

Digitální wattmetr pro měření malých výkonů

Patrik Komárek

Bakalářská práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Patrik Komárek
Osobní číslo: A20638
Studijní program: B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci
Specializace: Průmyslová automatizace
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Digitální wattmetr pro měření malých výkonů
Téma práce anglicky: Digital Wattmeter for Small Power Measurements

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši na dané téma.
2. Provedte hardwarový návrh digitálního wattmetru pro měření malých výkonů na bázi vybraného mikropočítače.
3. Prakticky realizujte navržený měřicí přístroj.
4. Vytvořte programové vybavení wattmetru umožňující měření činného, jalového a zdánlivého výkonu.
5. Ověřte správnou funkci wattmetru.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

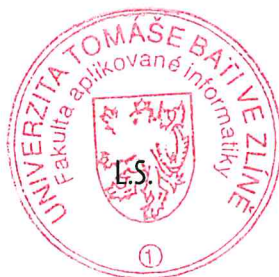
1. FROHN, Manfred. Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 8073001233.
2. JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. EAGLE pro začátečníky /: uživatelská a referenční příručka :. 2. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2007, 191 s. ISBN 80-730-0213-2.
3. NXP Semiconductors. ARM Microcontrollers / General Purpose Microcontrollers, [online]. 2022 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <http://www.nxp.com>
4. PINKER, Jiří. Mikroprocesory a mikropočítače. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 80-7300-110-1.
5. PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 5. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 8073000598.
6. VÁŇA, Vladimír. ARM pro začátečníky. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2009, 195 s. ISBN 978-80-7300-246-6.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Dostálek, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **16. prosince 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2023**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 12. prosince 2022

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

Patrik Komárek, v. r.
podpis studenta

ABSTRAKT

V práci je uveden celý postup tvorby digitálního wattmetru pro měření malých výkonů. V teoretickém úvodu jsou uvedeny některé známé metody snímání napětí a proudu. Poté jsou popsány technologie pro měření a úpravu signálu, konkrétně operační zesilovače, A/D převodníky a optočleny. Na konci teoretického úvodu jsou základní informace o mikropočítačích a wattmetrech.

V praktické části je popsán celý postup návrhu schématu wattmetru, ze kterého byl poté vytvořen návrh desky plošných spoj. Dále je ukázán způsob realizace, tvorba programového vybavení a ověření funkčnosti.

Pokud bude wattmetr fungovat podle předpokladů, bude možné ho využít při výuce na fakultě.

Klíčová slova:

Digitální wattmetr, činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, účinník, mikropočítač, bočník, dělič napětí, LCD displej

ABSTRACT

The work presents the entire process of creating a digital wattmeter for measuring small powers. In the theoretical introduction, some well-known methods of sensing voltage and current are presented. Then the technologies for measuring and adjusting the signal are described, namely operational amplifiers, A/D converters and optocouplers. At the end of the theoretical introduction, there is basic information about microcomputers and wattmeters.

In the practical part, the entire process of designing the wattmeter scheme is described, from which the printed circuit board design was created. Furthermore, the method of implementation, creation of software and verification of functionality is shown.

If the wattmeter works as expected, it will be possible to use it in teaching at the faculty.

Keywords:

Digital wattmeter, active power, reactive power, apparent power, power factor, microcomputer, shunt, voltage divider, LCD display

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Dostálkovi, Ph.D. za mnoho cenných a důležitých rad při řešení problematiky a za spolehlivou komunikaci.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN V OBVODECH	11
1.1 ZPŮSOBY SNÍMÁNÍ PROUDU	11
1.1.1 Bočník	11
1.1.2 Proudový transformátor	11
1.1.3 Senzor s Halloovou sondou.....	12
1.1.3.1 Měření v otevřené smyčce	12
1.1.3.2 Měření v uzavřené smyčce	13
1.2 ZPŮSOBY SNÍMÁNÍ NAPĚTÍ.....	14
1.2.1 Dělič napětí	14
1.2.2 Napěťový měřicí transformátor.....	14
2 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÝCH SIGNÁLŮ	15
2.1 OPERAČNÍ ZESILOVAČE	15
2.1.1 Neinvertující zesilovač.....	16
2.1.2 Invertující zesilovač	16
2.1.3 Součtový zesilovač.....	17
2.1.4 Integrovní zesilovač.....	17
2.1.5 Derivační zesilovač	18
2.2 A/D PŘEVODNÍKY	19
2.2.1 Základní vlastnosti A/D převodníků	19
2.2.2 Funkce A/D převodníků	20
2.2.3 Rozdělení A/D převodníků	20
2.3 GALVANICKÉ ODDĚLENÍ.....	22
2.3.1 Optické galvanické oddělení	22
2.3.2 Další způsoby galvanického oddělení	23
2.4 MIKROKONTROLERY	23
2.4.1 FRDM-K20D50M.....	24
3 WATTMETR	26
3.1 PRINCIP WATTMETRU	26
3.2 TYPY WATTMETRŮ	26
3.3 POTŘEBNÉ VZORCE PRO VÝPOČET STRÍDAVÉHO VÝKONU.....	27
II PRAKTICKÁ ČÁST	29
4 NÁVRH OBVODU	30
4.1 VÝBĚR HLAVNÍCH KOMPONENTŮ	30
4.1.1 Operační zesilovače	30
4.1.2 A/D převodníky	31
4.1.3 Optočleny	32
4.1.4 Mikrokontroler	32
4.1.5 Displej	32
4.1.6 Zdroje napětí	32
4.2 SNÍMÁNÍ VSTUPNÍCH VELIČIN	33
4.2.1 Snímání proudu	34

4.2.2	Snímání napětí.....	35
4.3	NÁVRH FINÁLNÍHO OBVODU V APLIKACI EAGLE.....	37
4.3.1	Připojení napěťových zdrojů.....	37
4.3.2	Připojení A/D převodníků.....	39
4.3.3	Připojení optočlenů.....	40
4.3.4	Připojení mikropočítače.....	41
4.3.5	Celý navržený obvod.....	42
4.4	NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	43
5	REALIZACE PŘÍSTROJE.....	46
5.1	OSAZENÍ DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	46
5.2	PROPOJENÍ CELÉHO ZAŘÍZENÍ.....	48
6	PROGRAM PRO MĚŘENÍ A ZOBRAZENÍ VÝKONU.....	49
6.1	DRIVERY PROGRAMU.....	49
6.2	PŘÍPRAVA PROGRAMU.....	49
6.3	FUNKCE V PROGRAMU.....	50
6.4	HLAVNÍ FUNKCE MAIN A ZOBRAZENÍ HODNOT NA DISPLEJI.....	53
7	OVĚŘENÍ FUNKCE WATTMETRU.....	56
7.1	ZADÁNÍ ÚLOHY PRO OVĚŘENÍ WATTMETRU.....	56
7.2	MĚŘENÍ DIGITÁLNÍM WATTMETREM.....	59
7.3	MĚŘENÍ ANALOGOVÝM WATTMETREM.....	62
7.4	POROVNÁNÍ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	64
	ZÁVĚR.....	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
	SEZNAM TABULEK.....	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

ÚVOD

Měření elektrického výkonu se dnes využívá v mnoha oborech, především v elektronice. Přesné měření elektrického výkonu je důležité pro zjištění spotřeby elektrické energie, což může usnadnit ekonomičtější hospodaření v domácnostech či továrnách.

V moderní době jsou analogové wattmetry již málo používané, kvůli větší složitosti měření a vyžadování přesně naměřených hodnot. Proto jsou čím dál více nahrazovány digitálními wattmetry, které často mají mnohem více funkcí a s moderními prostředky není jejich výroba příliš náročná ani nákladná.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a sestrojít prototyp digitálního wattmetru pro přesné měření malých výkonů v elektrických obvodech a dále zobrazování všech naměřených veličin.

Práce začíná teoretickým úvodem, kde budou ukázány metody snímání napětí a proudu. Budou popsány metody využití bočníku, Hallovy sondy, děliče napětí a transformátorů. Dále bude vysvětleno, jakými způsoby se měřený signál může zpracovat. Jako technologie pro zpracování signálu budou uvedeny a popsány operační zesilovače, A/D převodníky, optočleny a mikropočítače. Na konec bude vysvětlen obecný princip analogových a digitálních wattmetrů a budou uvedeny výpočetní vztahy pro elektrický výkon.

Praktická část se bude zabývat celým postupem návrhu desky plošných spojů. Začne se s výběrem součástek a poté bude následovat návrh schématu, ze kterého bude deska plošných spojů vycházet. Poté bude ukázána praktická realizace osazení desky a propojení s dalšími perifériemi. Bude vysvětlena tvorba programového vybavení pro zpracování měřených hodnot a jejich zobrazení na displeji. Závěrem práce bude ověření funkčnosti wattmetru prostřednictvím zkušebního měření a porovnáním s analogovým wattmetrem, který se současně používá v laboratořích univerzity.

Wattmetru bude možné využít při výuce na fakultě v laboratorních měřeních, či jako model při výuce předmětu Embedded systémy s mikropočítači.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN V OBVODECH

Základními elektrickými veličinami, které můžeme v obvodech měřit, jsou elektrické napětí a elektrický proud. Ze znalostí těchto veličin lze vypočítat elektrický výkon.

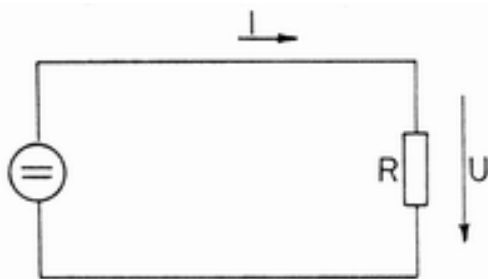
1.1 Způsoby snímání proudu

Snímání proudu bývá často složitější než snímání napětí, protože to často vyžaduje přerušování obvodu. Některé měřicí přístroje mohou také dost ovlivňovat měřený obvod.

1.1.1 Bočník

Bočník je rezistor, který se vloží do obvodu sériově v místě, kde chceme snímat proud. Na tomto rezistoru vznikne úbytek napětí, který se většinou přivádí na A/D převodník, před vstupem do A/D převodníku je někdy vhodné upravit velikost signálu pomocí operačních zesilovačů. Digitální signál z výstupu A/D převodníku vyhodnocuje například mikropočítač, v němž se programově vypočítá proud ze znalosti odporu bočníku a úbytku napětí na bočníku. Odpor bočníku musí být vhodně zvolen. Nesmí být příliš velký, aby neovlivňoval obvod, ale nesmí být příliš malý, aby úbytek napětí na bočníku byl měřitelný.

Výhodou snímání proudu pomocí bočníku je dobrá přesnost (nad 95 %) a jednoduchost. Nevýhodou je omezený rozsah měřeného proudu (v jednotkách ampér), velký ztrátový výkon a nemožnost galvanického oddělení měření. [1]

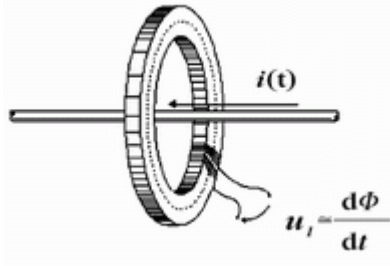


Obrázek 1 Obvod s bočníkem [1]

1.1.2 Proudový transformátor

U této metody měříme také úbytek napětí na snímacím rezistoru. Můžeme zde ale měření galvanicky oddělit od hlavního obvodu, díky tomu, že je snímací rezistor zapojený v sekundárním vinutí měřícího proudového transformátoru. Touto metodou můžeme měřit také mnohem větší proudy (až 1000 A). [1]

Nevýhodou této metody je nižší přesnost a kvůli většímu množství součástek i vyšší cena realizace a větší rozměry, proto se tato metoda v současnosti už téměř nepoužívá. [1]



Obrázek 2 Proudový transformátor [1]

1.1.3 Senzor s Hallovou sondou

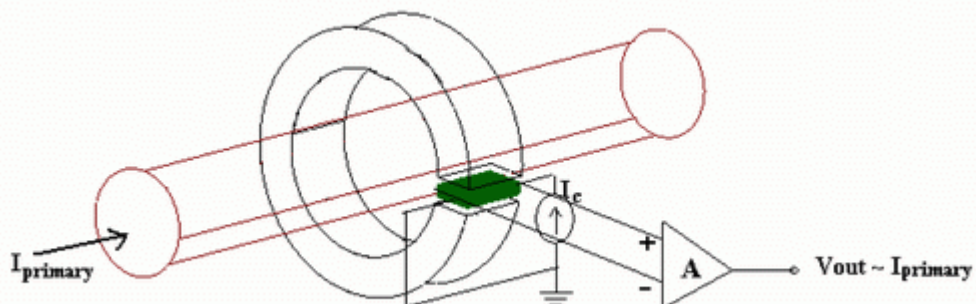
Existují 2 způsoby aplikace této metody:

- Měření v otevřené smyčce
- Měření v uzavřené smyčce

1.1.3.1 Měření v otevřené smyčce

Princip měření v otevřené smyčce spočívá v tom, že kolem vodiče, ve kterém chceme měřit proud, se nasadí prstenec z feromagnetického materiálu. V prstenci je malá mezera, ve které je vložen Hallův senzor, u nějž se koncentruje magnetické pole. Výstupem Hallova senzoru je magnetická indukce nebo elektrický proud.

Nevýhodami je nízká přesnost způsobená Hallovým snímačem a negativními jevy ve feromagnetickém jádře. [1]

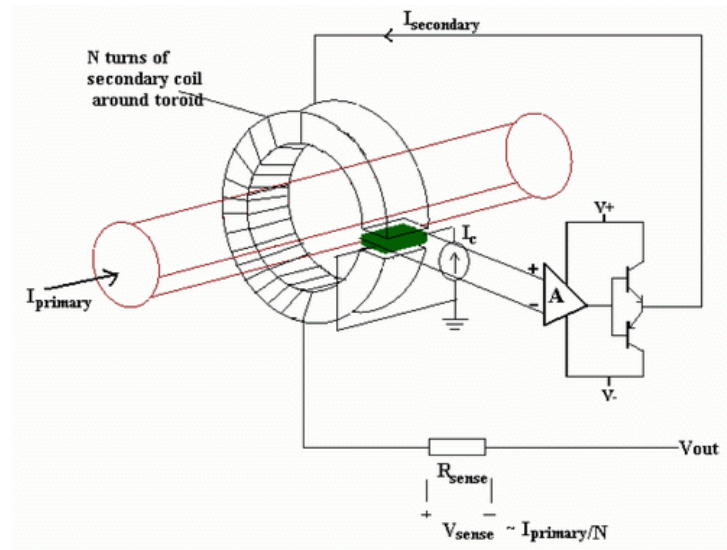


Obrázek 3 Měření Hallovou sondou v otevřené smyčce [1]

1.1.3.2 Měření v uzavřené smyčce

Tato metoda přidává navíc k předchozí zpětnou vazbu, kterou se přivádí zpět do prstence regulovaný opačný proud z výstupu senzoru tak, aby se vyrušily negativní jevy ve feromagnetickém prstenci. Výstupem měření je regulační proud v uzavřené smyčce. [1]

Tento způsob měření dosahuje vysoké přesnosti, avšak náročnost sestavení a cena jsou také mnohem vyšší. [1]



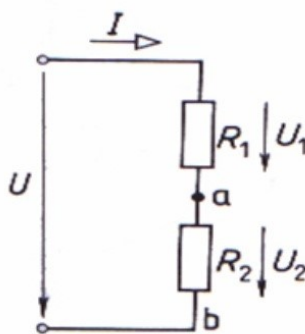
Obrázek 4 Měření Hallovoú sondou v uzavřené smyčce [1]

1.2 Způsoby snímání napětí

Snímání napětí je většinou snadnější než snímání proudu. Měřicí přístroj stačí paralelně připojit měřicí přístroj k měřené části obvodu. V případě větších napětí se může použít dělič napětí pro uzpůsobení k měření.

1.2.1 Dělič napětí

Dělič napětí je tvořen dvěma sériově zapojenými rezistory. Oběma rezistory prochází stejný proud, takže poměr napětí se rovná poměru odporů rezistorů. Tímto způsobem si můžeme jednoduše přizpůsobit napětí, které odebíráme z druhého rezistoru – snížíme hodnotu vstupního napětí na výstupní hodnotu vhodnou pro náš účel. [2]



Obrázek 5 Dělič napětí [2]

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} \Rightarrow \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

$$\frac{U}{R_1+R_2} = \frac{U_2}{R_2} \Rightarrow U_2 = \frac{R_2}{R_1+R_2} * U [V] \quad (2)$$

1.2.2 Napěťový měřicí transformátor

Je to přístroj pro měření vysokých elektrických napětí. Používá se pro několika-řádové snížení napětí. Nejdůležitějším parametrem transformátoru je poměr napětí mezi primárním a sekundárním vinutím. Na primární vinutí je přivedeno vysoké vstupní napětí a z vinutí sekundárního poté odvádíme nízké napětí přizpůsobené většinou pro měření. [3]

2 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÝCH SIGNÁLŮ

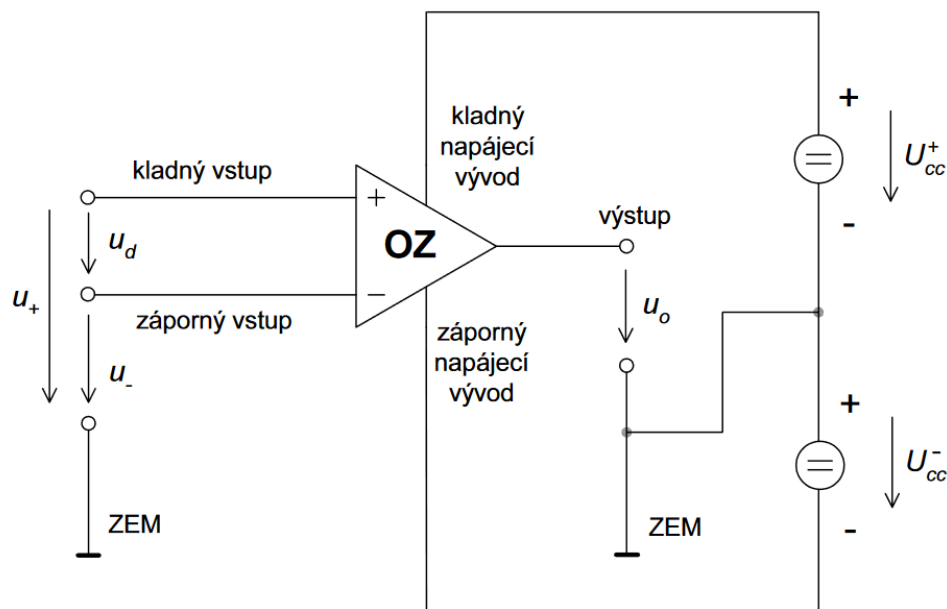
2.1 Operační zesilovače

Operační zesilovač je elektronický obvod používaný pro zesílení signálu, odfiltrování signálu a mnoho dalšího. Díky jeho širokému použití to je jeden z nejrozšířenějších elektronických obvodů. [4]

Mají vysoké zesílení (až několik milionů), velmi vysoký vstupní odpor (ideální zesilovač – nekonečný), díky čemuž neprotéká vstupem zesilovačem téměř žádný proud a je tak vhodný pro použití v senzorce. [4]

V jeho základní struktuře má následující vývody:

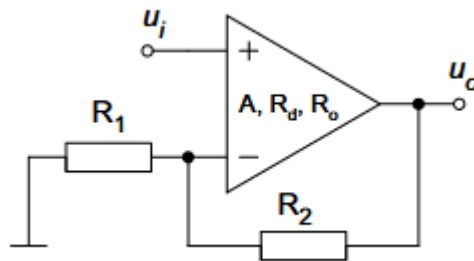
- 2 vstupy – neinvertující (+) a invertující (-)
- 2 napájecí vývody – kladný a záporný
- Výstup [4]



Obrázek 6 Základní zapojení operačního zesilovače [4]

2.1.1 Neinvertující zesilovač

Vstupní impedance tohoto zapojení se blíží nekonečnu a není závislá na odporech R_1 a R_2 . Zesílení je vždy větší než 1. [4]



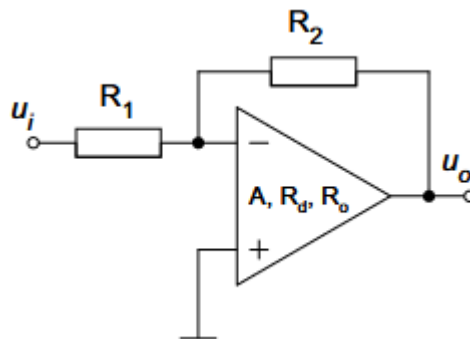
Obrázek 7 Neinvertující zesilovač [4]

Napět'ové zesílení:

$$A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3)$$

2.1.2 Invertující zesilovač

Vstupní impedance je rovna vstupnímu odporu R_1 . Zesílení je vždy menší než 0. [4]



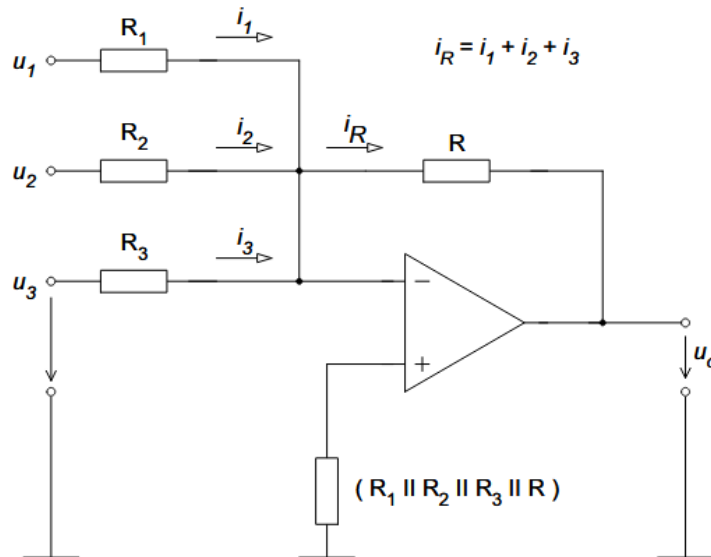
Obrázek 8 Invertující zesilovač [4]

Napět'ové zesílení:

$$A = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

2.1.3 Součtový zesilovač

Součtový zesilovač sčítá napětí na všech vstupech, avšak výstup je invertovaný. Pokud chceme sčítat napětí v tom poměru, v jakém je přivádíme na vstup, zvolíme všechny vstupní odpory i zpětnovazební odpor stejné. Počet vstupů není omezen. [4]



Obrázek 9 Součtový zesilovač se třemi vstupy [4]

Výstupní napětí:

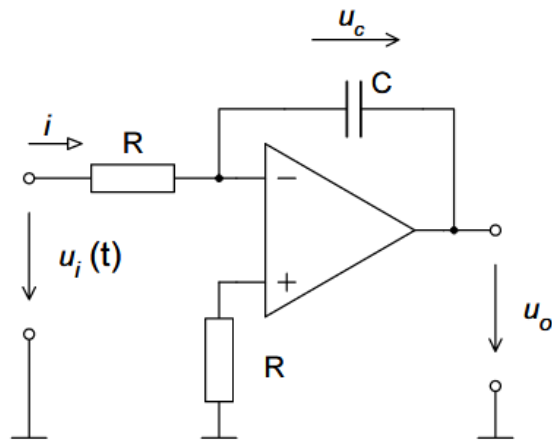
$$u_o = -R * \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} \right) [V] \quad (5)$$

Pro shodné hodnoty odporu rezistorů:

$$u_o = -(u_1 + u_2 + u_3) [V] \quad (6)$$

2.1.4 Integrovační zesilovač

Integruje vstupní napětí podle času. [4]



Obrázek 10 Integrovní zesilovač [4]

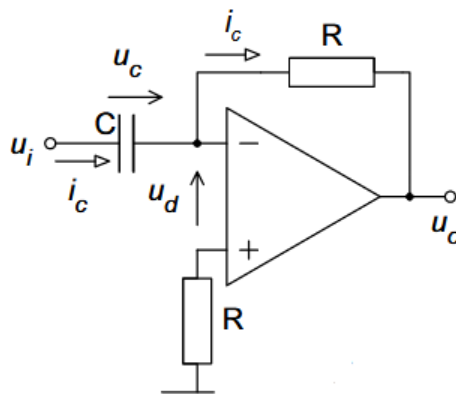
Výstupní napětí v čase t :

$$u_o = \frac{1}{RC} \int u_i(t) dt - u_o(t = 0) \text{ [V]} \tag{7}$$

Kde $U_o(t = 0)$ je výstupní napětí při spuštění. [4]

2.1.5 Derivační zesilovač

Derivuje vstupní napětí podle času. [4]



Obrázek 11 Derivační zesilovač [4]

Výstupní napětí v čase t :

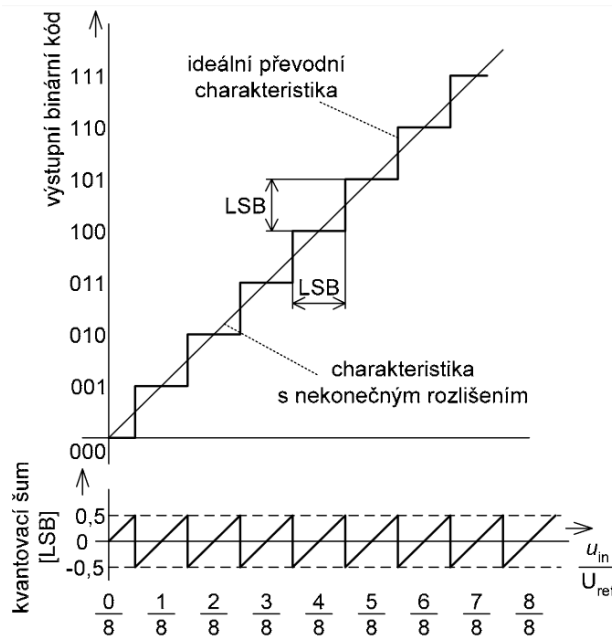
$$u_o = -RC * \left(\frac{du_i}{dt}\right) \text{ [V]} \tag{8}$$

2.2 A/D převodníky

2.2.1 Základní vlastnosti A/D převodníků

Statické:

- Rozlišení – Vyjadřuje se počtem bitů. Z tohoto potom plyne počet kvantizačních úrovní, který je roven 2^N , kde N je počet bitů, např.: 12-bitový převodník má 4096 úrovní.
- Přesnost – Odchylka výstupu převodníku od skutečné hodnoty, udává se v procentech, může být způsobena například šumem
- Kvantizační chyba – Je způsobena nutností zaokrouhlení na nejbližší kvantizační úroveň, maximální možná kvantizační chyba je $\Delta_{ku} = u_{LBS} / 2$ (u_{LBS} – rozdíl napětí mezi dvěma sousedními kvantizačními úrovněmi)
- Offset error – chyba nastavení nuly
- Hystereze
- Převodní charakteristika [5]



Obrázek 12 Ideální převodní charakteristika 3-bitového A/D převodníku [5]

Dynamické:

- Rychlost převodu – Udává, jak rychle převodník dokáže převést analogový signál na digitální hodnotu, udává se v počtech vzorků za sekundu
- Odstup signálu a šumu
- Efektivní počet bitů
- Dynamický rozsah
- Harmonické zkreslení
- Šum – vrcholový a efektivní
- Doba přepnutí a ustálení [5]

2.2.2 Funkce A/D převodníků

Analogově číslicové převodníky transformují spojitý signál $s(t)$ na řadu čísel $\{S_n(t_n)\}$, kde n je řadové číslo každé výstupní hodnoty ($n = 0, 1, \dots$) vztažené k okamžiku $t_n = nT_v$ (T_v – *perioda vzorkování*). [5]

Celý převod je výsledkem dvou samostatných operací:

- Diskretizace – transformace spojitě funkce na nespojitou
- Kvantování – přiřazení výsledku diskretizace k nejbližší kvantizační úrovni

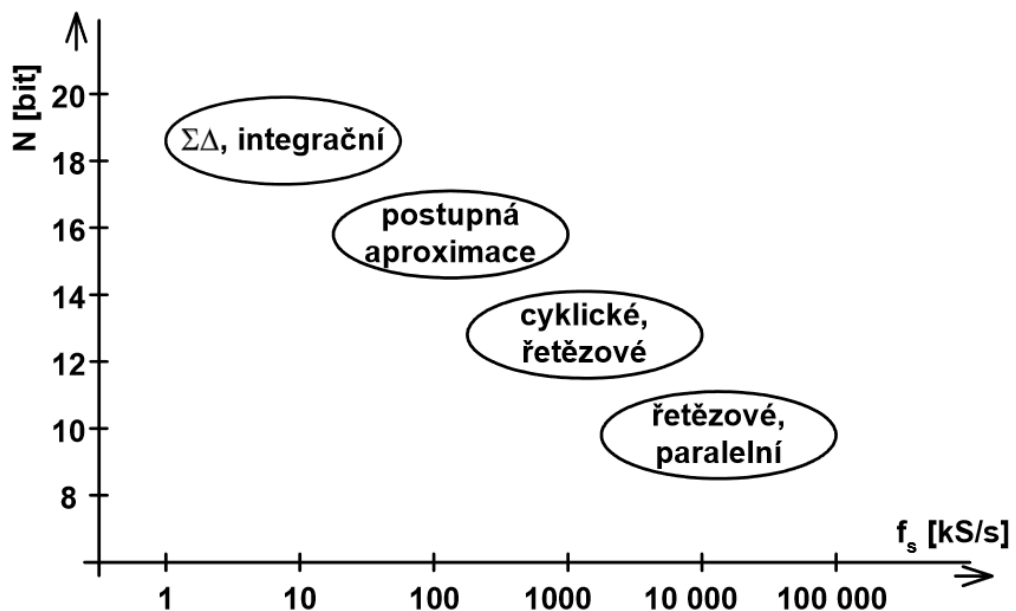
Jestliže vstupní signál $s(t)$ neobsahuje příliš prudké změny, lze diskretizaci a kvantování re-alizovat naráz pomocí A/D převodníku. [5]

2.2.3 Rozdělení A/D převodníků

Základní typy A/D převodníků, jejich výhody a nevýhody:

- Sigma- delta ($\Sigma\Delta$)
 - o + velmi vysoká rozlišovací schopnost (až 24 bitů)
 - o + jednoduchá konstrukce obvodu
 - o - nízký vzorkovací kmitočet (řádově pouze stovky kHz)

- Integrační
 - + velmi vysoká rozlišovací schopnost (až 24 bitů)
 - - nízký vzorkovací kmitočet (řádově pouze stovky kHz)
 - - Nutnost velkých kapacit v integrátoru, vysoké výrobní náklady
- S postupnou aproximací
 - + vysoká rozlišovací schopnost (až 24 bitů)
 - + malý čip, nízká spotřeba
 - - nepřiliš velký vzorkovací kmitočet (jednotky MHz)
- Řetězové
 - + dobrá rozlišovací schopnost (až 16 bitů)
 - + vysoký vzorkovací kmitočet (stovky MHz)
 - + při menším počtu bitů malý čip, nízká spotřeba
 - – nutnost časové harmonizace vzorku, kvůli odezvě mezi vstupem a výstupem
- Paralelní
 - + nejvyšší vzorkovací frekvence
 - - nízké rozlišení (do 8 bitů), v případě vyšších rozlišení by bylo potřeba většího čipu – vyšší spotřeba [5]



Obrázek 13 Rozdělení typů A/D převodníků dle dosažitelné vzorkovací frekvence a rozlišení [5]

2.3 Galvanické oddělení

Galvanické oddělení umožňuje nevodivé spojení dvou obvodů. Obvody tak neprotéká stejný proud, ale i tak jsou spojeny a umožňují přenos dat. [6]

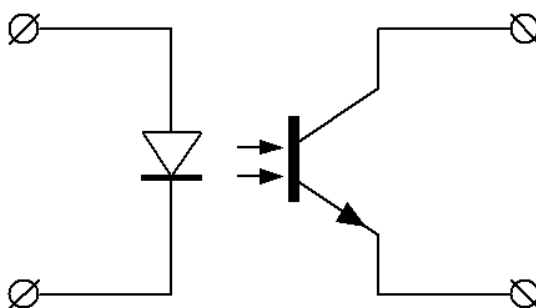
Důvody pro aplikaci galvanického oddělení:

- Obvody, které chceme propojit mají různé potenciály a jejich spojení by tak narušilo požadovanou funkci.
- Zabránění zkratu (například při spojení dvou zdrojů)
- Bezpečnost
- Zabránění šíření proudových smyček přes uzemňovací vedení [7]

2.3.1 Optické galvanické oddělení

Pro optické oddělení se používají optočleny. V primárním obvodu je použita LED jako vysílač a v sekundárním obvodu fototranzistor jako přijímač. Data jsou přenášena světelnými signály z LED na tranzistor, který bývá v zapojení s otevřeným kolektorem. [6]

Díky použití světelných signálů není tento způsob citlivý na elektromagnetické rušení. Rychlost přenosu dat je závislá na spínací rychlosti LED, a tak není přenos tak rychlý jako například u elektromagnetického oddělení. V současnosti mohou být díky moderním technologiím i optočleny dostatečně rychlé pro široké využití. Kvůli degradaci LED mají optočleny také kratší životnost oproti jiným způsobům oddělení. [6]



Obrázek 14 Jednoduchý optočlen [7]

2.3.2 Další způsoby galvanického oddělení

Elektromagnetické oddělení – mezi dvěma cívkami je přenos realizován pomocí elektromagnetické indukce. Oproti optočlenům je tato metoda galvanického oddělení náchylnější na elektromagnetické rušení. Samotné cívky jsou zde zdrojem elektromagnetického rušení. Avšak tato metoda může zajistit rychlejší přenos (až 100Mb / s) a má nižší spotřebu energie. [6]

Kapacitní oddělení – kondenzátory v obvodu blokují přenos stejnosměrného napětí a přenášejí pouze napětí střídavé. [6]

Reléové oddělení – cívka relé je zapojena v jednom obvodu a její kontakty jsou zapojeny v druhém obvodu. Spojení mezi dvěma obvody tak není vodivé, ale pouze mechanické. [7]

2.4 Mikrokontrolery

Mikrokontroler je multifunkční programovatelný jednočipový počítač. [8]

Jeho základní části jsou:

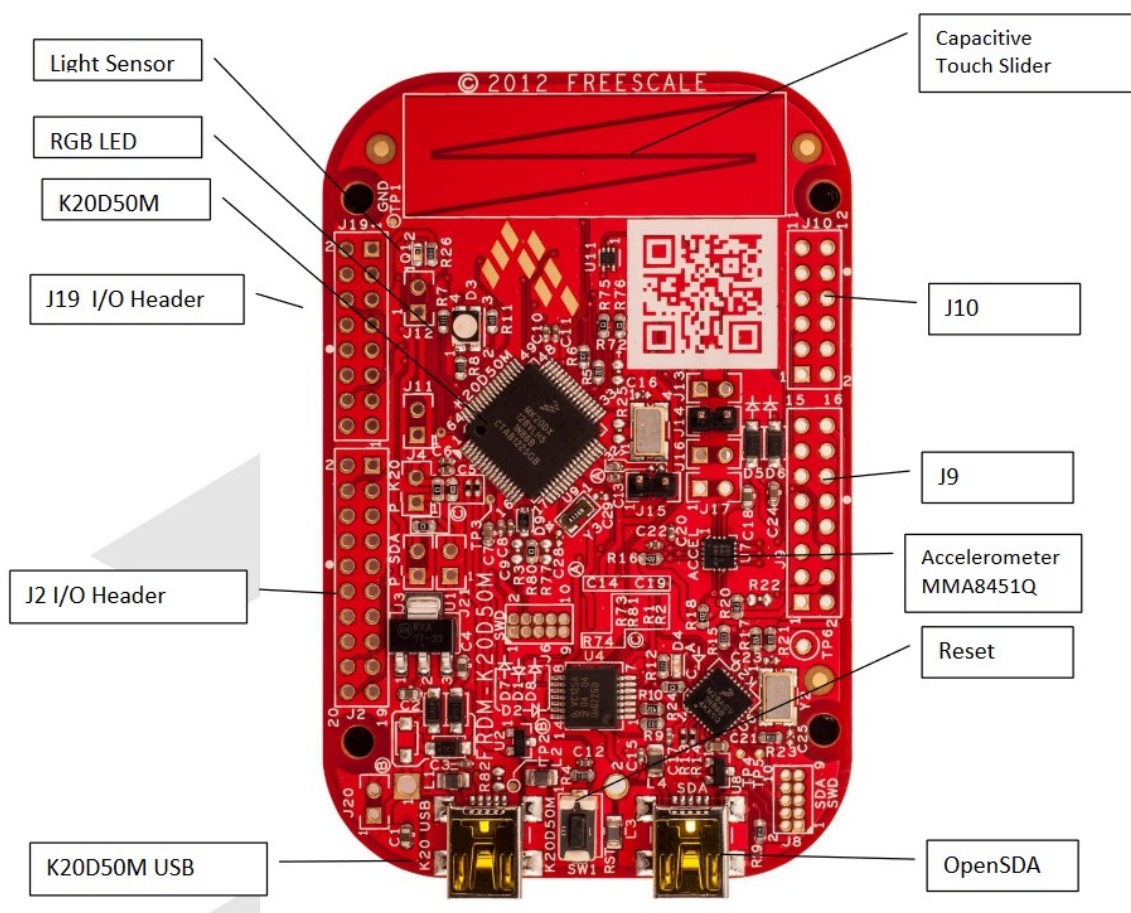
- Procesor (CPU) – jádro mikrokontroleru, hlavní řídicí člen. Obsahuje aritmeticko-logickou jednotku, řadič, registry dekodér
- Paměť – slouží pro ukládání programu a dat
- Sériové rozhraní (například SPI) – přenáší data mezi mikrokontrolerem a připojenými zařízeními
- Řadič přerušení – umožňuje přerušení programu kvůli vykonání aktuálně důležitější operace
- Časovač – generuje přesný čas
- Vstupně-výstupní piny – můžeme je propojit k akčním členům, sensorům, displeji, klávesnici... [8][9]

2.4.1 FRDM-K20D50M

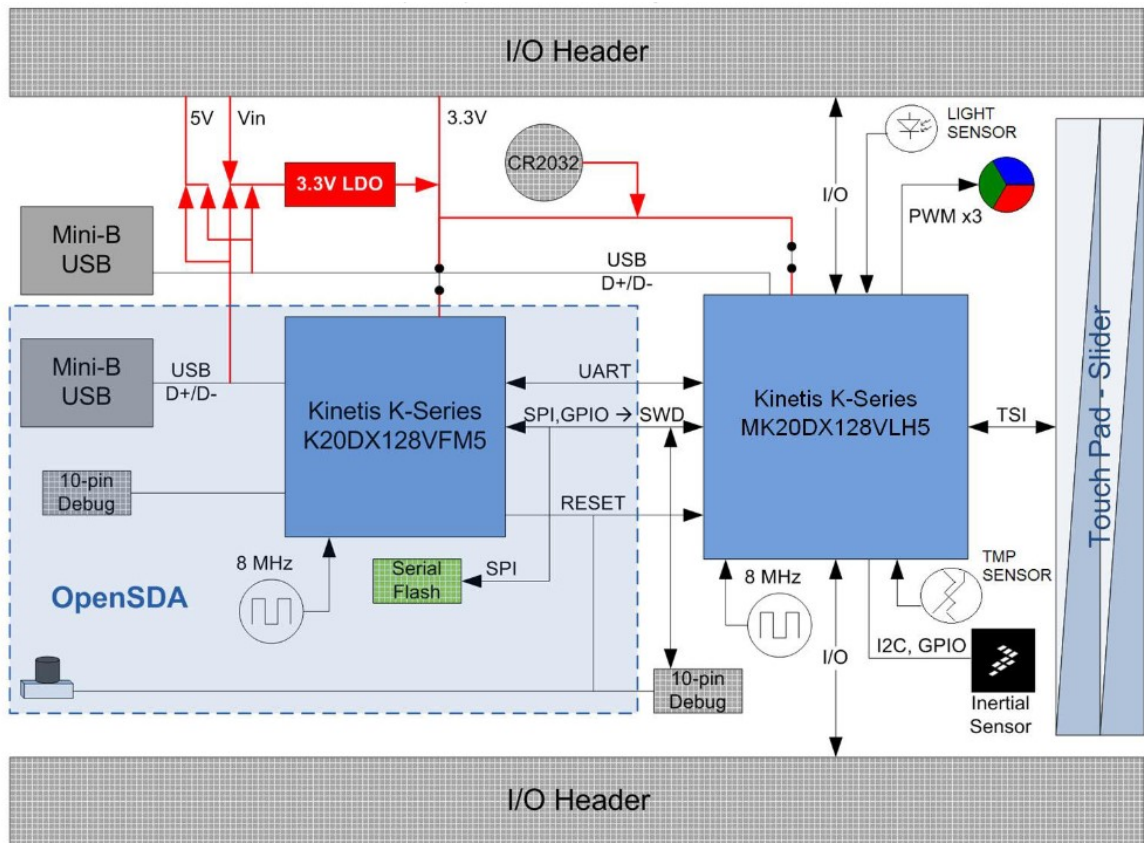
Na trhu je k dispozici celá řada vývojových desek osazených mikrokontroléry od různých výrobců. Pro ukázkou byla vybrána vývojová deska FRDM-K20D50M. Je to cenově dostupný, ale zároveň široce využitelný mikrokontroler. [14]

Nejdůležitější parametry:

- Pinová kompatibilita s Arduino R3
- Pracuje na frekvenci až 50 MHz
- 128 kB Flash paměť, 16 kB RAM
- Deska nabízí: senzor světla, RGB LED, kapacitní dotykový snímač, akcelerometr
- Programovatelné rozhraní SDA:
 - o Velkokapacitní programovatelná Flash paměť
 - o Rozhraní P&E Debug – pro ladění programu
 - o Aplikace pro záznam dat



Obrázek 15 Konstrukční provedení FRDM-K20D50M



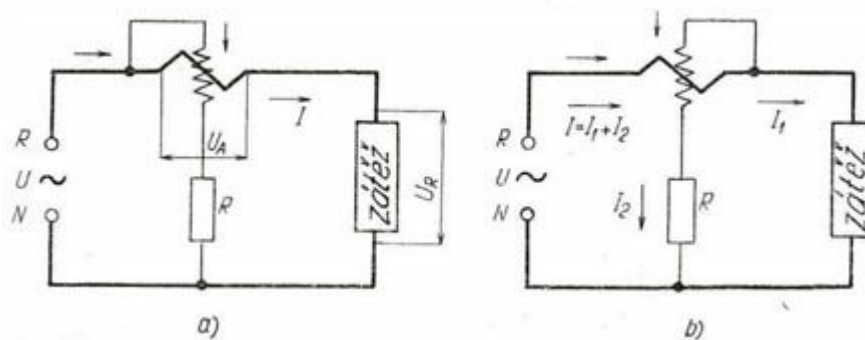
Obrázek 16 Blokové schéma vývojové desky FRDM-K20D50M

3 WATTMETR

3.1 Princip wattmetru

Wattmetr je přístroj pro měření elektrického příkonu součástky či části obvodu. K naměření příkonu potřebujeme znát elektrický proud a napětí, z toho vyplývá, že wattmetr musí tyto veličiny změřit, a to pomocí napěťové a proudové cívky. Wattmetr se může použít pro měření stejnosměrného i střídavého výkonu. [10]

Vstupní svorky proudové a napěťové cívky se připojují na stranu zdroje (označeny šipkou na *Obrázku 16*). Výstupní svorka proudové cívky se připojuje před zátěž, aby byla v sérii se zátěží. Výstupní svorka napěťové cívky se připojuje za zátěž, aby byla paralelně k zátěži. Wattmetr může být realizován s napěťovou cívkou zapojenou před proudovou nebo naopak. [10]



Obrázek 17 Zapojení wattmetru, a) napěťová cívka před proudovou, b) napěťová cívka za proudovou [10]

3.2 Typy wattmetrů

Analogové wattmetry (elektrodynamické) – princip těchto přístrojů vychází ze vzájemného působení sil dvou cívek. První cívka je pevná s malým počtem závitů, druhá je pohyblivá s velkým počtem závitů. Proud protékající pevnou cívku budí magnetické pole, které odklání pohyblivou cívku. Na pohyblivé cívice je připevněna ručka, ukazující na stupnici wattmetru. [11]

Výpočet výkonu analogového wattmetru:

$$\text{Konstanta wattmetru: } k_W = \frac{U_R * I_R}{\alpha_M} \left[\frac{W}{\text{dílek}} \right] \quad (9)$$

$$\text{Činný výkon: } P = \alpha * k_W [W] \quad (10)$$

Popis veličin:

- U_R – napěťový rozsah wattmetru
- I_R – proudový rozsah wattmetru
- α_M – počet dílků stupnice
- α – naměřená výchylka [10]

Digitální wattmetry – modernější metoda snímání výkonu. Napětí je snímáno digitálním voltmetrem a proud například bočníkem nebo proudovým transformátorem. Tyto veličiny jsou zpracovány mikroprocesorem. Výhodou těchto přístrojů je to, že na rozdíl od analogových vidíme již konkrétní hodnotu na displeji a nemusíme ji tak přepočítávat. Důležité je ovšem nepřekročit nastavený rozsah proudu nebo napětí, abychom nepoškodili přístroj – tohle platí i u analogových přístrojů.

3.3 Potřebné vzorce pro výpočet střídavého výkonu

Efektivní hodnota napětí:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_P} * \int_0^{T_P} u^2(t) dt} \approx \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n u_i^2} [V] \quad (9)$$

Efektivní hodnota střídavého napětí je rovna hodnotě stejnosměrného napětí, které by při připojení na stejnou zátěž dávalo stejný výkon. [12][13]

Efektivní hodnota proudu:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_P} * \int_0^{T_P} i^2(t) dt} \approx \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n i_i^2} [A] \quad (10)$$

Efektivní hodnota střídavého proudu je rovna hodnotě stejnosměrného proudu, který by při průchodu stejnou zátěží dával stejný výkon. [12][13]

[12][13]

Činný výkon:

$$P = \frac{1}{T_P} * \int_0^{T_P} u(t) * i(t) dt \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i i_i [W] \quad (11)$$

Činný výkon je množství užitečné práce vykonané za jednotku času. [12][13]

Zdánlivý výkon:

$$S = U_{RSM} * I_{RSM} [VA] \quad (12)$$

Zdánlivý výkon je celkový výkon spotřebovaný v elektrickém obvodu, je to vektorový součet činného a jalového výkonu. [13]

Jalový výkon:

$$Q = \sqrt{S^2 * P^2} [VAR] \quad (13)$$

Jalový výkon se spotřebuje v elektrickém obvodu, ale nevykonává užitečnou práci. [13]

Účinník:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (14)$$

Účinník je poměr mezi činným a zdánlivým výkonem, může se pohybovat v rozmezí od 0 do 1. V praxi tedy chceme, aby se účinník co nejvíce

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH OBVODU

Úkolem je navrhnout digitální wattmetr pro měření malých střídavých výkonů činných, jalových i zdánlivých. Pro jeho realizaci je tedy zapotřebí vhodným způsobem snímat proud a napětí. Tyto veličiny je poté potřeba upravit přes operační zesilovače na přijatelné hodnoty pro A/D převodník. Poté se galvanicky oddělí analogová část od digitální pomocí rychlých optočlenů, které budou přenášet data mezi A/D převodníkem a mikropočítačem. Nakonec se připojí mikropočítač s tlačítky pro ovládání displeje, na kterém budou zobrazovány hodnoty výkonů.

4.1 Výběr hlavních komponentů

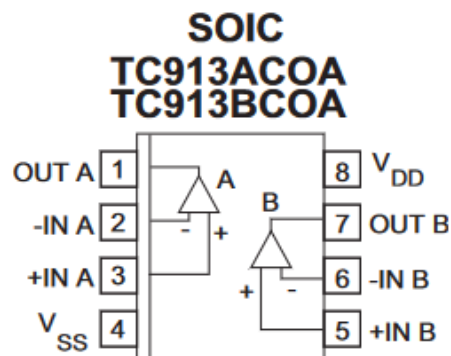
Mikropočítač a displej byly už dostupné přímo na univerzitě.

Všechny ostatní hlavní komponenty, byly hromadně objednávány z internetových obchodů:

- Farnell (<https://www.farnell.com/>)
 - o Napěťová reference
 - o Operační zesilovače
 - o A/D převodníky
- GM Electronic (<https://www.gme.cz/>)
 - o Optočleny
 - o DC/DC měnič
 - o Stabilizátory napětí
 - o Pasivní součástky

4.1.1 Operační zesilovače

Pro úpravu vstupních signálů budou zapotřebí celkem 4 operační zesilovače. Byly vybrány operační zesilovače TC913BCOA. Každé pouzdro obsahuje 2 operační zesilovače, takže byly objednány celkem dva kusy. Tyto operační zesilovače byly vybrány také z důvodu aktuální dostupnosti v době tvorby objednávky. Mají funkci automatického nulování offsetu, nízký vstupní šum, není potřeba vnějších kondenzátorů.

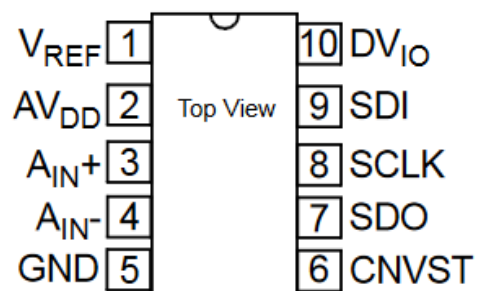


Obrázek 18 Uspořádání operačních zesilovačů v pouzdře SOIC TC913BCOA [15]

4.1.2 A/D převodníky

Budou zapotřebí 2 převodníky, každý pro převod jedné ze vstupních analogových veličin na digitální. Při výběru bylo nutné zohlednit skutečnost, že se součástky budou pájet ručně a většina dostupných převodníků je ve velmi malých pouzdech. Proto byl zvolen převodník MCP33121-10-E/MS. I tento převodník je stále dost malý (rozteč pinů je 0,5 mm), ale jeho pájení na desku je už realizovatelné.

Převodník je 14bitový, takže převádí vstupní signál v rozsahu 0 až 5 V na číslo 0 až 16 383. Dosahuje vzorkovací frekvence 1 MSPS (milion vzorků za sekundu) a má velmi nízkou spotřebu proudu. Nevýhodou je nutnost připojení 3 různých napájecích napětí (V_{REF} , AV_{DD} , DV_{IO}), jak je vidět na obrázku níže.



Obrázek 19 Uspořádání vývodů AD/ Převodníku MCP33121-10-E/MS - MSOP-10 [16]

4.1.3 Optočleny

Pro galvanické oddělení komunikace mezi mikropočítačem a A/D převodníky jsou potřeba celkem 4 optočleny. První bude přenášet hodinový signál z mikropočítače do A/D převodníků, další bude posílat data z A/D převodníků do mikropočítače a zbylé dva budou pro výběr A/D převodníku, ze kterého bude prováděn převod a čtení. Byly vybrány optočleny 6N137, které mají velkou rychlost přenosu (10 MBd) – rychlost přenosu je pro navrhovaný wattmetr nejdůležitější parametr, protože je zapotřebí snímat co nejvíce hodnot ve velké rychlosti, aby se mohla co nejpřesněji vypočítat efektivní hodnota střídavých signálů. Zároveň jsou tyto optočleny velmi levné.

4.1.4 Mikrokontroler

Z univerzity byly na výběr 2 mikrokontrolery: FRDM-KL25Z a FRDM-K20D50M. Byl vybrán KL25Z, protože měl již ze spodu vyvedené pin headery, takže bylo snadné ho připojit. Také je to stejný typ mikrokontroleru, který se používá ve výuce Embedded systémů, jsou k němu tedy vytvořené některé drivery a programování tak bude o něco snadnější. Zároveň se tak model wattmetru bude moct využít ve výuce předmětu Embedded systémy s mikropočítači..

4.1.5 Displej

Displeje byly na výběr SHARP LM162KS1 a MC1602A. Byl vybrán displej MC1602A, protože byl o něm k dispozici mnohem rozsáhlejší datasheet. Také bylo dost jednoduché pro něj přepracovat v programu drivery, které jsou určeny pro displeje používané ve výuce.

4.1.6 Zdroje napětí

Pro různé části obvodu jsou potřeba různé napájecí zdroje, které bylo nutné vhodně realizovat. Byly zapotřebí zdroje:

- DC/DC měnič, který galvanicky odděluje napětí ze strany mikropočítače. Byl vybrán měnič AM1D-0512DZ, který převádí vstupní napětí 5 V na výstupních ± 12 V.

Vhodnější by byl měnič, který převádí na ± 8 V, ale muselo se vybírat také podle dostupnosti.

- Napěťová reference +1,8 V pro A/D převodník a -2,48 V do součtového zesilovače – 2krát LM285BXZ/NOPB, je to zdroj, který může regulovat napětí v rozsahu 1,24 V až 5,3 V. Jednoduše se připojuje, nastavení napětí na výstupu je řešeno pomocí rezistorů s vhodným poměrem odporů.
- Přesná napěťová reference +5 V pro A/D převodník - ADR02ARZ-REEL7, tento zdroj má velmi vysokou přesnost, stabilitu a nízkou spotřebu energie.
- Lineární stabilizátor napětí +8 V pro operační zesilovač – L78L08ACZ
- Lineární stabilizátor napětí -8 V pro operační zesilovač – L79L08ACZ-AP
- Lineární stabilizátor napětí +5 V pro A/D převodník – L78L05ACZ

Všechny stabilizátory byly vybrány podle požadovaného napětí na výstupu a také kvůli jejich velmi nízké ceně.

4.2 Snímání vstupních veličin

Wattmetr je navržen pro rozsah napětí ± 100 V a rozsah proudu ± 1 A. Aby bylo možné tyto veličiny změřit, je nutné je upravit na hodnoty snímatelné A/D převodníkem (0 až 5 V). Z Ohmova zákona se může vypočítat velikost odporu zátěže pro simulaci maxima rozsahu:

$$R_Z = \frac{U_{IN}}{I_{IN}} = \frac{100}{1} = 100 \Omega \quad (15)$$

Proto by bylo nejvhodnější zvolit pro simulaci zátěž 100Ω , ale kvůli mírnému zatížení bočnickem ($100 \text{ m}\Omega$) je vhodné zvolit zátěž $99,9 \Omega$, aby se jednoduše mohly vypočítat maximální rozsahy.

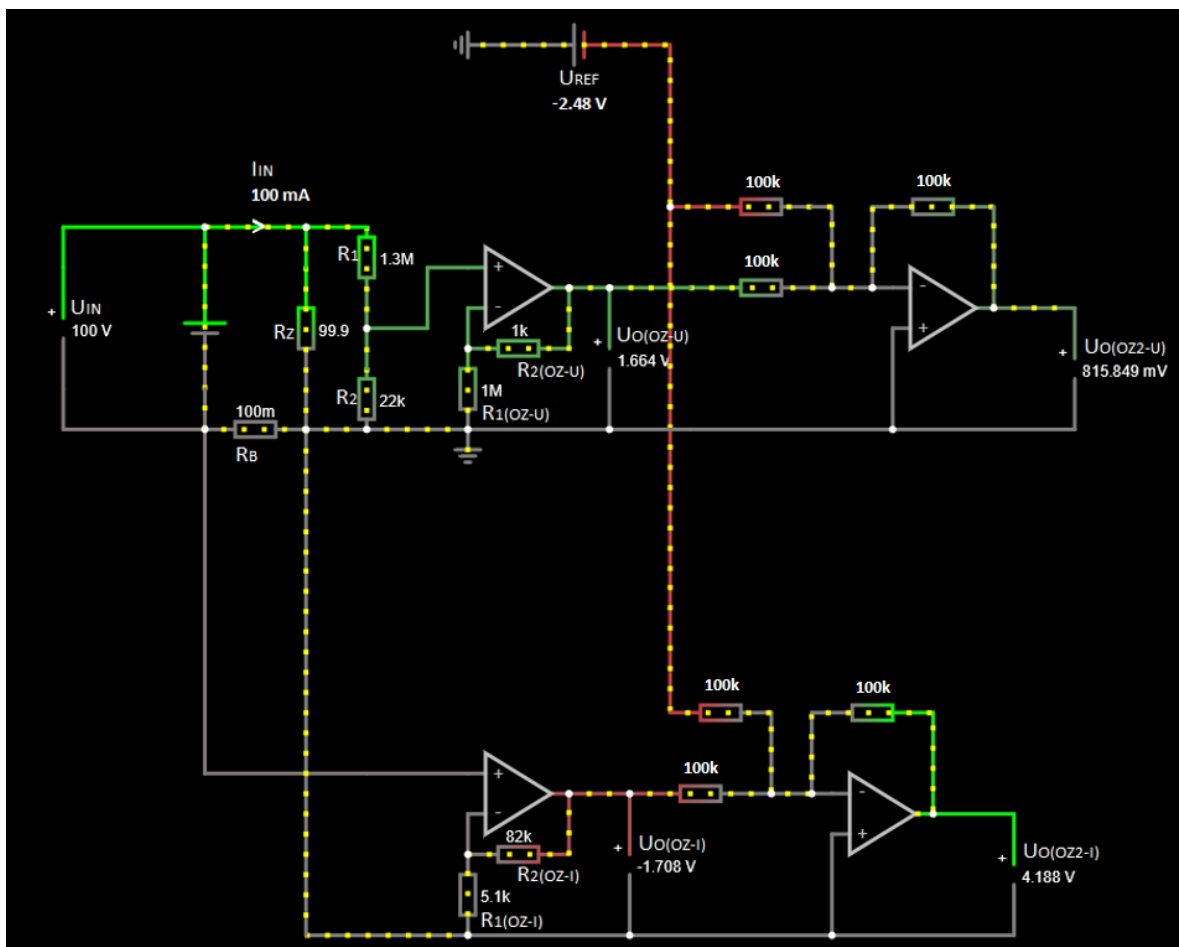
Napěťová reference byla navržena s hodnotou napětí blízko středu vstupního rozsahu A/D převodníku. Referenční napětí bude přiváděno na invertující součtový zesilovač, proto je potřeba záporné napětí, jeho přesná hodnota je -2,48 V.

Přepočítání vstupního proudu a napětí je realizováno tak, aby se využila velká část vstupního rozsahu A/D převodníku. Není však potřeba využít tento rozsah celý a ani by to nebylo bezpečné (potenciální poškození A/D převodníku jen při malém překročení rozsahu), proto je uvažováno využití vstupního rozsahu A/D převodníku od 0,8 V do 4,2 V. Tato hodnota je

však jen teoretická, musela se ještě upravit, aby bylo možné použít dostupné rezistory z řady E24. Přesné hodnoty jsou vypočítány v dalších kapitolách.

Pro všechny výpočty budou uvažovány maximální rozsahy měřených veličin.

Simulace pro jednoduché ověření snímaných hodnot byla provedena v Circuit simulatoru dostupné na webové adrese: <https://www.falstad.com/circuit/>.



Obrázek 20 Návrh vstupní části obvodu v Circuit simulatoru

4.2.1 Snímání proudu

Pro snímání proudu byla použita metoda bočníku, kvůli její jednoduchosti, pro naše účely je zcela dostačující. Jako bočník je zde rezistor s odporem $100\text{ m}\Omega$, protože bylo potřeba co nejmenší hodnoty odporu, aby neovlivňoval měřený obvod, ale zároveň dostatečně velkou

hodnotu, aby bylo napětí na bočníku snímatelné. Napětí na bočníku je snímáno obráceně, proto bude úbytek napětí na bočníku záporný:

$$U_B = -U_{IN} \frac{R_B}{R_Z + R_B} = -100 \frac{0,1}{99,9+0,1} = -100 \text{ mV} \quad (16)$$

Prvním zesilovačem je třeba upravit 100 mV na napětí blízké 1,8 V. Použijeme tedy neinvertující zapojení zesilovače se zesílením co nejbližším 18. Odpor rezistorů není nutné volit moc velké, protože nimi nebude protékat téměř žádný proud. Z teorie je známá rovnice pro výpočet zesílení neinvertujícího zesilovače (3). Zesílení A je poměr výstupního a vstupního napětí, z toho tedy dále vyplývá:

$$\frac{U_{O(OZ-1)}}{U_B} = \left(1 + \frac{R_2(OZ-1)}{R_1(OZ-1)}\right) \quad (17)$$

$$U_{O(OZ-1)} = U_B \left(1 + \frac{R_2(OZ-1)}{R_1(OZ-1)}\right) = -0,1 * \left(1 + \frac{82*10^3}{5,1*10^3}\right) = -1,708 \text{ V} \quad (18)$$

Druhý zesilovač převádí napětí pouze do kladných hodnot. V této fázi je napětí v rozsahu -1,708 až +1,708 V. Tohle napětí je přivedeno společně s referenčním napětím -2,48 V na invertující sčítací zesilovač. Z teorie je známá rovnice pro shodné rezistory (6), podle které lze vypočítat:

$$U_{O(OZ2-1)} = -(U_{O(OZ-1)} + U_{REF}) =$$

$$(\textit{Pro dolní rozsah}) - (1,708 + (-2,48)) = 0,772 \text{ V} \quad (19)$$

$$(\textit{Pro horní rozsah}) - (-1,708 + (-2,48)) = 4,188 \text{ V} \quad (20)$$

Výsledný rozsah napětí přivedený na A/D převodník je 0,772 až 4,188 V.

Na A/D převodník bude tedy přiváděno napětí vypočítané podle následujícího vzorce:

$$U_{O(OZ2-1)} = I_{IN} * 1,708 + 2,48 \text{ [V]} \quad (21)$$

4.2.2 Snímání napětí

Pro snímání napětí byl použit napěťový dělič. Opět je to nejjednodušší metoda, která umožňuje rozdělení měřeného napětí v požadovaném poměru. Odpor rezistorů je dobré zvolit co

největší, aby procházel děličem co nejmenší proud a tím pádem dělič nezatěžoval měřený obvod. Dělič je tedy tvořen z rezistorů $R_1 = 1,3 \text{ M}\Omega$ a $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$. Napětí bude snímáno z menšího rezistoru R_2 , proto výpočet napětí vypadá následovně:

$$U_2 = U_Z \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 99,9 \frac{22 \cdot 10^3}{1,3 \cdot 10^6 + 22 \cdot 10^3} = 1,662 \text{ V} \quad (22)$$

První zesilovač bude sloužit pouze jako oddělení měřicího obvodu. Použije se tedy neinverující zesilovač se zesílením blízké 1.

$$\frac{U_{O(OZ-U)}}{U_2} = \left(1 + \frac{R_{2(OZ-U)}}{R_{1(OZ-U)}} \right) \quad (23)$$

$$U_{O(OZ-U)} = U_2 \left(1 + \frac{R_{2(OZ-U)}}{R_{1(OZ-U)}} \right) = 1,662 * \left(1 + \frac{1 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^6} \right) = 1,664 \text{ V} \quad (24)$$

Druhý zesilovač převádí napětí pouze do kladných hodnot.. V této fázi je napětí v rozsahu -1,664 až +1,664 V. Tohle napětí se přivede společně s referenčním napětím -2,48 V na inverující sčítací zesilovač.

Výpočet bude vypadat následovně:

$$U_{O(OZ2-U)} = -(U_{O(OZ-U)} + U_{REF}) =$$

$$(\text{Pro dolní rozsah}) - (-1,664 + (-2,48)) = 4,144 \text{ V} \quad (25)$$

$$(\text{Pro horní rozsah}) - (1,664 + (-2,48)) = 0,816 \text{ V} \quad (26)$$

Výsledný rozsah napětí přivedený na A/D převodník je **4,144 až 0,816 V**.

Horní a dolní rozsah jsou prohozené (zvýšení napětí na vstupu způsobí pokles napětí za operačními zesilovači), což nezpůsobí potíže, protože se tento problém může jednoduše vyřešit softwarově.

Na A/D převodník bude tedy přiváděno napětí vypočítané podle následujícího vzorce:

$$U_{O(OZ2-U)} = -U_{IN} * 0,01664 + 2,48 \text{ [V]} \quad (27)$$

4.3 Návrh finálního obvodu v aplikaci EAGLE

Návrh obvodu i desky plošných spojů byl vytvořen v aplikaci EAGLE od společnosti AUTODESK. Z předchozích kapitol je již známé napětí přiváděné na A/D převodníky i napětí všech zdrojů.

4.3.1 Připojení napěťových zdrojů

DC/DC měnič musí mít na vstup připojeno napájení z mikrokontroleru označené +5V_USB a napájecí zem ze strany mikrokontroleru GND_USB. Na výstupu bude +12 V a -12 V a napájecí zem ze strany analogového obvodu. Tato napětí v obvodu nejsou potřeba, tudíž se rovnou připojí ke stabilizátorům, které napětí upraví na +8 V a -8 V.

Všechny stabilizátory potřebují podle datasheetu na vstupu kondenzátor s kapacitou 0,33 μF a na výstupu 100 nF. Na vstup byly připojeny kondenzátory s vyšší kapacitou a to 1 μF , funkci to nijak neovlivní a tyto kondenzátory jsou dostupnější. Stabilizátory musí být uzemněny – připojeny na GND.

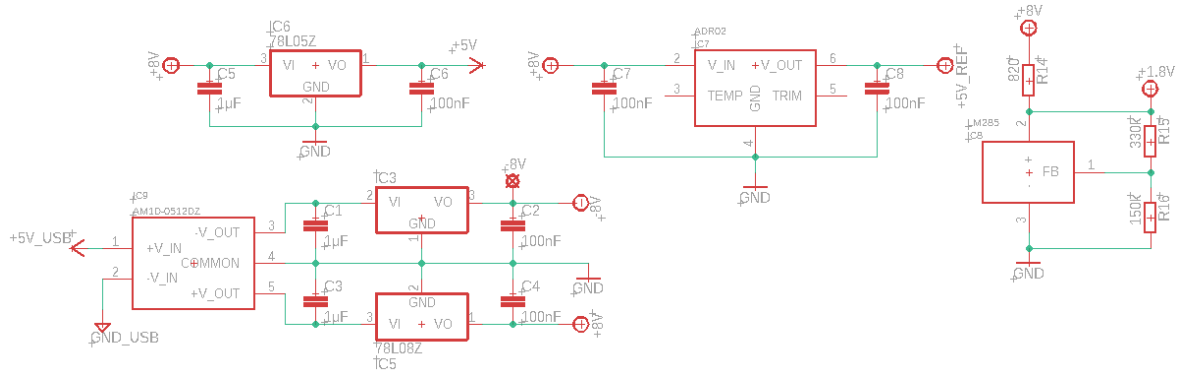
Zdrojem ADR02 bude napětí 8 V převedeno na přesné stabilizované napětí +5V_REF. Podle doporučeného zapojení v datasheetu jsou připojeny na vstup i výstup kondenzátory s kapacitou 100 nF a celý zdroj opět uzemněn.

Zdroj pro napětí +1,8 V je napájen také z napětí +8 V a spojen s napájecí zemí. Velikost odporu rezistoru R_{14} , nesmí být příliš malá, v tomto případě stačí odpor 820 Ω , aby se netvořily zbytečné ztráty. Rezistory R_{15} a R_{16} byly dopočítané podle rovnice uvedené v datasheetu. Stejným způsobem byl poté připojen a vypočítán zdroj -2,48 V, ale na jeho vstup bylo připojeno záporné napětí -8 V, aby výstupní napětí bylo také záporné:

$$V_{OUT} = 1,24 * \left(\frac{R_{16}}{R_{15}} + 1 \right) \quad (28)$$

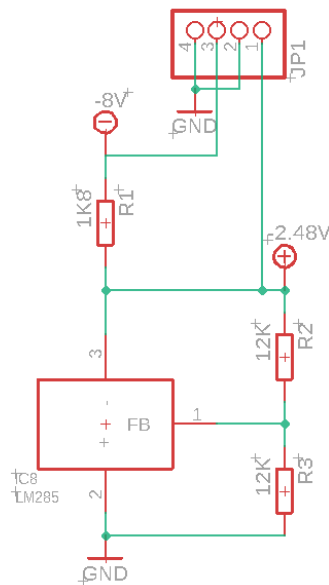
$$\text{Pro zdroj } +1,8 \text{ V:} \quad V_{OUT} = 1,24 * \left(\frac{150 * 10^3}{330 * 10^3} + 1 \right) = 1,804 \text{ V} \quad (29)$$

$$\text{Pro zdroj } -2,48 \text{ V:} \quad V_{OUT} = 1,24 * \left(\frac{12 * 10^3}{12 * 10^3} + 1 \right) = 2,48 \text{ V} \quad (30)$$



Obrázek 21 Návrh zapojení napěťových zdrojů v Eaglu

Zdroj záporného napětí -2,48 V byl navržen na druhou malou desku, která se poté připojila na hlavní desku pomocí vodičů a pin headerů.



Obrázek 22 Návrh zapojení zdroje -2,48 V v Eaglu

Na operační zesilovače bylo potřeba vyvést napětí +8 V a -8 V. Na následujícím obrázku je připojení napětí na piny 8 a 4 obou dvojic operačních zesilovačů.

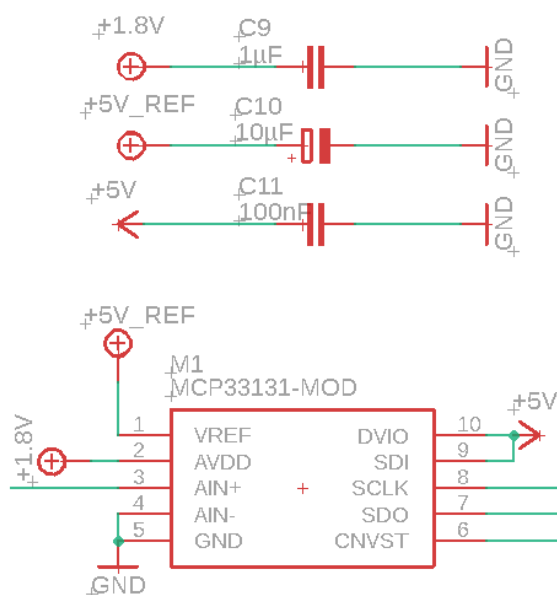


Obrázek 23 Připojení napájení k pinům operačních zesilovačů

4.3.2 Připojení A/D převodníků

Oba A/D převodníky jsou zapojeny stejným způsobem. Připojení napětí na vývody A/D převodníku je vidět na obrázku níže. Dále bylo zapotřebí ke každému napájecímu pinu připojit kondenzátor. Podle datasheetu byl ke vstupu referenčního napětí připojen tantalový kondenzátor s kapacitou 10 μF , ke vstupu AVDD 1 μF a ke vstupům DVIO a SDI keramický kondenzátor 100 nF.

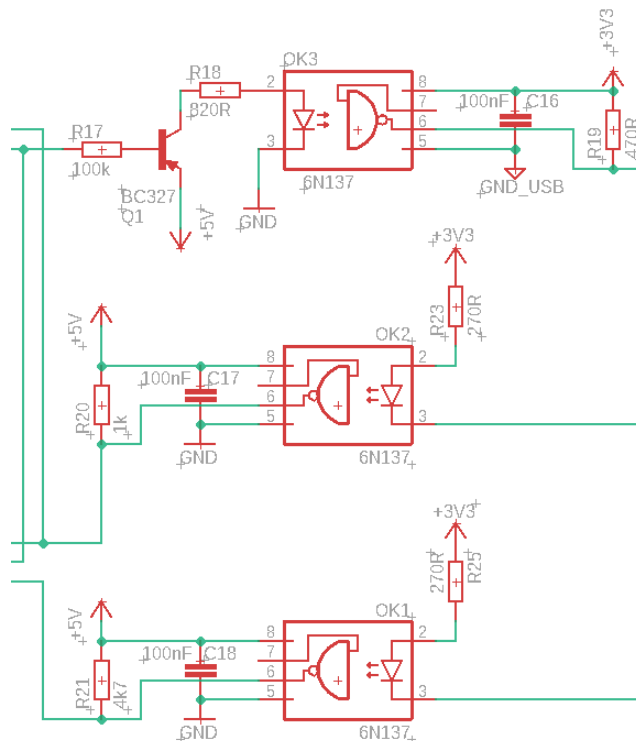
Signály SCLK a SDO jsou navzájem propojeny mezi převodníky a přes optočleny přivedeny do mikrokontroleru (SCLK z výstupu PTD1 a SDO do vstupu PTD3). Signály CNVST, které ovládají výběr převodníku, jsou každý zvlášť propojeny přes optočleny s mikrokontrolerem (z výstupů PTD0 a PTE0).



Obrázek 24 Připojení A/D převodníku v obvodu

4.3.3 Připojení optočlenů

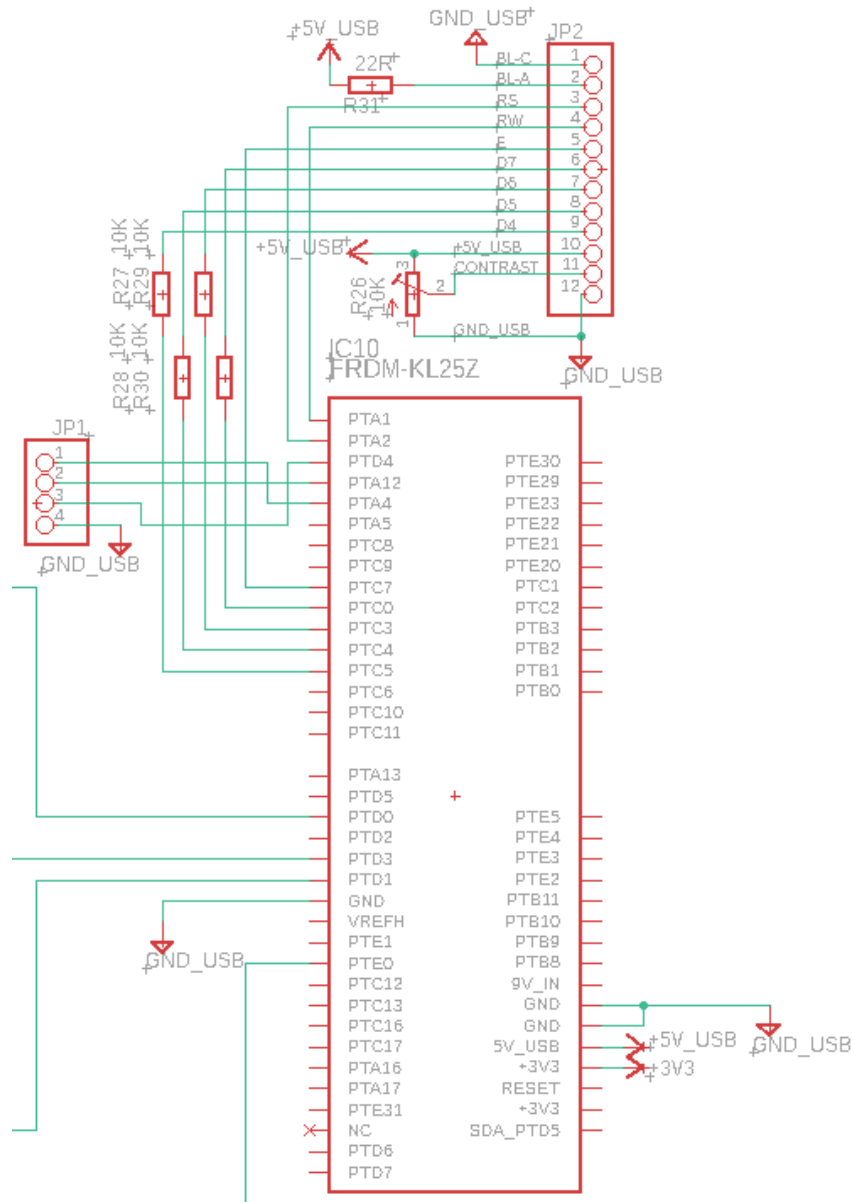
Na obrázku níže jsou 3 optočleny: horní pro SDO signál, prostřední pro SCLK signál a spodní pro CNVST signál (tento je v obvodu 2krát připojený stejným způsobem). Ze strany analogového obvodu je připojeno napětí +5 V a zem propojená s analogovým obvodem GND. Ze strany mikro počítače je připojeno napětí +3V3 (stabilizované napětí z vývojové desky) a uzemnění digitální části GND_USB. Kondenzátory 100 nF na výstupu byly zvoleny podle datasheetu. Rezistory na výstupu byly v datasheetu uvedeny s nižším odporem, než jaký byl vybrán. Obecně by bylo lepší zvolit rezistory s většími odpory, ale ty by z důvodu větších časových konstant omezovaly maximální dosažitelnou přenosovou rychlost. Proto jsou na výstupy optočlenů, které budou přenášet data a hodinový signál velmi rychle (SCLK a SDO), připojeny rezistory s nižším odporem. Dále jsou ze strany mikro počítače připojeny pull-up rezistory, aby byl výchozí stav logická 1, protože optočlen má výstup s otevřeným kolektorem. Tranzistor na vstupu horního optočlenu proudově posiluje SDO signál A/D převodníků.



Obrázek 25 Připojení optočlenů v obvodu

4.3.4 Připojení mikropočítače

Kromě signálů z A/D převodníků bylo nutné k mikropočítači připojit také tlačítka a displej. To je řešeno přes pin headery. JP1 je pin header pro tlačítka, jeden pin je zem, zbývající tři piny jsou připojeny k mikropočítači na piny PTD4, PTA12 a PTA4. JP2 je pin header pro displej, který potřebuje celkem 12 signálových cest. Signály na pinech 3 až 9 jsou připojeny k mikropočítači na piny PTA2, PTA1, PTC7, PTC0, PTC3, PTC4 a PTC5. Piny mikropočítače jsou zvoleny podle pozice ke snadnému připojení. Signál BL-C je katoda připojená k GND_USB a BL-A je anoda displeje připojená k napájení z mikropočítače +5V_USB. Signály na pinech 10 a 12 jsou napájecí a mezi nimi je signál kontrastu nastavitelný přes připojený trimr.



Obrázek 26 Připojení mikropočítače a pin headerů

4.3.5 Celý navržený obvod

Celkové schéma zapojení wattmetru je uvedeno v **Příloze P I**.

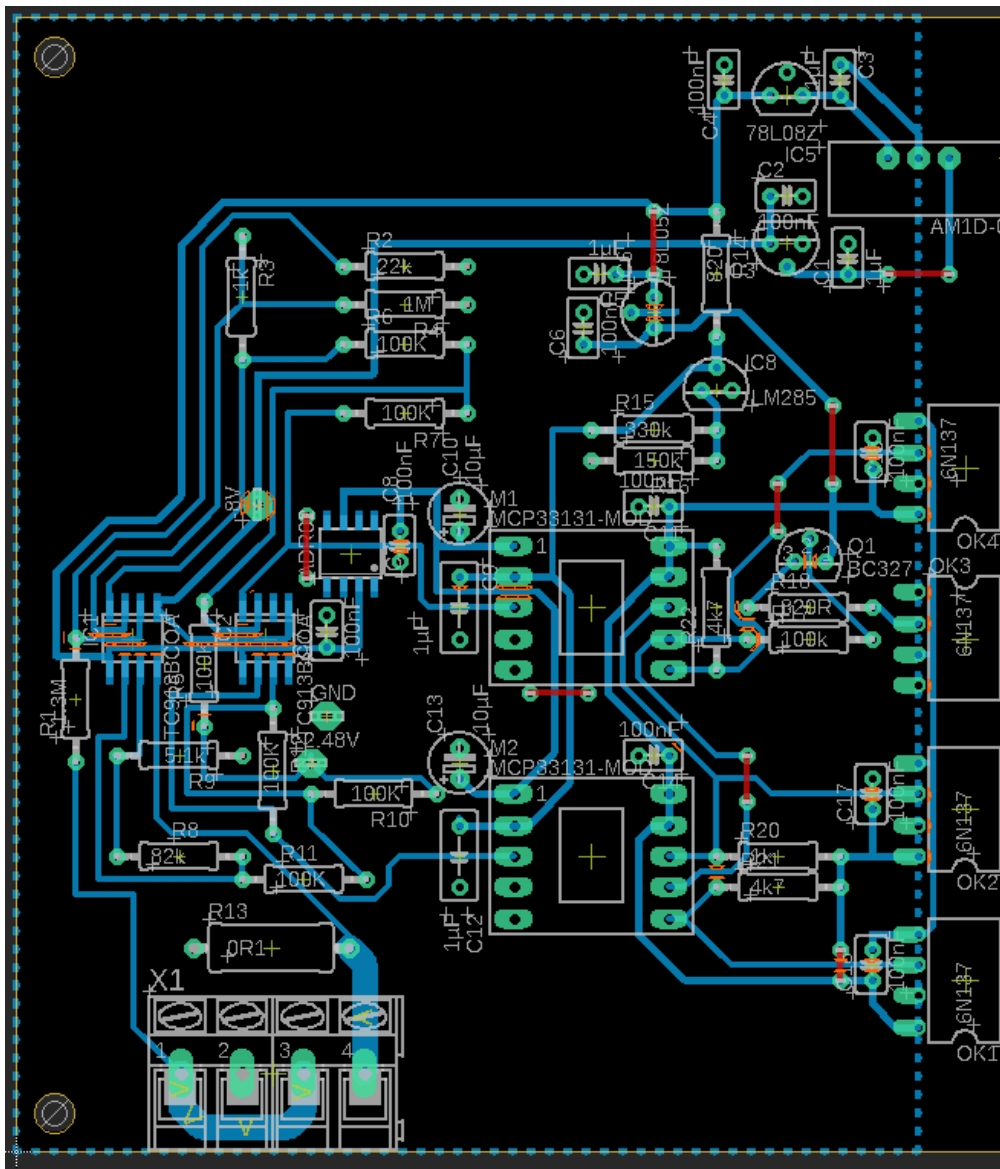
4.4 Návrh desky plošných spojů

Hlavní obtíží návrhu desky bylo vhodně poskládat všechny součástky na dostupnou desku délky 16 cm. Nejvíce místa zabírá mikropočítač, proto se část pro snímání a úpravu vstupních veličin musela vtěsnat do velmi úzkého prostoru.

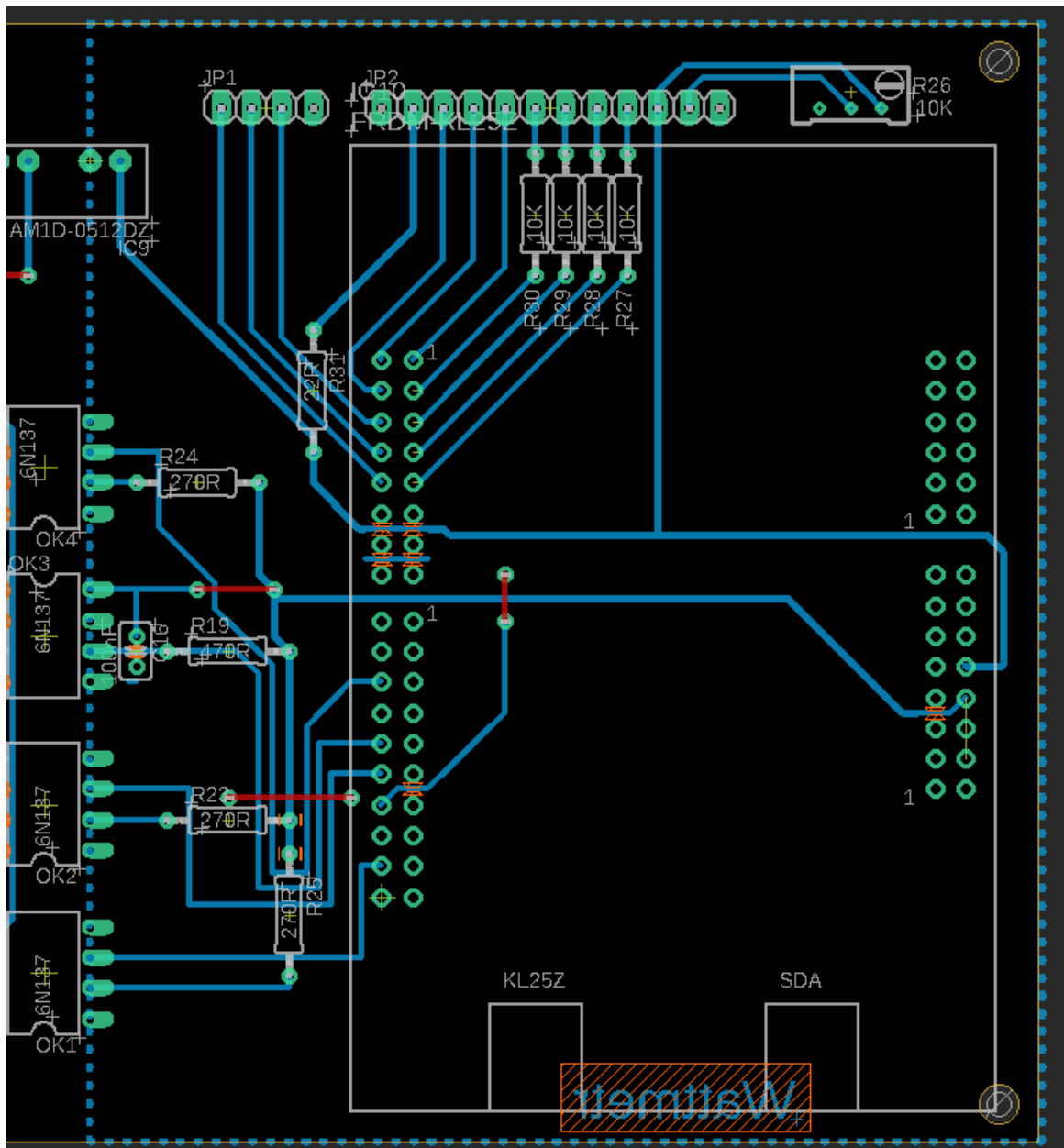
Signály pro připojení snímaného napětí, proudu a zem jsou vyvedeny na svorkovnici.

Pro dodatečný zdroj záporného referenčního napětí jsou v desce připravené otvory, jsou to signály -8 V, GND a -2,48 V.

Operační zesilovače a zdroj napětí +5V_REF bylo nutné zrcadlově převrátit funkcí Mirror, protože se budou na desku osazovat zespodu.



Obrázek 27 Analogová část navržené desky plošných spojů.

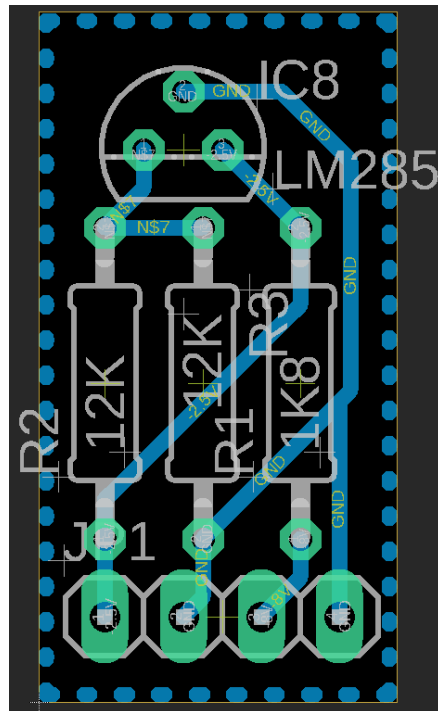


Obrázek 28 Digitální část navržené desky plošných spojů

Každá část desky je v prázdných oblastech vyplněna signálem GND u analogové a GND_USB u digitální.

Dodatečný zdroj byl navržen na velmi malou destičku s šířkou odpovídající přibližně šířce čtyř pinového pin headeru. Piny se signálem GND budou přímo zapojeny do desky (přes ně

bude dodatečná deska připevněna) a signály -2,48 V a -8 V budou připojeny prostřednictvím vodičů.



Obrázek 29 Deska plošných spojů se zdrojem napětí -2,48 V

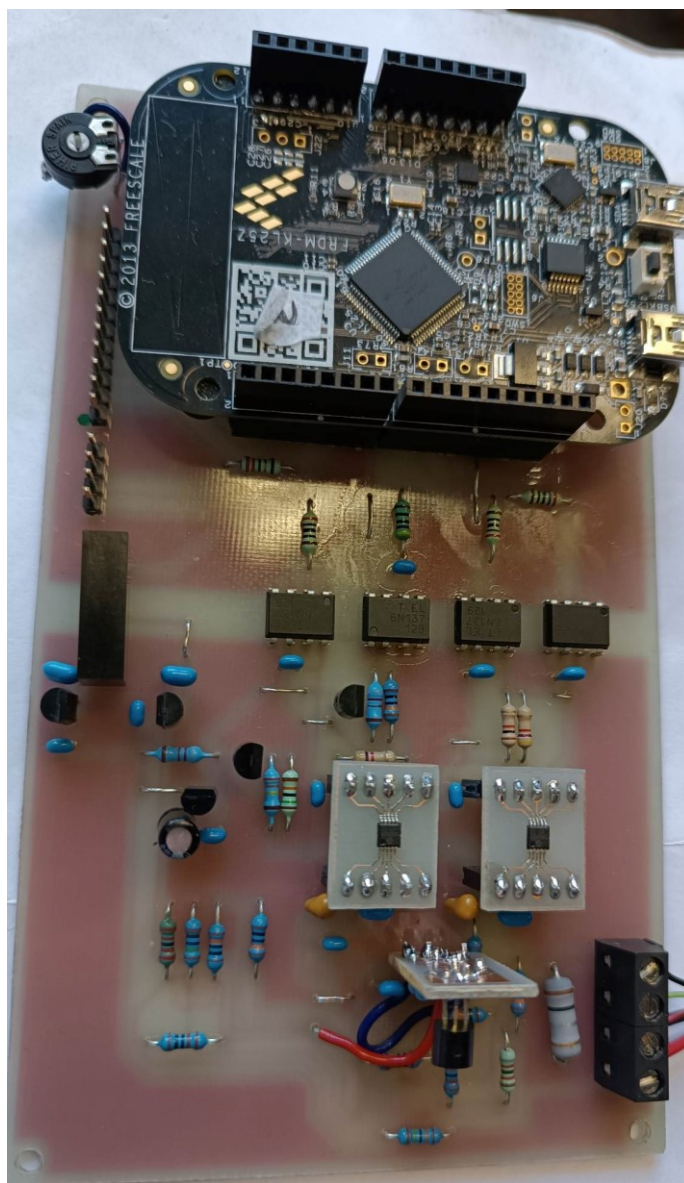
Z důvodu velmi malých rozměrů pouzder integrovaných obvodů A/D převodníků bylo potřeba nejdříve navrhnout malou rozšiřující destičku pro každý převodník. Tahle deska se poté připojí k hlavní desce pomocí pin headerů a dutinkových lišt. Deska má rozměry 12,7 na 16,5 mm.

5 REALIZACE PŘÍSTROJE

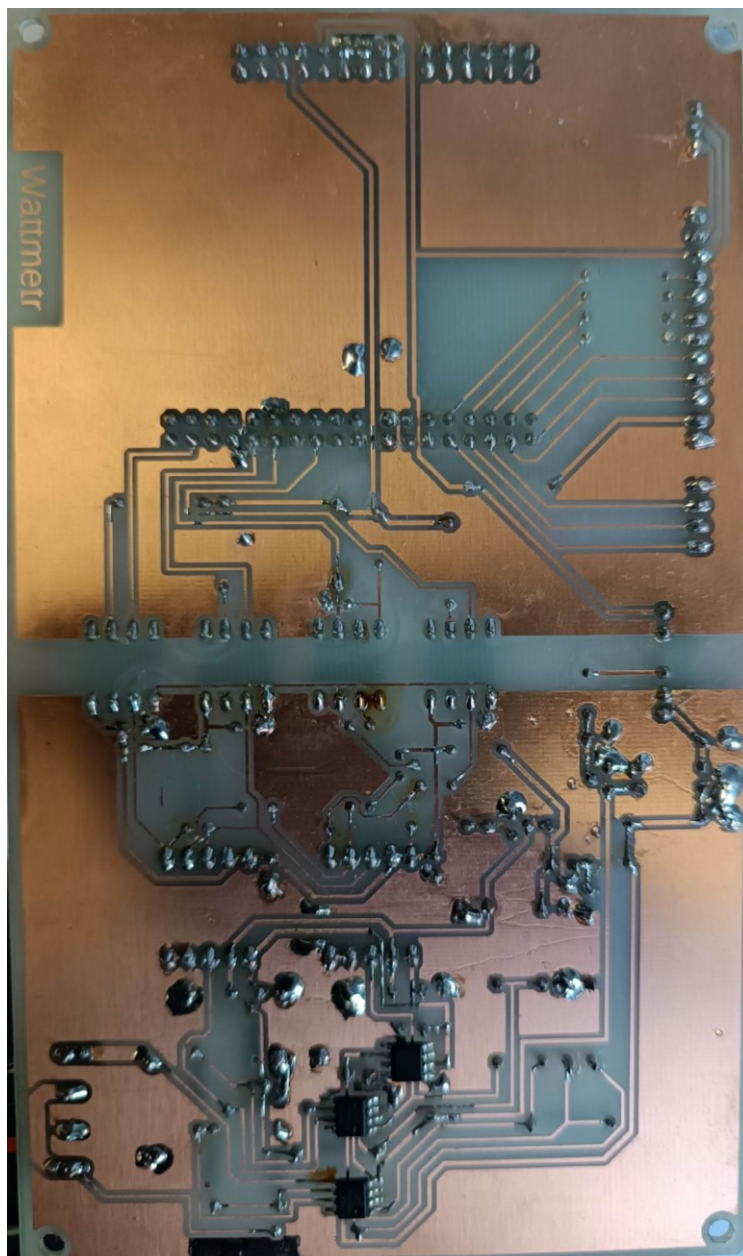
Nyní se všechny součástky zapojí podle návrhu.

5.1 Osazení desky plošných spojů

Navržená deska byla vyrobena a nachystána k pájení. Většina součástek se osazovala sešora a pájela přes otvory v desce. Pouze operační zesilovače TC913 a přesná napěťová reference ADR02ARZ v pouzdrech SOIC se osazovaly zespoda. Mikropočítač a rozšířené desky A/D převodníku se na desku připojily přes dutinky ze strany desky a pin headerů ze strany součástek. Pro displej a tlačítka jsou připájeny pin headery.



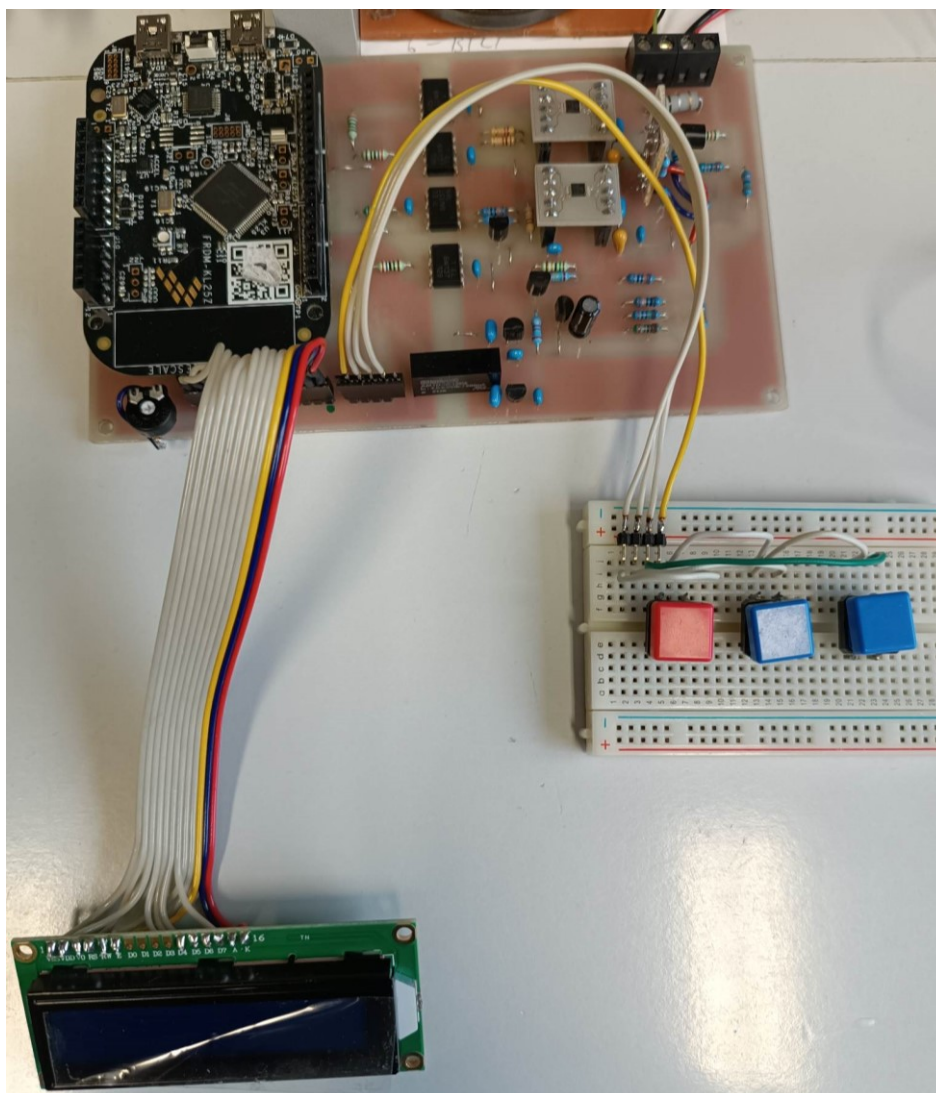
Obrázek 30 Osazená deska z horní strany



Obrázek 31 Osazená deska ze spodní strany

5.2 Propojení celého zařízení

Propojení desky s displejem a tlačítky bylo provedeno plochým kabelem. Tlačítka jsou nasazena a propojena na nepájivém poli, ze kterého je vyveden čtyřpinový pin header.



Obrázek 32 Konstrukční řešení celého zařízení

6 PROGRAM PRO MĚŘENÍ A ZOBRAZENÍ VÝKONU

Programové vybavení digitálního wattmetru bylo napsáno v jazyce C++ v programu Kinetis Design Studio.

6.1 Drivery programu

K programu jsou připojeny celkem 3 drivery, které byly k dispozici z výuky embedded systémů:

- drv_uart.c a drv_uart.h – tyto soubory byly použity pouze pro simulační výpis měřených hodnot před zapojením displeje k zařízení
- drv_lcd.c a drv_lcd.h – tyto byly potřebné pro inicializaci displeje. Ovšem displej, který byl použit pro wattmetr je jiný než displej, pro který byl driver přizpůsoben. Po vyzkoušení se zjistilo, že je driver plně kompatibilní i s displejem k wattmetru. Jediná věc, která se musela změnit bylo přiřazení výstupů mikropočítače ke vstupům displeje, protože na kitu pro výuku byly využity jiné výstupy mikropočítače.
- drv_gpio.c a drv_gpio.h – drivery pro tlačítka, které pošle pouze jednorázový signál při aktivaci tlačítka. Bylo třeba tyto soubory rozšířit, aby program mohl pracovat se třemi různými tlačítky.

6.2 Příprava programu

Prvním krokem bylo vložení všech potřebných souborů. Kromě driverů je také potřeba knihovna <stdio.h> pro práci s textem a "math.h" pro matematické výpočty.

```
#include "MKL25Z4.h"  
#include "math.h"  
#include "drv_uart.h"  
#include <stdio.h>  
#include "drv_lcd.h"  
#include "drv_gpio.h"
```

Obrázek 33 Soubory připojené k hlavnímu programu

Dále se provedla inicializace vstupů a výstupů, inicializace časovače, vytvoření potřebných proměnných, konstant a prototypů funkcí.

```

/* CNVST napeti */
PORTD->PCR[0] = PORT_PCR_MUX(1); //určení funkce pinu
PTD->PDDR |= (1 << 0); //určení směru (výstup "|= (1 << 0)" nebo vstup "&= ~(1 << 3)")
PTD->PCOR |= (1 << 0); //vynulování výstupu

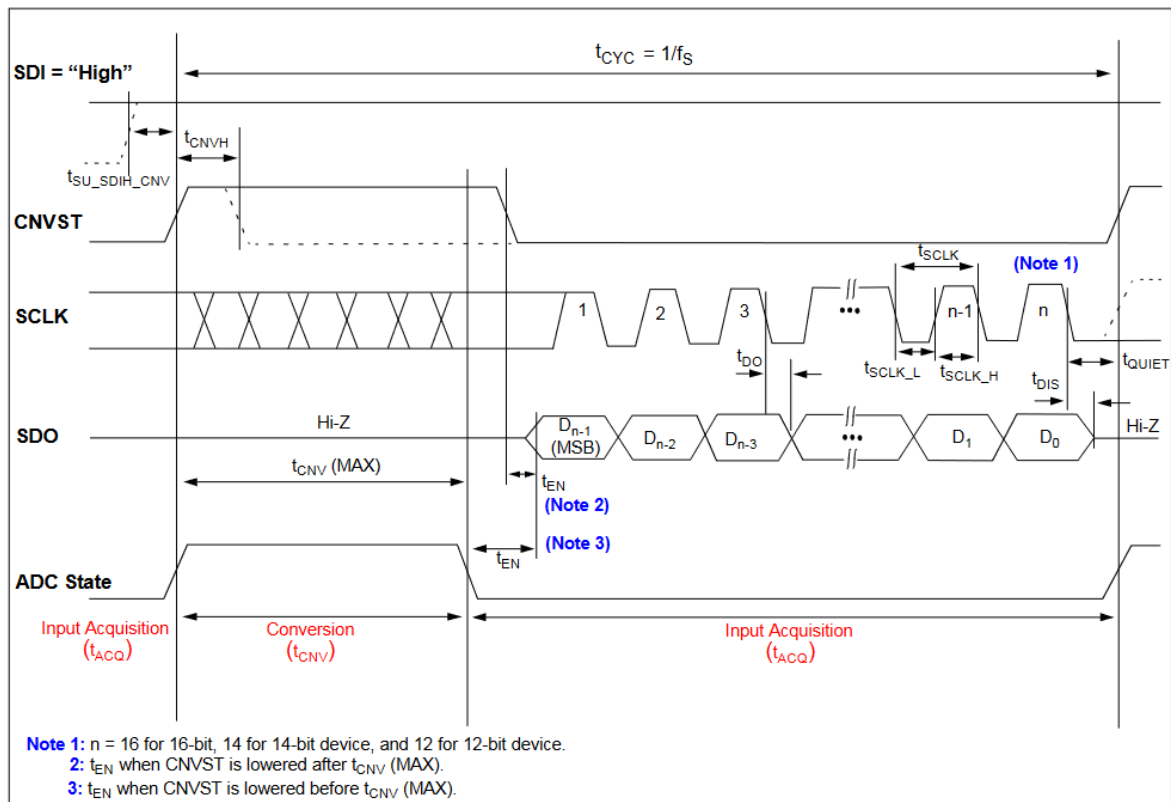
```

Obrázek 34 Inicializace výstupu, který aktivuje čtení z A/D převodníku

6.3 Funkce v programu

Kromě inicializačních funkcí program obsahuje následující funkce:

- **void TPM0_IRQHandler(void)** – obsluha přerušení od události TOF časovače TPM() – volá se v pravidelných intervalech celkem 12500krát za sekundu (perioda je 80 μ s) a ukládá hodnoty z jednoho přečtení A/D převodníku. V každém svém cyklu jednou zavolá funkce *read_AD_U* a *read_AD_I*.
- **int16_t read_AD_U(void)** – čte hodnotu z A/D převodníku pro převod napětí
- **int16_t read_AD_I(void)** – čte hodnotu z A/D převodníku pro převod proudu, hodnoty z A/D převodníku se čtou podle následujícího diagramu:



Obrázek 35 Diagram přenosu dat z výstupu A/D převodníku [16]

- **void calculate(void)** - Provede výpočet požadovaných veličin po tom, co se uloží 1000 hodnot z A/D převodníku do vstupního bufferu. Volá se z hlavní smyčky ve funkci *Main*. Perioda volání této funkce je 80 ms, to znamená, že provádí výpočet ze 4 period signálu se standardní frekvencí 50 Hz (perioda 20 ms).

Teoretický offset hodnoty z A/D převodníku, který znamená 0 na vstupu se vypočítal následovně:

$$offset = \frac{AD_{OUT-MAX} * U_{UIN(0)}}{AD_{IN-MAX}} = \frac{16383 * 2,48}{5} = 8126 \quad (31)$$

Tato hodnota se upravila na přesnější hodnoty během testování: 8095 pro napětí a 8132 pro proud.

Pro napětí i proud byly vypočteny převodní konstanty podle následujících rovnic vycházejících ze znalostí z kapitoly 4.3:

$$U_{O(OZ2-I)} = -U_{IN} * 0,01664 + 2,48 [V] \quad (32)$$

$$I_{IN} = \frac{AD_{OUT(I)} * \frac{AD_{IN-MAX}}{AD_{OUT-MAX}}}{0,01664} = \frac{AD_{OUT(I)} * \frac{5}{16383}}{0,01664} = 0,01834 \quad (33)$$

$$U_{O(OZ2-I)} = I_{IN} * 1,708 + 2,48 [V] \quad (34)$$

$$I_{IN} = \frac{AD_{OUT(I)} * \frac{AD_{IN-MAX}}{AD_{OUT-MAX}}}{1,708} = \frac{AD_{OUT(I)} * \frac{5}{16383}}{1,708} = 0,0001787 \quad (35)$$

Tyto hodnoty jsou opět pouze teoretické a byly upraveny během testování: 0,018493 pro napětí a 0,000179 pro proud.

```
const float konst_I = 0.000179; // Vypocetni konstanta proudu
const float konst_U = 0.018493; // Vypocetni konstanta napeti
static int offset_U = 8095; // Defaultni offset napeti
static int offset_I = 8132; // Defaultni offset proudu
```

Obrázek 36 Konstanty pro výpočet v programu

Funkce vypočítá všechny veličiny z 1000 vzorků a poté zprůměruje poslední 4 výsledky.

```

for(i=0;i<POCET_VZORKU;i++)
{
    suma_U += ((U_values[i]-offset_U)*konst_U)*((U_values[i]-offset_U)*konst_U);
    suma_I += ((I_values[i]-offset_I)*konst_I)*((I_values[i]-offset_I)*konst_I);
    suma_P += ((I_values[i]-offset_I)*konst_I)*((U_values[i]-offset_U)*konst_U);
}

//Vypocet napeti:
U_buff[b] = sqrt(suma_U / POCET_VZORKU);
U = (U_buff[0]+U_buff[1]+U_buff[2]+U_buff[3])/4;

//Vypocet proudu:
I_buff[b] = sqrt(suma_I / POCET_VZORKU);
I = (I_buff[0]+I_buff[1]+I_buff[2]+I_buff[3])/4;
I_mA = I * 1000;

//Vypocet cinneho vykonu:
P_buff[b] = fabs(suma_P / POCET_VZORKU);
P = (P_buff[0]+P_buff[1]+P_buff[2]+P_buff[3])/4;

//Vypocet zdanliveho vykonu:
S = U*I;

//Vypocet jaloveho vykonu:
Q = sqrt(fabs(S*S-P*P));

//Vypocet uciniku:
if(P/S < 0)
{
    cos_fi = 0; // Pro pripad, ze by ucinik vysel zaporny se zobrazi 0
}
else if(P/S > 1)
{
    cos_fi = 1; // Pro pripad, ze by ucinik vysel vetsi nez 1 se zobrazi 1
}
else
{
    cos_fi = P/S;
}

```

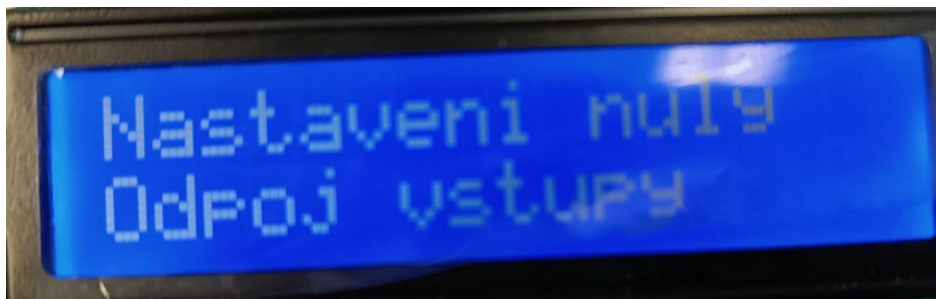
Obrázek 37 Část funkce Calculate pro výpočet všech veličin

- **void zobraz_velicinu(uint8_t velicina)** – zobrazí vybranou veličinu na displeji. Podle hodnoty proměnné *velicina* na displej zobrazí vypočtená hodnota. Volá se v hlavní smyčce ve funkci *Main*.

6.4 Hlavní funkce Main a zobrazení hodnot na displeji

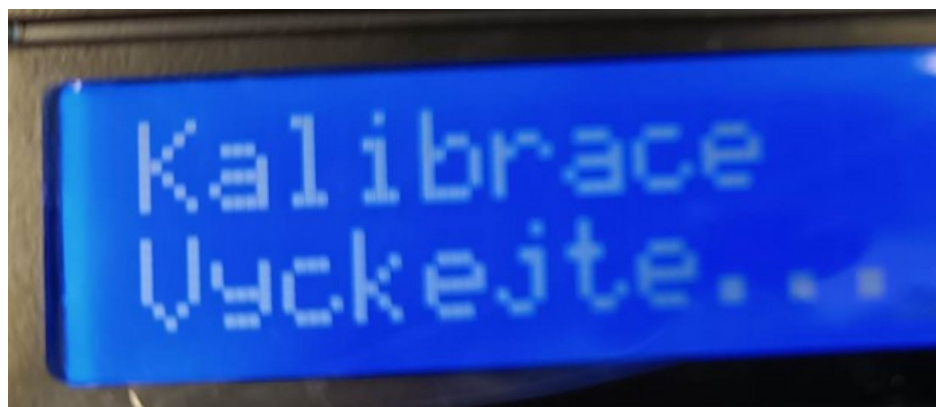
Na začátku funkce *Main* je zavolání inicializačních funkcí a poté hlavní smyčka, která se provádí stále dokola. V hlavní smyčce je volání funkce *Calculate* a *zobraz_velicinu*. Dále se zde řeší čtení tlačítek.

Tlačítko 1 – při prvním stisknutí se na displeji zobrazí následující zpráva:



Obrázek 38 Příprava nastavení nuly na displeji

Poté se očekává úplné odpojení wattmetru od měřeného obvodu a dalším stisknutím tlačítka 1 se provede kalibrace offsetu trvající přibližně 1 sekundu.



Obrázek 39 Kalibrace na displeji

Tlačítko 2 – každé stisknutí změní zobrazovanou veličinu na veličinu předchozí

Tlačítko 3 – každé stisknutí změní zobrazovanou veličinu na veličinu následující:

Činný výkon > Zdánlivý výkon > Jalový výkon > Účinník > Efektivní hodnota napětí > Efektivní hodnota proudu > Činný výkon...



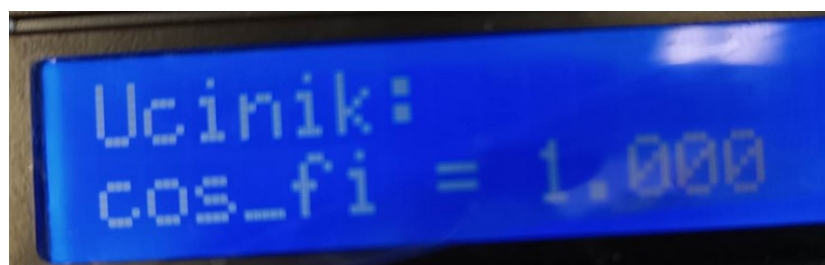
Obrázek 40 Činný výkon na displeji



Obrázek 41 Zdánlivý výkon na displeji



Obrázek 42 Jalový výkon na displeji



Obrázek 43 Účinnost na displeji



Obrázek 44 Napětí na displeji



Obrázek 45 Proud na displeji

7 OVĚŘENÍ FUNKCE WATTMETRU

Pro ověření funkce wattmetru byla změřena část úlohy ze cvičení elektrotechniky.

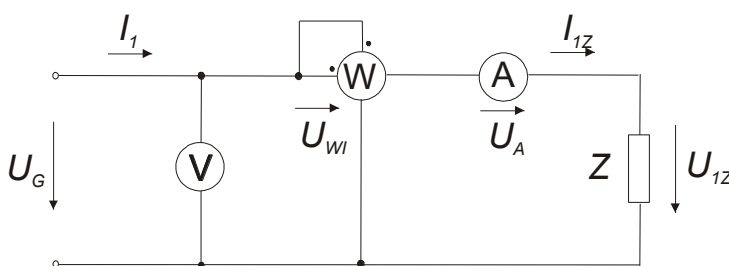
7.1 Zadání úlohy pro ověření wattmetru

Úkol měření:

1. Pomocí wattmetru změřte činný výkon jednofázového střídavého proudu pro tři druhy zátěže: cívka bez jádra, cívka s jádrem, paralelní kombinace kondenzátorů.
2. Vypočítejte pro jednotlivé typy zátěží činný výkon, jalový výkon a zdánlivý výkon. Výpočtem určete fázový posuv mezi napětím a proudem pro jednotlivé typy zátěží.
3. Ověřte platnost vztahu mezi zdánlivým, činným a jalovým výkonem.

Seznam použitých přístrojů:

G	generátor střídavého sinusového napětí	typ: DIAMETRAL AC 250K1D
V	voltmetr	typ: METEX M-3860D
A	ampérmetr	typ: METEX M-3890D
W	wattmetr	typ: METRA PLi
	Přístroj pro měření odporu, kapacity, indukčnosti	typ: UNI-T UT603



Obrázek 46 Měření činného výkonu jednofázového proudu

Činný výkon určený z výchylky wattmetru je:

$$P_1 = P_{1Z} + P_{WI} + P_A \quad , \quad (36)$$

kde jsou

- P_{1Z} výkon zátěže,
- P_{WI} výkon spotřebovaný proudovou cívkou wattmetru,
- P_A výkon spotřebovaný ampérmetrem.

Výkon spotřebovaný proudovou cívkou wattmetru lze vyjádřit jako:

$$P_{WI} = R_{WI} \cdot I_{1Z}^2 \quad , \quad (37)$$

kde jsou

- R_{WI} odpor proudové cívky wattmetru,
- I_{1Z} proud procházející zátěží.

Pro výkon spotřebovaný ampérmetrem lze psát:

$$P_A = R_A \cdot I_{1Z}^2 \quad , \quad (38)$$

kde je R_A odpor ampérmetru.

Činný výkon zátěže je:

$$P_{1Z} = P_1 - P_{WI} - P_A \quad . \quad (39)$$

Absolutní chyba metody tohoto zapojení je:

$$\Delta_{1M} = P_1 - P_{1Z} = P_{WI} + P_A \quad . \quad (40)$$

Pro relativní chybu metody platí:

$$\delta_{1M} = \frac{\Delta_{1M}}{P_{1Z}} \cdot 100 \quad (41)$$

Postup při měření:

1. Změříme odpor proudové cívky wattmetru a vnitřní odpor ampérmetru.
2. Změříme indukčnost cívky bez jádra a s jádrem, kapacitu paralelní kombinace kondenzátorů.
3. Zapojíme jednofázový obvod podle *Obrázku 47*, připojíme jeden typ zátěže. Změříme velikost činného výkonu pro různé hodnoty napájecího napětí pomocí analogového wattmetru. Poté provedeme stejné měření i se sestrojeným digitálním wattmetrem.
4. Postupně proměříme výkon jednofázového střídavého proudu pro všechny typy zátěží.

Naměřené hodnoty prvků obvodu:1. *Měření vnitřních odporů přístrojů*

- vnitřní odpor ampérmetru:

$$R_A = 5,7 \Omega$$

- vnitřní odpor proudové cívky analogového wattmetru:

$$R_{WI} = 5,4 \Omega$$

- vnitřní odpor napěťové cívky analogového wattmetru:

$$R_{WU1} = 2\,000 \Omega$$

- odpor bočníku digitálního wattmetru

$$R_{WI2} = 0,1 \Omega$$

- odpor děliče napětí digitálního wattmetru

$$R_{WU2} = 1\,322 \text{ k}\Omega$$

2. Měření odporu cívky, indukčnosti cívky a kapacity kondenzátorů

- odpor vinutí cívky

$$R_L = 410 \Omega$$

- indukčnost cívky bez jádra

$$L = 0,31 \text{ H}$$

- indukčnost cívky s jádrem

$$L = 0,76 \text{ H}$$

- kapacita paralelní kombinace kondenzátorů

$$C = 25 \mu\text{F}$$

7.2 Měření digitálním wattmetrem

Zátěž	U_G [V]	U [V]	I [mA]	P_l [W]	S [VA]	Q [Var]	$\cos \varphi$
Cívka bez jádra	30	30,0	63,2	1,89	1,92	0,32	0,985
	35	35,2	75,2	2,64	2,69	0,45	0,986
	40	39,8	83,8	3,27	3,33	0,56	0,986
	45	45,2	94,3	4,22	4,27	0,70	0,987
	50	50,4	103,5	5,12	5,20	0,84	0,987

Tabulka 1 Měření cívky bez jádra digitálním wattmetrem

Zátěž	U_G [V]	U [V]	I [mA]	P_l [W]	S [VA]	Q [Var]	$\cos \varphi$
Cívka s jádrem	30	29,8	48,2	1,23	1,46	0,82	0,830
	35	35,2	58,0	1,71	2,08	1,18	0,825
	40	39,8	65,6	2,16	2,62	1,50	0,820
	45	45,1	74,5	2,77	3,40	1,95	0,819
	50	50,5	83,1	3,45	4,21	2,41	0,820

Tabulka 2 Měření cívky s jádrem digitálním wattmetrem

Zátěž	U_G [V]	U [V]	I [mA]	P_l [W]	S [VA]	Q [Var]	$\cos \varphi$
Paralelní kombinace kondenzátorů	30	30,0	232,0	0,14	7,20	7,18	0,020
	35	35,2	273,5	0,19	9,99	9,99	0,019
	40	39,9	306,8	0,23	12,62	12,61	0,019
	45	45,4	349,0	0,30	16,30	16,29	0,018
	50	49,7	381,8	0,35	19,45	19,43	0,018

Tabulka 3 Měření paralelní kombinace kondenzátorů digitálním wattmetrem

Zátěž	U_G [V]	P_1 [W]	P_{WI} [W]	P_A [W]	P_Z [W]
Cívka bez jádra	30	1,89	0,000	0,02	1,87
	35	2,64	0,001	0,03	2,61
	40	3,27	0,001	0,04	3,23
	45	4,22	0,001	0,05	4,17
	50	5,12	0,001	0,06	5,06

Tabulka 4 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s digitálním wattmetrem při měření cívky bez jádra

Zátěž	U_G [V]	P_1 [W]	P_{WI} [W]	P_A [W]	P_Z [W]
Cívka s jádrem	30	1,23	0,000	0,01	1,22
	35	1,71	0,000	0,02	1,69
	40	2,16	0,000	0,02	2,14
	45	2,77	0,001	0,03	2,74
	50	3,45	0,001	0,04	3,41

Tabulka 5 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s digitálním wattmetrem při měření cívky s jádrem

Zátěž	U_G [V]	P_1 [W]	P_{WI} [W]	P_A [W]	P_Z [W]
Paralelní kombinace kondenzátorů	30	0,14	0,005	0,31	-0,17
	35	0,19	0,007	0,43	-0,24
	40	0,23	0,009	0,54	-0,32
	45	0,30	0,012	0,69	-0,41
	50	0,35	0,015	0,83	-0,50

Tabulka 6 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s digitálním wattmetrem při měření paralelní kombinace kondenzátorů

Příklad výpočtu pro první řádek:

$$P_{WI} = R_B * I^2 = 0,1 * 0,063^2 = 0,0004 \text{ W}$$

$$P_A = R_A * I^2 = 5,7 * 0,063^2 = 0,022 \text{ W}$$

Výkon v poslední tabulce vyšel záporný, protože při tomhle měření byl činný výkon velmi malý a změřit přesně malé výkony je velmi náročné. Takle chyba může být také způsobena nepřesně změřeným vnitřním odporem ampérmetru.

Zátěž	U [V]	Z [Ω]	I [mA]	P [W]	S [VA]	Q [Var]	cos φ
Cívka bez jádra	30,0	421,4	71,2	2,08	2,14	0,49	0,973
	35,2	421,4	83,5	2,86	2,94	0,68	0,973
	39,8	421,4	94,4	3,66	3,76	0,87	0,973
	45,2	421,4	107,3	4,72	4,85	1,12	0,973
	50,4	421,4	119,6	5,86	6,03	1,39	0,973

Tabulka 7 Teoretický výpočet výkonů v obvodu s digitálním wattmetrem při měření cívky bez jádra

Zátěž	U [V]	Z [Ω]	I [mA]	P [W]	S [VA]	Q [Var]	cos φ
Cívka s jádrem	29,8	474,5	62,8	1,62	1,87	0,94	0,864
	35,2	474,5	74,2	2,26	2,61	1,31	0,864
	39,8	474,5	83,9	2,89	3,34	1,68	0,864
	45,1	474,5	95,1	3,70	4,29	2,16	0,864
	50,5	474,5	106,4	4,64	5,38	2,70	0,864

Tabulka 8 Teoretický výpočet výkonů v obvodu s digitálním wattmetrem při měření cívky s jádrem

Příklad výpočtu pro první řádek:

$$X_L = 2 * \pi * f * L = 2 * \pi * 50 * 0,31 = 97,4 \Omega$$

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2} = \sqrt{97,4^2 + 410^2} = 421,4 \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{30}{421,4} = 71,2 \text{ mA}$$

$$S = U * I = 30 * 0,0712 = 2,14 \text{ VA}$$

$$Q = X_L * I^2 = 97,4 * 0,0712^2 = 0,49 \text{ Var}$$

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2} = \sqrt{2,14^2 - 0,49^2} = 2,08 \text{ W}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{2,08}{2,14} = 0,973$$

Hodnoty výkonu pro paralelní kombinaci kondenzátorů nebylo možné vypočítat, protože neznáme jejich odpor. Kondenzátor můžeme považovat za ideální prvek, v tom případě by byl činný výkon nulový a jalový výkon by se rovnal zdánlivému.

7.3 Měření analogovým wattmetrem

Zátěž	U_G [V]	U [V]	I [mA]	P_1 [W]
Cívka bez jádra	30	29,8	66,0	2,13
	35	35,2	77,2	2,82
	40	39,8	86,0	3,50
	45	45,0	96,2	4,33
	50	50,4	106,0	5,30

Tabulka 9 Měření cívky bez jádra analogovým wattmetrem

Zátěž	U_G [V]	U [V]	I [mA]	P_1 [W]
Cívka s jádrem	30	29,8	52,2	1,38
	35	35,2	61,0	1,88
	40	39,8	68,0	2,25
	45	45,1	76,6	2,88
	50	50,4	85,2	3,50

Tabulka 10 Měření cívky s jádrem analogovým wattmetrem

Zátěž	U_G [V]	U [V]	I [mA]	P_1 [W]
Paralelní kombinace kondenzátorů	30	29,9	231,8	1,00
	35	35,2	273,0	1,22
	40	39,9	305,8	1,25
	45	45,3	347,5	1,78
	50	49,6	380,5	2,12

Tabulka 11 Měření paralelní kombinace kondenzátorů analogovým wattmetrem

Zátěž	U_G [V]	P_1 [W]	P_{wi} [W]	P_l [W]	P_z [W]
Cívka bez jádra	30	2,13	0,0	0,02	2,08
	35	2,82	0,0	0,03	2,75
	40	3,50	0,0	0,04	3,42
	45	4,33	0,0	0,05	4,23
	50	5,30	0,1	0,06	5,18

Tabulka 12 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s analogovým wattmetrem při měření cívky bez jádra

Zátěž	U_G [V]	P^* [W]	P_{WI} [W]	P_I [W]	P_Z [W]
Cívka s jádrem	30	1,38	0,0	0,02	1,35
	35	1,88	0,0	0,02	1,84
	40	2,25	0,0	0,03	2,20
	45	2,88	0,0	0,03	2,81
	50	3,50	0,0	0,04	3,42

Tabulka 13 Výpočet výkonu spotřebovaného měřicím obvodem s analogovým wattmetrem při měření cívky s jádrem

Zátěž	U_G [V]	P^* [W]	P_{WI} [W]	P_I [W]	P_Z [W]
Paralelní kombinace kondenzátorů	30	1,00	0,3	0,31	0,40
	35	1,22	0,4	0,42	0,39
	40	1,25	0,5	0,53	0,21
	45	1,78	0,7	0,69	0,44
	50	2,12	0,8	0,83	0,51

Tabulka 14 Výpočet výkonu spotřebovaného měřicím obvodem s analogovým wattmetrem při měření cívky bez jádra

Zátěž	U [V]	Z [Ω]	I [mA]	P [W]	S [VA]	Q [Var]	$\cos \varphi$
Cívka bez jádra	29,8	421,4	70,7	2,05	2,11	0,49	0,973
	35,2	421,4	83,5	2,86	2,94	0,68	0,973
	39,8	421,4	94,4	3,66	3,76	0,87	0,973
	45,0	421,4	106,8	4,68	4,81	1,11	0,973
	50,4	421,4	119,6	5,86	6,03	1,39	0,973

Tabulka 15 Teoretický výpočet výkonů v obvodu s analogovým wattmetrem při měření cívky bez jádra

Zátěž	U [V]	Z [Ω]	I [mA]	P [W]	S [VA]	Q [Var]	$\cos \varphi$
Cívka s jádrem	29,8	474,5	62,8	1,62	1,87	0,94	0,864
	35,2	474,5	74,2	2,26	2,61	1,31	0,864
	39,8	474,5	83,9	2,89	3,34	1,68	0,864
	45,1	474,5	95,1	3,70	4,29	2,16	0,864
	50,4	474,5	106,2	4,63	5,35	2,69	0,864

Tabulka 16 Teoretický výpočet výkonů v obvodu s analogovým wattmetrem při měření cívky s jádrem

7.4 Porovnání a zhodnocení výsledků měření

Digitální naměřené	Digitální vypočtené	Analogový naměřené	Analogový vypočtené
P [W]			
1,22	1,62	1,35	1,62
1,69	2,26	1,84	2,26
2,14	2,89	2,20	2,89
2,74	3,70	2,81	3,70
3,41	4,64	3,42	4,63
Digitální naměřené		Digitální vypočtené	
Digitální naměřené		Analogový vypočtené	
S [VA]			
1,46	1,87	1,87	1,87
2,08	2,61	2,61	2,61
2,62	3,34	3,34	3,34
3,40	4,29	4,29	4,29
4,21	5,38	5,35	5,35
Q [VAr]			
0,82	0,94	1,87	1,87
1,18	1,31	2,61	2,61
1,50	1,68	3,34	3,34
1,95	2,16	4,29	4,29
2,41	2,70	5,35	5,35
cos ϕ			
0,830	0,864	1,87	1,87
0,825	0,864	2,61	2,61
0,820	0,864	3,34	3,34
0,819	0,864	4,29	4,29
0,820	0,864	5,35	5,35

Tabulka 17 Porovnání výsledků měření

Naměřené výsledky se těžko porovnávají s vypočtenými, protože výpočet je pouze teoretický. Tím pádem nemůžeme ani určit, který wattmetr měřil přesněji.

Digitální wattmetr byl při tvorbě programu kalibrován podle digitálních ampérmetrů a voltmetrů, takže jeho přesnost by měla být dost vysoká.

Také má oproti analogovému wattmetru několik výhod:

- Mnohem snadnější čtení hodnoty
- Automatický výpočet zdánlivého a jalového výkonu a účinníku
- Nízký odpor měřicího bočníku, díky čemuž tolik neovlivňuje měřený obvod

ZÁVĚR

Bakalářská práce splnila všechny body zadání a výstupem práce je přesný digitální wattmetr, který na displej zobrazuje hodnoty činného, zdánlivého a jalového výkonu, účinníku, ale i proudu a napětí. Maximální doporučený měřicí rozsah wattmetru je ± 1 A a ± 100 V. Wattmetr také obsahuje funkci pro kalibraci offsetu. Wattmetr je celkem snadně přenosný, ale potřebuje napájení přes USB.

Wattmetr byl vyzkoušen při laboratorním měření, kde fungoval podle očekávání. V tomto měření nebylo možné ověřit, zda wattmetr funguje zcela přesně. Byl porovnáván s analogovým wattmetrem na učebně a s výsledky teoretického výpočtu. V porovnání s těmito však nevznikly nějak zvlášť velké odchylky.

Napětí a proud zobrazovány wattmetrem byly také testovány pomocí přesného digitálního ampérmetru a voltmetru. V porovnání s těmito přesnými přístroji byli rozdíly pouze zanedbatelné. Pokud wattmetr měří proud a napětí s vysokou přesností a výpočetní vztahy pro výkon jsou správné, pak je i měření elektrického výkonu velmi přesné.

Při realizaci wattmetru se objevilo několik problémů, převážně v oblasti návrhu desky plošných spojů. První problém byl příliš malý A/D převodník, který by se špatně pájel na desku plošných spojů. Tohle se vyřešilo jeho připojením na rozšiřující destičku plošných spojů, která se poté připojila k hlavní desce. Dalším problémem byl zdroj záporného napětí, který bylo velmi náročné vhodně umístit do návrhu desky, kvůli křížení vodivých cest. Proto se tento zdroj realizoval na další malou desku, která se k hlavní desce připojila pomocí vodičů.

Wattmetr se může využít při laboratorních měřeních v předmětu elektrotechnika. Dále díky tomu, že funguje na bázi stejného mikropočítače, který se používá ve výuce embedded systémů s mikropočítači, by bylo možné wattmetr použít i zde, například pro semestrální projekty studentů.

Pro praktičtější využití wattmetru bude nejspíš ještě potřeba upravit oblast pro připojení měřeného obvodu, upravit propojení s tlačítky a celý wattmetr nainstalovat do krabičky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VOJÁČEK, Antonín. Integrované senzory proudu a problematika použití – 1.část. *Automatizace hw* [online]. 2009 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-senzory-proudu-a-problematika-použití-1část>
- [2] Dělič napětí. *ELUC* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/veřejně/lekce/436>
- [3] Napěťový transformátor. *Frwiki* [online]. [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://cs.frwiki.wiki/wiki/Transformateur_de_tension
- [4] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0059-8.
- [5] VRBA, Radimír, Jiří HÁZE, Lukáš FUJCIK a Ondřej SAJDL. *Teorie vzájemného převodu analogového a číslicového signálu*. Brno, 2011.
- [6] MACHALEC, Libor. Galvanické oddělení napájení a dat USB. *Vývoj hw* [online]. 2021 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/galvanicke-oddeleni-napajeni-a-dat-usb.html>
- [7] ČERNÝ, Michal. Co je co – galvanické oddělení. *Robodoupě* [online]. 2015 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://robodoupe.cz/2015/co-je-co-4/>
- [8] WOSTL, Marek. Co je to mikrokontrolér?. *Zonepi* [online]. 2019 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://blog.zonepi.cz/maker-uno-ve-vyuce-1-5-co-je-to-mikrokontroler/>
- [9] PINKER, Jiří. Mikroprocesory a mikropočítače. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 159 s. ISBN 80-7300-110-1.
- [10] MIKEŠ, Jan. Wattmetry na měření činného výkonu. *Elektrika* [online]. 2016 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/wattmetry-na-mereni-cinneho-vykonu>
- [11] Wattmetry - typy a aplikace, schéma zapojení, vlastnosti použití. *Electricianexp* [online]. [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://i.electricianexp.com/cs/main/school/1634-wattmetry-vidy-i-primenenie-osobnosti-ispolzovaniya.html>
- [12] NOVÁK, Martin, Marek ČAMBÁL a Jaroslav NOVÁK. *MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH PARAMETRŮ V OBVODECH S PWM ŘÍZENÝMI ZDROJI*

NAPĚTÍ. Ústav přístrojové a řídicí techniky ČVUT v Praze, odbor elektrotechniky Technická 4, 166 07 Praha 6.

- [13] KOLÁŘ, Václav a Václav VRÁNA. *ELEKTRICKÉ OBVODY STŘÍDAVÉHO PROUDU*. Katedra obecné elektrotechniky Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - TU Ostrava, 2006.
- [14] *FRDM-K20D50M User's Manual* [online]. Freescale Semiconductor [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1697772.pdf>
- [15] *TC913A/TC913B: Dual Auto-Zeroed Operational Amplifiers* [online]. Microchip Technology, 2012 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2131151.pdf>
- [16] *MCP33131/21/11-XX: 1 Msps/500 kSPS 16/14/12-Bit Single-Ended Input SAR ADC* [online]. Microchip Technology, 2018 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2711994.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DC/DC	Stejnoseměrné na stejnoseměrné
A/D	Analogově-digitální
CPU	Centrální procesová jednotka
SPI	Sériové periferní rozhraní
RAM	Paměť s náhodným přístupem
RGB	Červená, zelená, modrá
LED	Svítilná dioda
SDA	Sériová datová linka
USB	Univerzální sériová sběrnice
TOF	Časovač do vypnutí
TPM	Časový modul pulzně šířkové modulace
IRQ	Žádost přerušení
ADC	Analogově-digitální převodník

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Obvod s bočníkem [1]</i>	11
<i>Obrázek 2 Proudový transformátor [1]</i>	12
<i>Obrázek 3 Měření Hallovou sondou v otevřené smyčce [1]</i>	12
<i>Obrázek 4 Měření Hallovou sondou v uzavřené smyčce [1]</i>	13
<i>Obrázek 5 Dělič napětí [2]</i>	14
<i>Obrázek 6 Základní zapojení operačního zesilovače [4]</i>	15
<i>Obrázek 7 Neinvertující zesilovač [4]</i>	16
<i>Obrázek 8 Invertující zesilovač [4]</i>	16
<i>Obrázek 9 Součtový zesilovač se třemi vstupy [4]</i>	17
<i>Obrázek 10 Integrovní zesilovač [4]</i>	18
<i>Obrázek 11 Derivační zesilovač [4]</i>	18
<i>Obrázek 12 Ideální převodní charakteristika 3-bitového A/D převodníku [5]</i>	19
<i>Obrázek 13 Rozdělení typů A/D převodníků dle dosažitelné vzorkovací frekvence a rozlišení [5]</i>	21
<i>Obrázek 14 Jednoduchý optočlen [7]</i>	22
<i>Obrázek 15 Konstrukční provedení FRDM-K20D50M</i>	24
<i>Obrázek 16 Blokové schéma vývojové desky FRDM-K20D50M</i>	25
<i>Obrázek 17 Zapojení wattmetru, a) napěťová cívka před proudovou, b) napěťová cívka za proudovou [10]</i>	26
<i>Obrázek 18 Uspořádání operačních zesilovačů v pouzdře SOIC TC913BCOA [15]</i>	31
<i>Obrázek 19 Uspořádání vývodů AD/ Převodníku MCP33121-10-E/MS - MSOP-10 [16]</i>	31
<i>Obrázek 20 Návrh vstupní části obvodu v Circuit simulatoru</i>	34
<i>Obrázek 21 Návrh zapojení napěťových zdrojů v Eaglu</i>	38
<i>Obrázek 22 Návrh zapojení zdroje -2,48 V v Eaglu</i>	38
<i>Obrázek 23 Připojení napájení k pinům operačních zesilovačů</i>	39
<i>Obrázek 24 Připojení A/D převodníku v obvodu</i>	39
<i>Obrázek 25 Připojení optočlenů v obvodu</i>	40
<i>Obrázek 26 Připojení mikropočítače a pin headerů</i>	42
<i>Obrázek 28 Analogová část navržené desky plošných spojů</i>	43
<i>Obrázek 29 Digitální část navržené desky plošných spojů</i>	44
<i>Obrázek 30 Deska plošných spojů se zdrojem napětí -2,48 V</i>	45

<i>Obrázek 31 Osazená deska z horní strany</i>	46
<i>Obrázek 32 Osazená deska ze spodní strany</i>	47
<i>Obrázek 33 Konstrukční řešení celého zařízení</i>	48
<i>Obrázek 34 Soubory připojené k hlavnímu programu</i>	49
<i>Obrázek 35 Inicializace výstupu, který aktivuje čtení z A/D převodníku</i>	50
<i>Obrázek 36 Diagram přenosu dat z výstupu A/D převodníku [16]</i>	50
<i>Obrázek 37 Konstanty pro výpočet v programu</i>	51
<i>Obrázek 38 Část funkce Calculate pro výpočet všech veličin</i>	52
<i>Obrázek 39 Příprava nastavení nuly na displeji</i>	53
<i>Obrázek 40 Kalibrace na displeji</i>	53
<i>Obrázek 41 Činný výkon na displeji</i>	54
<i>Obrázek 42 Zdánlivý výkon na displeji</i>	54
<i>Obrázek 43 Jalový výkon na displeji</i>	54
<i>Obrázek 44 Účinník na displeji</i>	54
<i>Obrázek 45 Napětí na displeji</i>	55
<i>Obrázek 46 Proud na displeji</i>	55
<i>Obrázek 47 Měření činného výkonu jednofázového proudu</i>	56

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Měření cívky bez jádra digitálním wattmetrem</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 2 Měření cívky s jádrem digitálním wattmetrem</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 3 Měření paralelní kombinace kondenzátorů digitálním wattmetrem.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 4 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s digitálním wattmetrem při měření cívky bez jádra</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 5 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s digitálním wattmetrem při měření cívky s jádrem</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 6 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s digitálním wattmetrem při měření paralelní kombinace kondenzátorů</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 7 Teoretický výpočet výkonů v obvodu s digitálním wattmetrem při měření cívky bez jádra</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 8 Teoretický výpočet výkonů v obvodu s digitálním wattmetrem při měření cívky s jádrem</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 9 Měření cívky bez jádra analogovým wattmetrem</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 10 Měření cívky s jádrem analogovým wattmetrem</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 11 Měření paralelní kombinace kondenzátorů analogovým wattmetrem.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 12 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s analogovým wattmetrem při měření cívky bez jádra</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 13 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s analogovým wattmetrem při měření cívky s jádrem</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 14 Výpočet výkonu spotřebovaného měřícím obvodem s analogovým wattmetrem při měření cívky bez jádra</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 15 Teoretický výpočet výkonů v obvodu s analogovým wattmetrem při měření cívky bez jádra</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 16 Teoretický výpočet výkonů v obvodu s analogovým wattmetrem při měření cívky s jádrem</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 17 Porovnání výsledků měření.....</i>	<i>64</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Schéma wattmetru v Eagle

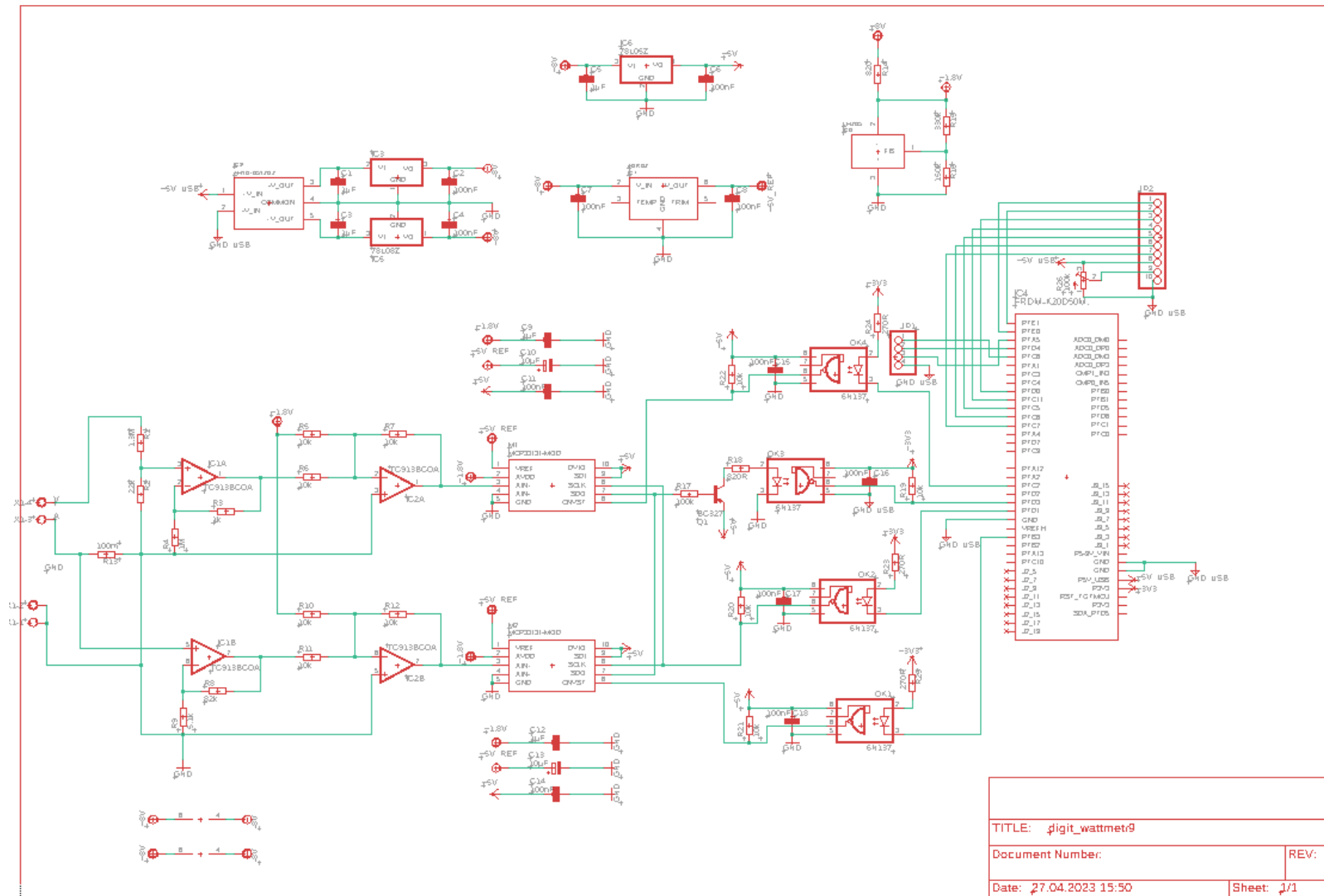
Příloha P II: Návrh desky plošných spojů wattmetru v Eagle

Příloha P III: Osazovací plán horní části desky

Příloha P IV: Osazovací plán dolní části desky

Příloha P V: Motiv desky plošných spojů

PŘÍLOHA P I: SCHÉMA WATTMETRU V EAGLE



TITLE: digit_wattmet9	
Document Number:	REV:
Date: 27.04.2023 15:50	Sheet: 1/1

PŘÍLOHA P IV: OSAZOVACÍ PLÁN DOLNÍ ČÁSTI DESKY



PŘÍLOHA P V: MOTIV DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

