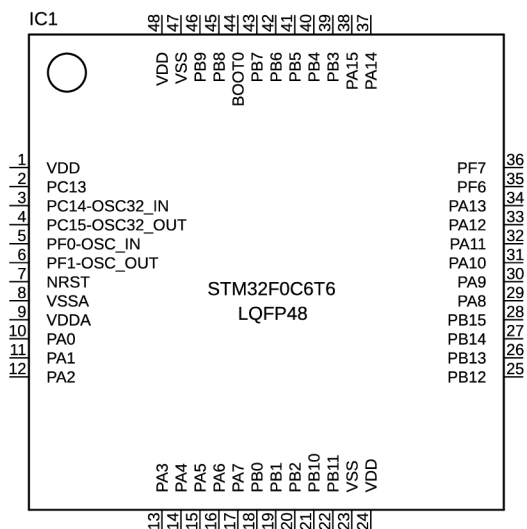
Pro převod z TTL logiky na RS-232 je nutno použít převodník úrovní. V této aplikaci je použit převodník od firmy Maxim obvod MAX232. Jeho zapojení je na následujícím obrázku 2.2. Obsahuje dvakrát převodník z TTL na RS-232 a dvakrát převodník z RS-232 na TTL. Funkce spočívá v použití nábojové pumpy, díky čemuž mu stačí napájení $+5\text{ V}$. Pro správnou funkci je kromě napájení potřeba zapojit několik externích kondenzátorů právě pro nábojovou pumpu.

Jelikož na dnešních počítačích se sériový port již běžně nevyskytuje, je využíván převodník USB/RS232. Použití převodníků může způsobit vyšší odezvy na lince, což může některým aplikacím činit problémy, ale pro naše využití, tj. posílání údaje o změřené teplotě na zobrazovací zařízení to nezpůsobuje žádné nedostatky.



Obrázek 2.2 Zapojení převodníku úrovní MAX232

Použitý mikrokontrolér STM32F030C6T6 je jeden z nejzákladnějších ARM procesorů od firmy STMicroelectronics. Obsahuje 32-bitové jádro Cortex-M0 s redukovanou instrukční sadou. Pracuje na kmitočtu až 48 MHz, obsahuje 32 kB paměti a je dodáván v LQFP pouzdře se 48 vývody. Obsahuje periferie jako SPI, I2C a USART. Jeden AD převodník a pět univerzálních časovačů. Široký rozsah teplot od -40 do +85 °C a možnost napájení od 2,4 V do 3,6 V jsou pro naši aplikaci velice výhodné. Přestože se jedná o jednoduchý procesor, je naprosto dostačující a díky svému malému výkonu má také malou spotřebu.

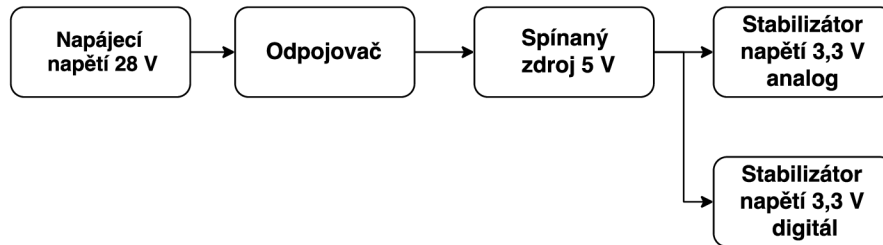


Obrázek 2.3 Rozložení pinů na použitém procesoru STM32F030C6T6

2.3 Zdroje napětí

Pro správnou funkci všech obvodů a celého zapojení je zapotřebí zajistit konstantní zdroj požadovaného napětí. Zařízení bude napájeno z letadlové sítě 28 V, na které mohou nastat při výjimečných situacích výkyvy, nebo špičky. Dále je požadováno dvojí napětí, 5 V pro nábojovou pumpu převodníku úrovní MAX232 a 3,3 V pro AD převodník a

mikroprocesor. Byl tedy využit spínaný zdroj na 5 V a další snížení tohoto napětí pomocí pevných stabilizátorů na 3,3 V, dle následujícího blokového schématu na obr. 2.4. Dále je zapojen odpojovač vysokého napětí, který odpojí zařízení od napájení v případě dlouho trvajícího přepětí na letadlové síti nebo vysokého proudového odběru.



Obrázek 2.4 Blokové schéma napájení

2.3.1 Odpojovač vysokého napětí s proudovým omezovačem

Odpojovač slouží jako ochrana proti přepětí v napájecí síti. Vybraný obvod LT4363 odolává napěťovým špičkám větším než 100 V. Pracovní napětí je v rozsahu 4 V až 80 V. Princip spočívá v odpojení napájecí větve při dlouhodobém překročení zvoleného napětí, pro naši aplikaci s ohledem na možné napájecí výkyvy bylo zvoleno napětí 60 V. Při krátkých špičkových přepětích dochází k regulaci výstupního napětí pomocí externího MOSFET tranzistoru, který zajistí limitaci výstupního napětí na bezpečnou hodnotu, což umožní pokračovat ve funkci dalším obvodům bez výpadku napájení. Za normálních podmínek je tranzistor plně otevřený a dochází na něm jen k minimálnímu úbytku napětí. Pokud je napájecí napětí příliš vysoké, zareagují vnitřní obvody a pin gate řídicí tranzistor, který reguluje napětí na výstupu. V tomto případě se začne nabíjet kondenzátor na pinu TMR zapojeném proti zemi. Pokud napětí na TMR dosáhne hodnoty 1,275 V, pin FLT signalizuje blížící se vypnutí v důsledku přepětí. Tranzistor však zůstává sepnutý až do hodnoty 1,375 na pinu TMR. V tomto okamžiku dojde k odpojení napájecí větve od tranzistoru. Další výhodou je rychlý proudový omezovač, který reaguje za méně než 5 μ s. Výstupní proud se snímá přes rezistor umístěný mezi piny SNS a OUT. Při překročení nastaveného proudu dojde k jeho omezení pomocí regulace tranzistoru. V naší aplikaci je nastaven omezovač na proud 0,5 A pomocí rezistoru R_{22} .

$$R_{22} = \frac{50 \text{ mV}}{I_{LIM}} = \frac{50 \text{ mV}}{0,5} = 0,1 \Omega \quad (2.1)$$

Funkce je zde opět obdobná, jako při regulaci napětí. Při krátkém vyšším proudovém odběru dojde pouze k omezení a pokud je tato doba vyšší než nastavená pomocí nabíjecího kondenzátoru na pinu TMR, tak dojde k úplnému odpojení. Obvod zastává také ochranu proti přepólování až do napětí -60 V.

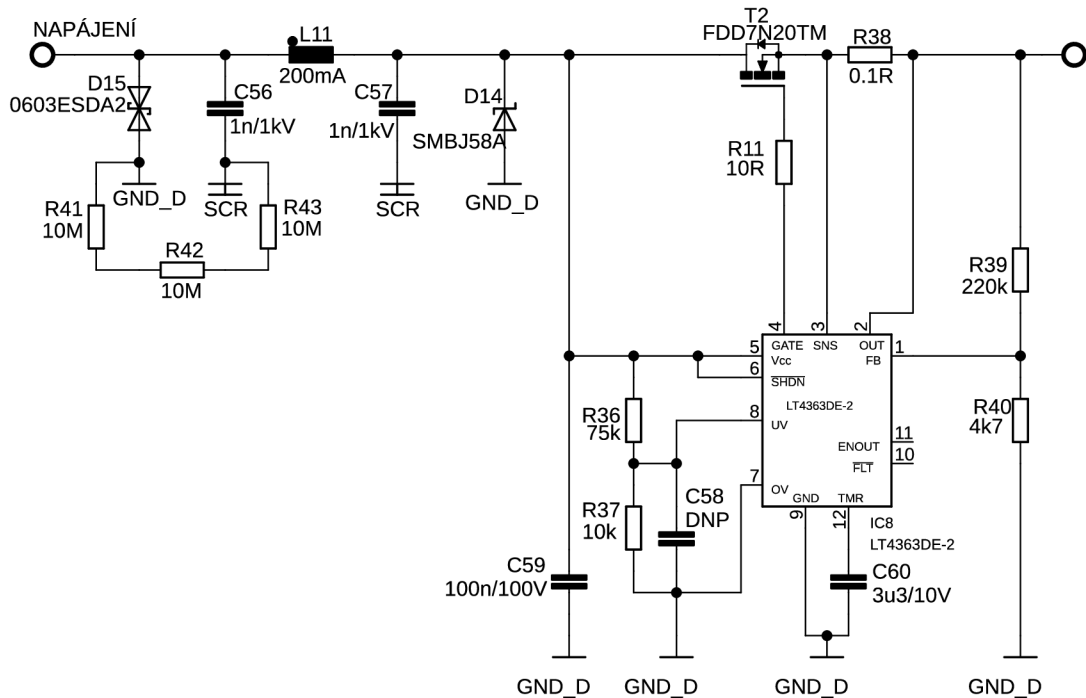
Velikost napětí, při kterém dojde k odpojení je dána odporovým děličem R_{27} , R_{30} . Výpočet je následující: odpor R_{30} byl zvolen 4,7 k Ω a druhý odpor byl dopočítán podle následujícího vztahu

$$R_{27} = \frac{(U_{OUTmax} - 1,275) \cdot R_{30}}{1,275} = \frac{(60 - 1,275) \cdot 4700}{1,275} = 216 \text{ k}\Omega \quad (2.2)$$

Byl zvolen odpor z řady a $R_{27} = 220 \text{ k}\Omega$. Dále pro ověření správnosti děliče při maximálním napětí na výstupu 60 V má vycházet napětí na pinu FB 1,275V.

$$U_{FB} = U_{OUTmax} \cdot \frac{R_{30}}{R_{27} + R_{30}} = 60 \cdot \frac{4700}{220\,000 + 4700} = 1,255 \text{ V} \quad (2.3)$$

Vypočtená hodnota téměř odpovídá a kontrola tedy vychází.



Obrázek 2.5 zapojení omezovače napětí s obvodem LT4363

Dále je možné si ve schématu všimnout filtru na vstupu. Tento zabraňuje pronikání přechodných dějů, elektrostatických výbojů a rušení dále do obvodu. Je složen ze speciální ochranné diody, filtračních kondenzátorů, feritové perly a transilu. Jejich funkce bude popsána dále v textu v kapitole 2.4. Standardní v tomto případě digitální zem je označena zkratkou GND_D. Ve schématu je také zem označená SCR, jedná se o VF zem spojenou s hliníkovou krabičkou a drakem letadla. Obě země jsou navzájem propojeny třemi 10 M Ω odpory z důvodu bezpečnosti.

2.3.2 Spínaný zdroj 5 V

Použitý obvod LT8620 od firmy Linear Technology je snižující spínaný zdroj, dosahující vysoké účinnosti až 94 % při proudu do 1 A. Široký rozsah vstupního napětí od 3,4 V do 65 V předurčuje tento obvod pro široké spektrum aplikací v různých odvětvích, od automobilového průmyslu až po letecké aplikace. Zvlnění výstupního napětí je menší než 10 mV_{P-P}. Integrovaný obvod obsahuje většinu důležitých obvodů a díky tomu je potřeba minimum externích součástek.

Zvolené výstupní napětí je 5 V, jež se nastavuje děličem napětí R_{28} , R_{34} . Rezistor R_{28} byl zvolen 1 M Ω a druhý z děliče dopočítán dle následujícího vztahu.

$$R_{34} = \frac{R_{28}}{\frac{V_{OUT}}{0,970} - 1} = \frac{1M}{\frac{5}{0,970} - 1} = 240 \text{ k}\Omega \quad (2.4)$$

Rozsah vstupního napětí je od 5,65 V do 65 V. Horní rozsah je dán schopností integrovaného obvodu a jelikož se jedná o snižující měnič, tak spodní hranice musí být logicky větší, než zmiňovaných 5 V. Tato hranice se dá vypočítat dle vztahu z dokumentace výrobce a je následující.

$$V_{INmin} = \frac{V_{OUT} + V_{SW(BOT)}}{1 - f_{SW} \cdot t_{OFF(MIN)}} - V_{SW(BOT)} + V_{SW(TOP)} = \frac{5 + 0,15}{1 - 0,7M \cdot 90n} - 0,15 + 0,3 = 5,65 \text{ V} \quad (2.5)$$

Dalším volitelným parametrem je spínací frekvence, která je u tohoto obvodu od 200 kHz do 2,2 MHz. Byla zvolena frekvence $f_{SW} = 0,7 \text{ MHz}$, na kterou by neměli být citlivé ostatní obvody v zapojení a ani další avionika letadla. Tento kmitočet udává rezistor R_{33} , zapojený mezi svorky RT a GND.

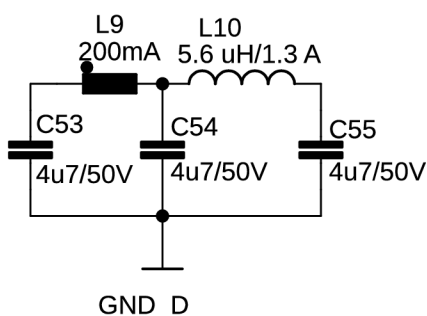
$$R_{33} = \frac{46,5}{f_{SW}} - 5,2 = \frac{46,5}{0,7} - 5,2 = 61,2 \text{ k}\Omega \quad (2.6)$$

Byla zvolena hodnota $R_{33} = 62 \text{ k}\Omega$. Posledním parametrem, který je potřeba dopočítat je cívka na výstupu L_8 . Ta je dána následujícím vztahem a je ovlivňována výstupním napětím a spínací frekvencí.

$$L_8 = \frac{V_{OUT} + V_{SW(BOT)}}{f_{SW}} = \frac{5 + 0,15}{0,7} = 7,35 \text{ }\mu\text{H} \quad (2.7)$$

Bylo zvolena nejbližší hodnota z řady a $L_8 = 8,2 \text{ }\mu\text{H}$.

Na samotném vstupu obvodu je zařazen odrušovací EMI filtr, který má odstranit šíření elektromagnetického rušení dále do obvodu vlivem elektromagnetické vazby. Mezní frekvenci filtru lze spočítat dle známého Thomsonova vztahu jako



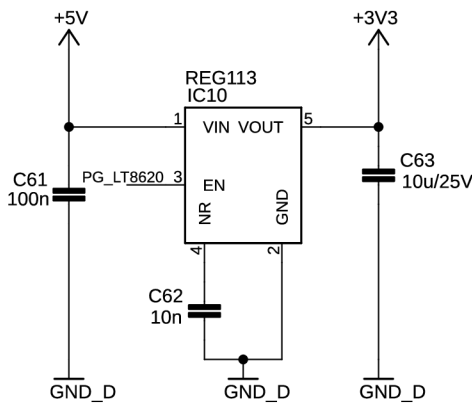
Obrázek 2.6 Zapojení odrušovacího filtru

$$f_m = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{4,7 \mu \cdot 5,6 \mu}} = 31,02 \text{ kHz} \quad (2.8)$$

2.3.3 Lineární stabilizátor 3,3 V

Obvody jako AD převodník a procesor vyžadují napájení 3,3 V. Navíc pro AD převod je potřeba analogové napětí. Oproti tomu procesor vyžaduje napájení digitální. Proto jsou využity dva stabilizátory na 3,3 V ze spínaného zdroje na 5 V.

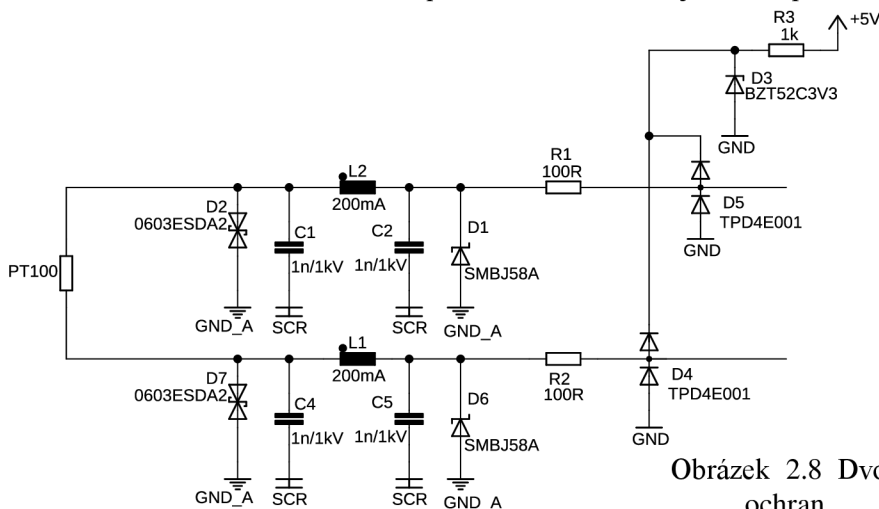
Zapojení obsahuje stabilizátory REG113 od firmy Texas Instruments. Tyto mají pevně nastavené výstupní napětí bez možnosti regulace. Jsou schopny dodávat proud až 400 mA. Dodatečné připojení kondenzátorů na vstup a výstup není pro lepší stabilitu vyžadováno, přesto byly kapacitory využity. Stejně jako spínaný zdroj i tento lineární stabilizátor je určen pro práci v rozmezí teplot od -40 do 85 °C, což je nezbytné pro správnou funkci v naší aplikaci.



Obrázek 2.7 Zapojení lineárního stabilizátoru napětí

2.4 Ochranné obvody

Aby byly splněny požadavky zadání a zařízení bylo odolné vůči napěťovým jehlovým impulsům a přechodovým jevům způsobenými blesky, bylo nutné navrhnout řešení, které zajistí ochranu obvodu proti zmíněným jevům. Bylo využito dvoustupňové ochrany, transilů a ochranných diod. Jelikož se jedná o polovodičové součástky, dochází při zapojení podle obrázku 2.8 k nežádoucímu jevu, kterým jsou svodové proudy. Tyto proudy mají negativní vliv na přesnost měření a zanáší do měření chyby. Této problematice bude také věnována pozornost v následujících kapitolách.



Obrázek 2.8 Dvoustupňové zapojení ochrany

2.4.1 Dvoustupňové zapojení ochran

Jak bylo uvedeno výše, zařízení musí odolat napětovým jehlovým impulzům až do velikosti 600 V. Z tohoto důvodu jsou na vstupu napájení a před piny převodníku, na které vede čidlo PT100, připojeny paralelně transily SMBJ58A, jež tyto jehlové impulzy odstraní. Zmíněné transily zvládají odolat napětovým impulzům o výkonu až 600 W.

Podle normy může dojít na napájení k přepětí až na 60 V, proto jsou transily vybrány tak, aby spínaly až od tohoto napětí. Princip jejich funkce spočívá v tom, pokud přijde přepětový impulz větší než zmíněných 60 V, dojde přes polovodičovou diodu k sepnutí této špičky na zem a tím je zařízení ochráněno. Jako druhý stupeň jsou zapojeny ochranné diody, které zajistí odstranění impulzů, jež proniknou přes první stupeň ochrany. Princip je podobný jako u transilů, ale vybrané diody potřebují napájení. Případný záporný impuls je přímo uzemněn, pokud jde o kladný impuls, je přes zenerovu diodu opět přiveden na zem.

Na vstupu je zapojena ESD dioda, která má zabránit pronikání vysokofrekvenčního rušení do obvodu po napájecím vedení a ze snímače PT100. Dva filtrační kondenzátory jsou dimenzovány pro všechny případy na napětí až 1kV. Mezi nimi je feritový korálek, který slouží také k odstranění rušení. Kondenzátory nějaké rušení vyhladí, ale ne všechno, proto je třeba mezi ně vložit malou cívku, která bude mít na vyšších kmitočtech impedanci zhruba stovky ohmů až několik kilo ohmů a velké ztráty. Proto je použit vhodný feritový materiál, aby se rušení nevyžářilo, ale ztratilo v jádře.

2.4.2 Výběr transilů

Byly zvoleny 58V transily z důvodu napájecích špiček až 60 V, které mohou nastat, a proto musí dojít ke spínání až od tohoto napětí. Výběr byl zvolen s ohledem na možné typy vln popsané v kapitole 1.2.8, na které má být zařízení testováno. Výrobce transilů udává proudy, které snesou pro vlnu typu 10/1000 μ s, avšak požadavky dané normou jsou pro jiné testovací vlny. Proto je potřeba přepočítat jaké proudy jsou transily schopné vydržet bez poškození. Bylo využito návrhové poznámky firmy Microsemi [7], která udává způsob výpočtu maximální hodnoty špičkových proudů pro vlny typu 3 a 4 pro úder do pinů, kterým jsou transily schopné odolat.

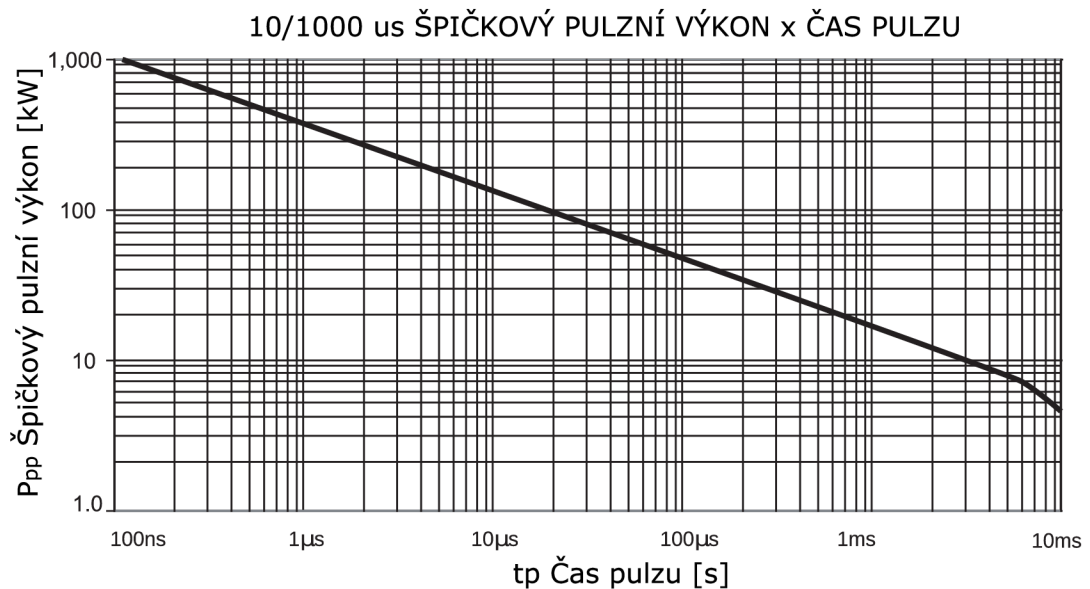
Výpočet je následující:

$$I_{P_{WAVEFORM3}} = \frac{P_p}{P_{pp}} \cdot I_{pp} = \frac{170}{15} \cdot 6,7 = 75,93 \text{ A} \quad (2.9)$$

$$I_{P_{WAVEFORM4}} = \frac{P_p}{P_{pp}} \cdot I_{pp} = \frac{50}{15} \cdot 6,7 = 22,33 \text{ A} \quad (2.10)$$

kde $I_{P_{WAVEFORM3}}$ a $I_{P_{WAVEFORM4}}$ jsou špičkové proudy pro zvolené typy vln, P_p špičkový impulzní výkon odečten z grafu na obrázku 2.9, doba trvání pulzu 5 μ s pro vlnu typu 3 a doba 69 μ s pro vlnu typu 4, respektive 83 μ s, jelikož je možná odchylka $\pm 20\%$, P_{pp} maximální výkon impulzu, dle návrhové poznámky je graf níže přepočten pro výkon 15 kW a I_{pp} je špičkový proud vybraného transilu z dokumentace (SMBJ58A). Pro typ

vlny 3 vychází maximální špičkový proud 75,93 A a pro typ vlny 4 je to 22,33 A. Proud I_{pp} je udán výrobcem pro dobu trvání 10/1000 μ s. Proudů pro vlnu typu 3 a 4 jsou omezeny na kratší dobu. Konkrétně u vlny typu 3 je to 5 μ s a pro vlnu typu 4 je to 6,4/69 μ s. Na obrázku 2.9 je znázorněn graf, podle kterého se provádí přepočet pro zvolené typy vln. Podle aplikační poznámky je graf platný pro všechny TVS s rozsahem výkonu od 400 W až do 30 kW.



Obrázek 2.9 Graf přepočtu proudu transilu pro vlnu typu 3 [7]

Dále je možné provést výpočet, jak velké budou maximální testovací špičkové proudy ze zkuškového generátoru. Výpočet musí být samotný pro každý typ vlny a zvolený stupeň testování.

Nejdříve pro vlnu typu 3: určíme odpor generátoru z požadavku na napěťovou a proudovou vlnu.

$$Z_S = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} = \frac{250}{10} = 25\Omega \quad (2.11)$$

Kde Z_S je impedance generátoru (source impedance), V_{OC} je napětí naprázdno (open circuit voltage) a I_{SC} je zkratový proud (short circuit current). Potom je možné určit maximální špičkový proud.

$$I_p = \frac{(V_{OC} - V_C)}{Z_S} = \frac{(250 - 60)}{25} = 7,6 A \quad (2.12)$$

Kde I_p je maximální špičkový proud z generátoru pro daný typ vlny a V_C je napětí na otevřeném transilu.

Nyní výpočet zopakujeme pro vlnu typu 4:

$$Z_S = \frac{V_{OC}}{I_{SC}} = \frac{125}{25} = 5\Omega \quad (2.13)$$

$$I_p = \frac{(V_{oc} - V_C)}{Z_S} = \frac{(125 - 60)}{5} = 13,0 \text{ A} \quad (2.14)$$

Z výpočtu je patrné, že vybrané transily splňují odolnost na špičkové proudy s rezervou, a proto by při výboji měly zařízení ochránit a zajistit tak jeho správnou funkci i v případě úderu blesku, nebo jiného jevu, kdy dojde k přepětí. Tabulka 2.1 shrnuje provedené výpočty a požadavky.

Tabulka 2.1 Souhrn výpočtů proudů pro transily a vlny typu 3,4

| Typ vlny | Proud TVS I_p [A] | Max. proud generátoru [A] |
|----------|---------------------|---------------------------|
| 3 | 75,93 | 7,6 |
| 4 | 22,33 | 13,0 |

2.4.3 Problematika svodových proudů

Měření teploty s odporovým teplotním čidlem je možno provádět dvou, tří, nebo čtyřvodičově, jak bylo uvedeno výše. Při dvouvodičovém zapojení je použito méně vodičů, což může být výhodou. Také je potřebný jen jeden zdroj proudu. Pro třívodičové zapojení jsou nutné dva zdroje proudu, které se po průchodu snímacím odporem PT100 sečtou.

Zapojení čtyřvodičové je výhodné z několika hledisek. Postačuje jeden budící proud a patří mezi nejpresnější zapojení. Napětí na odporovém čidle je snímáno samostatnými vodiči a nedochází tak k uplatnění odporu přívodů budícího proudu.

Již malá změna budícího proudu má za následek chybu v měření teploty. Jelikož jsou na zařízení kladeny nároky podle letecké normy RTCA DO-160G, zejména na ochranu proti napěťovým jehlovým impulzům a přechodovým jevům způsobenými blesky, bylo použito dvoustupňového zapojení ochran. Jako první ochrany bylo využito transilů a za druhou byly zvoleny ochranné diody od firmy Texas Instruments. Jelikož se jedná o polovodičové součástky, dochází při provozu k úniku svodových proudů. Tyto proudy jsou za normální teploty velmi malé, v řádu piko ampér až jednotek nano ampér. Při růstu teploty tyto proudy ovšem značně stoupají a mohly by negativně ovlivnit měření a zanechat do výsledku chybu. Proto bylo nutné vybrat takové součástky, u kterých budou svodové proudy co nejmenší. Výrobce uvádí tyto proudy jen pro teploty kolem 25 °C, a to i s rezervou. Proto byl vytvořen počítačový model, aby bylo možné určit, jak velké svodové proudy je možno akceptovat, aby byla splněna přesnost měření. Následně bylo provedeno experimentální měření součástek, na kterém byla ověřena velikost svodových proudů v závislosti na teplotě.

2.4.4 Chybový model svodových proudů

Aby bylo možné analyzovat působení svodových proudů na správné měření teploty, byl vytvořen v programu PSpice chybový model, ve kterém jsou znázorněny všechny součástky ze schématu, jimiž bude protékat budící proud senzoru PT100. Do jednotlivých

uzlů je postupně připojován zdroj proudu jako simulace svodového proudu a s daným krokem se mění jeho velikost. Není nutné připojit zdroj proudu do všech dvanácti uzlů najednou, jelikož výsledný svodový proud vznikne jejich superpozicí. Sleduje se, jak dojde k ovlivnění měřené teploty. V uzlech 6, 9, 11 a 12 působí parazitní vstupní proudy AD převodníku, které ovšem nemají na přesnost měření vliv. Dle tohoto modelu je možné určit, na kterém místě dojde k největšímu ovlivnění měření a jak velké svodové proudy již nejsou přípustné. Na obrázku 2.10 je schéma simulace z programu PSpice, ve kterém jsou označeny jednotlivé uzly. V tabulce 2.2 jsou zapsány závislosti odchylky teploty na velikosti svodových proudů v jednotlivých uzlech. Odchylka teploty se vypočítá ze známé rovnice:

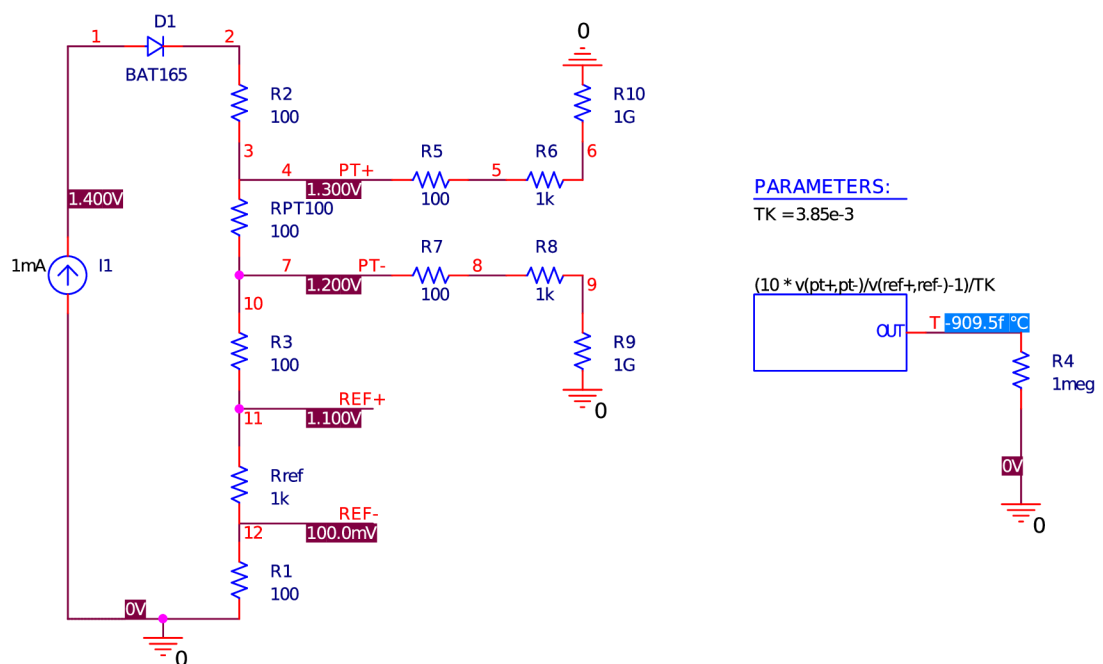
$$R_x = R_0 \cdot [1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (2.15)$$

kde R_x představuje neznámý odpor při teplotě ϑ , R_0 je odpor při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$ a α je teplotní součinitel.

Pro čidlo PT100, jehož snímací rezistor je tvořen z platiny, jsou hodnoty následující:

$R_0 = 100\Omega$... odpor při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$

$\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$... teplotní součinitel platiny



Obrázek 2.10 Schéma simulace z programu PSpice

Určování odchylky je následovné: z rovnice 2.16 se vyjádří teplota a podle napětí na odporech PT100 a R_{REF} se počítá odchylka. Ideálně pro nulové svodové proudy by měl model ukazovat $0\text{ }^\circ\text{C}$, ale ukazuje stovky femto stupňů, což je naprosto zanedbatelné. Při budícím proudu 1 mA je na odporu PT100 úbytek napětí 0,1 V a na R_{REF} 1 V. Při působení svodových proudů se potom podle uzlu zapojení mění úbytek napětí na rezistorech a díky tomu se dá spočítat, jak velkou chybu měření teploty způsobí.

$$T = \frac{R_{PT100}}{100\Omega} - 1 \gg T = \frac{1000 \cdot \frac{V_{PT100}}{V_{RREF}} - 1}{TK} \quad (2.16)$$

Kde V_{PT100} je úbytek napětí na odporovém čidle a V_{RREF} je úbytek napětí na referenčním odporu. Pro nulové svodové proudy je výpočet následující a vychází přesně 0°C .

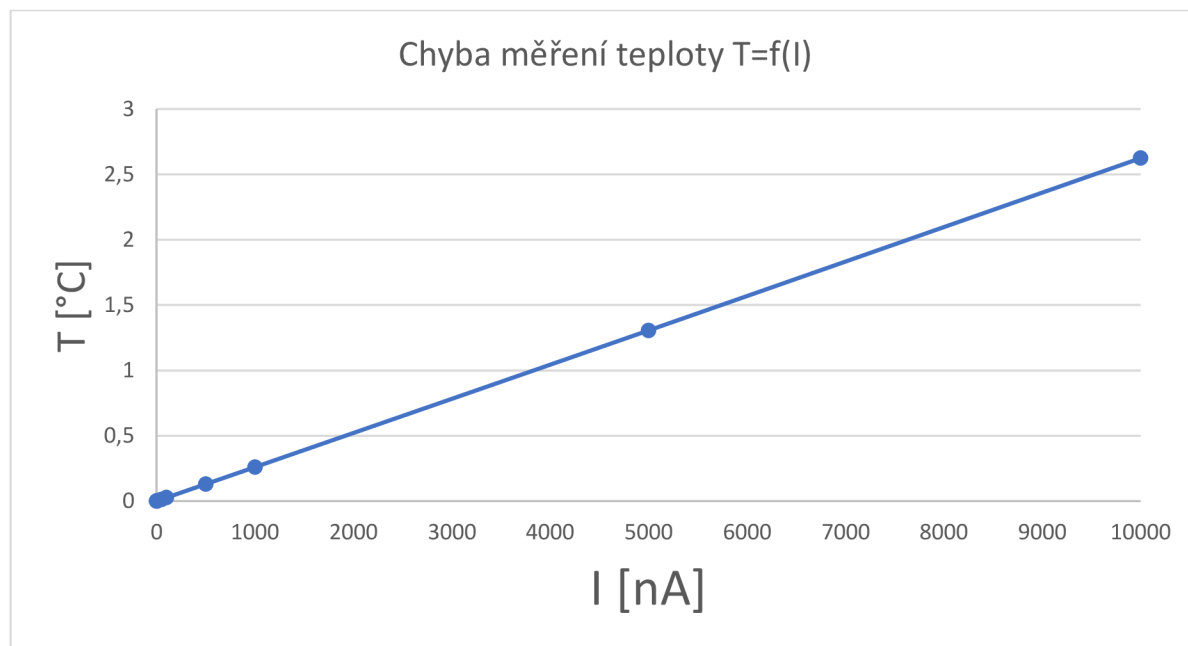
$$T = \frac{1000 \cdot \frac{V_{PT100}}{V_{RREF}} - 1}{TK} = \frac{1000 \cdot \frac{0,1}{1} - 1}{3,85e - 3} = 0^\circ\text{C} \quad (2.17)$$

Tabulka 2.2 Odchytky teploty v závislosti na velikosti svodových proudů

| Chybový model | Označení uzlů | | | | | |
|--|--|----------|----------|----------|----------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | Chyba měření teploty ve stupních pro svodový proud v nA $T = f(I)$ | | | | | |
| Svodový proud [nA] | T[°C] | T[°C] | T[°C] | T[°C] | T[°C] | T[°C] |
| 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 500 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Označení uzlů | | | | | |
| | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | Chyba měření teploty ve stupních pro svodový proud v nA $T = f(I)$ | | | | | |
| Svodový proud [nA] | T[°C] | T[°C] | T[°C] | T[°C] | T[°C] | T[°C] |
| 0,1 | 0,000286 | 0,000286 | 0,000286 | 0,000286 | 0,000286 | 0 |
| 1 | 0,000571 | 0,000571 | 0,000571 | 0,000571 | 0,000571 | 0 |
| 10 | 0,002909 | 0,002909 | 0,002909 | 0,002909 | 0,002909 | 0 |
| 50 | 0,0133 | 0,0133 | 0,0133 | 0,0133 | 0,0133 | 0 |
| 100 | 0,02629 | 0,02629 | 0,02629 | 0,02629 | 0,02629 | 0 |
| 500 | 0,1302 | 0,1302 | 0,1302 | 0,1302 | 0,1302 | 0 |
| 1 000 | 0,2603 | 0,2603 | 0,2603 | 0,2603 | 0,2603 | 0 |
| 5000 | 1,306 | 1,306 | 1,306 | 1,306 | 1,306 | 0 |
| 10 000 | 2,624 | 2,624 | 2,624 | 2,624 | 2,624 | 0 |
| výsledná citlivost obvodu: 0,000263°C/nA | | | | | | |

Jak je vidět z tabulky 2.2, do proudu 100 nA je odchylka teploty minimální, avšak pro vyšší proudy již chyba stoupá. Proto bude brána hodnota svodových proudů kolem hodnoty 100 nA jako nejvyšší možná, aby byla zaručena dostatečná přesnost. Záleží však na místě, kde ke svodu dojde. Pokud se zapojí zdroj představující model svodového proudu do uzlu označeného čísly 1 až 6, tak měření teploty vůbec neovlivní. To je způsobeno tím, že stejný proud bude procházet jak snímačem teploty PT100, tak

referenčním odporem R_{REF} . Referenční odpor má hodnotu $1\text{ k}\Omega$ a procházejícím proudem se na něm vytváří úbytek napětí, které slouží jako referenční pro AD převodník. Změna proudu má za následek změnu napětí na obou odporech, ale jejich poměr bude stále stejný. Naopak pokud se zdroj svodového proudu zapojí za snímač PT100, přičte se tento proud k referenčnímu proudu a odporem R_{REF} bude procházet jiný proud než snímačem teploty, a to bude mít za následek chybný měřený údaj. Velikost chyby bude úměrná velikosti svodového proudu. Pokud by došlo ke svodu proudu v posledním uzlu 12, pak by tento proud neprocházet ani jedním ze zmíněných odporů a opět by to nemělo vliv na měření. Na obrázku 2.5 je graf znázorňující velikost odchylky teploty pro různé svodové proudy. Tato odchylka roste lineárně s velikostí proudu.

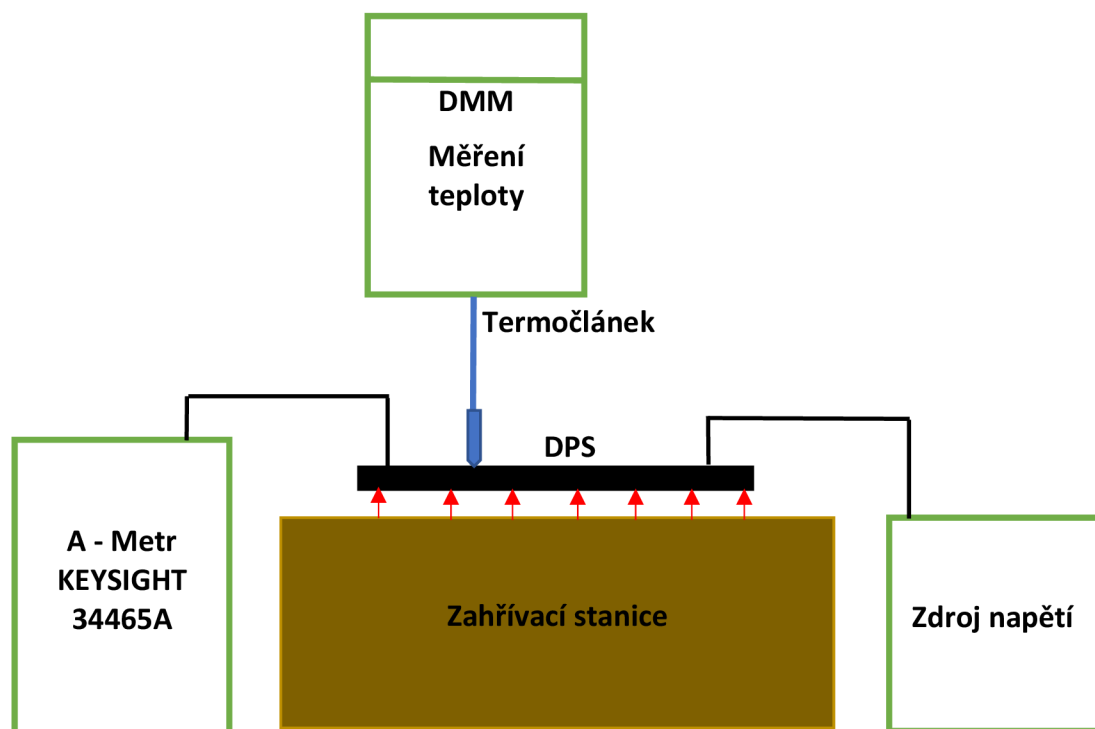


Obrázek 2.11 Graf znázorňující chybu měření teploty v závislosti na velikosti svodového proudu

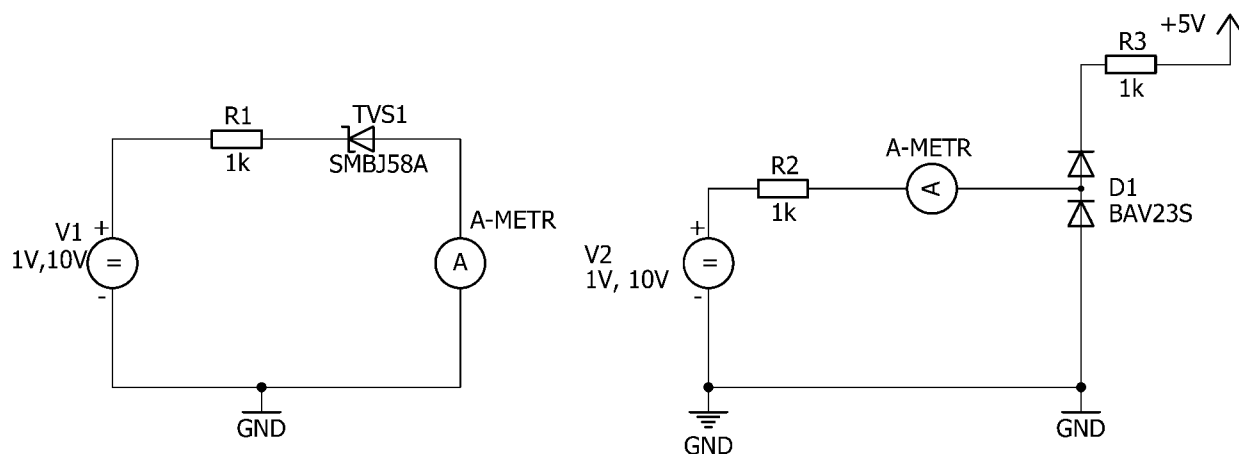
2.4.5 Měření svodových proudů

Měření bylo prokázáno, že stejná součástka od různých výrobců vykazuje značně rozdílné svodové proudy. Záleží zde na čistotě a kvalitě použitého polovodičového materiálu a na technologii výroby. Na obrázku 2.12 je znázorněno blokové schéma měřícího pracoviště a na obrázku 2.13 obvodové zapojení transilů a ochranných diod na DPS při měření těchto proudů. Měření probíhalo tak, že byla DPS umístěna nad zahřívací stanicí, aby byla rovnoměrně zahřívána celá plocha a došlo k zahřátí všech součástek na stejnou teplotu. Na desku byl umístěn termočlánekový snímač teploty, která se zobrazovala na digitálním multimetru. Pomocí napěťového zdroje o konstantním napětí 1 V a 10 V byly napájeny součástky. Měření proběhlo pro dvě velikosti napětí. Zapojením přesného multimetru KEYSIGHT 34465A byl měřen svodový proud při různých teplotách. Výsledky jsou shrnuty v tabulkách 2.3 a 2.4. Byly vybrány takové součástky, které vykazovaly nejmenší svodové proudy. Podařilo se najít transily, u nichž jsou svodové proudy pod půl nanoampéru v celém rozsahu teplot a napětí, což by mělo

ovlivnit přesnost jen minimálně.



Obrázek 2.12 Blokové schéma měření svodových proudů

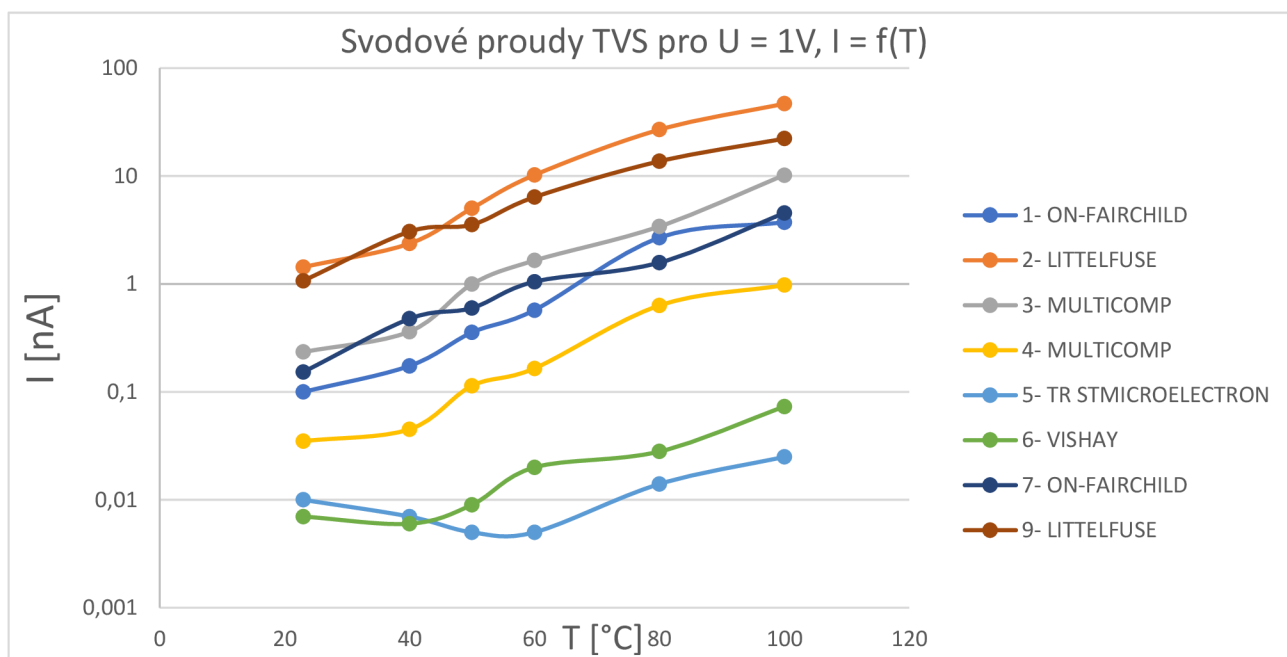


Obrázek 2.13 Zapojení TVS a ochranných diod na DPS

Tabulka 2.3 Výsledky měření TVS pro $U = 1V$

| | I [nA] | | | |
|--------|------------------------|---------------|--------------|--------------|
| | Označení a výrobce TVS | | | |
| T [°C] | 1- ON-FAIRCHILD | 2- LITTELFUSE | 3- MULTICOMP | 4- MULTICOMP |
| 23 | 0,1 | 1,434 | 0,234 | 0,035 |
| 40 | 0,174 | 2,367 | 0,362 | 0,045 |
| 50 | 0,356 | 5,035 | 0,996 | 0,114 |
| 60 | 0,572 | 10,22 | 1,65 | 0,165 |
| 80 | 2,683 | 26,89 | 3,41 | 0,632 |
| 100 | 3,736 | 46,808 | 10,196 | 0,976 |

| | I [nA] | | | |
|--------|------------------------|-----------|-----------------|---------------|
| | Označení a výrobce TVS | | | |
| T [°C] | 5- TR STMICROELECTRON | 6- VISHAY | 7- ON-FAIRCHILD | 9- LITTELFUSE |
| 23 | 0,01 | 0,007 | 0,153 | 1,071 |
| 40 | 0,007 | 0,006 | 0,476 | 3,056 |
| 50 | 0,005 | 0,009 | 0,599 | 3,546 |
| 60 | 0,005 | 0,02 | 1,05 | 6,38 |
| 80 | 0,014 | 0,028 | 1,577 | 13,7 |
| 100 | 0,025 | 0,073 | 4,532 | 22,23 |

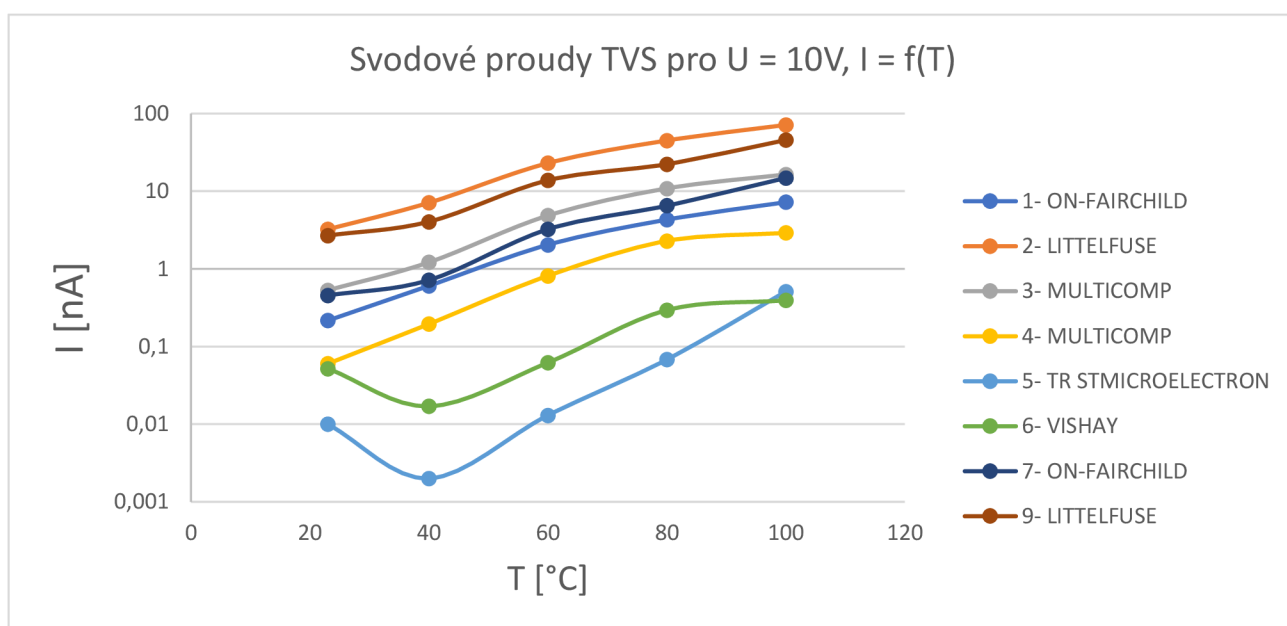


Obrázek 2.14 Graf výsledku měření svodových proudů TVS pro $U = 1V$

Tabulka 2.4 Výsledky měření TVS pro $U = 10V$

| | | I[nA] | | | |
|--------|-----------------|------------------------|--------------|--------------|--|
| | | Označení a výrobce TVS | | | |
| T [°C] | 1- ON-FAIRCHILD | 2- LITTELFUSE | 3- MULTICOMP | 4- MULTICOMP | |
| 23 | 0,216 | 3,23 | 0,53 | 0,06 | |
| 40 | 0,605 | 7,104 | 1,215 | 0,195 | |
| 60 | 2,042 | 22,995 | 4,856 | 0,814 | |
| 80 | 4,302 | 44,977 | 10,857 | 2,289 | |
| 100 | 7,236 | 71,501 | 16,457 | 2,917 | |

| | | I[nA] | | | |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------|---------------|--|
| | | Označení a výrobce TVS | | | |
| T [°C] | 5- TR STMICROELECTRON | 6- VISHAY | 7- ON-FAIRCHILD | 9- LITTELFUSE | |
| 23 | 0,01 | 0,052 | 0,456 | 2,688 | |
| 40 | 0,002 | 0,017 | 0,716 | 4,045 | |
| 60 | 0,013 | 0,062 | 3,236 | 13,807 | |
| 80 | 0,068 | 0,294 | 6,508 | 22,301 | |
| 100 | 0,51 | 0,394 | 14,79 | 45,501 | |



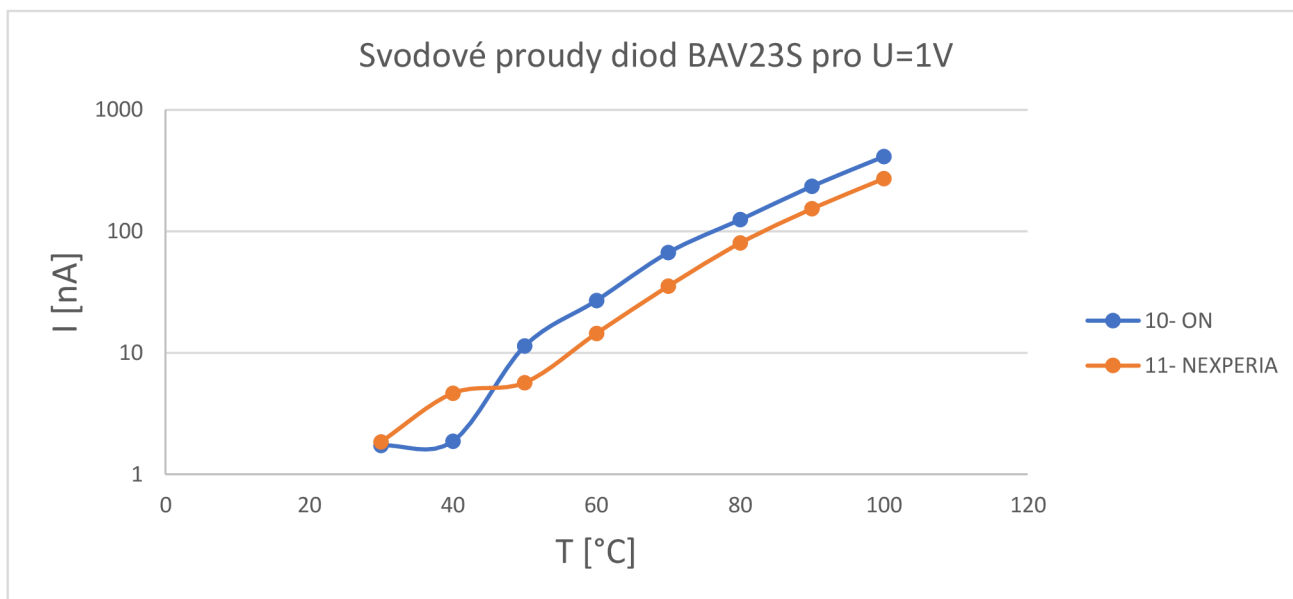
Obrázek 2.15 Graf výsledku měření svodových proudů TVS pro $U = 10V$

Jako ochranné diody byly uvažovány diody BAV23S a TPD4E001. U diod TPD4E001 od firmy Texas Instruments uvádí výrobce maximální svodový proud do 1 nA v celém rozsahu teplot, tj. od -40 do 85 °C. Avšak takový proud měřením nebyl potvrzen, jelikož proud byl téměř neměřitelný. Těchto výsledků bylo dosaženo integrací čtyř dvojic diod na jednom čipu, čímž jsou proudy vykompenzovány. Naopak u diod BAV23S jsou proudy příliš vysoké, pro teploty kolem 50 °C již dosahují 50 nA a s teplotou dále výrazně rostou. Výsledky naměřených hodnot jsou zaneseny v tabulce

2.5 a zpravovány v grafu na obrázku 2.16. Ve výsledném zapojení budou tedy použity diody TPD4E001. Navíc v pouzdře s ochrannými diodami od TI je zapojen na napájecí piny také jeden transil, který slouží k ochraně proti přepětí. Tabulka 2.6 a graf na obrázku 2.17 zobrazují jeho VA charakteristiku.

Tabulka 2.5 Výsledky měření svodových proudů pro diod BAV23S pro $U = 1V$

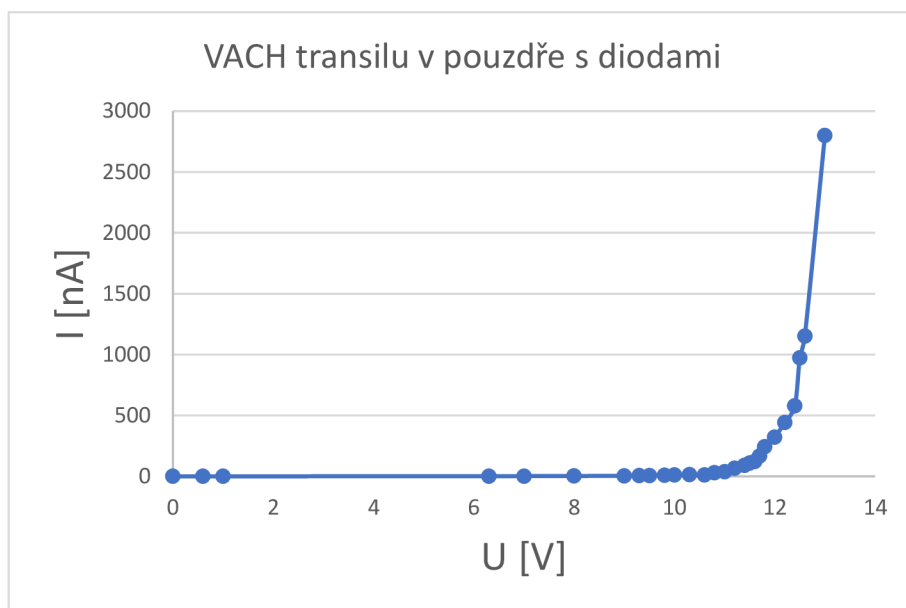
| T [°C] | I [nA] | |
|--------|-------------------------|--------------|
| | Označení a výrobce Diod | |
| | 10- ON | 11- NEXPERIA |
| 30 | 1,73 | 1,85 |
| 40 | 1,87 | 4,65 |
| 50 | 11,37 | 5,68 |
| 60 | 26,97 | 14,47 |
| 70 | 66,94 | 35,41 |
| 80 | 124,78 | 80,2 |
| 90 | 234,99 | 153,52 |
| 100 | 412,87 | 271,56 |



Obrázek 2.16 Graf měření svodových proudů diod BAV23S pro $U = 1V$

Tabulka 2.6 Výsledky měření transilu v pouzdře s diodami TPD4E001

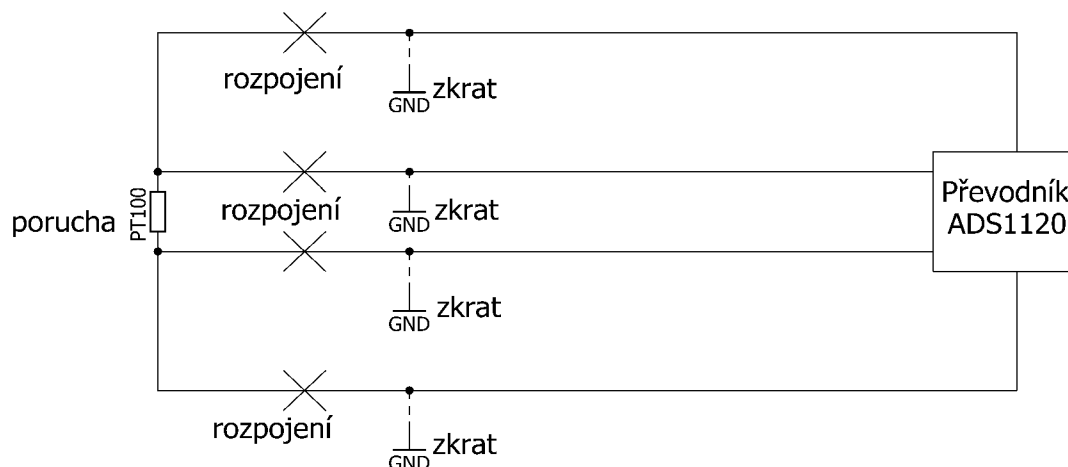
| U [V] | I [nA] |
|-------|--------|
| 0 | 0 |
| 0,6 | 0,1 |
| 1 | 0,1 |
| 6,3 | 1,53 |
| 7 | 2,07 |
| 8 | 2,86 |
| 9 | 4,74 |
| 9,3 | 6,2 |
| 9,5 | 6,56 |
| 9,8 | 8,52 |
| 10 | 11 |
| 10,3 | 13,5 |
| 10,6 | 10,4 |
| 10,8 | 29 |
| 11 | 37,8 |
| 11,2 | 66 |
| 11,4 | 89 |
| 11,5 | 109 |
| 11,6 | 121 |
| 11,7 | 166 |
| 11,8 | 243 |
| 12 | 322 |
| 12,2 | 442 |
| 12,4 | 578 |
| 12,5 | 973 |
| 12,6 | 1153 |
| 13 | 2800 |



Obrázek 2.17 Graf VACH transilu v pouzdře s diodami TPD4E001

2.5 Detekce poruchy

V případě poruchy může dojít k několika stavům, což je naznačeno na principiálním schématu na obrázku 2.18. To znamená, že může dojít ke zkratu na zem, například ke spojení s kostrou krabičky, nebo k rozpojení některého z vodičů, který spojuje snímač PT100 a AD převodník. Při rozpojení některého vodiče bude měřený odpor nekonečný – při rozpojení vodiče uzavírajícího hlavní proudový okruh nebo dvojice vodičů měřících diferenční napětí na snímači PT100. Dále může dojít ke zkratu na kostru, v tom případě dojde ke spojení s nulovým potenciálem. Potom bude měřený odpor opět nekonečný, při zkratu vodiče uzavírajícího proudový okruh, nebo vyšší než očekávaný, jelikož se bude měřit proti zemi a nikoli diferenčně. Poslední možností je poškození snímače. V tom případě bude měřený odpor nedefinovaný. Z tohoto důvodu se měří taktéž hodnoty napětí na AD převodníku, aby mohla být vyhodnocena porucha.



Obrázek 2.18 Principiální schéma možných poruch

Vyhodnocení poruchy probíhá v mikroprocesoru, kde se změřená data zpracovávají. Dle měřicího rozsahu, který má být $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ je možné určit, jakých hodnot bude snímací odpor nabývat v krajních hodnotách. Zde je třeba vzít v úvahu toleranční výchylku proudu, která je až $\pm 6\%$ dle údajů výrobce. Je známo, že při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ má snímací odpor hodnotu přesně $100\ \Omega$. Potom je možné určit z rovnice 1.1 hodnotu odporu pro $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a z rovnice 1.2 pro teplotu $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výpočet je následovný

$$\begin{aligned}
 R = R - R \cdot 6\% &= & (2.18) \\
 &= R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C(\vartheta - 100)\vartheta^3] \\
 &\quad - R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C(\vartheta - 100)\vartheta^3] \cdot 6\% \\
 &= 100[1 + 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot (-50) + (-5,775 \cdot 10^{-7}) \cdot (-50)^2 \\
 &\quad + (-4,183 \cdot 10^{-12}) \cdot (-50 - 100) \cdot (-50)^3] \\
 &\quad - 100[1 + 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot (-50) + (-5,775 \cdot 10^{-7}) \cdot (-50)^2 \\
 &\quad + (-4,183 \cdot 10^{-12}) \cdot (-50 - 100) \cdot (-50)^3] \cdot 0,06 = 80,3063 - 4,8183 \\
 &= 75,4880\ \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R = R + R \cdot 6\% &= R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2) + R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2) \cdot 6\% & (2.19) \\
 &= 100 \cdot [1 + 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot (200) + (-5,775 \cdot 10^{-7}) \cdot (200)^2] \\
 &\quad + 100 \cdot [1 + 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot (200) + (-5,775 \cdot 10^{-7}) \cdot (200)^2] \cdot 0,06 \\
 &= 175,8560 + 10,5514 = 186,4074\ \Omega
 \end{aligned}$$

Nyní již je známo, jakých hodnot může odpor nabývat a může se přistoupit k vyhodnocení. Převodník ADS1120 je sice 16- ti bitový, ale umožňuje měřit jak kladné, tak záporné hodnoty, proto pro kladný rozsah má rozlišení pouze 15 bitů. Při plném rozsahu bude mít měřený vzorek hodnotu $2^{15} = 32\ 768$. Výpočet probíhá poměrově vůči přesnému referenčnímu odporu R_{REF} , jehož hodnota je přesně $1000\ \Omega$. Z rovnice 2.20 je možné spočítat rozsah hodnot vzorků, kterých může snímač PT100 pro zvolený rozsah nabývat.

$$R_{PT100} = \frac{R_{REF}}{2^{15}} \cdot \text{změřená hodnota} \Rightarrow \text{změřená hodnota} = \frac{R_{PT100} \cdot \text{zesílení} \cdot 2^{15}}{R_{REF}} \quad (2.20)$$

Pro záporné teploty dle rozsahu maximálně $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bude hodnota odporu snímače PT100 nabývat nejméně $75\ \Omega$ a změřená hodnota vzorku tedy bude

$$\text{změřená hodnota} = \frac{R_{PT100} \cdot \text{zesílení} \cdot 2^{15}}{R_{REF}} = \frac{75 \cdot 4 \cdot 2^{15}}{1000} = 9\ 830 \text{ vzorků} \quad (2.21)$$

Pro kladné hodnoty dle rozsahu maximálně $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bude hodnota odporu snímače nabývat nejvýše $187\ \Omega$ a změřená hodnota odporu bude tedy

$$\text{změřená hodnota} = \frac{R_{PT100} \cdot \text{zesílení} \cdot 2^{15}}{R_{REF}} = \frac{187 \cdot 4 \cdot 2^{15}}{1000} = 24\ 511 \text{ vzorků} \quad (2.22)$$

Vyhodnocení poruchy probíhá tedy tak, že se zjistí, zda se změřený vzorek pohybuje v daném rozmezí a pokud je mimo, tak se vyhodnotí porucha. Při rozpojení nebo zkratu je hodnota vzorku buď maximální $32\ 768$, nebo minimální $-32\ 768$. Na obrazovku počítače je vypsáno chybové hlášení a bliká červená dioda na DPS.

Pro ověření funkčnosti testování poruch jsou na desce rozmístěny testovací kolíky, jejichž spojením lze simulovat zkrat či rozpojení vodiče. Tato funkce byla ověřena a vše bezchybně funguje.

Samotné měření probíhá ve dvou cyklech. V prvním je měřena teplota a vyhodnocováno, zda nedošlo k rozpojení nebo zkratu a ve druhém cyklu jsou měřena kontrolní napětí. Měří se napětí $0,21\ \text{V}$ odvozené napěťovým děličem z napětí napájecího. Napětí $0,21\ \text{V}$ se měří proti napětí na referenčním odporu R_{REF} , které je bráno jako referenční pro AD převod při měření odporu snímače PT100. Důvodem tohoto kroku je ověřit funkčnost referenčního napětí, které má být na odporu R_{REF} při správné funkci $1\ \text{V}$. V dalším kroku se měří jednotlivá napětí na snímači PT100 proti zemi. Při započítání všech úbytku napětí na součástkách v cestě ke snímači teploty vychází napětí na vstupu převodníku $AIN0$ $1,22\ \text{V}$. Toto napětí má být konstantní a hlídá se jeho hodnota. Je stanovena odchylka, které může dosáhnout v závislosti na kolísání budícího proudu či výchylce teploty a v případě překročení dojde k výpisu varovného hlášení. Druhý konec snímače je připojen na vstup $AIN1$ a zde dochází ke změně napětí vlivem změny odporu při výchylce teploty. Je spočítán rozsah, jak se může napětí změnit pro teplotu od -50 do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při teplotě $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je odpor snímače $100\ \Omega$ a tomu odpovídá při budícím proudu $1\ \text{mA}$ úbytek napětí $0,1\ \text{V}$. Tedy na $AIN1$ bude měřeno napětí vůči zemi $1,32\ \text{V}$. Pro teplotu $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bude krajní hodnota napětí

$$U_{AIN1} = U_{AIN0} + R_{-50} \cdot (I_{BUD} \cdot 0,94\%) = 1,22 + 75 \cdot (0,001 \cdot 0,94) = 1,292\ \text{V} \quad (2.24)$$

a pro teplotu $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$U_{AIN1} = U_{AIN0} + R_{+200} \cdot (I_{BUD} \cdot 1,06\%) = 1,22 + 187 \cdot (0,001 \cdot 1,06) = 1,418 \quad (2.23)$$

Pokud opět dojde k překročení hlídaných hodnot, bude vypsáno varovné hlášení. Hlídá se také velikost napájecího napětí, které má být $3,3\ \text{V}$. Měří se i napětí externí reference na R_{REF} vůči interní referenci, která je $2,048\ \text{V}$. Hlídá se, aby bylo konstantní kolem $1\ \text{V}$ s ohledem na možné kolísání budícího proudu a teploty na DPS, která může také způsobit výchylku. Z tohoto důvodu je měřena teplota samotného AD převodníku, který má interní snímač teploty. Zde se dá s výhodou vyhodnocovat požadovaný teplotní rozsah -55 až $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při překročení vyslat upozornění. Po změření všech těchto hodnot a ověření správné bezporuchové funkce je opět přepnuto na měření teploty snímačem PT100. Tyto dva cykly se neustále opakují.

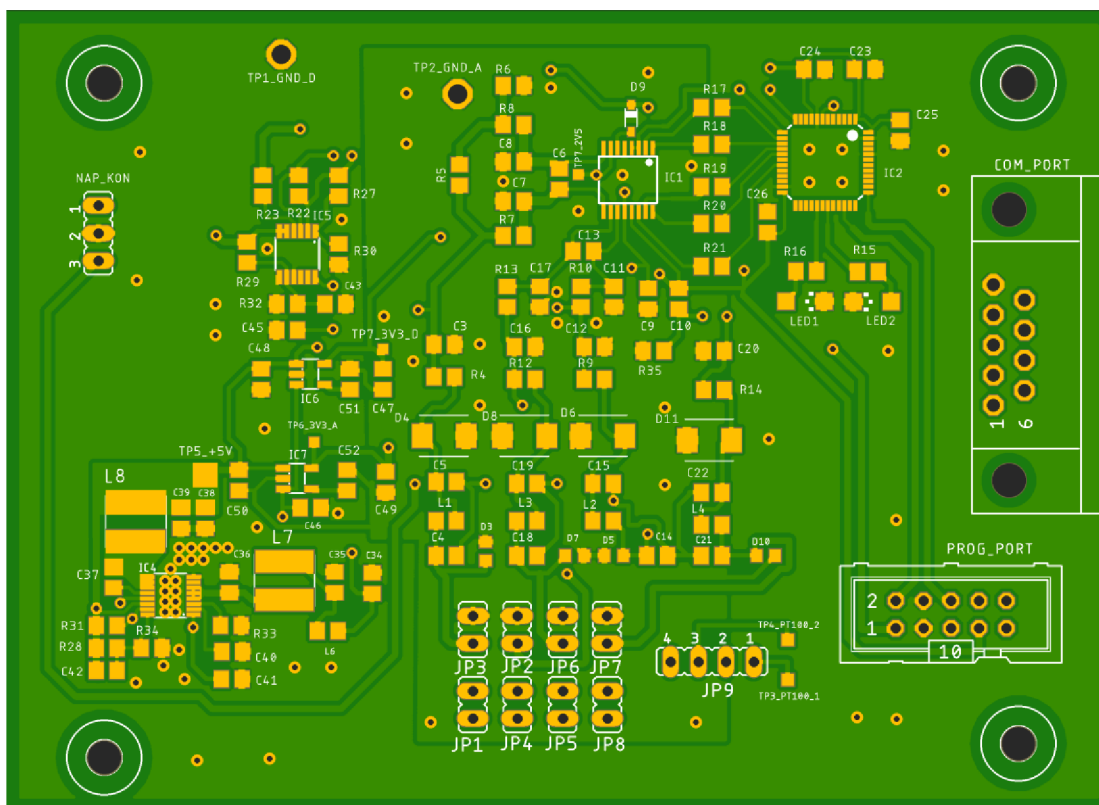
3 REALIZACE ZAŘÍZENÍ

Po navržení všech obvodových zapojení bylo potřeba přistoupit k návrhu desky plošných spojů. K tomuto účelu byl využit program Eagle od firmy Autodesk. Dále bylo potřeba napsat software pro AD převodník a mikroprocesor, které jsou v aplikaci obsaženy. K této práci byl použit návrhový systém firmy STMicroelectronics, STM32CubeMX, který podle zvolených funkcí a použitých periférií vygeneruje kostru kódu pro mikroprocesor STM32F030C6T6. K další úpravě a kompilaci byl používán program Keil uVision5, který slouží jako programovací prostředí.

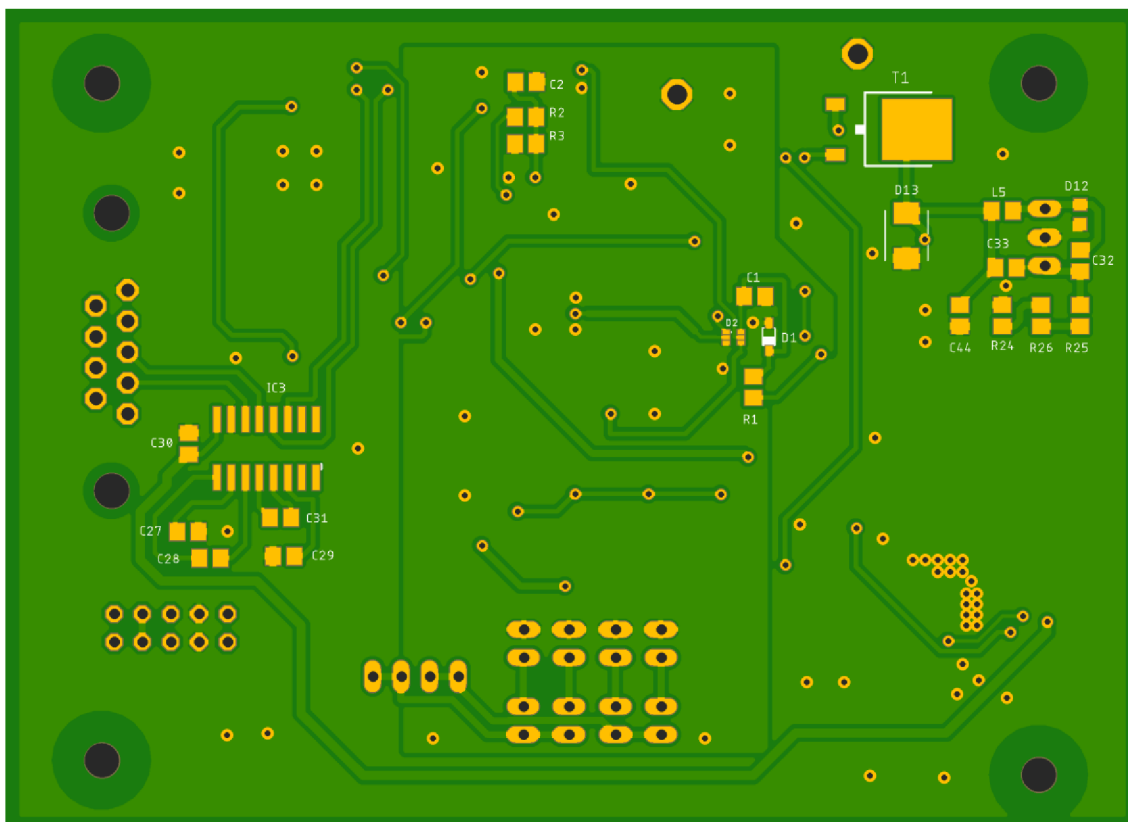
3.1 Návrh DPS

Deska plošných spojů je důležitým krokem v návrhu celého zařízení. Zajišťuje fyzické propojení všech předepsaných uzlů bez kolizí a křížení. Při realizaci je potřeba dodržet několik zásad, které zabezpečí funkčnost a předejdou problémům při ožívování zařízení. Jedná se o rozmístění součástek do funkčních celků, jako jsou zdroje 5 V a 3,3 V, AD převodník s ochranami, mikroprocesor a převodník úrovní MAX232. Tím se předejde vzájemnému ovlivňování a nežádoucím vazbám mezi jednotlivými obvody.

Deska byla realizována jako dvouvrstvá s tloušťkou mědi 35 μm a tloušťkou desky 1,5 mm. Návrh byl proveden v programu Eagle verze 8.7.1 a na obr. 3.1 a 3.2 je vizualizace výsledné desky.



Obrázek 3.1 Vizualizace horní strany desky plošných spojů

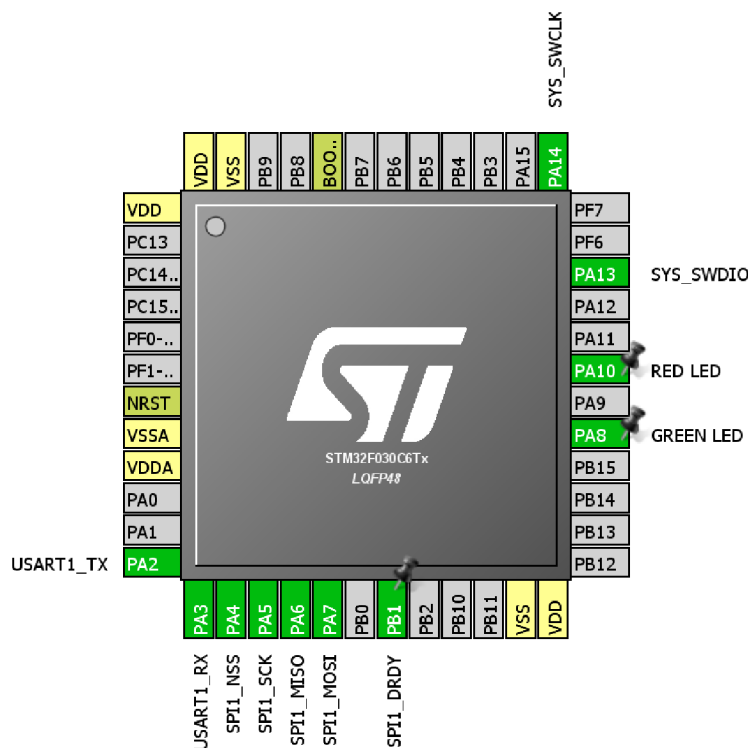


Obrázek 3.2 Vizualizace spodní strany desky plošných spojů

3.2 Popis programu

Programové vybavení celého přípravku vyžaduje obsluhovat mikroprocesor STM32F0 a AD převodník ADS1120. Procesor komunikuje s počítačem, vyčítá naměřená data z AD převodníku, tyto data zpracuje a následně zobrazuje naměřenou hodnotu na obrazovce počítače. K výběru použitých periférií byl použit program STM32CubeMX, ve kterém je možno vybrat, jaké možnosti použitého procesoru budeme používat a program přehledně zobrazí, které piny bude potřeba zapojit. V našem případě bude využít UART pro komunikaci s PC, SPI rozhraní pro spojení s AD převodníkem, vstupně/výstupní piny pro připojení led diod, napájecí a programovací piny. Na Obr. 3.3 je zobrazeno, jak vypadá návrh zapojení jednotlivých pinů z programového prostředí STM32CubeMX.

K další práci byl využit program Keil uVision5, ve kterém byl psán nový kód a sloužil také ke kompilaci výsledného programu, jehož výstup se v hexadecimálním formátu nahraje do procesoru.



Obrázek 3.3 Rozložení použitých pinů na mikroprocesoru STM32F030C6T6

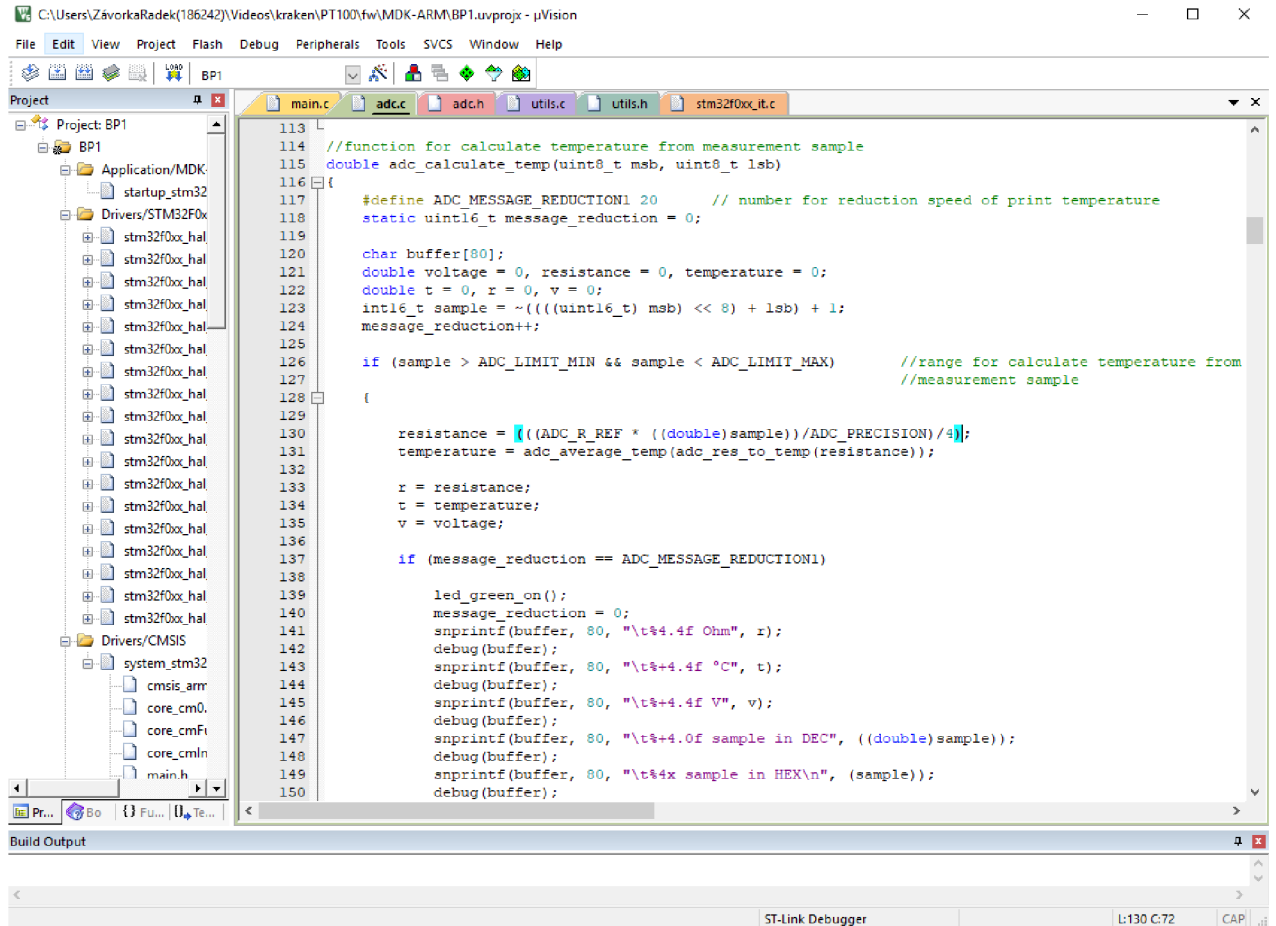
Programování mikroprocesoru je založeno na IPS (in-system programming), což znamená, že je možné CPU programovat za běhu a připojený na DPS. K tomuto účelu je na desce umístěn IDC10 konektor, který propojí porty SWCLK, SWDIO, NRST a GND programátoru a MCU. K programování je použit jednoduchý USB programátor ST Link V2 mini.

Porty PA8 a PA10 jsou nastaveny jako výstupní a jsou na ně připojeny testovací led diody, pro ověření správné funkce MCU a programu. Piny PA2 a PA3 jsou vyhrazeny pro USART. Jako poslední je využito rozhraní SPI zapojené na pinech PA3-7 a PB1. Žádné další periferie nebylo potřeba využít.

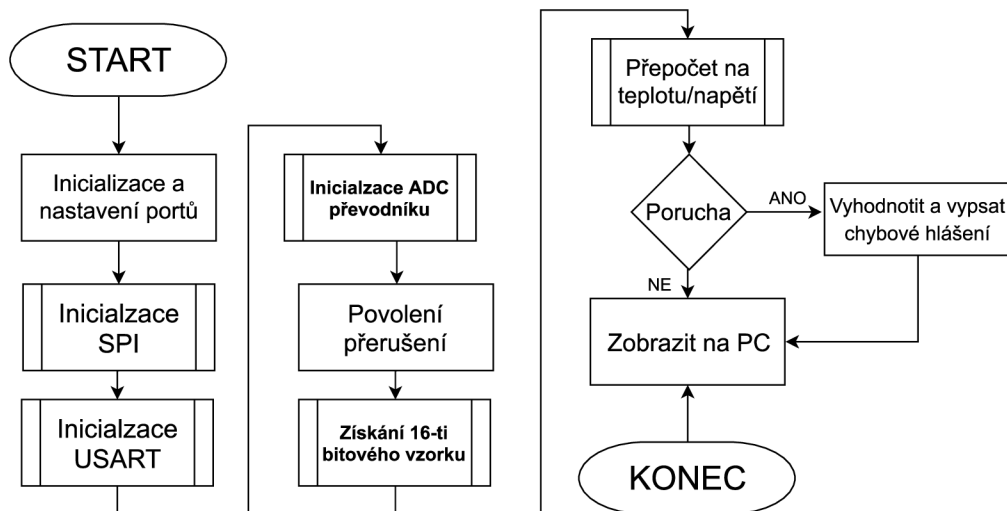
Dále je potřeba nastavit čtyři registry AD převodníku ADS1120. Ty umožňují zvolit vstup převodníku, zesílení naměřené hodnoty, mód převodu, volbu použitého senzoru interní/externí, zdroj referenčního napětí, FIR filtr a velikost budícího proudu. Všechny tyto nastavení se nastaví na začátku komunikace přes rozhraní SPI a poté dochází ke kontinuálnímu čtení naměřených dat z AD převodníku ve zvoleném intervalu.

Tento převodník toho umožňuje daleko více, než jen měřit teplotu a toho je také využito. V prvním kroku se nastaví, na kterých, ze čtyř možných vstupů se má měřit. Pro měření teploty jsou zvoleny vstupy AIN0 a AIN1, čtyřnásobné zesílení, jelikož se porovnává hodnota odporu, který bude mít maximálně do 250 Ω s referenčním rezistorem 1000 Ω , zvolí se externí reference na vstupech REFPO a REFNO a velikost budícího proudu se nastaví na 1 mA. Tohle jsou nejdůležitější nastavení, které je potřeba provést. Následně se zavolá příkaz pro čtení dat a jakmile jsou připraveny, tak se pošlou po datovém vodiči do procesoru. V tuto chvíli se dynamicky zobrazuje změřená teplota, která reaguje na změny. Dále, pro kontrolu funkčnosti převodníku a okolních parametrů jsou ve zvoleném časovém intervalu vyčítány další údaje, jako externí referenční napětí

Na obrázku 3.5 je náhled do programového prostředí Keil, ve kterém byl psán software. Kód je rozdělen na několik částí a dále do funkcí, aby byla zachována přehlednost. Na obrázku 3.6 je zjednodušený vývojový diagram programu mikroprocesoru.



Obrázek 3.5 Programové prostředí Keil uVision5



Obrázek 3.6 Vývojový diagram programu

4 MĚŘENÍ DOSAŽENÝCH PARAMETRŮ

Jelikož je zařízení konstruováno pro letecké aplikace, musí splňovat vybrané normy a odolnosti, aby mohlo být použito pro tyto účely. Proto byly provedeny zkoušky, jako měření elektromagnetické kompatibility, rozsah napájecího napětí, test funkčnosti v plném teplotního rozsahu a kontrola přesnosti po připojení na odporový etalon o hodnotě 100Ω . Odolnosti proti napěťovým jehlovým impulsům a přechodovým jevům způsobenými blesky byly navrženy na teoretické úrovni, ale jejich ověření nebylo provedeno z důvodu potřeby certifikovaného pracoviště, které je schopno zadane průběhy simulovat a jejichž testování by bylo finančně velice nákladné.

4.1 Napájení

Zařízení bude napájeno ze stejnosměrné letadlové sítě 28 V. Je požadováno, aby správně pracovalo také při výkyvech napájení od 10 do 47 V a při výjimečných podmínkách může dojít dokonce k přepětí 60 V po dobu až 100 ms. Tento rozsah napájecího napětí je možný díky spínanému zdroji na vstupu, jehož rozsah vstupního napětí je od 5,65 V do 65 V. Horní hranici ovšem hlídá odpojovač vysokého napětí a pokud by přepětí trvalo příliš dlouho, dojde k rozpojení napájecí větve z důvodu ochrany zařízení.

4.2 Přesnost

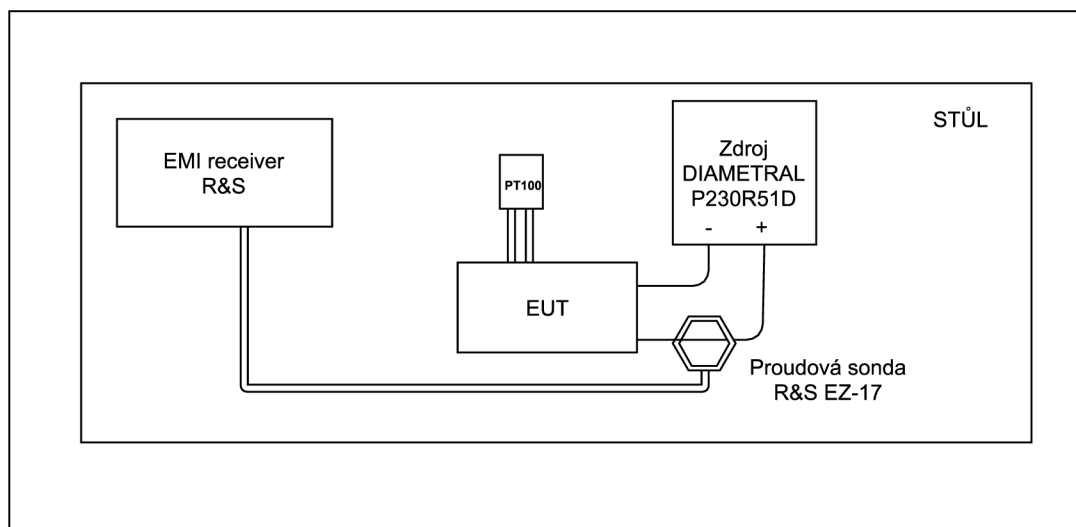
Hodnota dosažené přesnosti byla ověřena připojením vstupních svorek pro snímač PT100 na odporový etalon o hodnotě 100Ω . Hodnota etalonu byla ověřena multimetrem KEYSIGHT 34465A, který umožňuje měřit také čtyřvodičově a díky tomu se eliminuje odpor přívodů a přechodu kontaktů. Byla stanovena hodnota odporu etalonu na $100,008 \Omega$. Po připojení k přípravku byla naměřena hodnota odporu $99,9924 \Omega$ a tomu odpovídající teplota $-0,0357 \text{ }^\circ\text{C}$. Rozlišovací schopnost převodníku je $0,0076 \Omega$ a tomu odpovídá teplota $0,0196 \text{ }^\circ\text{C}$. Dosažená přesnost je tedy díky čtyřvodičovému zapojení vysoká a při uvedeném zapojení nezávislá na hodnotě budícího proudu, jelikož přesnost je dána referenčním odporem R_{REF} .

4.3 Elektromagnetická kompatibilita

Po sestavení výrobku bylo provedeno několik zkoušek elektromagnetické kompatibility. Jednak se měřily vyzařované emise vedené, po napájecím vedení a na signálových přívodech snímače PT100, a vyzařované do vzdušného prostoru. K měření vedených emisí byla použita proudová sonda Rohde&Schwarz EZ- 17 připojena k EMI receiveru stejného výrobce. K měření signálů vyzařovaných do prostoru byla využita školní stíněná komora s širokopásmovou anténou (HL562) kombinující bikónickou anténu pro nízké kmitočty a logaritmicko-periodickou pro vysoké kmitočty. Díky této kombinaci je možné použitím jedné antény pokrýt celé pásmo měřených kmitočtů. Při měření vyzařovaných signálů bylo zařízení umístěno uvnitř komory na dřevěném kulatém stole 1 m od měřící antény.

Měření vedených emisí:

Uspořádání měřicího pracoviště:



Obrázek 4.1 Uspořádání měřicího pracoviště při měření vedených emisí pomocí proudové sondy

Měření bylo provedeno ve školní laboratoři pro měření EMC v kmitočtovém rozsahu 150 kHz až 152 MHz na napájecích vodičích a signálových přívodech PT100. Byla provedena detekce špičkové hodnoty s předepsanou šířkou pásma pro určité kmitočtové rozsahy viz tabulka 4.1. Na následujících grafech jsou zobrazeny přípustné meze dány normou a změřené hodnoty rušení. Vždy je nejdříve změřena hodnoty pozadí a poté za provozu. Při měření pozadí byl zapnut laboratorní zdroj diametral P230R51D, pouze bylo vypnuto výstupní napětí. Normy zobrazené v grafech:

160CEP-B

Mez pro vrcholové hodnoty – kategorie B

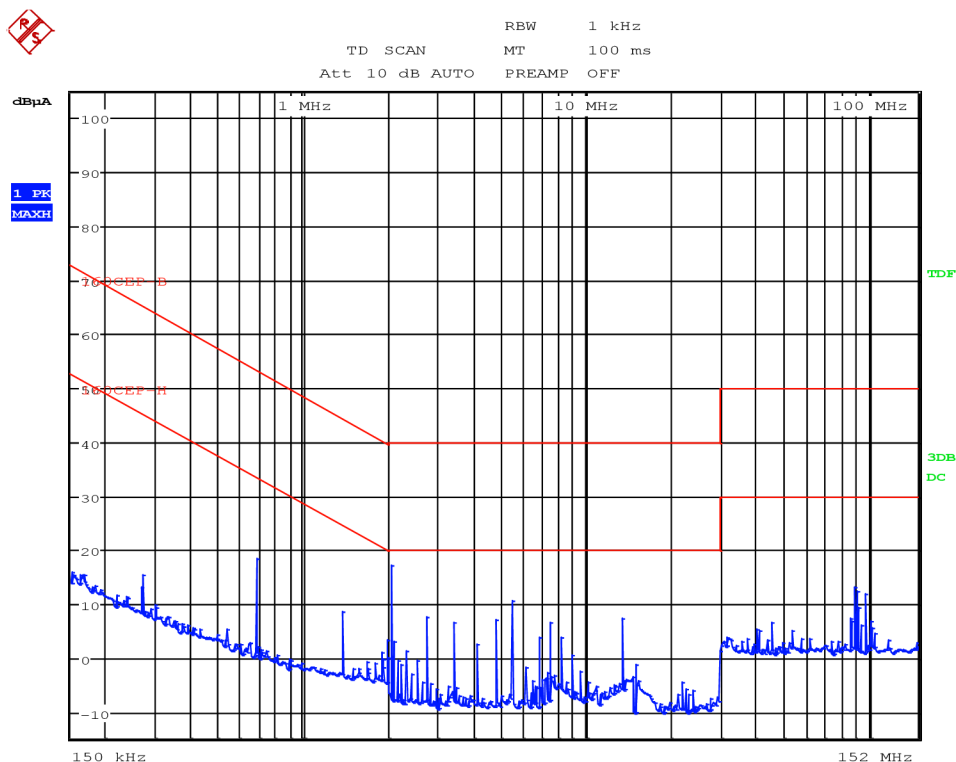
160CEP-H

Mez pro vrcholové hodnoty – kategorie H a L

Tabulka 4.1 Předepsané šířky pásma rozlišení RBW

| Kmitočtový rozsah | RBW |
|--------------------|--------|
| 150 kHz až 30 MHz | 1 kHz |
| 30 MHz až 100 MHz | 10 kHz |
| 100 MHz až 152 MHz | 10 kHz |

Na obrázku 4.2 je zobrazeno měření vedených emisí pro napájecí vodič. Další změřené grafy jsou zobrazeny v příloze E.1.



Obrázek 4.2 Vedené emise kladný napájecí vodič- provoz

Všechny změřené hodnoty jsou pod úrovní obou norem a zařízení tedy splňuje požadavky na velikost vedených emisí.

Měření vyzařovaných emisí:

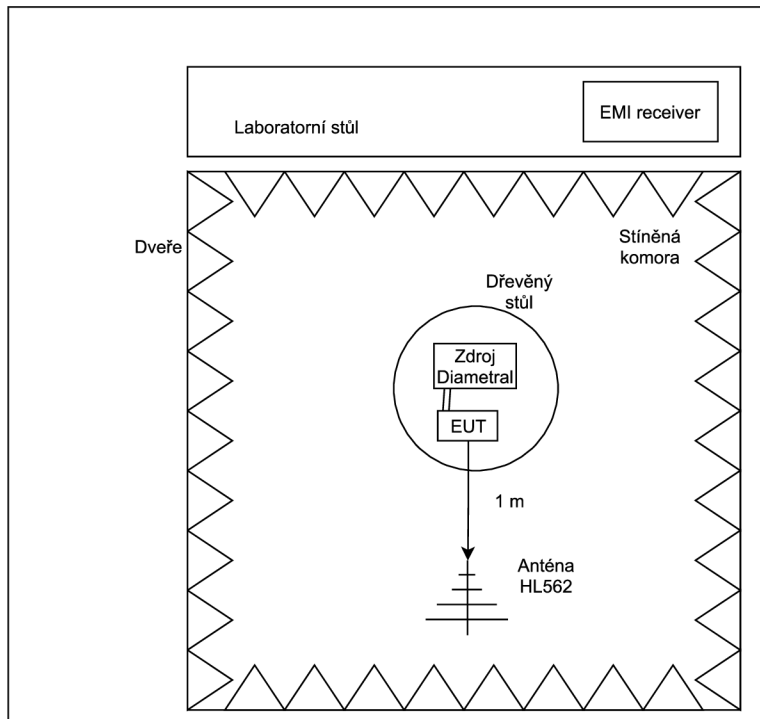
Měření bylo provedeno ve školní stíněné komoře v kmitočtovém rozsahu 100 MHz až 2 GHz. Byla provedena detekce vrcholové hodnoty intenzity elektromagnetického pole (složka E) s předepsanou šířkou pásma pro určité kmitočtové rozsahy viz tabulka 4.2. Vždy pro vertikální a horizontální polarizaci antény. Na následujících grafech jsou zobrazeny přípustné meze dány normou a změřené hodnoty rušení. Vždy je nejdříve změřena hodnota pozadí a poté za provozu. Při měření pozadí byl zapnut laboratorní zdroj diametrál P230R51D, pouze bylo vypnuto výstupní napětí. Normy v grafech:

- 160-RE-B Mez pro vrcholové hodnoty – kategorie B
- 160-RE-L Mez pro vrcholové hodnoty – kategorie L
- 160-RE-H Mez pro vrcholové hodnoty – kategorie H

Tabulka 4.2 Předepsané šířky pásma rozlišení RBW

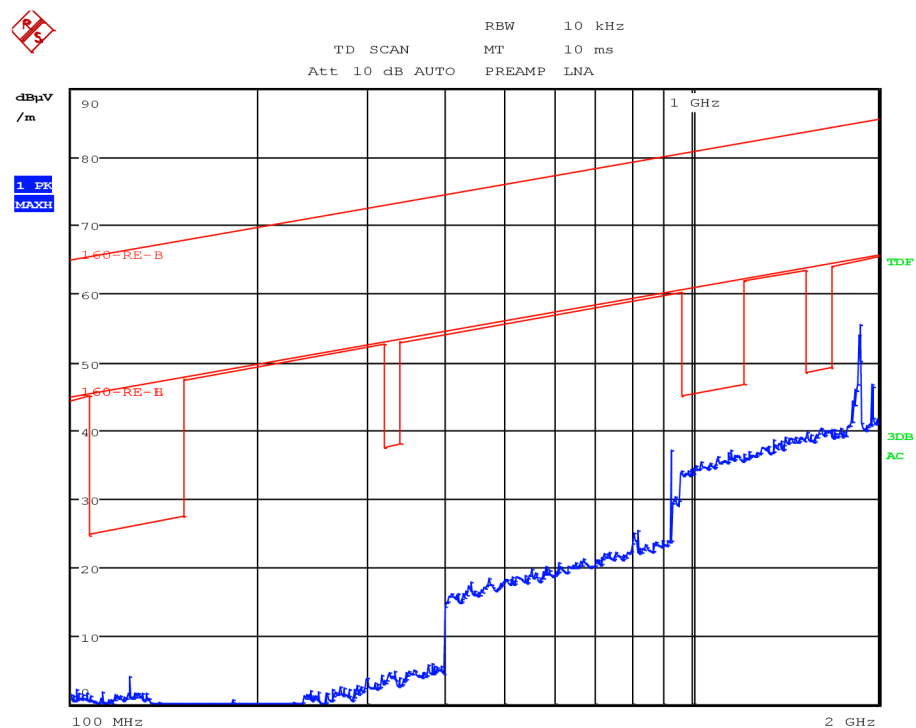
| Kmitočtový rozsah | RBW |
|--------------------|---------|
| 100 MHz až 400 MHz | 10 kHz |
| 400 MHz až 960 MHz | 100 kHz |
| 960 MHz až 2 GHz | 1 MHz |

Uspořádání měřicího pracoviště:



Obrázek 4.3 Uspořádání měřicího pracoviště při měření vyzařovaných emisí ve stíněné komoře

Na obrázku 4.4 je zobrazeno měření vyzařovaných emisí pro vertikální polarizaci antény. Další změřené grafy jsou zobrazeny v příloze E.2.

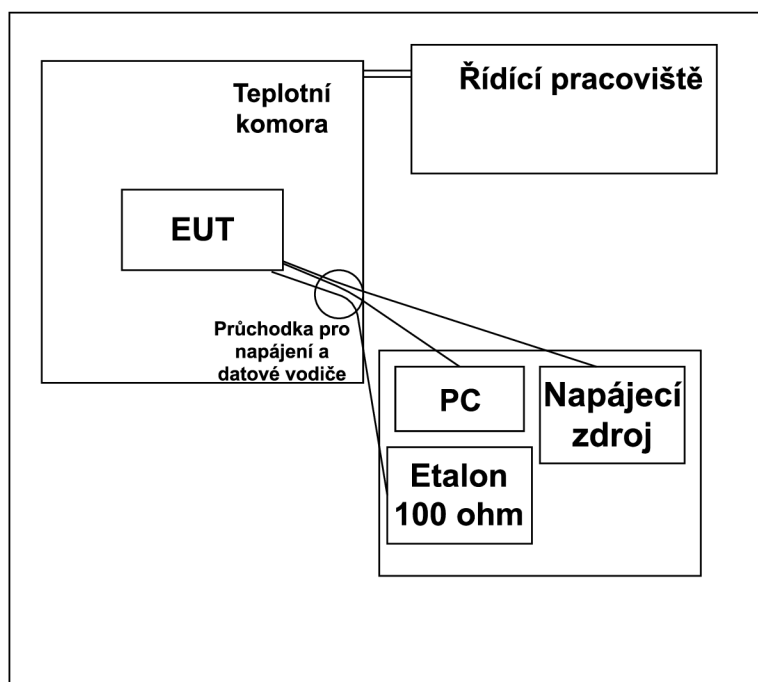


Obrázek 4.4 Vyzařované emise vertikální polarizace antény- provoz

Všechny změřené hodnoty jsou pod úrovní všech norem a zařízení tedy splňuje požadavky na velikost vyzařovaných emisí.

4.4 Teplotní odolnost

Po sestavení výrobku a ověření funkčnosti bylo přistoupeno k ověření práce v celém zadaném teplotním rozsahu $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. K tomuto účelu bylo využito teplotní zkušební komory od firmy Vötsch Industrietechnik, která umožňuje vystavit zařízení teplotě od -80 do $+220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření bylo provedeno v prostorech Univerzity obrany a uspořádání měřicího pracoviště je na obrázku 4.5. V příloze je uvedena fotografie ze samotného měření.



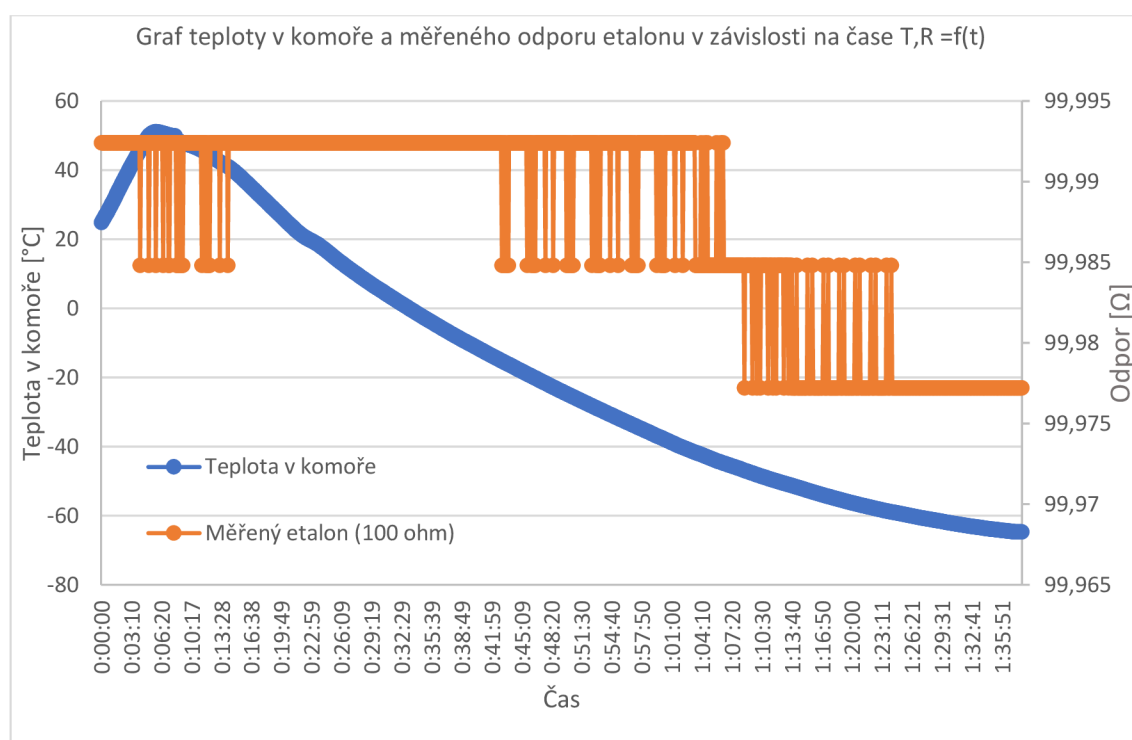
Obrázek 4.5 Uspořádání měřicího pracoviště při měření teplotní odolnosti

Zapojení bylo následovné, testované zařízení bylo umístěno do teplotní komory a průchodkou ve stěně byly vyvedeny napájecí a datové kabely. Namísto teplotního čidla PT100 byl připojen odporový normál $100\ \Omega$, který se nacházel mimo teplotní komoru a testovalo se, zda má změna teploty zařízení vliv na přesnost měření. V ideálním případě by mělo zařízení ukazovat stále měřený odpor $100\ \Omega$ a teplotu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Celý měřicí proces trval více než hodinu a půl. Nejdříve bylo testované zařízení zahříváno, aby se projevíli případné účinky dříve diskutovaných svodových proudů, které mají zásadní vliv na přesnost měření. Po ustálení teploty bylo nastaveno chlazení až na teplotu $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledky měření jsou vyneseny v následujícím grafu na obrázku 4.6 a v tabulce 4.3. Z grafu je vidět, že v celém teplotním rozsahu došlo k minimální chybě měření odporu odpovídající změně maximálně o 2 LSB, což je chyba měření do čtyř setin stupňů celsia. Dochází k oscilacím kolem rovnovážného stavu $100\ \Omega$, avšak chyba je zanedbatelná.

Jak je vidět v tabulce 4.3. vlivem teploty dochází k mírným odchylkám referenčních napětí, což může být způsobeno vlivem teploty na vnitřní referenci AD převodníku, ke

kteřé se měření vztahuje. Tolerance této referenční je typicky $10,24 \cdot 10^{-6} \text{ V}/^\circ\text{C}$ což je velmi malá hodnota. Na přesné měření teploty to nemá žádný vliv. To je způsobeno díky poměrovému měření dvou odporů. Referenční rezistor R_{REF} umístěn na DPS také podléhá působení okolní teploty. Jeho teplotní stabilita je až $\pm 0,015 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$. Při krajních hodnotách teplot $+70$ až $-55 \text{ } ^\circ\text{C}$ může dojít k výchylce až $1,05 \text{ } \Omega$ respektive $0,825 \text{ } \Omega$. Teoreticky může tedy docházet k chybě měření také vlivem pohybu referenčního odporu. Výsledky teplotní zkoušky jsou velmi dobré, zařízení obstálo v celém teplotním rozsahu jen s minimální odchylkou měřeného odporu.

Většina použitých integrovaných obvodů je určena pro průmyslové použití, a proto nesplňují spodní hranici teplot. Výrobce garantuje funkčnost do $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$. Měřením však bylo ověřeno, že obvody pracují i v extrémních teplotních podmínkách. Pro nasazení do provozu by ovšem bylo nutné ověřit spolehlivost na větším počtu vzorků v delším časovém úseku s mnoha počty cyklů. Vhodné by bylo také použití teplotní šokové komory pro vystavení obvodů náhlým změnám teplot.



Obrázek 4.6 Graf z měření teplotní odolnosti

Tabulka 4.3 Hodnoty měření napětí na AD převodníku při teplotní odolnosti

| Teplota [°C] | Externí reference [V] | AIN0 to AVSS [V] | AIN1 to AVSS [V] | Napájecí napětí [V] | Referenční napětí [V] |
|--------------|-----------------------|------------------|------------------|---------------------|-----------------------|
| 30 | 0,2105 | 1,2219 | 1,3243 | 3,3050 | 1,0180 |
| 40 | 0,2105 | 1,2219 | 1,3243 | 3,3050 | 1,0800 |
| 50 | 0,2107 | 1,2218 | 1,3241 | 3,3050 | 1,0750 |
| 50 | 0,2107 | 1,2218 | 1,3241 | 3,3050 | 1,0750 |
| 40 | 0,2109 | 1,2216 | 1,3239 | 3,3048 | 1,0173 |
| 30 | 0,2108 | 1,2218 | 1,3241 | 3,3050 | 1,0175 |
| 20 | 0,2106 | 1,2219 | 1,3243 | 3,3050 | 1,0178 |
| 10 | 0,2105 | 1,2219 | 1,3243 | 3,3048 | 1,0183 |
| 0 | 0,2104 | 1,2219 | 1,3243 | 3,3048 | 1,0183 |
| -10 | 0,2102 | 1,2215 | 1,3239 | 3,3043 | 1,0183 |
| -20 | 0,2100 | 1,2208 | 1,3232 | 3,3035 | 1,0180 |
| -30 | 0,2103 | 1,2187 | 1,3209 | 3,3023 | 1,0165 |
| -40 | 0,2100 | 1,2180 | 1,3201 | 3,3013 | 1,0600 |
| -50 | 0,2099 | 1,2173 | 1,3193 | 3,2995 | 1,0155 |
| -60 | 0,2098 | 1,2151 | 1,3171 | 3,2970 | 1,0140 |
| -65 | 0,2098 | 1,2143 | 1,3163 | 3,2963 | 1,0135 |

5 ZÁVĚR

V této bakalářské práci se věnuji návrhu systému pro měření teploty s odporovým teplotním čidlem. Sestavené zařízení má být vhodné pro letecké aplikace. V úvodu byly rozebrány požadavky, které má dle zadání zařízení splňovat, a které vychází z letecké normy RTCA DO-160G. Dále byly diskutovány možné měřicí senzory, jejich výhody, nevýhody a důvod volby právě platinového odporového snímače.

Při návrhu byl kladen důraz na odolnost proti napěťovým jehlovým impulzům a přechodovým dějům způsobenými blesky. Jelikož ochranné obvody jsou převážně polovodičové součástky, u kterých dochází s rostoucí teplotou k úniku svodových proudů, bylo nutné vybrat takové součástky, u nichž budou tyto proudy minimální. Toho bylo dosaženo pečlivým proměřením jednotlivých součástek v širokém rozsahu teplot. Nakonec se podařilo vhodné součástky najít a chyba měření by proto měla být minimální, což bylo ověřeno konečným měřením výrobku. Zařízení je také schopno rozpoznat jakoukoli poruchu měřicího okruhu a informovat obsluhu.

Bylo navrženo kompletní schéma zapojení od napájecího zdroje přes výběr vhodného AD převodníku až po obvod zpracování signálu, kterým je mikroprocesor od firmy STMicroelectronics.

Výsledný software pro řízení celého zařízení byl napsán v jazyce C a bylo využito programovacího prostředí Keil uVision5. Návrh desky plošných spojů byl proveden v programu Eagle.

Na závěr bylo provedeno měření dosažených parametrů, jenž prokázalo, že zařízení splňuje zadané požadavky. Od rozsahu napájecího napětí přes elektromagnetickou kompatibilitu až po rozsah provozních teplot, kdy je udržena vysoká přesnost měření v celém teplotním intervalu.

Výsledkem práce je funkční přípravek pro měření teploty, který splňuje zadané požadavky z letecké normy.

LITERATURA

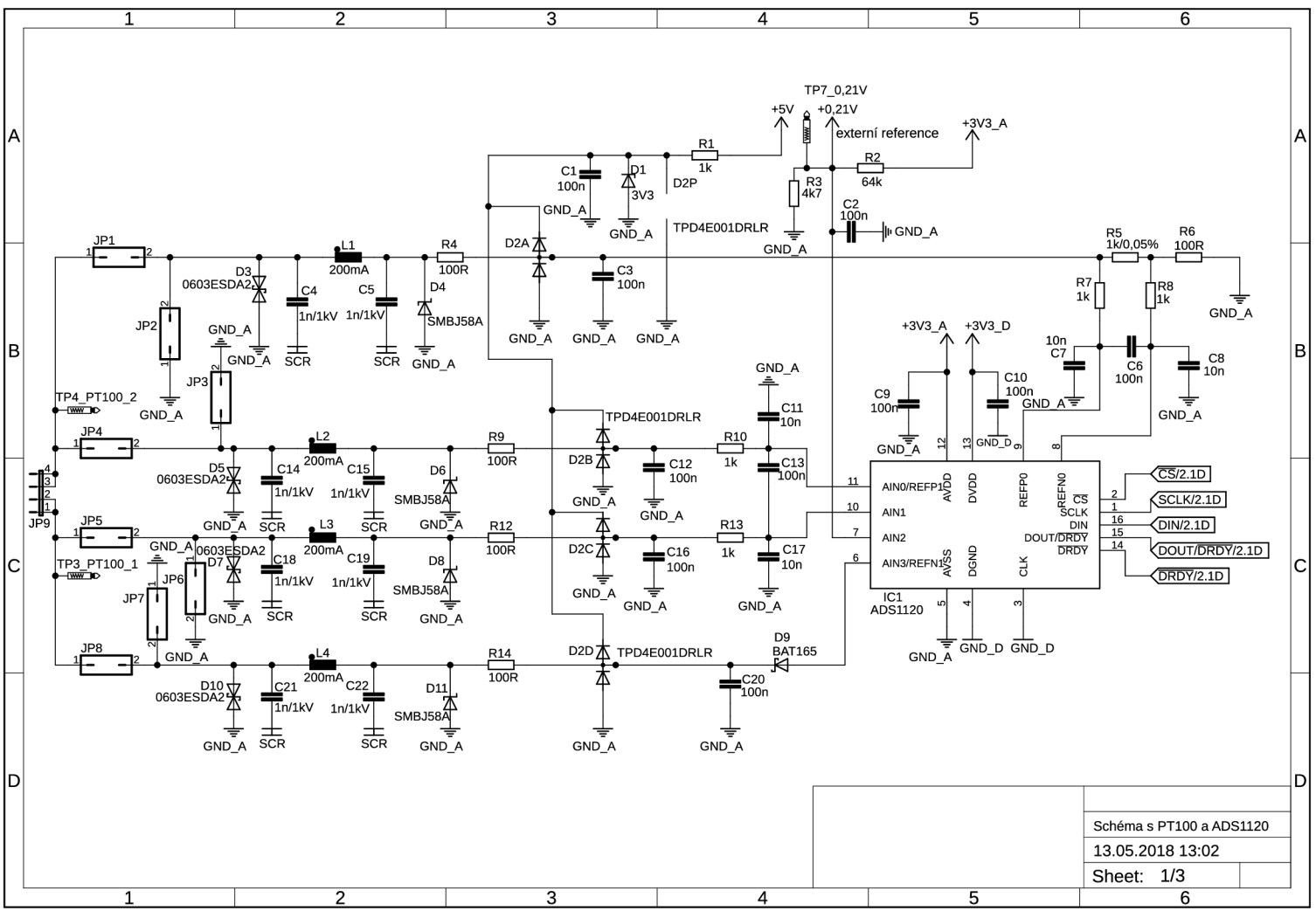
- [1] SENSIT. *Příručka pro konstruktéry, projektanty a realizátory měřicí a regulační techniky*. Rožnov pod Radhoštěm, 2017, 100. Dostupné také z: <http://www.sensit.cz/data-ftp/flippingbook/Sensit-konstrukcni-prirucka-2017/index.htm>
- [2] FRK, Martin a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. Přehled, přesnost a citlivost teplotních senzorů v praxi. *Elektrorevue*. 2012, 2012(4), 9. ISSN 1213- 1539. Dostupné také z: <https://bit.ly/2IeeRFU>
- [3] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] KING, Grayson a Toru FUKUSHIMA. RTD Interfacing and Linearization Using an ADuC8xx MicroConverter: Application note AN- 709. *Analog Device*. 2014, 2004(1), 12. Dostupné také z: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN709_0.pdf
- [5] RTCA, Inc. RTCA/DO-160G: Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. December 8, 2010. 542s.
- [6] ADS1120 4-Channel, 2-kSPS, Low-Power, 16-Bit ADS with Integrated PGA and Reference [online]. In: 2017, s. 73. Dostupné také z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1120.pdf>
- [7] LIGHTNING PROTECTION FOR AIRCRAFT ELECTRICAL POWER AND DATA COMMUNICATION SYSTEMS [online]. In: 2006, s. 20. Dostupné také z: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/14682-lightning-protection-for-aircraft-electrical-systems
- [8] SMBJ58A Transil [online]. In: 2010, s. 10 . Dostupné také z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/19/78/91/39/07/cd/40/65/CD00001366.pdf/files/CD00001366.pdf/jcr:content/translations/en.CD00001366.pdf>
- [9] TPD4E001 Low-Capacitance 4-Channel ESD-Protection for High-Speed Data Interfaces [online]. In: 2017, s. 28 [cit. 2018-05-11]. Dostupné také z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpd4e001.pdf>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|-------|---|
| ADC | analogově digitální převodník |
| DDM | digitální multimetr |
| DPS | deska plošných spojů |
| EMI | elektromagnetická interference, rušení (electromagnetic interference) |
| ESD | elektrostatický výboj (electroStatic Discharge) |
| EMC | elektromagnetická kompatibilita (electromagnetic compatibility) |
| EUT | testované zařízení (equipment under test) |
| IPS | in-system programming |
| LSB | nejméně významný bit (low significant bit) |
| MCU | mikroprocesor (microprocessing unit) |
| NTC | negativní termistor (negative temperature coefficient) |
| PTC | pozitivní termistor (positive temperature coefficient) |
| RBW | rozlišení šířky pásma (resolution bandwidth) |
| RTD | odporové teplotní čidlo (resistance temperature detector) |
| RTCA | Radio Technical Commission for Aeronautics |
| SPI | serial peripheral interface |
| TVS | transil (transient voltage suppression) |
| TI | Texas Instruments |
| USART | Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter, synchronní / asynchronní sériové rozhraní |
| VF | vysoko frekvenční |

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení s převodníkem ADS1120



A.2 Obvodové zapojení mikroprocesoru a převodníku úrovní MAX232

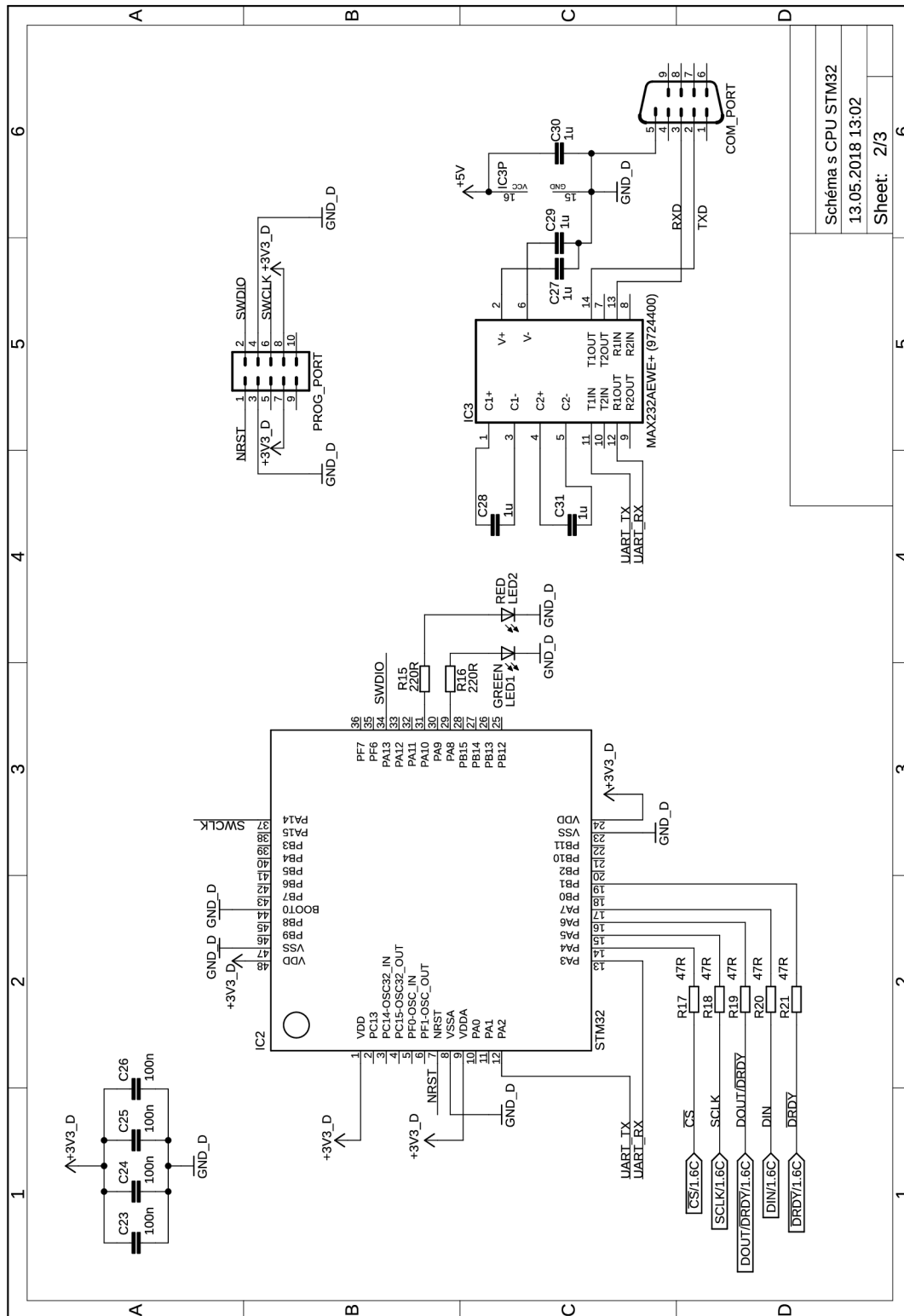
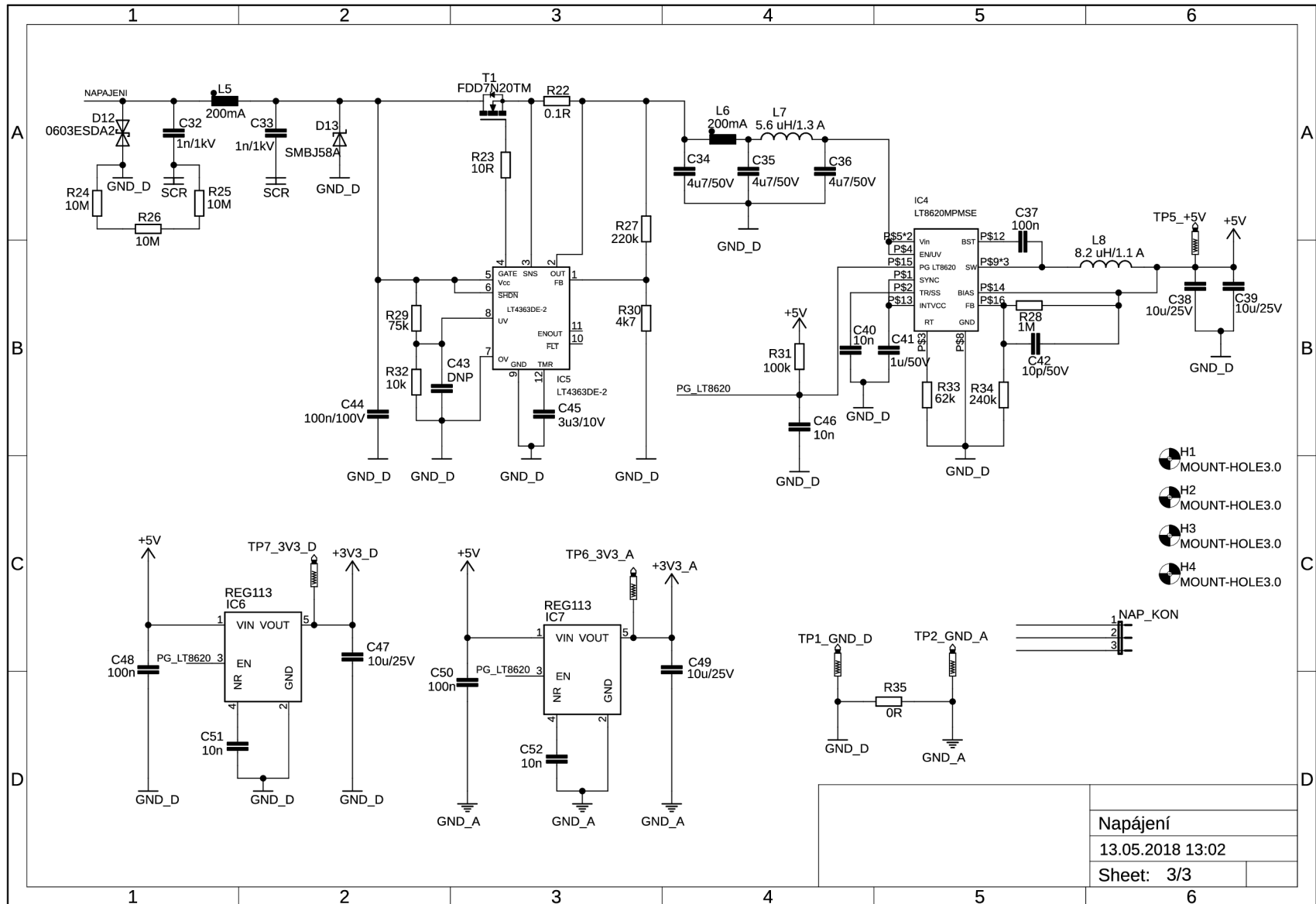


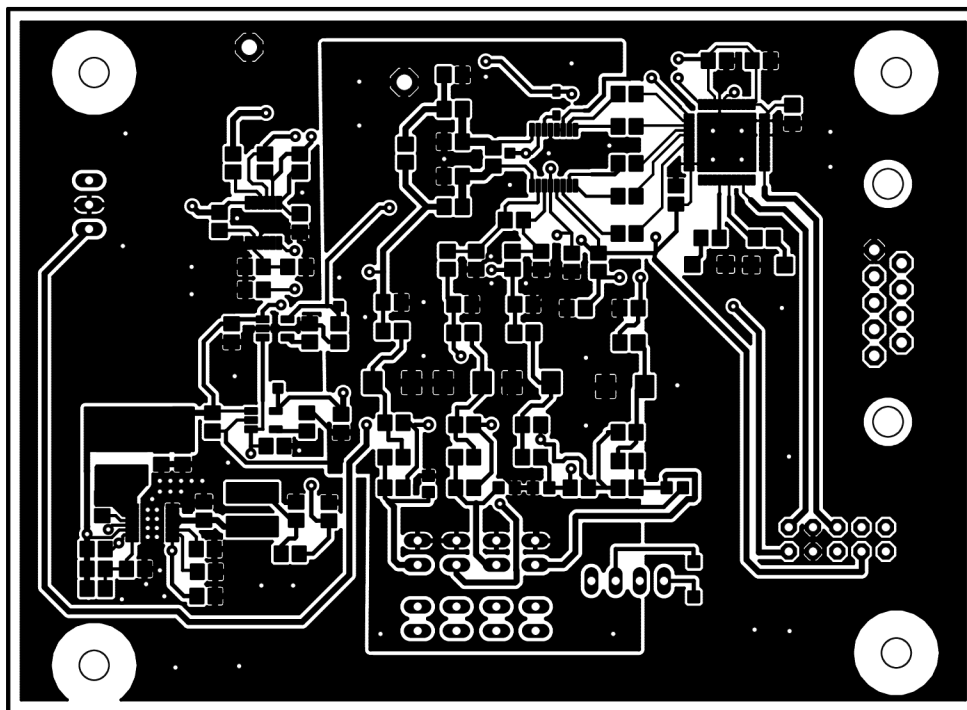
Schéma s CPU STM32
13.05.2018 13:02
Sheet: 2/3

A.3 Obvodové zapojení napájecí části a odpojovače

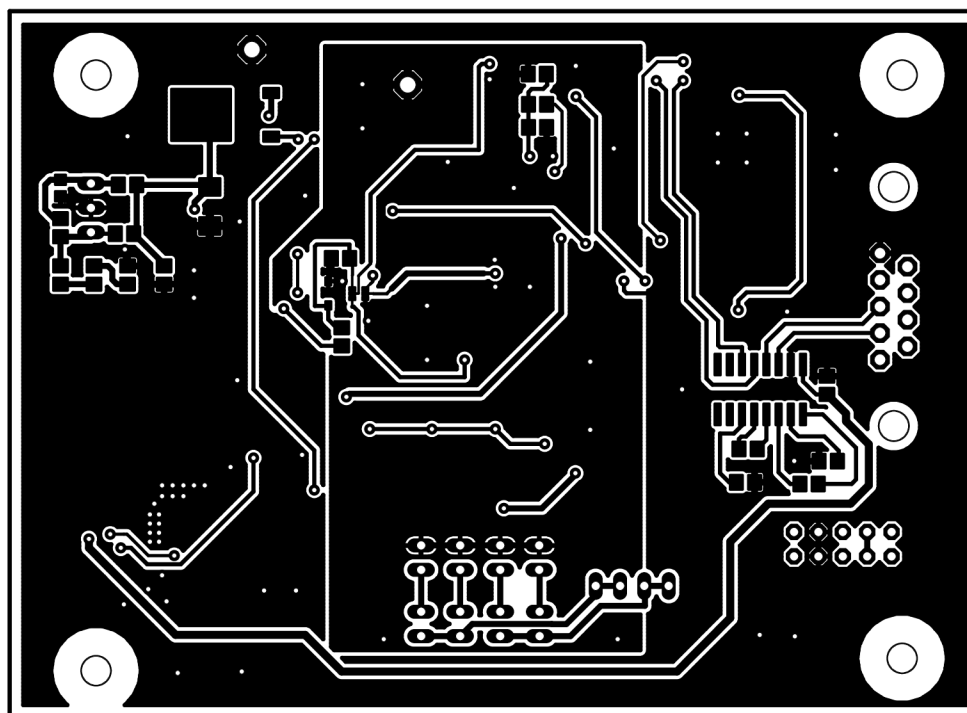


B NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1 Horní strana

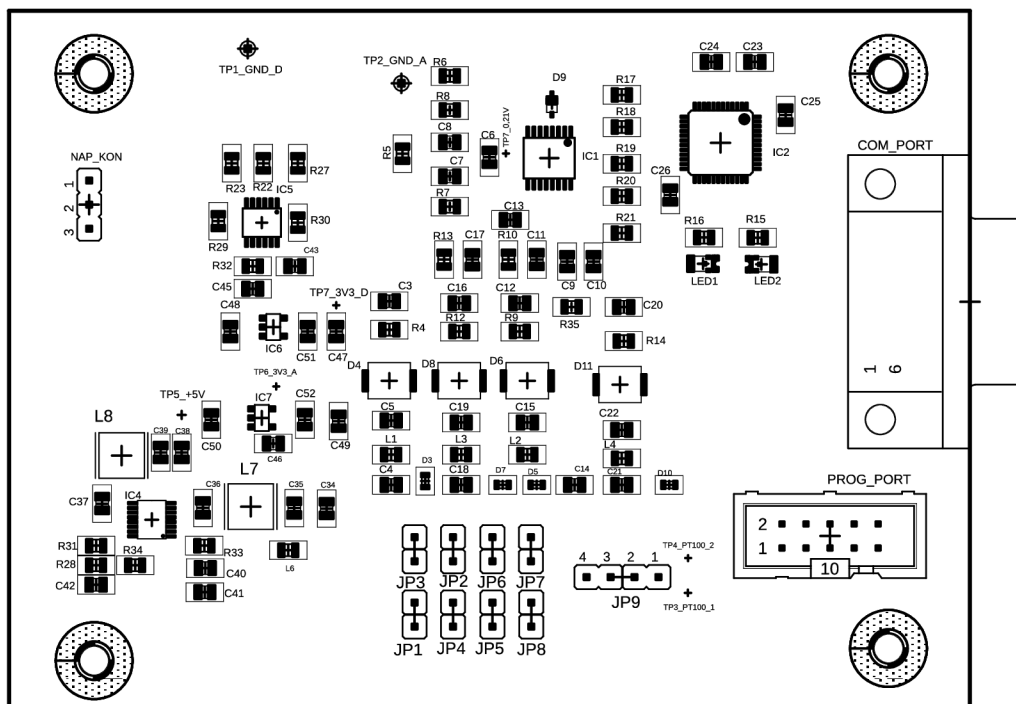


B.2 Spodní strana

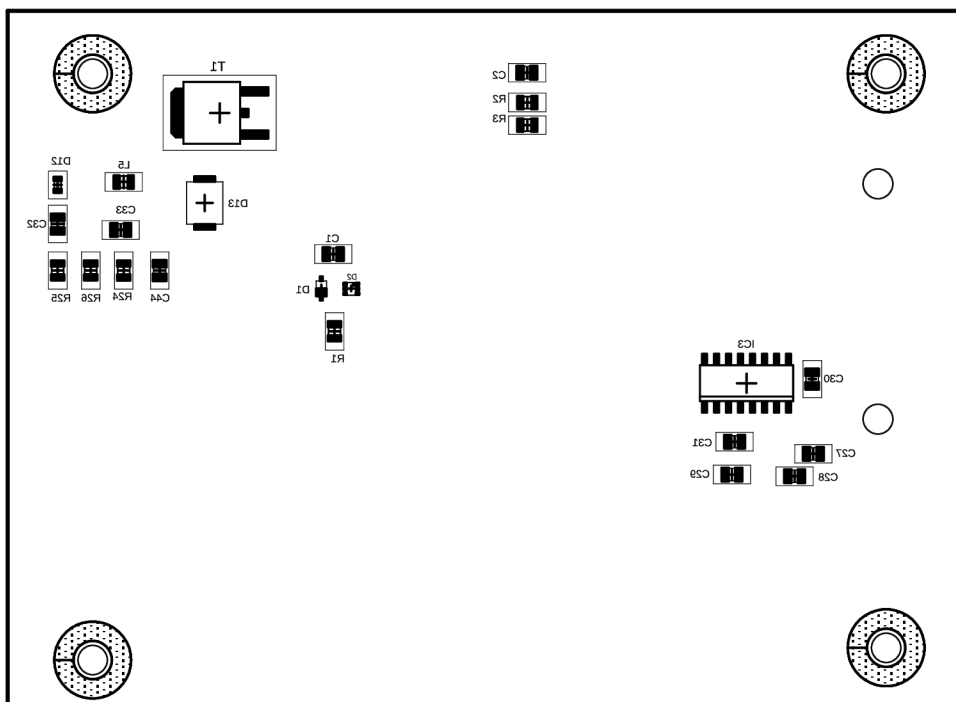


C OSAZOVACÍ PLÁN DPS

C.1 Horní strana



C.2 Spodní strana



D SEZNAM SOUČÁSTEK

Tabulka D.5.1 Seznam součástek Rezistory

| Počet | Označení | Hodnota [Ω] | Pouzdro | Popis |
|-------|-------------------------|----------------|---------|--------------|
| 1 | R35 | 0R | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R22 | 0.1R | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R23 | 10R | 805 | SMD rezistor |
| 5 | R17, R18, R19, R20, R21 | 47R | 805 | SMD rezistor |
| 5 | R4, R6, R9, R12, R14 | 100R | 805 | SMD rezistor |
| 2 | R15, R16 | 220R | 805 | SMD rezistor |
| 5 | R1, R7, R8, R10, R13 | 1k | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R5 | 1k/0,05% | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R30 | 4k7 | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R32 | 10k | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R33 | 62k | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R2 | 64k | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R31 | 100k | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R27 | 160k | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R3 | 200k | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R34 | 240k | 805 | SMD rezistor |
| 1 | R28 | 1M | 805 | SMD rezistor |
| 3 | R24, R25, R26 | 10M | 805 | SMD rezistor |

Tabulka D.5.2 Seznam součástek Cívky

| Počet | Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|-------|---------------------------|-------------|---------|------------------|
| 6 | L1, L2, L3, L4, L5, L6 | 2,2kΩ/200mA | 805 | Feritový korálek |
| 1 | L7 | 5,6uH/1,38A | SMD | Cívka |
| 1 | L8 | 8,2uH/1,4A | SMD | Cívka |

Tabulka D.5.3 Seznam součástek Kondenzátory

| Počet | Označení | Hodnota [F] | Pouzdro | Popis |
|-------|---|-------------|---------|---------------------------|
| 1 | C42 | 10p/50V | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 1 | C46 | 1n | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 10 | C4, C5, C14, C15, C18, C19, C21, C22, C32, C33 | 1n/1kV | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 7 | C7, C8, C11, C17, C40, C51, C52 | 10n | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 18 | C1, C2, C3, C6, C9, C10, C12, C13, C16, C20, C23, C24, C25, C26, C37, C44, C48, C50 | 100n | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 5 | C27, C28, C29, C30, C31 | 1u | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 1 | C41 | 1u/50V | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 1 | C45 | 3u3/10V | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 3 | C34, C35, C36 | 4u7/50V | 805 | SMD keramický kondenzátor |
| 4 | C38, C39, C47, C49 | 10u/25V | 805 | SMD keramický kondenzátor |

Tabulka D.5.4 Seznam součástek Diody

| Počet | Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|-------|----------------------|--------------|---------|--------------------|
| 5 | D3, D5, D7, D10, D12 | 0603ESDA2 | 603 | ESD dioda |
| 1 | D1 | 3V3 | SOD323 | zenerova dioda 3V3 |
| 1 | D9 | BAT165 | SOD323 | Shotkyho dioda |
| 1 | LED1 | GREEN | 805 | LED GREEN |
| 1 | LED2 | RED | 805 | LED RED |
| 5 | D4, D6, D8, D11, D13 | SMBJ58A | SMBJ | TVS dioda |
| 1 | D2 | TPD4E001DRLR | SC70-6 | Ochranná dioda |

Tabulka D.5.5 Seznam součástek IC a Tranzistory

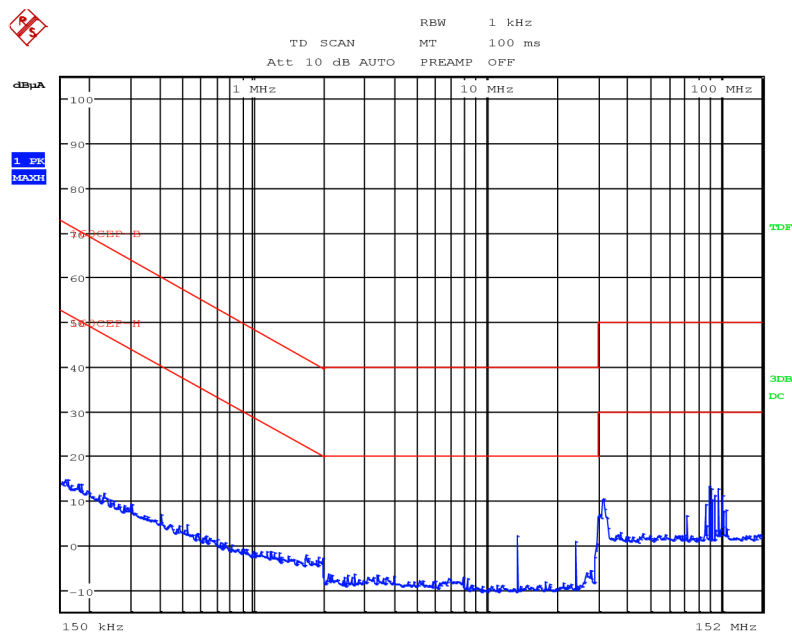
| Počet | Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|-------|----------|-------------|---------|------------------|
| 1 | T1 | FDD7N20TM | TO252 | Tranzistor |
| 1 | IC1 | ADS1120 | TSSOP16 | AD převodník |
| 1 | IC2 | STM32 | LQFP48 | MCU |
| 1 | IC3 | MAX232AEWE | SOIC16N | Převodník úrovní |
| 1 | IC4 | LT8620MPMSE | MSOP16 | Spínaný zdroj |
| 1 | IC5 | LT4363DE-2 | MSOP-12 | Odpojovač |
| 2 | IC6, IC7 | REG113 | SOT23-5 | Stabilizátor 3V3 |

Tabulka D.5.6 Seznam součástek Konektory

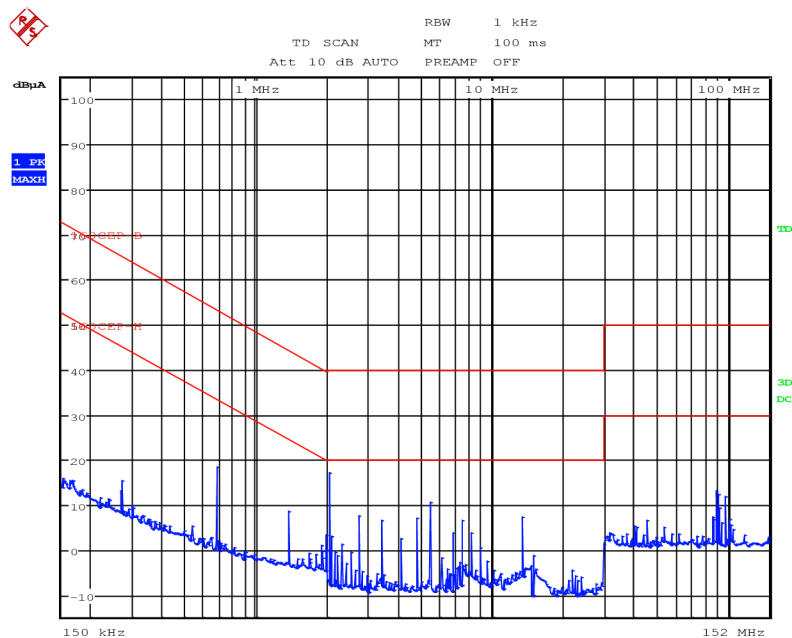
| Počet | Označení | Pouzdro |
|-------|------------------------------|-----------------|
| 1 | Napájecí konektor | MPT 0,5/ 3-2,54 |
| 1 | Sériový port | Cannon 9 |
| 1 | Programovací konektor | IDC10 |
| 1 | Konektor pro připojení PT100 | MPT 0,5/ 4-2,54 |

E MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY

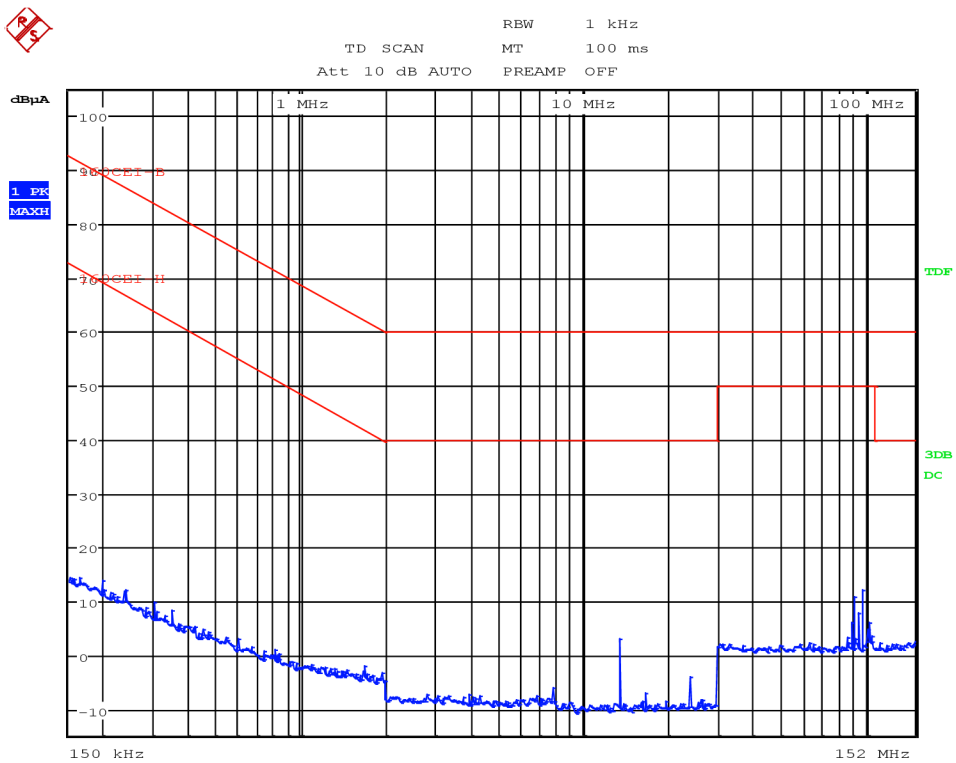
E.1 Vedené emise



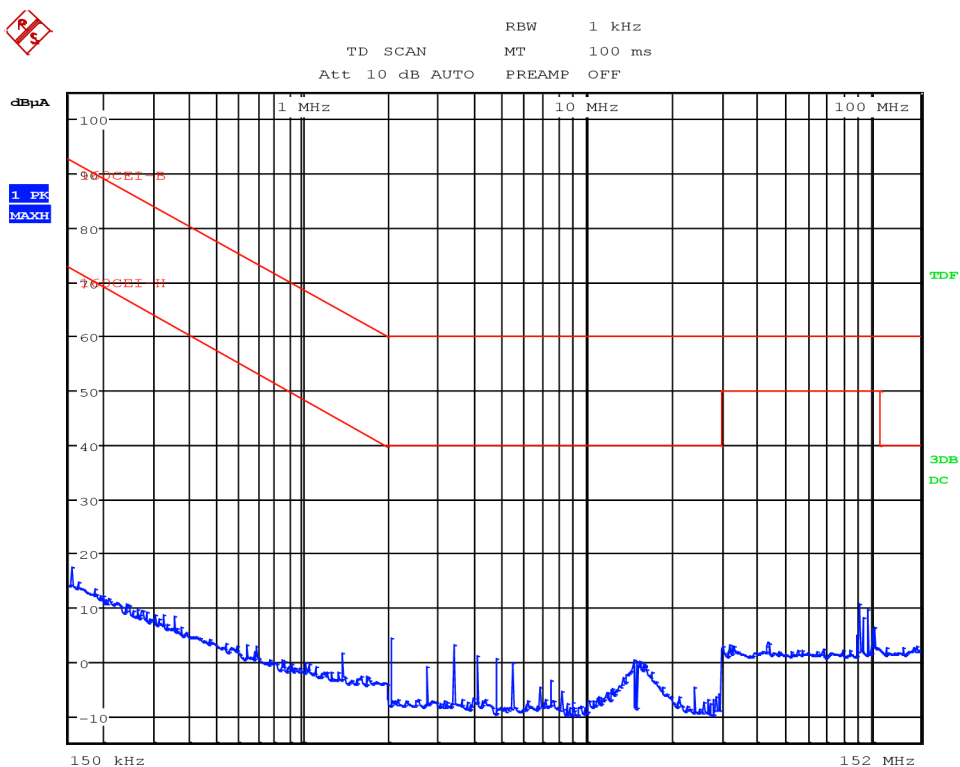
Obrázek E. 1 Vedené emise kladný napájecí vodič- pozadí



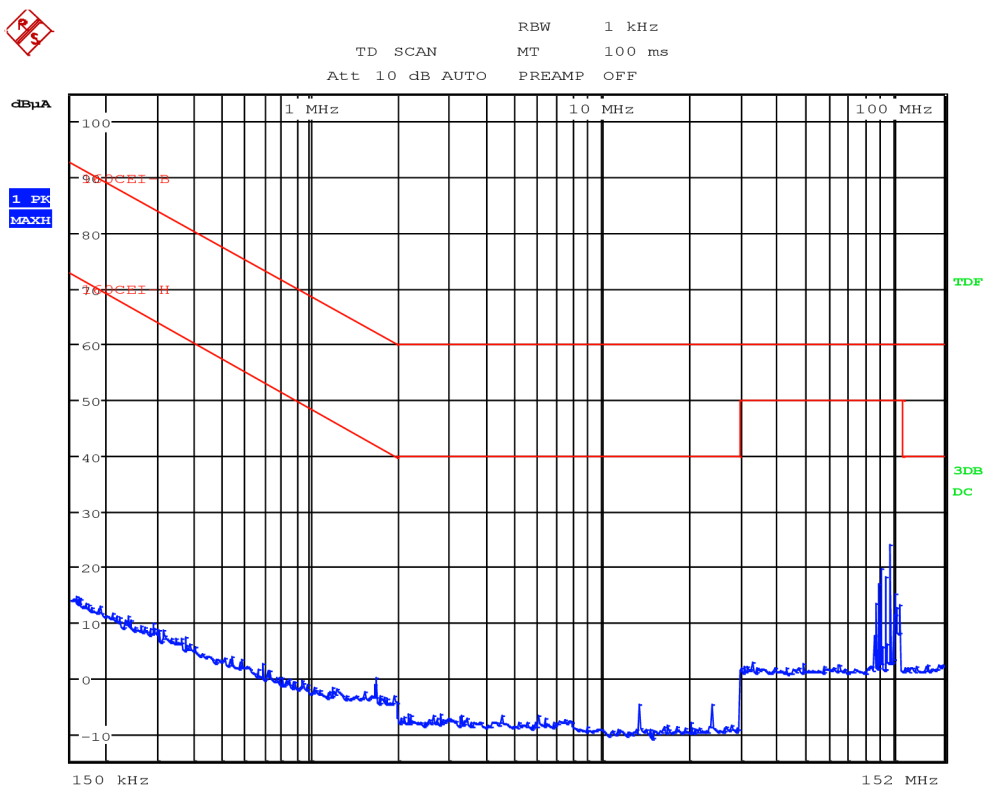
Obrázek E. 2 Vedené emise kladný napájecí vodič- provoz



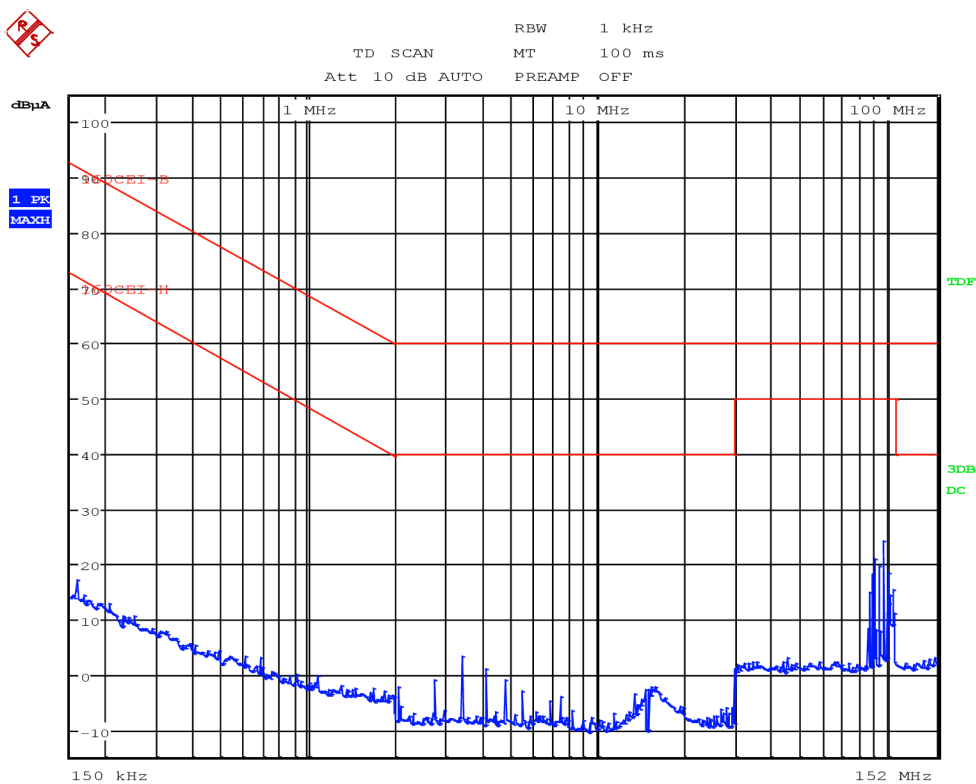
Obrázek E. 3 Vedené emise proudový vodič PT100- pozadí



Obrázek E. 4 Vedené imise proudový vodič PT100- provoz

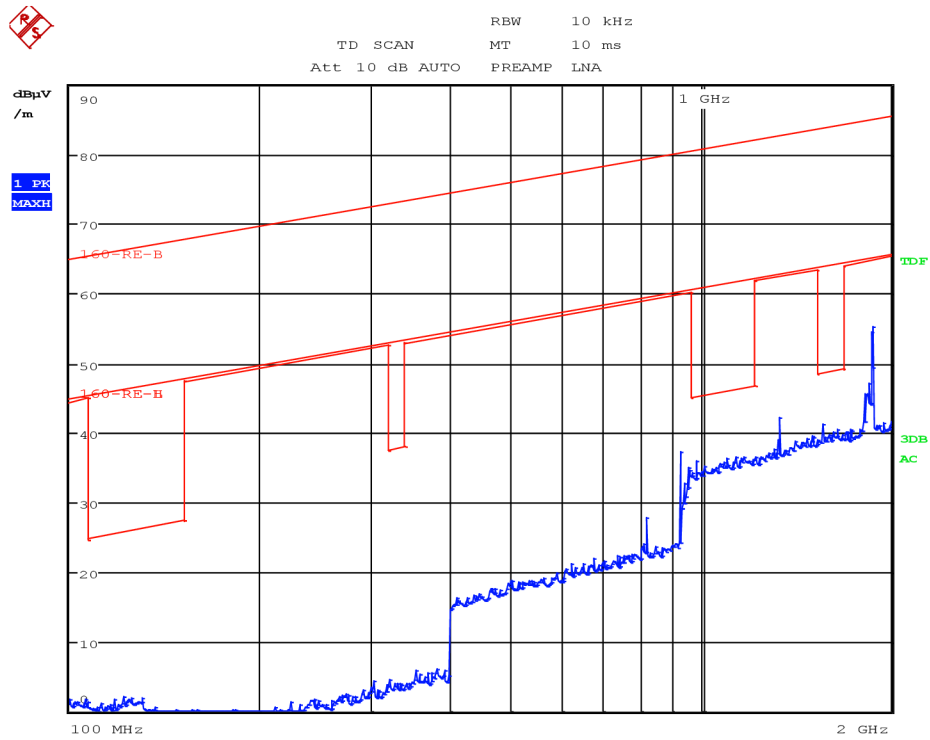


Obrázek E. 5 Vedené emise napěťový vodič PT100- pozadí

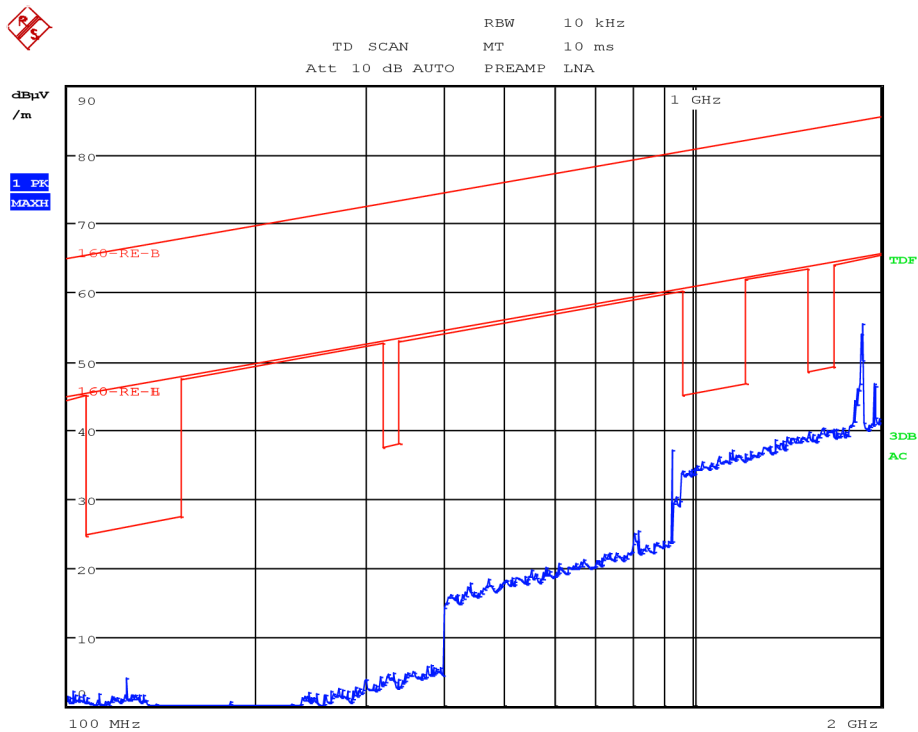


Obrázek E. 6 Vedené emise napěťový vodič PT100- provoz

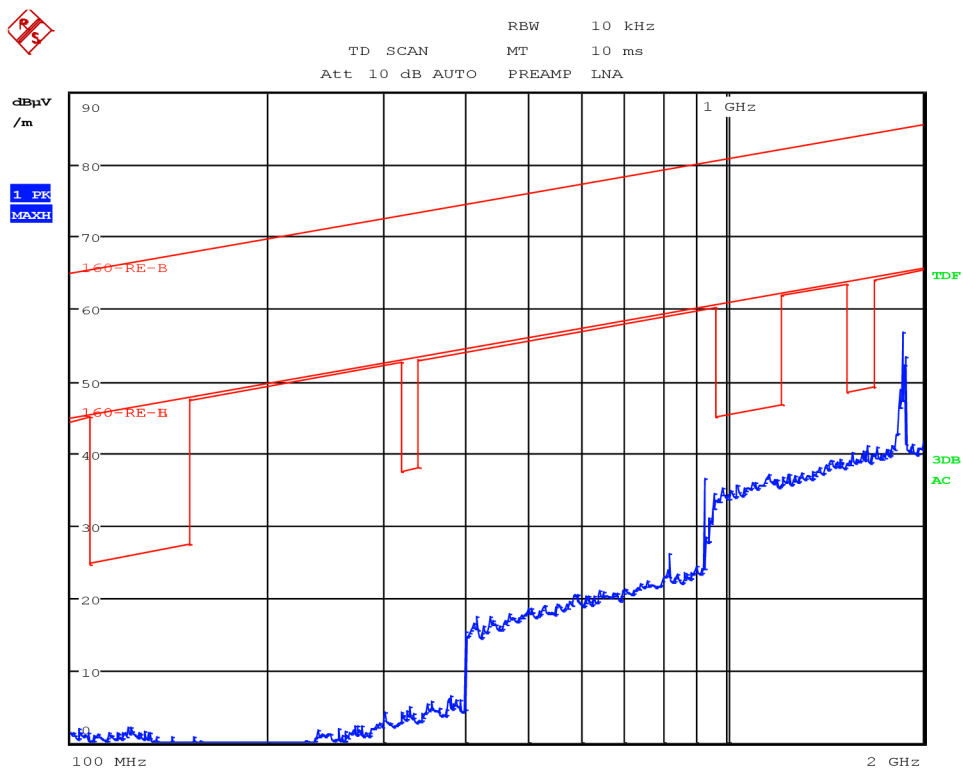
E.2 Vyzařované emise



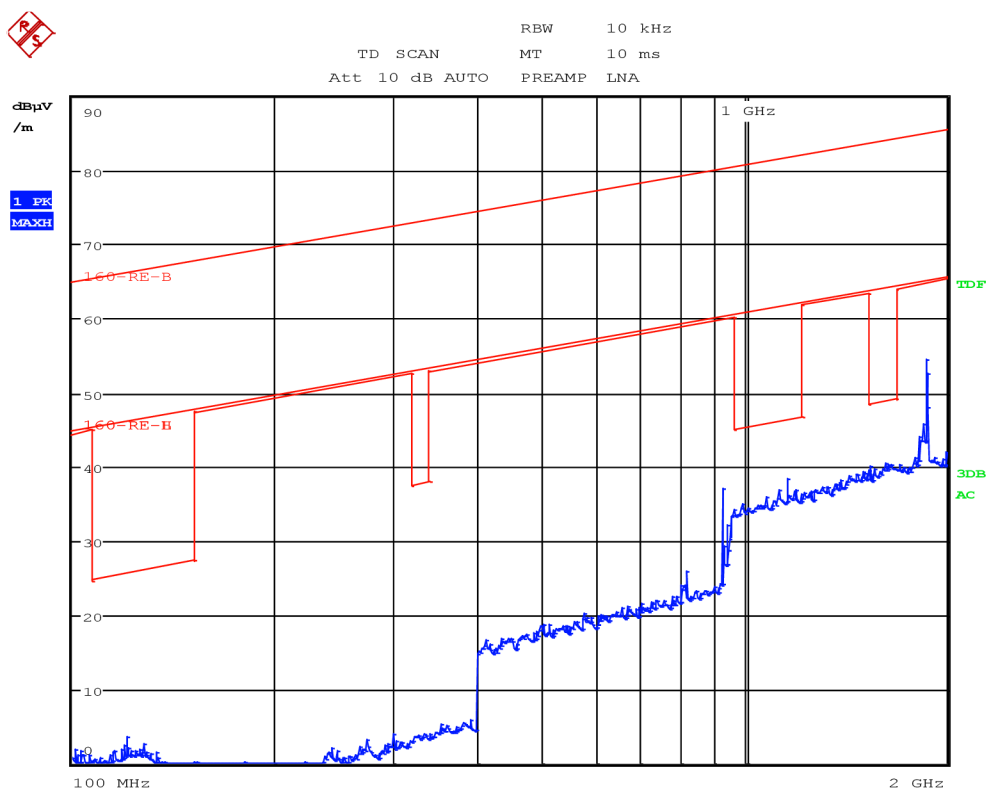
Obrázek E. 7 Vyzařované emise vertikální polarizace antény- pozadí



Obrázek E. 8 Vyzařované emise vertikální polarizace antény- provoz



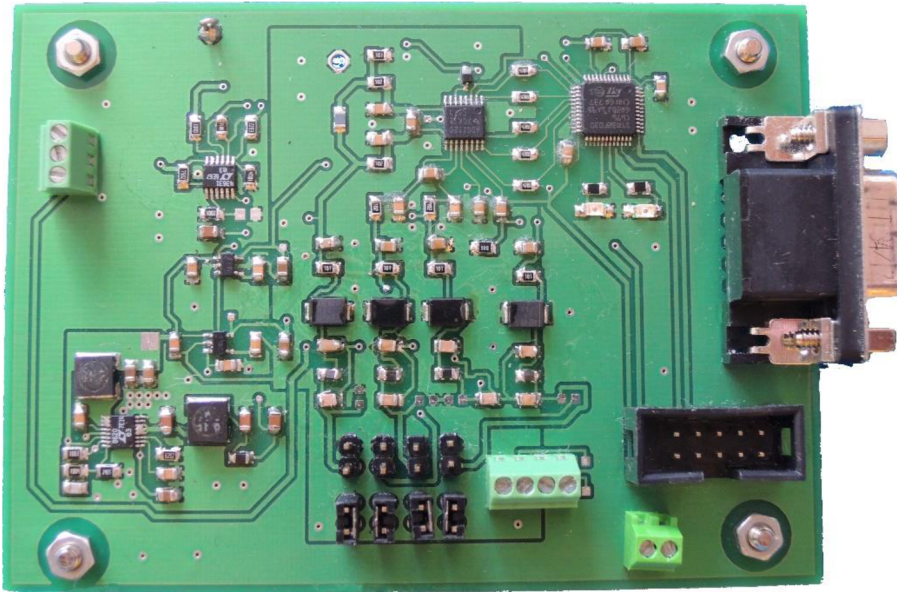
Obrázek E. 9 Vyzařované emise horizontální polarizace- pozadí



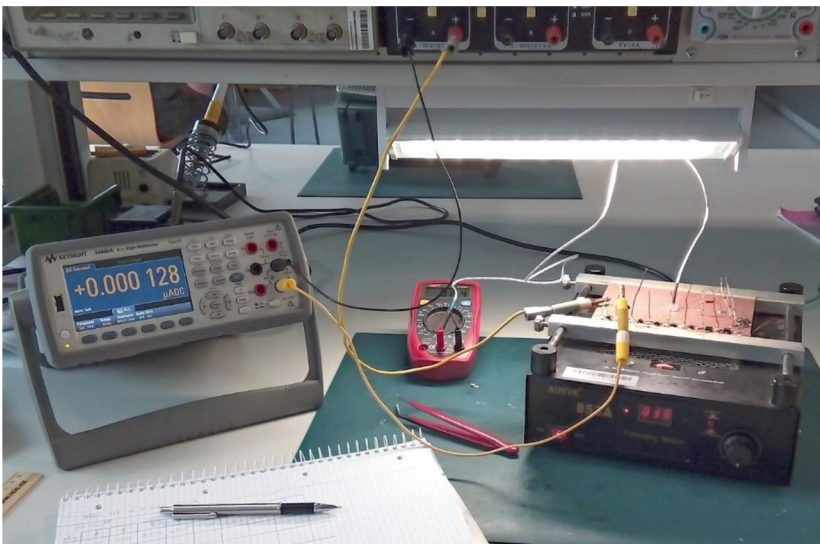
Obrázek E. 10 Vyzařované emise horizontální polarizace- provoz

F FOTO DOKUMENTACE

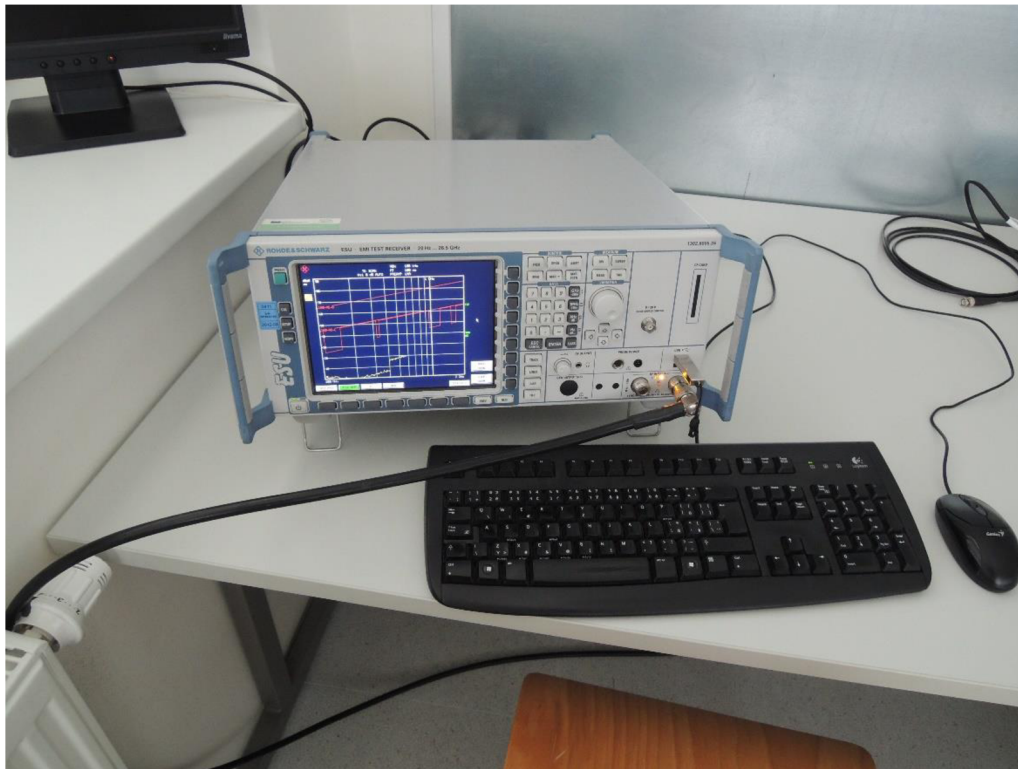
F.1 Fotografie výsledného zařízení



F.2 Fotografie z měření svodových proudů



F.3 Fotografie z měření EMC



F.4 Fotografie z měření teplotní odolnosti

