

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí přesného zařízení pro měření napětí, které zároveň umožňuje generování přesného výstupního napětového signálu. Jsou zde rozebrány různé vlivy zdrojů rušení na přesnost a možnosti jejich eliminace. Je popsána zvolená koncepce řešení. Práce se věnuje i jednotlivým fázím vývoje a vysvětluje příčiny jejich úprav v různých fázích.

## **Klíčová slova**

Datalogger, ADC, DAC, měření napětí, STM32, Ethernet

## **Abstract**

This work deals with the design and construction of a precise device for voltage measurement, which at the same time enables the generation of a precise output voltage signal. The various effects of interference sources on accuracy and the possibilities of their elimination are discussed here. The selected solution concept is described. The work also deals with individual phases of development and explains the reasons for their modifications in different phases.

## **Keywords**

Datalogger, ADC, DAC, voltage measurement, STM32, Ethernet

## **Bibliografická citace**

ŠAFÁŘ, Pavel. *Precizní datalogger a zdroj napětového signálu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159879>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Michal Kubíček.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Pavel Šafář</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	<i>232625</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2023/24</i>
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Precizní datalogger a zdroj napětového signálu</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: 20. května 2024

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Kubíčkovi, Ph.D. za podporu, trpělivost, vedení a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce i přes to, že můj přístup k diplomové ani zdaleka nešlo označit jako řádný. Z hlediska odborných rad bych dále chtěl velmi poděkovat panu Ing. Janu Cupákovi za velmi přínosné rady týkající se návrhu přesné analogové elektroniky. Velice cennou pomoc mi dále poskytl pan Ing. Viktor Bubla, jehož zkušenosti se zprovozněním Ethernetu mi pravděpodobně ušetřili jednu nefunkční revizi řídicí desky a také mi byl velice nápomocný při realizovaných měřeních. Bez osob zde uvedených by práce zcela jistě nebyla dopracována ani do současného stavu.

# Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ .....	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD .....	10
1. STRUKTURA ZÁVĚREČNÉ PRÁCE .....	10
1.1 POVINNÉ ČÁSTI PRÁCE .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
1.2 STRUKTURA PRÁCE .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
1.3 ELEKTRONICKÁ PŘÍLOHA .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2. ZÁKLAD PRÁCE SE STYLY .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2.1 ČLENĚNÍ TEXTU.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2.2 STYLY PRO TEXT .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2.2.1 Obyčejný text.....	Chyba! Záložka není definována.
2.2.2 Zdrojový kód .....	Chyba! Záložka není definována.
2.3 VKLÁDÁNÍ OBRÁZKŮ .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2.4 VKLÁDÁNÍ TABULEK .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2.5 VKLÁDÁNÍ ROVNIC.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
3. TYPOGRAFICKÉ A JAZYKOVÉ ZÁSADY .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
3.1 NIKDY TO NEBUDE NAPROSTO DOKONALÉ .....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
3.2 CO JE TO NORMOVANÁ STRÁNKA?.....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
4. ZÁVĚR.....	11
LITERATURA.....	23
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	24
SEZNAM PŘÍLOH.....	25

*Pozn.: Obsah se v rámci této šablony generuje automaticky z nadpisů 1 až 3 úrovně. Pro jeho aktualizaci stačí kliknout pravým tlačítkem na vytvořený obsah a vybrat položku Aktualizovat pole → Celá tabulka.*

## SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Vložení odkazu na obrázek. Vyberte <i>Typ odkazu</i> , pak <i>Pouze popisek a číslo</i> ..... 16
-----	--

*Pozn.: Seznam obrázků se generuje automaticky z vložených titulků. Pro jeho aktualizaci stačí kliknout pravým tlačítkem na vytvořený seznam a vybrat položku **Aktualizovat pole** → **Celá tabulka**. Všechny položky formátované zmíněným stylem se přidají do seznamu. Pokud závěrečná práce neobsahuje obrázky, tuto stránku smažte.*

# SEZNAM TABULEK

2.1	V této šabloně jsou definované následující důležité styly .....	16
-----	---	----

*Pozn.: Seznam tabulek se generuje automaticky z vložených titulků. Pro jeho aktualizaci stačí kliknout pravým tlačítkem na vytvořený seznam a vybrat položku **Aktualizovat pole** → **Celá tabulka**. Všechny položky formátované zmíněným stylem se přidají do seznamu. Pokud závěrečná práce neobsahuje obrázky, tuto stránku smažte.*

# ÚVOD

V současnosti dochází nejen v oblasti elektrotechniky k pokroku, jehož tempo by dříve nebylo ani představitelné. Elektronické systémy neustále zvyšují svoji komplexnost a přesnost. Zároveň s tímto se výrazně zvyšují nároky na jejich precizní návrh a důkladné testování. Současně s tím musí probíhat vývoj měřicího vybavení, na které se obvykle kladou větší požadavky. Ve vývojových odděleních firem zabývajících se touto činností bývají přesné univerzální měřicí přístroje od špičkových firem z oboru měřicí techniky. Tento projekt se zabývá návrhem přesného dataloggeru, který bude schopen zaznamenávat vstupní napětí a zároveň bude obsahovat i dva kanály zdroje přesného napětíového signálu, který bude sloužit i jako nízkofrekvenční generátor. Cíle práce zahrnují seznámení se s problematikou precizního měření a generování napětí. Dále je nutno stanovit pravděpodobné zdroje nepřesnosti v konstrukci měřicího zařízení a navrhnout jejich eliminaci. Pro úspěšné dokončení vývoje dataloggeru je třeba provést návrh celkové koncepce zařízení sloužícího k měření stejnosměrného napětí do  $\pm 24$  V s chybou měření maximálně 1 mV po kalibraci a rozlišením 100  $\mu$ V nebo lepším a ke generování precizního napětí do 24 V s přesností minimálně 1 mV po kalibraci. Měřicí vstupy musí vydržet přetížení větší než 100 % rozsahu, přičemž v měření musí být možno pokračovat bez nutnosti vypnutí přístroje. Výstupy generátoru precizního napětí musí vydržet zkrat vůči GND. Rychlost měření při plné přesnosti musí dosahovat minimálně 4 vzorků za sekundu. Při snížené přesnosti se očekává vzorkování alespoň 100 Hz. Očekává se možnost přepínání alespoň čtyř kanálů pro měření s možností sdružení do dvou diferenciálních párů. Napětíové výstupy se očekávají alespoň dva. Aby bylo možno zařízení realizovat, je nutné vybrat vhodné součástky s ohledem na jejich aktuální dostupnost pro tvorbu prototypů a následně realizovat zkušební vzorek analogové části zařízení spolu s ověřením očekávaných parametrů. Kromě analogové části zařízení je dále nutno provést návrh digitální části, která bude zajišťovat zpracování surových dat do/z převodníků a komunikaci s nadřazeným systémem po sběrnici Ethernet. Nezbytnou částí je také tvorba patřičného SW, návrh postupu kalibrace, stanovení reálných dosažených parametrů zařízení a specifikace provozních podmínek.



# 1. VELIČINY OVLIVŇUJÍCÍ MĚŘENÍ

## 1.1 Vliv teploty a návrh kompenzačních opatření

Teplota je jednou z veličin, která ovlivňuje všechny elektronické prvky často významnou měrou. Z tohoto důvodu bývá u každého elektronického zařízení specifikován rozsah provozních teplot, kdy výrobce ručí za udané parametry. Je nutno s ní počítat zejména ve fázi výběru konkrétních součástek, jelikož často komponenty splňují potřebné parametry při pokojové teplotě, ale následně při zahřátí dochází ke zhoršení, jež daný typ obvod učiní pro konkrétní aplikaci zcela nepoužitelným. Pro tuto konstrukci dataloggeru je teplotní stabilita součástek klíčová, byť se předpokládá použití přibližně při pokojové teplotě. Například u pasivních součástek není příliš problematické vypořádat se s výrobními tolerancemi jednotlivých prvků řetězce zpracování signálu, kde by měla plně postačovat úvodní kalibrace v dostatečném počtu bodů. Komplikované je řešení externích vlivů, jako je teplota. Konkrétní míru ovlivnění jednotlivých částí bude tato práce popisovat v částech věnujících se výběru komponent.

Zvládnutí teplotní závislosti při návrhu zařízení tohoto typu je výzva značně se týkající konstrukce DPS i mechanické stránky. Větším problémem, než je kompenzace teploty, je kompenzace gradientu teploty uvnitř celého zařízení i na jednotlivých deskách. Jelikož každá elektronická součástka spotřebovává elektrickou energii, dochází u ní zákonitě ke tvorbě odpadního tepelného výkonu a tedy i tepelného toku, jelikož žádná součástka není perfektně tepelně odizolovaná. Tepelný výkon koncentrovaný na malé ploše pouzdra integrovaného obvodu či rezistoru způsobí, že čip vlivem tepelného odporu zapouzdření bude mít jinou teplotu, než jakou má deska plošných spojů. Problém teplotního gradientu spočívá v tom, že původní kalibrační matici koeficientů pro jednu společnou teplotu posouvá z dvourozměrného prostoru do vícerozměrného, jehož dimenze je dána počtem prvků, pro jejichž teploty chceme mít připraveny kalibrační konstanty. Nárůst počtu kalibračních bodů od jistého okamžiku učiní přístroj prakticky nezkalibrovatelný, vzhledem k náročnosti tohoto procesu za předpokladu, že chceme kalibraci detailně vystihnout teplotní závislosti.

Cílem dobrého návrhu tedy je co možná nejvíce eliminovat lokální zahřívání čipů integrovaných obvodů, což vede na snižování napájecího napětí a pokud možno co nejmenší zátěž výstupů. Dále je nutno všechny součástky co možná nejlépe tepelně provázat maximalizací tepelné vodivosti nosné desky plošných spojů a dalšími opatřeními. Toho se docílí umístěním citlivých komponent co nejblíže k sobě a zejména jejich připojením na jednolitou plochu mědi, obvykle GND. Aplikací dostatečně účinných opatření by mělo být možné vliv teploty snížit natolik, že i precizní kalibrace bude minimálně teplotně závislá. V tomto ohledu jsem od pana Ing. Cupáka obdržel věcnou radu ohledně použití ventilátoru. Vzhledem k preciznosti dataloggeru může mít vliv i proudění vzduchu nad deskou elektroniky. Kvůli elektromagnetickému stínění je

plánováno citlivou analogovou část kompletně zakrýt plechovým krytem, připájeným na DPS. To vytvoří uzavřený prostor, který bude temperován na konstantní provozní teplotu pomocí malého topného tělesa. Panem Ing. Cupákem bylo k tomuto postupu namítnuto, že by uvnitř uzavřeného prostoru mohlo docházet k velkému teplotnímu gradientu, a tedy že by bylo vhodnější zde umístit ventilátor pro cirkulaci vzduchu. Aplikování tohoto opatření způsobí, že dojde k prohřívání výrazně rovnoměrněji než pouhým spoléháním na pasivní rozvedení tepla. Použití ventilátoru ovšem přináší celou řadu dalších komplikací. Při návrhu desek plošných spojů, jejich rozmístění uvnitř přístroje a návrhu mechanické části je nutné dobře odhadnout (nebo ideálně simulovat) proudění vzduchu, ponechat dostatek volného prostoru, vypořádat se s případným znečištěním prachem a také počítat s omezenou životností rotujících částí (zejména kluzného ložiska ventilátoru). Ventilátor tvoří zdroj vibrací, které by například mohly nepříznivě ovlivňovat kritický filtrační kondenzátor v napěťové referenci. (více vrstvé keramické kondenzátory vykazují piezoelektrický jev, podrobněji dále v kapitole věnované napěťové referenci) Vzhledem k těmto okolnostem bylo rozhodnuto v první verzi přístroje ventilátor nepoužívat.

## 1.2 Vznik termočlánků na desce plošných spojů

Termoelektrický jev, projevující se vznikem elektrického napětí v uzavřené smyčce na rozhraních dvou různých kovů, může také způsobit nezanedbatelné napětí v měřicím řetězci. Toto napětí je dáno rozdílem teplot přechodů mezi oběma kovy a také rozdílem Seebackových koeficientů pro daný kov. V rozsahu teplot uvažovaných v této aplikaci lze všechny výše uvedené veličiny považovat v jejich nejjednodušší formě – tedy lineární či konstantní. Zmíněné jevy se v praxi často využívají k měření (zejména vysokých) teplot a v mnoha aplikacích jsou obtížně nahraditelné. Pro návrh precizních měřicích systémů ovšem často představují spíše další z mnoha zdrojů problémů.

Při prvotním plánování bylo například předpokládáno ruční pájení nejcitlivějších součástek pájkou se značným obsahem bismutu, který ve slitině s cínem a olovem radikálně snižuje teplotu tání pájky, což by mělo zmenšit ovlivnění a riziko zničení precizních součástek jako je napěťová reference či AD převodník a usnadnit pájení pouzder s chladicí ploškou pod tělem pouzdra. Při následné analýze míry ovlivnění byl zjištěn velmi výrazný rozdíl mezi Seebackovým koeficientem pro bismut a koeficientem pro měď, která je běžně používána jako základní materiál vodivých cest na deskách plošných spojů. Hodnoty koeficientů jsou pro cín  $-1,5\mu\text{V/K}$ , pro olovo  $4,0\mu\text{V/K}$ , pro měď  $6,5\mu\text{V/K}$  a pro bismut  $-72\mu\text{V/K}$ . [1] Od běžně používané olovnaté pájky lze tedy na spoji na desce plošných spojů očekávat rozdíl koeficientů okolo  $8\mu\text{V/K}$ , ale při pájení s přídavkem bismutu by potenciálně mohlo dojít k navýšení tohoto koeficientu až k desítkám mikrovoltů na kelvin. Vzhledem k tomu, že spoje budou tvořeny slitinami, a ne čistými kovy, nelze považovat výše uvedené konstanty za zcela průkazné, avšak lze je vnímat jako potenciální zdroj možných problémů, který je vhodné eliminovat. K pájení

kritických částí tedy bude použita standardní pájka či pájecí pasta ze slitiny cínu s olovem. Zároveň je třeba eliminovat změny teploty v různých částech desky, jak bylo popsáno výše.

### 1.3 Tepelný šum

Tepelný šum je vytvářen náhodným pohybem volných elektronů ve vodiči, které nastává při jakékoliv teplotě nad 0 K. Velikost pohybu nosiče náboje je úměrná teplotě vodiče. Náhodný pohyb elektronů tvoří náhodný proud ve vodiči a jelikož každý materiál (s výjimkou supravodičů) vykazuje nenulovou hodnotu měrné elektrické vodivosti, tak se na každé části elektrického obvodu objevuje náhodné šumové napětí. Velikost tepelného šumu se měří jako jeho průměrný výkon  $P_{avg}$ , který je funkcí teploty vodiče  $T$  a šířky frekvenčního pásma  $B$  zahrnutého v měření.

$$P_{avg} = 4kTB [W]$$

kde  $k$  je Boltzmannova konstanta,  $k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $T$  je absolutní teplota a  $B$  je šířka pásma, ve kterém se měří šum. Efektivní šumové napětí  $U_n$  na svorkách vodiče s odporem  $R$  lze po dosazení do vzorce pro výpočet výkonu

$$P_{avg} = \frac{U_n^2}{R}$$

vyjádřit jako následující vztah.

$$U_n = 2 \times \sqrt{kTBR}$$

Tepelný šum má charakter bílého šumu. Termín bílý označuje rozložení výkonu ve frekvenčním spektru. Předpokládá se, že je frekvenčně nezávislý. Stejně jako bílé světlo obsahuje všechny barvy ve spektru ve stejné míře, spektrum bílého šumu obsahuje všechny frekvence ve stejné míře. [2]

Pro názorný příklad uveďme dva krajní případy, týkající se této konkrétní aplikace. V průběhu návrhu bylo uvažováno přidání ochrany vstupů pomocí vložení rezistoru  $10 \text{ k}\Omega$  do cesty signálu. V porovnání se vstupní impedancí uvažovaného analogového frontendu se jedná o zanedbatelnou hodnotu. Podstatně však dojde ke zvýšení vstupní impedance v okamžiku přetížení vstupu, kdy začnou reagovat ochranné varistory či diody proti napájení, jejichž impedance je při jejich aktivaci v řádu spíše jednotek či desítek ohmů a pustí tedy do zařízení i značné proudy, dovolí-li to impedance zdroje signálu. Vybraný AD převodník disponuje nastavitelnou vzorkovací frekvencí  $10 \text{ kHz}$  a uvažujeme teplotu  $40^\circ\text{C}$ . Pro tento případ dosazením do vzorce získáváme pro pásmo  $5 \text{ kHz}$   $U_n = 2,94 \times 10^{-7} \text{ V}$ . Tato hodnota je pro danou aplikaci přijatelná, ačkoliv se jedná o napětí výrazně převyšující rozlišení AD převodníku.

Druhý krajní případ bude uvažovat pomalé vzorkování  $5 \text{ Hz}$  a pouze parazitní odpor měřících vodičů, který lze v běžných situacích odhadnout na méně než  $10 \Omega$ . V tomto případě vychází  $U_n = 4,65 \times 10^{-10} \text{ V}$ , tedy z hlediska této konkrétní aplikace zanedbatelné.

Z podstaty problému tepelného šumu je patrné, že výše uvedené temperování kritických částí měřicího řetězce nevyhnutelně vede na zhoršení šumových vlastností. Z tohoto hlediska by bylo mnohem výhodnější dané komponenty chladit na co nejnižší teplotu v jejich pracovním rozsahu, což je naprosto běžná praxe u mnoha precizních vědeckých měření. Realizace vhodného chlazení pro konstruovaný datalogger je bohužel značně komplikovaná z mnoha aspektů. Vzhledem k velikosti zařízení přichází v úvahu pouze peltierovy termoelektrické články, které při průchodu elektrického proudu generují rozdíl teploty mezi horkou a chladnou stranou článku. Podstatnou nevýhodou je celkem nízká účinnost způsobující nutnost odvodu značného množství tepla z horké strany peltierova článku. Dalším významným problémem konstrukce chlazení je lokální kondenzace vzdušné vlhkosti na ochlazovaných komponentech, která by z dlouhodobého hlediska ovlivňovala stabilitu parametrů součástek a v krajním případě by mohla i způsobit selhání zařízení vlivem vzniku svodů na desce plošných spojů.

## **1.4 Systém napájení dataloggeru**

### **1.4.1 Požadavky a možné způsoby řešení**

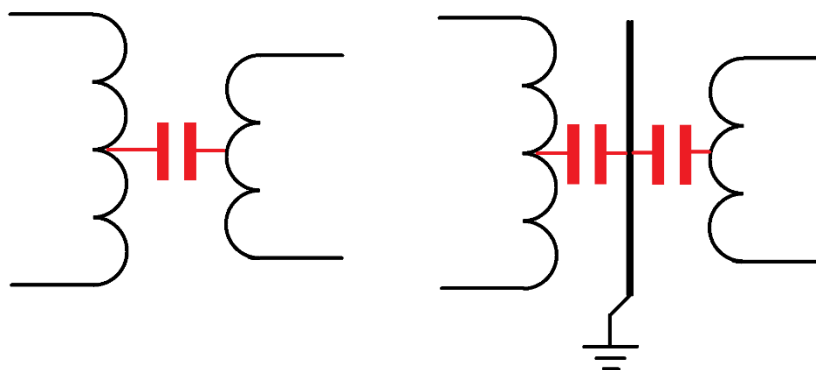
Vhodně navržený napájecí systém je podstatný nejen pro správnou funkčnost systému, ale musí zohledňovat i požadavky na bezpečnost, spolehlivost, ekonomiku provozu a způsob obvyklého využití zařízení. Konstruovaný datalogger je plánován jako stolní měřidlo pro oddělení vývoje a zároveň i oddělení výroby, kde bude obsluhován výhradně osobami s patřičnou kvalifikací. Lze očekávat krátkodobé zapínání na provedení jednoho osamocené měření i dlouhodobější chod při několikadenních měřeních. K dispozici je běžná síť 230 V/50 Hz s očekávaným přepětím kategorie II dle ČSN EN IEC 60664-1 ed. 3 (Koordinace izolace zařízení nízkého napětí - Část 1: Zásady, požadavky a zkoušky). Očekává se, že měřený systém může být napájen z libovolného běžného zdroje, tedy přímo z neoddělené sítě 230 V (přímo s ní spojen), SELV napájecího stejnosměrného zdroje nebo baterie.

Provádění precizních měření je kritické zajistit co nejmenší ovlivňování parazitními vlastnostmi měřidla, které jsou z velké části obvykle definovány vazbou na síť uvnitř napájecího zdroje měřidla i měřeného zařízení. V běžné praxi se nejlepších výsledků dosahuje, pokud alespoň jedno ze zařízení je napájeno z baterie. Toto řešení však vyžaduje pravidelné nabíjení akumulátoru (nebo výměnu baterie), což zvyšuje nároky na údržbu a v případě vestavěného akumulátoru také snižuje životnost zařízení. Vyhřívání analogové části, procesor a komunikační obvody jsou na poměry přijatelně velkých akumulátorů a uvažovaný čas běhu zařízení nepřiměřeně energeticky náročné, byť ještě stále potenciálně realizovatelné. Vzhledem k negativům však bylo rozhodnuto zvolit napájení ze sítě. V takovém případě lze volit externí DC adaptér, spínaný zdroj nebo klasický 50Hz transformátor. Analogové obvody dataloggeru vyžadují symetrické

napájení cca  $\pm 32$  V, dále +5 V, +7 V, +11 V a -5 V. Digitální část si v současném stavu vystačí s +3,3 V. V případě napájení z externího DC adaptéru by bylo nutné použít několik měničů napětí, jelikož tyto adaptéry jen zřídka mají více než jeden výstup. Zároveň odpojitelný adaptér zvyšuje riziko, že obsluha zapojí jiný adaptér, což může ovlivnit chování přístroje i pokud by jeho jmenovité parametry byly shodné. U DC adaptérů bývá problematická vazba na síť, kdy napětí sekundární strany může oproti PE dosahovat prakticky jakékoliv hodnoty od 0 V do 230 V AC a může dále obsahovat i vysokofrekvenční nebo DC složky. Všechna tato napětí mají vysokou impedanci a jsou na dotek pro obsluhu zcela bezpečné, ale mohou být dostatečné i na zničení citlivých součástek jako jsou MOSFET tranzistory. V těchto adaptérech je téměř vždy kvůli optimalizaci elektromagnetické kompatibility odrušovací Y kondenzátor s kapacitou řádově jednotek nanofaradů mezi primární a sekundární stranou. Ačkoliv se pro DC a 50Hz složku jedná o velmi dobrou izolaci, pro pracovní frekvenci zdroje v řádu desítek až stovek kHz je impedance kondenzátoru již značně nízká a vazba na síť tedy značně silná. Obdobných vlastností by dosahoval i spínaný napájecí zdroj integrovaný dovnitř přístroje, jedinou podstatnější výhodou by byly trvale definované parazitní vlastnosti. (Zde obvykle ještě přibývají Y kondenzátory vůči PE.)

#### 1.4.2 Zrealizované řešení – síťová část

Jako nejvhodnější způsob napájení byl zvolen zakázkově vyrobený 19VA 50Hz toroidní transformátor od firmy J K – E L T R A s.r.o. s pěti sekundárními vinutími a stíněním mezi primárním a sekundárním vinutím, které vůči primárnímu i sekundárnímu vinutí dodržuje požadavky na minimálně základní izolaci. Význam stínění spočívá ve značné změně charakteru parazitní vazby mezi vinutími.



Obrázek 1.1 Vložení odkazu na obrázek. Vyberte *Typ odkazu*, pak *Pouze popis* a číslo

U nestíněného transformátoru tvoří primární a sekundární vinutí díky své značné ploše a malé izolační vzdálenosti nezanedbatelný kondenzátor způsobující vazbu obou stran na vyšších frekvencích. Kapacita může v podobných případech dosahovat řádově

nanofaradů. Vložením stínění dojde k vytvoření další elektrody a tedy dvou parazitních kapacit místo jedné. Uzemněním stínění dojde k tomu, že naprostá většina rušení je přenášena pouze kapacitou mezi primárním vedením a stíněním. Sekundární vedení jsou vazbena vůči uzemnění podobnou kapacitou, ale uzemnění lze považovat za relativně nezarušené. (Bohužel v tomto konkrétním případě se kapacity nepodařilo smysluplně změřit, jelikož značná indukčnost vinutí rozhodla měření dostupného multimetru.)



Obrázek 1.2 Vložení odkazu na obrázek. Vyberte *Typ odkazu*, pak *Pouze popisek a číslo*

Transformátor odpovídá požadavkům ČSN EN 61558-2-6 ed. 2 (Bezpečnost transformátorů, tlumivek, napájecích zdrojů a podobných výrobků pro napájecí napětí do 1 100 V - Část 2-6: Zvláštní požadavky a zkoušky pro bezpečnostní ochranné transformátory a pro napájecí zdroje obsahující bezpečnostní ochranné transformátory). Jmenovité a změřené parametry transformátoru jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 1.1 Jmenovité parametry použitého transformátoru

Parametr	Hodnota	Poznámka
Jmenovité efektivní napětí primárního vinutí	230 V	Bílá izolace
Jmenovité napětí sekundárního vinutí 1	27 V	V zátěži
Jmenovitý proud sekundárního vinutí 1	0,15 A	Žlutá izolace
Jmenovité napětí sekundárního vinutí 2	27 V	V zátěži
Jmenovitý proud sekundárního vinutí 2	0,05 A	Červená izolace
Jmenovité napětí sekundárního vinutí 3	10 V	V zátěži
Jmenovitý proud sekundárního vinutí 3	0,75 A	Hnědá izolace
Jmenovité napětí sekundárního vinutí 4	6 V	V zátěži
Jmenovitý proud sekundárního vinutí 4	0,15 A	Zelená izolace
Jmenovité napětí sekundárního vinutí 5	4,5 V	V zátěži
Jmenovitý proud sekundárního vinutí 5	1,25 A	Modrá izolace

Tabulka 1.2 Změřené parametry použitého transformátoru

Parametr	Hodnota	Poznámka
----------	---------	----------

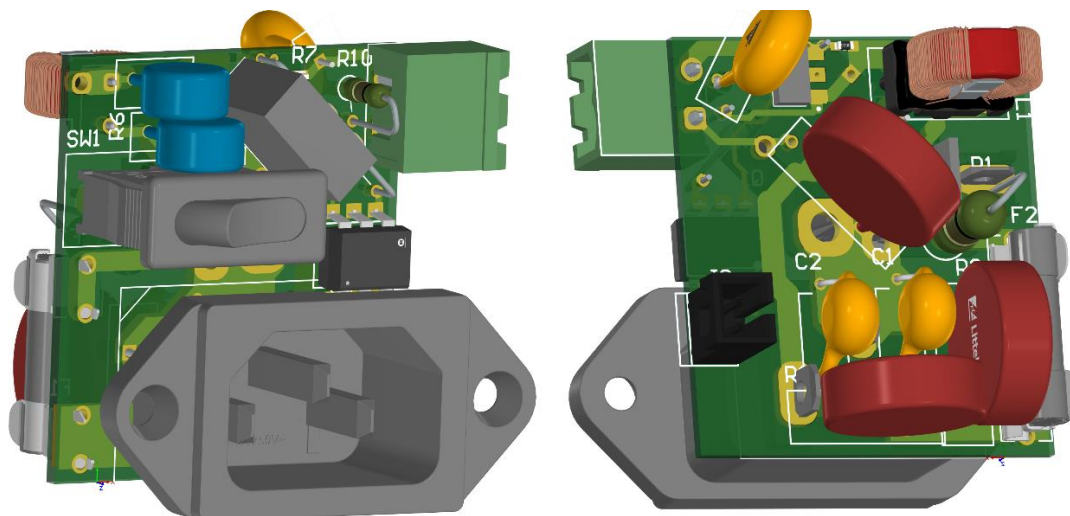
Odpor primárního vinutí	86	
Odpor sekundárního vinutí 1	5,2	
Odpor sekundárního vinutí 2	5,6	
Odpor sekundárního vinutí 3	0,6	
Odpor sekundárního vinutí 4	1,1	
Odpor sekundárního vinutí 5	0,2	
Rozptylová indukčnost primárního vinutí	87,31 mH	Sekundární vinutí zkratována
Indukčnost primárního vinutí	14,6 H	Sekundární vinutí rozpojena
Napětí naprázdno sekundárního vinutí 1	29,01 V	Při 230 V
Napětí naprázdno sekundárního vinutí 2	28,52 V	Při 230 V
Napětí naprázdno sekundárního vinutí 3	10,53 V	Při 230 V
Napětí naprázdno sekundárního vinutí 4	6,25 V	Při 230 V
Napětí naprázdno sekundárního vinutí 5	4,82 V	Při 230 V

Síťové napájení (L+N+PE) je přivedeno konektorem typu IEC 60320 na zadním panelu na ochrannou a filtrační desku, která je připájena přímo na síťovém konektoru a vypínači. Přímo u konektoru jsou na DPS neodpojitelně (před vypínačem) 1nF Y1 kondenzátory mezi PE-L a PE-N pro potlačení vysokofrekvenčního rušení co nejblíže ke vstupu. Stejně neodpojitelně jsou umístěny i varistory pro hrubou ochranu (na provozní napětí 310 V AC, schopné vydržet ráz až 6 kA) mezi všemi kombinacemi, kde se může vyskytnout přepětí, tedy L-N, L-PE, N-PE. Takto silná ochrana je značně naddimenzovaná a odpovídala by spíše použití v průmyslovém prostředí než běžné kategorii přepětí II. Cena varistorů je nicméně zanedbatelná vzhledem k celkovým nákladům na materiál a zařízení ani nemá být vyráběno sériově, tudíž předimenzování ochrany by nemělo být problematické. Varistory přímo u vstupu jsou na 300 V AC dimenzovány pro omezení degradace během dlouhodobého připojení k síti. (Pracuje-li reálný varistor dlouhodobě poblíž jmenovitého napětí, lze očekávat postupné zvyšování unikajícího proudu.)

Pracovní vodiče jsou vzájemně plně záměnné, dále však budou pro lepší názornost označovány v souladu se schématem L a N. Fázový vodič je jištěn pomalou pojistkou T250mA/250V, veden přes drátový rezistor 100  $\Omega$  /3 W na jednopólový vypínač. Rezistor R1 slouží pro omezení proudového nárazu při zapnutí transformátoru, který vzniká kvůli nutnosti nasycení jádra transformátoru a nabití filtračních kapacit na sekundární straně za usměrňovači. Musí se jednat o drátový rezistor, jelikož v případě tenkovrstvých rezistorů může i u takto malého transformátoru dojít k přepálení vlivem počátečního rázu. Obvykle se zde v běžné elektronice používá výkonový NTC termistor, jehož odpor výrazně klesá v závislosti na vlastním zahřívání způsobeném průchodem elektrického proudu. Toto řešení značně snižuje ztráty při současném zachování jednoduchosti obvodu (není nutné překlenutí pomocí relé/triaku), ovšem za cenu problematického chování v širokém rozsahu teplot (což by v tomto konkrétním případě nevalilo) a zejména při opakovaném zapínání napájecího zdroje, kdy termistor potřebuje

značný čas pro ochlazení (řádově až minuty, závisí na typu a použití) a během problematické doby je nárazový proud omezen výrazně méně. Použitý  $100\Omega$  rezistor tvoří přibližně 4 % z celkové hodnoty impedance vstupu, což je relativně akceptovatelná hodnota, umožňující absenci překlenovacího obvodu. Téměř podobným příspěvkem přispívá i odpor primárního vinutí, který při přibližně 2300 závitěch tenkého drátu přidá dalších  $86\Omega$  reálné složky impedance. Omezení nárazového proudu není nutné kvůli napájecí síti, ale mělo by mít pozitivní vliv na životnost pojistky a případně i transformátoru, zejména v případě opakovaných startů velmi krátce po sobě.

Za vypínačem je menší varistor pro jemnější ochranu (275 V AC / 2,5 kA, 66 J) mezi L a N, jehož úkolem je omezení přepětí na výrazně nižší hodnotu než u vstupního varistoru, čemuž napomůže i rezistor R1 pro tlumení nárazového proudu. Filtrační obvod je dále tvořen dvojitou 10 mH tlumivkou pro potlačení souhlasného rušení a 100nF X2 kondenzátorem mezi fázovým a nulovým vodičem pro eliminaci vysokofrekvenčního diferenciálního rušení. Malý varistor na této straně tlumivky omezuje případné vysoké napětí, které by mohla odrušovací tlumivka generovat při přepětíovém rázu a také případné napětíové špičky generované primárním vinutím transformátoru při rozpojení. Na filtrační a spínací desce je v cestě proudu triak řízený optotriakem pro umožnění ovládání tlačítkem z čelního panelu, což je pro obsluhu pohodlnější a snižuje to opotřebení síťového vypínače.



Obrázek 1.3 Vložení odkazu na obrázek. Vyberte *Typ odkazu*, pak *Pouze popis* a číslo

DPS je pevně přimontována k zadnímu panelu, jelikož vypínač a zásuvka musí být pájeny v montážních otvorech. Již tak dostatečné mechanické upevnění je posíleno uzemňovacím šroubkem mezi panelem a deskou. Pro zvýšení bezpečnosti je ochranný vodič veden ještě nezávislým vodičem s pájecím očkem přímo na dno hliníkové krabičky. V návrhu DPS je jedna z cest nedokončena, jelikož vzhledem k nutnosti dodržení



izolačních vzdáleností nezbyvalo místo. Z tohoto důvodu je cíleně realizována propojovacím izolovaným vodičem mezi dvěma vyhrazenými pájecími ploškami.

Transformátor je vestavěn do montážní krabičky z pocínovaného plechu, která slouží jako stínění rozptylového magnetického pole a je montážním šroubem uzemněna přes dno krytu. Elektrostatické stínění mezi primárním a sekundárním vinutím je připájeno přímo ke dnu této montážní krabičky.

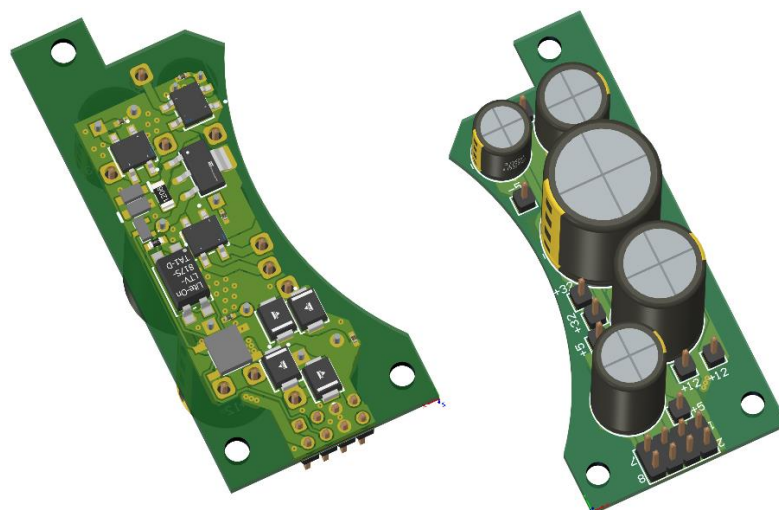
#### **1.4.3 Zrealizované řešení – stejnosměrná část.**

Pro úspěšný návrh bylo nutno pečlivě rozvrhnout potřeby jednotlivých komponent. Relativně jednoduchá je situace u digitální části, která si vystačí pouze s napětím 3,3 V a případné nižší napětí si použité integrované obvody dokáží vytvořit interním stabilizátorem. Při součtu nejvyšších možných proudů z katalogů výrobců byl maximální možný odběr této větve stanoven na cca 3 W, tedy necelý 1 A. (Obvykle okolo 1,5 W.) Napájení digitální části je zajišťováno 4,5 V vinutím. Na této napájecí větvi je použití LDO stabilizátoru problematické, což vedlo k rozhodnutí porušit snahu o kompletní vynechání spínaných měničů.

Pro analogovou část jsou preferovány v maximální možné míře lineární stabilizátory, jelikož prakticky nevytvářejí rušení na vyšších frekvencích a mají obvykle méně zvlněný výstup. Potřebná napětí jsou: cca  $\pm 32$  V pro měřicí modul (má vlastní stabilizátor – viz popis modulu), +28 V pro výstupní zesilovače analogových výstupů, +7 V pro napájení měřicího modulu a napěťové reference analogových výstupů, +11 V pro pomocné zesilovače v modulu DA převodníku a -5 V pro výstupní zesilovače analogových výstupů. +28V a -5V větve musí zvládnout napájet výstupní zesilovač i v případě zkratu obou kanálů (až cca 100 mA), ostatní větve jsou zatíženy výrazně méně. Napájení vytápění jednotlivých modulů je vedeno odděleně a je stavěno na 12 V s odběrem cca 6 W při náběhu.

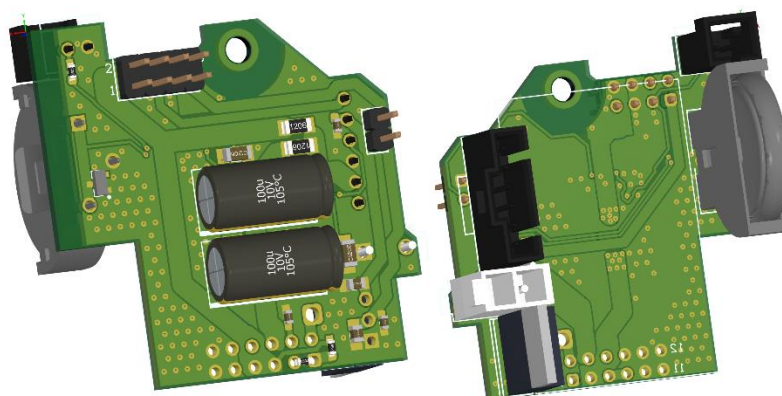
Stejnoseměrný rozvod napájení byl navrhován až jako poslední součást zařízení a kvůli zvětšení transformátoru o cca 10 mm v průměru oproti prvním odhadům na něj nezbylo mnoho volného prostoru, což vedlo na rozdělení na 3 DPS, které byly následně pomocí konektorů poskládány do tří pater ve volném místě vedle transformátoru a nad procesorem.

První DPS (vedle transformátoru) obsahuje usměrňovače pro jednotlivé větve, optočlen pro případnou možnost synchronizace se sítí a jednoduchý stabilizátor s tranzistorem a zenerovou diodou pro +36V větev. (na +36V větvi je možný větší proudový odběr, tudíž tato triviální stabilizace vede k rozptřeni tepla dále od analogových modulů).



Obrázek 1.4 Vložení odkazu na obrázek. Vyberte *Typ odkazu*, pak *Pouze popis* a číslo

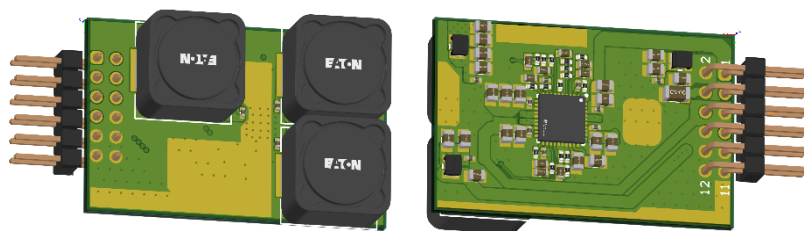
Druhá DPS slouží zejména jako propojovací prvek. Je zde stabilizována -5V větev pomocí integrovaného obvodu 7905 v pouzdru TO-220 a také 3,3V baterie CR2032 pro RTC obvod v procesoru a hlavně pro start napájení přes optotriak. První dvě DPS jsou pro svoji jednoduchost pouze dvouvrstvé, avšak jejich umístění vyžadovalo precizní návrh tvaru a tvorbu 3D sestavy.



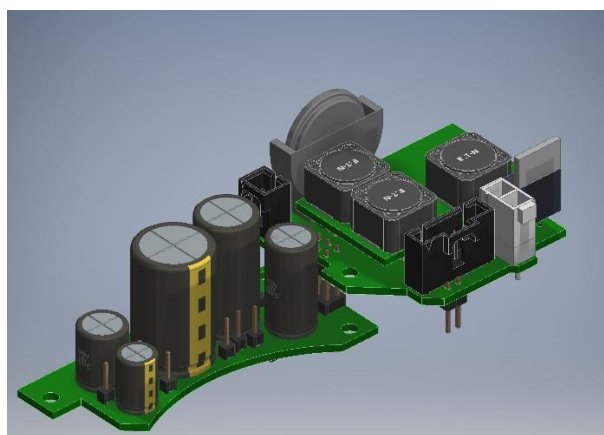
Obrázek 1.5 Vložení odkazu na obrázek. Vyberte *Typ odkazu*, pak *Pouze popis* a číslo

Třetí modul je trojitý spínaný měnič založený na obvodu TPS65251 na čtyřvrstvé DPS. Jedná se prakticky o katalogové zapojení, pouze na každou větev je přidán dodatečný LC filtr tvořený indukčností 3,3  $\mu$ H a 10  $\mu$ F a více, což vytvoří dolní propust s mezní frekvencí pod 40 kHz. (Kapacita je různá u jednotlivých větví a také je na dalších DPS.) Čip má čtyři samostatná napájení – jedno pro samotný čip a tři pro jednotlivé

měníče. 3,3V větev je napájena z 4,5V vinutí, zbytek z 11V větve. Modul vytváří 3,3 V pro logiku, 12 V pro topení a 5 V pro případné další budoucí rozšiřující moduly.



Obrázek 1.6 Vložení odkazu na obrázek. Vyberte *Typ odkazu*, pak *Pouze popisek a číslo*



Obrázek 1.7 Vložení odkazu na obrázek. Vyberte *Typ odkazu*, pak *Pouze popisek a číslo*

## **2. ZÁVĚR**

(Kapitolu nahraďte svým textem) Kapitola Závěr obsahuje

## LITERATURA

- [1] *Pravidla českého pravopisu*, 2017. Vydání 3. (s Dodatkem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR). Praha: Academia. ISBN 978-80-200-2755-9.
- [2] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2017. *Směrnice č. 72/2017 - Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací*. Online. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/uredni-deska/vnitrni-predpisy-a-dokumenty/smernice-72-2017-uprava-odevzdavani-a-zverejnovani-zaverecnych-praci-d161410>. [cit. 2023-10-03].
- [3] ČSN ISO 690:2022 (010197), *Informace a dokumentace - Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*, 2022. [Praha]: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.
- [4] ČSN ISO 7144 (010161), *Dokumentace - Formální úprava disertací a podobných dokumentů*, 1997. Praha: Český normalizační institut.
- [5] ČSN EN ISO 80000-2 (011300), *Veličiny a jednotky - Část 2: Matematika*, 2020. Praha: Česká agentura pro standardizaci.

*Pozn.: Pro vytváření citací ve formátu dle ČSN ISO 690:2022 je doporučeno využít webové stránky: <http://www.citace.com/> nebo lze přímo instalovat doplněk Citace PRO do MS Word (viz - <https://www.vut.cz/uk/navody/citacepro> )*

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně

### Symboly:

$U$	napětí	(V)
$I$	proud	(A)

*Pozn.: V této části by měly být uvedeny všechny zkratky použité v textu a všechny symboly použité v rovnicích.*

# SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	26
------------------------------------	----

*Samotná část příloh je tvořena dvěma částmi „Seznamem příloh“ a jednotlivými přílohami označenými „Příloha A“ až „Příloha X“. Do příloh se dávají např. manuály, zdrojové kódy, rozsáhlé tabulky s naměřenými hodnotami, grafy apod. V případě, že taková data nejsou součástí práce, není třeba přílohy uvádět vůbec.*

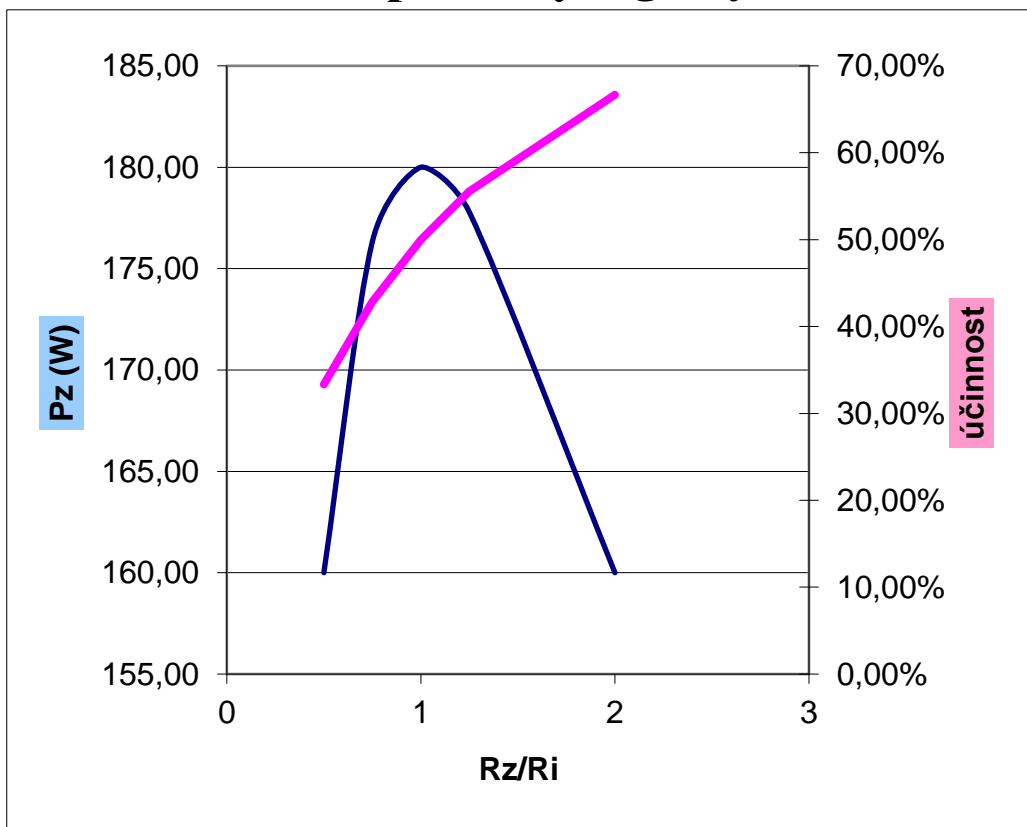
*Pokud je rozsah přílohy příliš velký (např. příliš velký počet tabulek, nebo mnoho stránek zdrojového kódu), do seznamu příloh lze uvést např. větu: „Příloha A – Zdrojový kód programu je uložen na přiloženém CD“. V takovém případě musí být závěrečná práce doplněna CD, na kterém jsou příslušná data uložena a jasně označena.*

## Příloha A - Naměřené hodnoty

### A.1 Tabulka naměřených hodnot

$R_z (\Omega)$	$I_z (A)$	$U_z (V)$	$P_i (W)$	$P_z (W)$	$P (W)$	$\eta$
10	4,000	40,00	320,00	160,00	480,00	33,33%
15	3,429	51,43	235,10	176,33	411,43	42,86%
20	3,000	60,00	180,00	180,00	360,00	50,00%
25	2,667	66,67	142,22	177,78	320,00	55,56%
40	2,000	80,00	80,00	160,00	240,00	66,67%

### A.2 Naměřené průběhy – grafy





## SEZNAM OBRÁZKŮ

### Úvod

1. Veličiny ovlivňující měření	
1.1 vliv teploty a návrh kompenzačních opatření	10
1.2 vznik termočlánků na desce plošných spojů	11
1.3 tepelný šum	12
2. Návrh zařízení	14
2.1 rozdělení do funkčních bloků	14
2.2 řešení analogového vstupu	15
2.3 výběr ad převodníku	16
2.4 realizace vstupního obvodu	18
2.5 výběr napěťové reference	21
2.6 napěťový výstup	22
2.7 digitální část	22