



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

JEDNOFÁZOVÝ SÍŤOVÝ WATTMETR

SINGLE-PHASE WATTMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Kolouch

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Huták, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Petr Kolouch

ID: 173678

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Jednofázový síťový wattmetr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte obvodové řešení jednofázového wattmetru s mikroprocesorem včetně DPS.
2. Přístroj realizujte a naprogramujte měřící algoritmus.
3. Ověřte vlastnosti přístroje měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Vorel, P.; Patocka, M.: Skripta, Průmyslová elektronika. VUT v Brně, 2007.

[2] Patočka M.: Výkonová elektronika, 1. část - usměrňovače, střídavé měniče napětí, skriptum FEKT, Brno, 2010 (CS)

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Petr Huták, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá wattmetry. Úvod práce se věnuje přiblížení dané problematiky. Následně je vysvětlen princip snímání obvodových veličin, teorie vzorkování a základní teorie. Další kapitola pojednává o vývojových kitech Arduino. Praktická část se zabývá návrhem obvodového schématu a desky plošných spojů. Dále je popsán navržený software. Závěrečná část testuje parametry navrženého wattmetru.

Klíčová slova

Wattmetr, Arduino UNO, návrh bočníku, návrh napěťového děliče

Abstract

This diploma thesis deals with wattmeters. The introduction is devoted to approach the issue. Subsequently, the principle of sensing of circumferential quantities, sampling theory and basic theory is explained. The next chapter discusses Arduino development kits. The practical part deals with the design of the circuit diagram and the printed circuit board. Further described is designed software. The final part tests the parameters of the designed power meter.

Keywords

Wattmeter, Arduino UNO, design of the shunt, design of voltage divider

Bibliografická citace:

KOLOUCH, Petr. Jednofázový síťový wattmetr [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117537>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Petr Huták.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Jednofázový síťový wattmetr jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: **22. května 2019**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Hutákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **22. května 2019**

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	11
2	Wattmetr.....	12
2.1	Princip měření průchozích wattmetrů	13
2.2	Princip výpočtu hodnot	13
2.3	Vzorkování signálu (sampling) a jeho rekonstrukce	15
2.4	Snímání obvodových veličin.....	16
2.4.1	Čidla napětí	16
2.4.1.1	Dělič napětí	16
2.4.1.2	Měřicí transformátor napětí	17
2.4.2	Čidla proudu.....	17
2.4.2.1	Bočník	18
2.4.2.2	Měřicí transformátor proudu.....	18
2.4.2.3	Rogowského cívka	18
2.4.2.4	Hallův proudový senzor.....	18
2.5	Vizualizace dat – LCD.....	19
2.6	Ukládání dat	19
3	Arduino	20
3.1	Vývojové desky	20
3.2	Software Arduino IDE	20
3.3	Arudino UNO.....	22
4	Zapojení wattmetru	23
4.1	Offset pro vstupní napětí Arduina.....	23
4.2	Návrh děliče síťového napětí	24
4.3	Zapojení děliče pro hardwarový offset	26
4.4	Zapojení bočniců	27
4.4.1	Návrh obvodu pro citlivé měření proudu.....	27
4.4.1.1	Výpočet neinvertujícího zesilovače IC1	28
4.4.2	Návrh obvodu pro měření široké škály proudu.....	30
4.4.2.1	Výpočet neinvertujícího zesilovače IC2 pro B2	30

4.4.3	Operační zesilovače MAX44251	32
4.5	RC člunek.....	32
4.5.1	Optimalizace zapojení RC članků.....	33
4.6	Zapojení LCD displeje.....	34
4.6.1	Arduino LCD Shield	35
5	Návrh DPS	37
5.1	Verze na univerzálním pájivém poli	37
5.2	První verze DPS.....	38
5.2.1	Optimalizace provedené na DPS	39
5.3	Druhá verze DPS.....	40
6	Firmware	43
6.1	Teorie zpětného výpočtu obvodových veličin	43
6.2	Měření a korekce.....	44
6.2.1	Výpočet napětí v kódu	45
6.2.2	Výpočet proudu v kódu.....	45
6.2.3	Efektivní hodnoty napětí a proudu.....	46
6.2.4	Výkony a odebraná energie	46
6.3	Menu a zobrazení na LCD	48
6.4	Provedené optimalizace firmware.....	48
7	Testovací měření	50
7.1	Měření napětí	50
7.2	Měření proudu.....	52
7.3	Měření výkonu	53
8	Náklady	56
9	Závěr	57

Seznam obrázků

Obr. 2-1: Klešťový wattmetr CEM DT-3353 [2].....	12
Obr. 2-2: Schéma topologie wattmetru a jeho připojení.....	13
Obr. 2-3: Vhodně zvolená vzorkovací frekvence 100 Hz pro rekonstrukci křivky..	15
Obr. 2-4: Nevhodně zvolená vzorkovací frekvence 100 Hz pro rekonstrukci křivky 90 Hz a nesprávně zrekonstruovaná křivka o frekvenci 10 Hz	16
Obr. 2-5: Schématické zobrazení děliče napětí.....	17
Obr. 2-6: Schéma čidla proudu s Halloovou sondou [11]	18
Obr. 2-7: Měřič spotřeby elektrické energie DT-26 [12].....	19
Obr. 3-1: Prostředí softwaru Arduino IDE	21
Obr. 3-2: Popis jednotlivých pinů Arduina UNO [17]	22
Obr. 4-1: Zobrazení vstupního napětí bez offsetu a s offsetem	23
Obr. 4-2: Zapojení děliče napětí s offsetem na GND	26
Obr. 4-3: Zapojení neinvertujícího operačního zesilovače IC1	29
Obr. 4-4: Zapojení neinvertujícího operačního zesilovače IC2	31
Obr. 4-5: Zapojení bočníků s neinvertujícími OZ	32
Obr. 4-6: Zapojení LCD s potenciometrem	35
Obr. 4-7: Arduino LCD Shield	36
Obr. 5-1: Náhled zapojení na univerzálním pájivém poli.....	37
Obr. 5-2: Měření na vstupu operačního zesilovače IC1	38
Obr. 5-3: Navržená deska plošných spojů v první verzi.....	39
Obr. 5-4: Provedené hardwarové změny na první verzi DPS	40
Obr. 5-5: Navržená finální verze DPS pro wattmetr.....	41
Obr. 5-6: Schéma navrženého wattmetru s čidly a vyvedením na piny	42
Obr. 6-1: Zobrazení odebrané energie a čas měření na LCD	48
Obr. 7-1: Zapojení pro měření napětí a proudu	50
Obr. 7-2: Vynesená relativní chyba v závislosti na měřeném napětí.....	51
Obr. 7-3: Vynesená relativní chyba v závislosti na měřeném proudu	53
Obr. 7-4: Zapojení prvního kontrolního měření pro měření výkonu	54
Obr. 7-5: Zapojení druhého kontrolního měření pro měření výkonu	54
Obr. 7-6: Zapojení třetího kontrolního měření pro měření výkonu	54

Seznam tabulek

Tab. 3-1: Přehled vybraných desek Arduino [14].....	20
Tab. 4-1: Propojení pinů mezi LCD displejem 16x2 a Arduinem UNO	34
Tab. 6-1: Převod plnosti registru A2 na teoretickou hodnotu síťového napětí.....	43
Tab. 7-1: Naměřená a vypočtené hodnoty do maximálního síťového napětí	51
Tab. 7-2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro proudy od 0,7 A do 2,55 A.....	52
Tab. 7-3: Naměřené hodnoty s dopočítaným S_{ref} a P_{Fref}	54
Tab. 7-4: Vypočtené relativní chyby PF, zdánlivého a činného výkonu	55
Tab. 8-1: Přibližné náklady na výrobu wattmetru	56

1 ÚVOD

V dnešní době je kladen vyšší důraz na ekonomickou výhodnost a ekologii, zároveň stále narůstá odběr elektrické energie. Z toho důvodu je nutné stále zvyšovat výrobu elektrické energie. Snižování odběru elektrické energie, jak na straně výrobce, tak i na straně spotřebitele, nutnost navyšování výroby elektrické energie zpomaluje. Energetika má tendenci decentralizace a stále větší podíl na výrobě elektrické energie mají obnovitelné zdroje. Budoucností energetiky jsou chytrá zařízení – smart systémy.

Nejlevnější a zároveň nejjednodušší zařízení, které spotřebiteli umožní měřit a pozorovat spotřebu elektrické energie v domě je průchozí (zásuvkový) wattmetr. Pomocí tohoto zařízení může spotřebitel optimalizovat spotřebu v obytných prostorách.

Trh obsahuje spoustu levných wattmetrů, a tak je cílem této práce vytvořit jednoduchý a levný měřicí systém z dostupných součástek.

Teoretická část této práce pak nastiňuje problematiku wattmetrů, snímání obvodových veličin a výpočty prováděné mikrokontrolérem. Je provedena zevrubná rešerše platformy Arduino a popsán vybraný typ Arduino UNO.

Praktická část se zabývá návrhem vhodného obvodového zapojení vyvíjeného jednofázového wattmetru, dále jsou vybrány a dimenzovány součástky. Následuje tvorba desky plošných spojů. Poslední část práce se věnuje vytvořenému firmwaru a na závěr ověřuje parametry vytvořeného wattmetru.

2 WATTMETR

Wattmetr je přístroj používaný pro měření výkonu. Jak bylo uvedeno výše, tato diplomová práce se zabývá měřením koncového spotřebiče zejména v domácnostech. V současné době lze tyto wattmetry rozdělit na 2 hlavní větve – analogové a elektronické wattmetry.

Analogové wattmetry je možno dělit dle měřicí soustavy na elektrodynamické a ferodynamické [1]. Kritériem dělení elektronických wattmetrů může být skutečnost, zdali přeruší měřený elektrický obvod.

Klešťovým wattmetrem, viz obr. 2-1, lze začít měřit, aniž by bylo nutno měřený obvod rozpojit, jedná se tedy o měření neinvazivní. Hojně rozšířenými průchozími (invazivními) elektronickými wattmetry jsou wattmetry zásuvkové, které je nutno umístit přímo do obvodu. Je tedy nezbytné měřené zařízení odpojit, umístit wattmetr a znovu zařízení připojit. Tato práce se zaměřuje pouze na průchozí zásuvkové wattmetry.

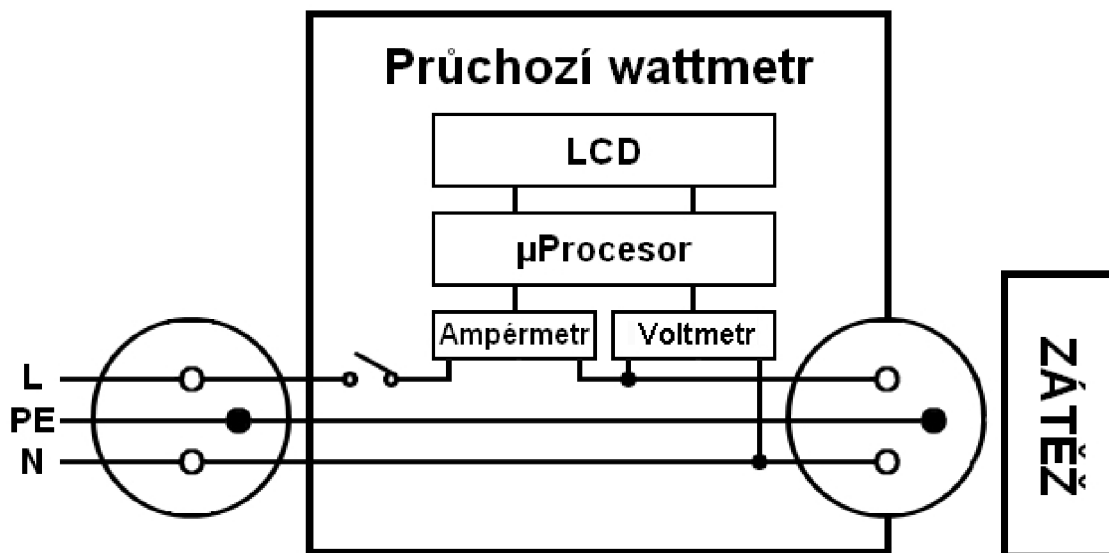


Obr. 2-1: Klešťový wattmetr CEM DT-3353 [2]

2.1 Princip měření průchozích wattmetrů

Veškeré digitální wattmetry mají stejnou topologii a podobné základní funkce. Úkolem wattmetru je měření základních veličin, zpracovat je a zobrazit na LCD displeji. Zjednodušené schéma topologie wattmetru je na obr. 2-2. Z této topologie je zřejmé, že wattmetr snímá čidly napětí (na obrázku voltmetr) a proud (na obrázku ampérmetr) a zpracovává je v mikroprocesoru. Výstupem je odebíraný výkon a spotřebovaná elektrická energie, avšak zároveň lze dopočítat výkon zdánlivý. Všechny vypočtené informace jsou následně zobrazovány na LCD displeji.

Prvky obsažené ve wattmetru spolu komunikují, komunikace většinou probíhá přes sériové periferní rozhraní (SPI) nebo přes I2C. Existuje celá řada sériových rozhraní a je na výrobcu, aby pro své potřeby a optimalizaci zařízení zvolil ideální řešení komunikace [3].



Obr. 2-2: Schéma topologie wattmetru a jeho připojení

2.2 Princip výpočtu hodnot

Aby mikrokontrolér (mikroprocesor), který je mozkiem celého smart meteru a zpracovává veškerá data, mohl určit výkon spotřebiče, jsou měřeny obvodové veličiny, tj. napětí a proud.

Z obvodových veličin mikrokontrolér vypočítává stanovené veličiny. Systém výpočtů a matematických operací mikroprocesoru se může lišit, princip je ale podobný.

Mikroprocesor snímá skrz čidla okamžité hodnoty napětí a proudu vzorkovací frekvencí f_s . Následuje výpočet okamžitého výkonu dle vztahu 2.1, ten je počítán z hodnot napětí a proudu se stejným časem odebrání vzorku. Počet vzorků na periodu je určen poměrem frekvence vzorkovací a frekvence měřené křivky, např. při frekvenci sítě 50 Hz a vzorkovací frekvenci 5 kHz je za periodu odebráno 100 vzorků, tj. každých 200 μ s je odebrán vzorek.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2.1)$$

Aby měla informace okamžitého výkonu váhu, je z něj určen průměrný výkon za určitý čas dle rovnice 2.2 [4]. Toto je výkon, který je zobrazen uživateli jako odebíraný výkon zařízení, kde n je počet cyklů měření a T znázorňuje jednu periodu sítě (0,02 s). Cykly měření je určena doba aktualizace průměrného výkonu uživateli.

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt \quad (2.2)$$

Aktualizuje-li se zobrazený výkon jednou za 5 s, vypočítá se počet cyklů ze vztahu 2.3 následovně:

$$n = \frac{t_{aktualizace}}{T_{sítě}} = \frac{5}{0,02} = 250 \quad (2.3)$$

Spotřebovaná elektrická energie se vypočte ze vztahu 2.4 integrací výkonu podle času [4].

$$E = \int P dt \text{ [Ws]} \quad (2.4)$$

Má-li být zobrazován i zdánlivý výkon, je nejprve nutno určit efektivní hodnoty napětí i proudu. Výpočet efektivní hodnoty napětí zobrazuje vzorec 2.5, zatímco efektivní hodnota proudu je zobrazena vzorcem 2.6 [5].

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{nT} \int_0^{nT} u^2(t) dt} \quad (2.5)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{nT} \int_0^{nT} ui^2(t) dt} \quad (2.6)$$

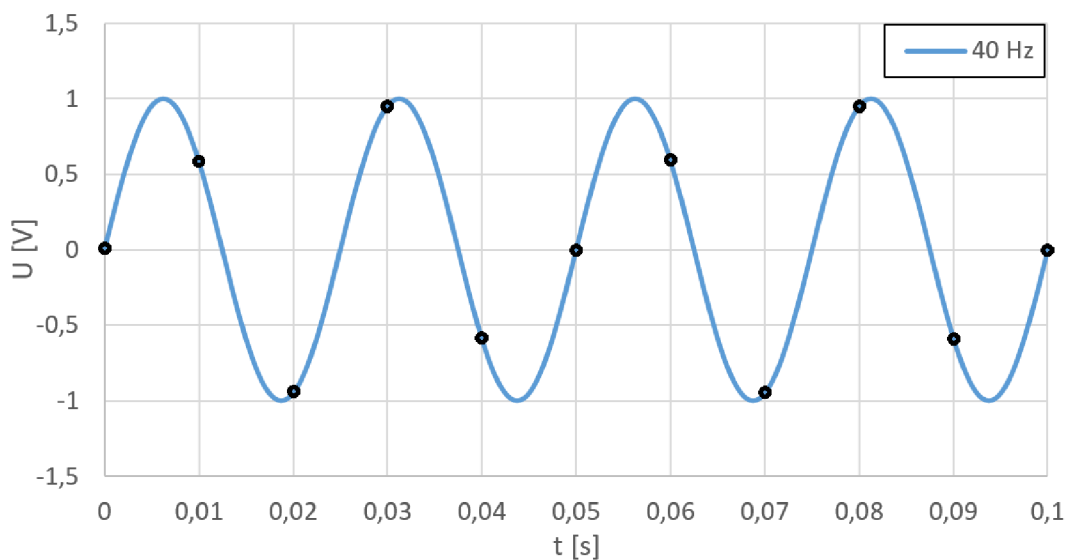
Zdánlivý výkon je následně vypočten ze součinu efektivních hodnot, viz vzorec 2.7. Tento výkon se aktualizuje vždy po určitém počtu cyklů.

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef} \quad (2.7)$$

2.3 Vzorkování signálu (sampling) a jeho rekonstrukce

Vzorkování zajišťuje A/D převodník, který převádí spojitý signál na diskrétní. Pro samotné vzorkování průběhu a jeho následnou rekonstrukci je potřeba vycházet ze vzorkovacího teorému daného vztahem 2.8. Pokud zařízení vzorkuje minimálně dvakrát rychleji než je nejvyšší kmitočet ve spektru vzorkovaného signálu, nedojde při vzorkování ke ztrátě informace a lze zpětně rekonstruovat spojitý (původní) signál [6]. Příklad správně určené vzorkovací frekvence je na obr. 2-3, kdy pro signál napětí o frekvenci 40 Hz byla zvolena vzorkovací frekvence 100 Hz, což splňuje vzorkovací teorém 2.8. Pro věrné zachycení průběhu a dosažení reálných výsledků by dle [7] měla být vzorkovací frekvence minimálně desetinásobkem frekvence vzorkovaného signálu, vyšší vzorkovací frekvence zkvalitňují rekonstruovanou křivku.

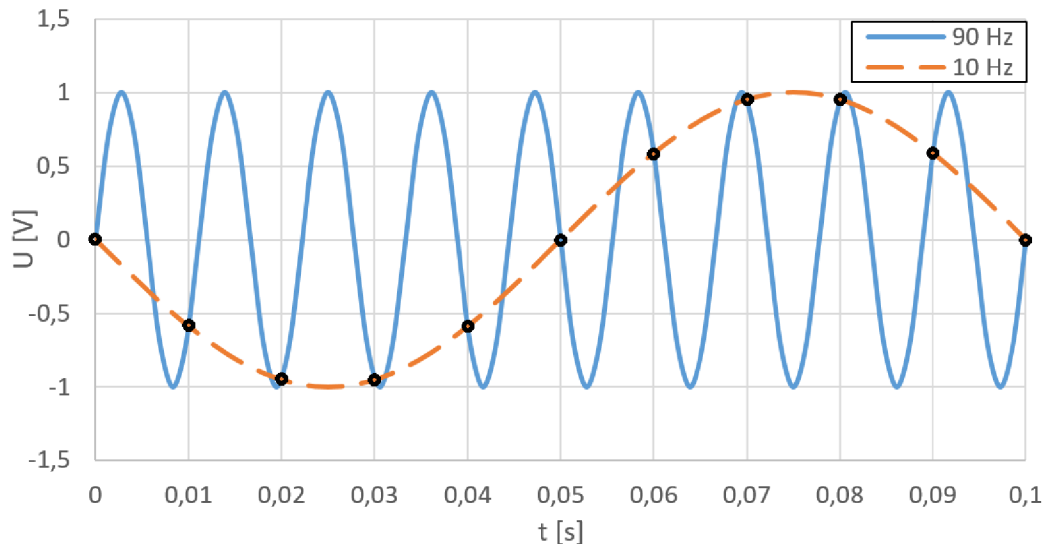
$$\omega_s \geq 2\omega_{max} \Leftrightarrow T_s \leq \frac{\pi}{\omega_{max}} \quad (2.8)$$



Obr. 2-3: Vhodně zvolená vzorkovací frekvence 100 Hz pro rekonstrukci křivky

Naopak, pokud nesplníme vzorkovací teorém, dojde k jevu známému jako aliasing efekt. Při tomto jevu nastává již výše zmíněná ztráta informace a dojde při součtu spekter k jejich vzájemnému překrytí [6].

Tato situace nastává na obr. 2-4, kdy byla pro signál o frekvenci 90 Hz zvolena nedostatečná vzorkovací frekvence 100 Hz. Při rekonstrukci dochází k aliasing efektu a výsledná křivka má frekvenci 10 Hz, což neodpovídá původní křivce.



Obr. 2-4: Nevhodně zvolená vzorkovací frekvence 100 Hz pro rekonstrukci křivky 90 Hz a nesprávně zrekonstruovaná křivka o frekvenci 10 Hz

2.4 Snímání obvodových veličin

Přes průchozí wattmetr je z elektrické sítě (230 V) napájena připojená zátěž. Pro určení odběru dané zátěže je potřeba měřit obvodové veličiny, to zajišťuje mikroprocesor, který obsahuje napěťové vstupy dimenzované na určité napětí, řádově jednotky voltů.

Na tyto vstupy se připojí senzory napětí a proudu, jež budou po správném dimenzování a hardwarových úpravách dodávat napětí o potřebné maximální velikosti. Snímání obvodových veličin lze uskutečnit několika způsoby.

2.4.1 Čidla napětí

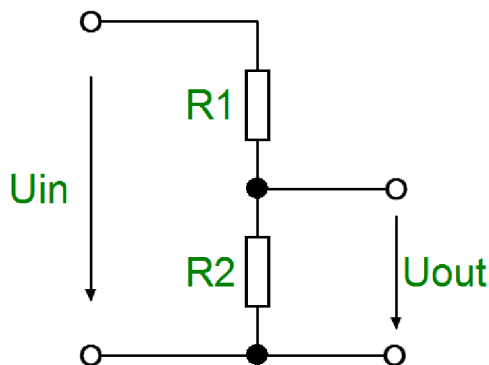
Mikroprocesor nedokáže měřit síťové napětí přímo, proto je nutné síťové napětí transformovat na měřitelnou hladinu.

2.4.1.1 Dělič napětí

Snížení hladiny síťového napětí na měřitelnou hladinu lze docílit děličem napětí zobrazeného na obr. 2-5. Výstupní napětí se určí dle vzorce 2.9.

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.9)$$

Výhodou děliče je malá velikost, jednoduchost a cena. Avšak neodděluje galvanicky síť od mikroprocesoru, což je hlavním nedostatkem této metody.



Obr. 2-5: Schématické zobrazení děliče napětí

2.4.1.2 Měřicí transformátor napětí

Mimo děliče lze použít měřicí transformátor napětí. Ten se připojí primárním vinutím paralelně k síti a na sekundárním napětí se následně objeví ponížené napětí dle vzorce 2.10, kde je U_1 je napětím na primárním vinutí, U_2 napětím na sekundárním vinutí a K je převodní konstanta. Ta je dána poměrem závitů primárního vinutí k závitům vinutí sekundárního, zároveň platí, že počet primárních závitů je větší než počet sekundárních závitů.

$$U_1 = K \cdot U_2 \quad (2.10)$$

Nevýhodou měřicího transformátoru napětí je sice jeho velikost, ta je ale do jisté míry kompenzována galvanickým oddělením.

2.4.2 Čidla proudu

Elektrický proud lze měřit dvěma způsoby. Prvním způsobem je měření přímé. Při této možnosti se měří přímo elektrický proud protékající v obvodu ampérmetrem. Druhou možností je nepřímé měření, kdy není snímán proud, ale jiná fyzikální veličina (napětí). Pro tuto práci je nutné použití druhého způsobu, tedy nepřímého měření elektrického proudu. Pro toto snímání proudu lze využít několikero čidel.

2.4.2.1 Bočník

Bočník je nízkoodporový rezistor přesné hodnoty, který je připojen do série k zátěži. Při připojení zátěže na něm vzniká úbytek napětí, jenž je úměrný procházejícímu proudu. Jednoduchým přepočtem podle Ohmova zákona lze zpětně určit procházející proud [8].

2.4.2.2 Měřicí transformátor proudu

Měřicí transformátory proudu jsou toroidní transformátory, skrz jejich střed se provléká fázový vodič. Na sekundární stranu je připojen snímací odpor, na kterém se měří úbytek napětí vyvolaný transformovaným proudem [9].

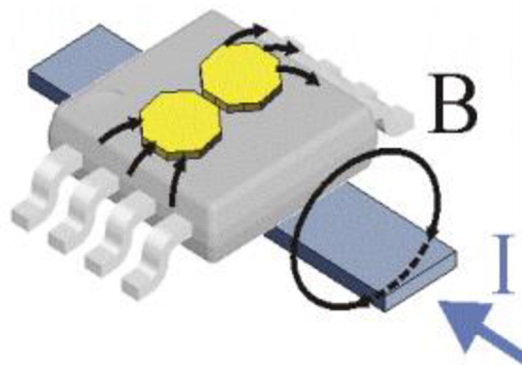
2.4.2.3 Rogowského cívka

Dříve hojně využívané měřicí transformátory proudu jsou čím dál častěji nahrazovány přesnými Rogowského cívkami [10]. Z Rogowského cívky je výstupem napětí, jedná se o toroidní vzduchovou cívku umístěnou okolo měřeného vodiče [4], [10].

2.4.2.4 Hallův proudový senzor

Elektrický proud procházející vodičem zapříčiní vznik magnetického pole – to je snímáno senzorem s Hallovou sondou. Snímač samotný je tvořen úzkou polovodičovou destičkou. Šířka destičky je nepřímo úměrná citlivosti snímače, tzn. čím je destička užší, tím je snímač citlivější.

Po vložení snímače do magnetického pole jsou procházejícím indukčním tokem přeskupovány náboje v polovodiči na jednu stranu, tím se generuje Hallovo napětí. Na tomto principu např. pracuje proudový snímač FHS 40-P/SP600 od firmy LEM [3]. Náhled senzoru s Hallovou sondou je na obr. 2-6.



Obr. 2-6: Schéma čidla proudu s Hallovou sondou [11]

2.5 Vizualizace dat – LCD

Průchozí wattmetry zobrazují naměřené hodnoty na LCD displeji. Možnou nadstavbou je zobrazení dat v aplikaci, na kterou se uživatel připojí pomocí Wi-Fi nebo bluetooth. Nicméně, tyto přidané ability a aplikace většinou obsahují další pokročilé funkce, jako jsou grafy, možnost vypínání zásuvky na dálku, časovače atp. Takové zásuvky jsou klasifikovány jako smart metery.



Obr. 2-7: Měřič spotřeby elektrické energie DT-26 [12]

2.6 Ukládání dat

Průchozí wattmetry nedisponují velkou pamětí, tu ostatně ani nepotřebují. Měření začíná připojením do obvodu, případně restartem pomocí hardwarového tlačítka. Jelikož průchozí wattmetry nedisponují grafickým znázorněním odběru, mohou přepisovat zobrazovaná data v mezipaměti, a není tedy potřeba úložiště. Jednoduchým úkonem jde nastavit cenu za kWh, snadno se tak k uživatelům dostává srozumitelná informace spotřebovaných finančních nákladů za odebranou elektrickou energii.

3 ARDUINO

Arduino je open-source hardwarová a softwarová společnost Atmel, která vyvíjí jednodeskové mikrokontroléry a mikrokontrolérové kity. Mikrokontrolérové kity jsou využívány k vývoji digitálních zařízení a interaktivních projektů. Jelikož je projekt open-source, existuje obrovské množství knihoven, aplikací a k nim vytvořených programů [13].

Vývojové kity jsou osazeny indikačními diodami, USB portem (micro/mini), A/D převodníky, digitálními i analogovými vstupy či výstupy. Obsahují spoustu ochranných prvků, a proto jsou tyto kity ideální pro vývoj hardwaru. Hojně jsou využívány začátečníky atp.

3.1 Vývojové desky

Společnost Atmel momentálně nabízí 22 druhů vývojových desek, celkový přehled používaných, ale i historických desek, je možné zhlédnout na [14]. Tab. 3-1 zobrazuje některé z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších desek.

Tab. 3-1: Přehled vybraných desek Arduino [14]

Název	Procesor	Frek. CPU	Analog. piny	Dig. piny IO/PWM	EEPROM	SRAM	Flash	USB	UART
		[MHz]	In/Out		[kB]	[kB]	[kB]		
Nano	ATmega168	16	8/0	14/6	0.512	1	16	Mini	1
	ATmega328P				1	2	32		
Uno	ATmega328P	16	6/0	14/6	1	2	32	Klasik	1
Zero	ATSAMD21G18	48	6/1	14/10	-	32	256	2 Mikro	2
Pro Mini	ATmega328P	8	6/0	14/6	1	2	32	-	1
		16							
Micro	ATmega32U4	16	12/0	20/7	1	2,5	32	Mikro	1
Mega 2560	ATmega2560	16	16/0	54/15	4	8	256	Klasik	4

3.2 Software Arduino IDE

Pro programování je vyvíjen zdarma dostupný program Arduino Software, označovaný také jako Arduino IDE (Integrated Development Environment).

Program umožňuje jednoduché nahrání kódu před USB. Editor kódu lze spustit na Windows, Mac OS X i Linuxu, prostředí je naprogramováno pomocí jazyku Java [13].

Jazyk, kterým se Arduino programuje, vychází z open-source frameworku Wiring, které je založeno na základním jazyce C++. Nevýhodou je složité programování společně s výskytem možných chyb a nepředvídatelných bugů [15].

Samotné prostředí je jednoduché a uživatelsky přívětivé, viz obr. 3-1. Důležitým prvkem je sériový monitor, který umožňuje výpis výstupních dat na pinech sériové linky RX a TX.

Zdrojový kód programu obsahuje hlavní 2 bloky – setup a loop. Setup se inicializuje pouze při začátku měření, nastaví jednotlivé piny a definuje všechny proměnné v kódu. Loop, smyčka, se opakuje cyklicky po proběhnutí inicializace až do konce měření, případně pádu systému. Pomocí smyčky loop lze cyklicky vyčítat data na sériovou linku, případně na připojený LCD displej [15].



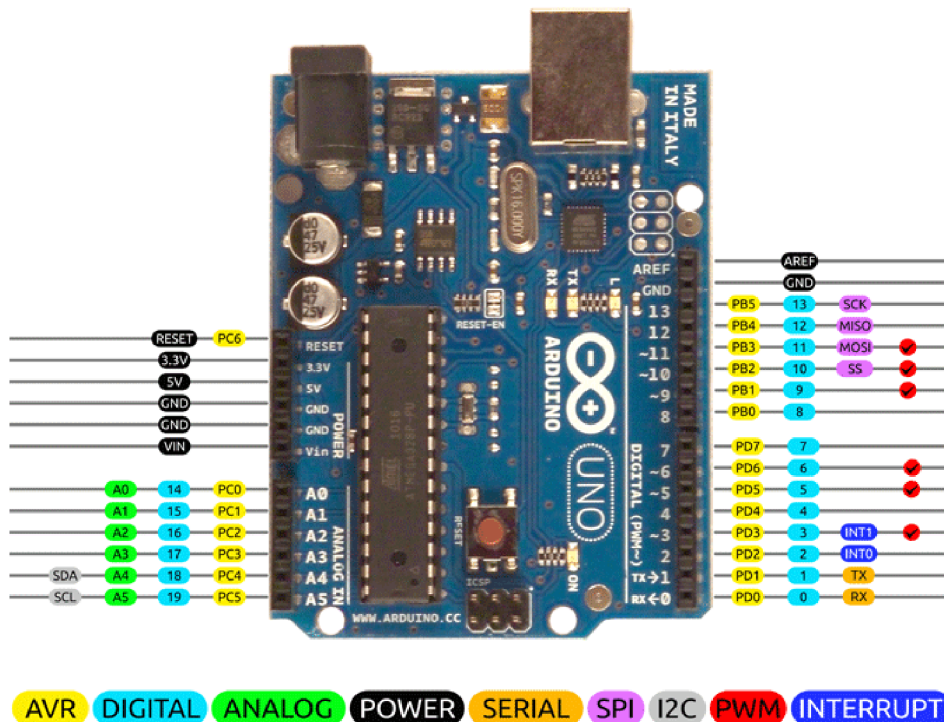
Obr. 3-1: Prostředí softwaru Arduino IDE

3.3 Arudino UNO

Pro potřeby této práce byla vybrána patrně uživatelsky nejrozšířenější vývojová deska Arduino UNO. Mozkem této desky je 8bitový mikrokontrolér ATmega328P o flash paměti 32 kB, paměti SRAM 2 kB a paměti EEPROM 1 kB.

Arduino UNO obsahuje 14 digitálních pinů (viz obr. 3-2), všechny mohou být použity jako vstup či výstup užitím funkcí `pinMode()`, `digitalWrite()` a `digitalRead()`. Maximální dovolený proud těmito svorkami je 20 mA, pokud proud dosáhne dvojnásobku tohoto proudu, může dojít k poškození vývojového kitu. Dále obsahuje 6 analogových vstupů o šířce 10 bitů, ty disponují měřicím rozsahem 5 V. Toto napětí lze upravit užitím funkce `analogReference()` na pin AREF.

Přesný krystal generuje pro celý obvod hodinový signál 16 MHz. Arduino UNO disponuje USB konektorem pro komunikaci s PC, piny umožňující pulzně šířkovou modulaci, napájecí konektor, resetovací tlačítko atp. Podrobnější informace lze nalézt v tab. 3-1 nebo technické dokumentaci [16].



Obr. 3-2: Popis jednotlivých pinů Arduina UNO [17]

4 ZAPOJENÍ WATTMETRU

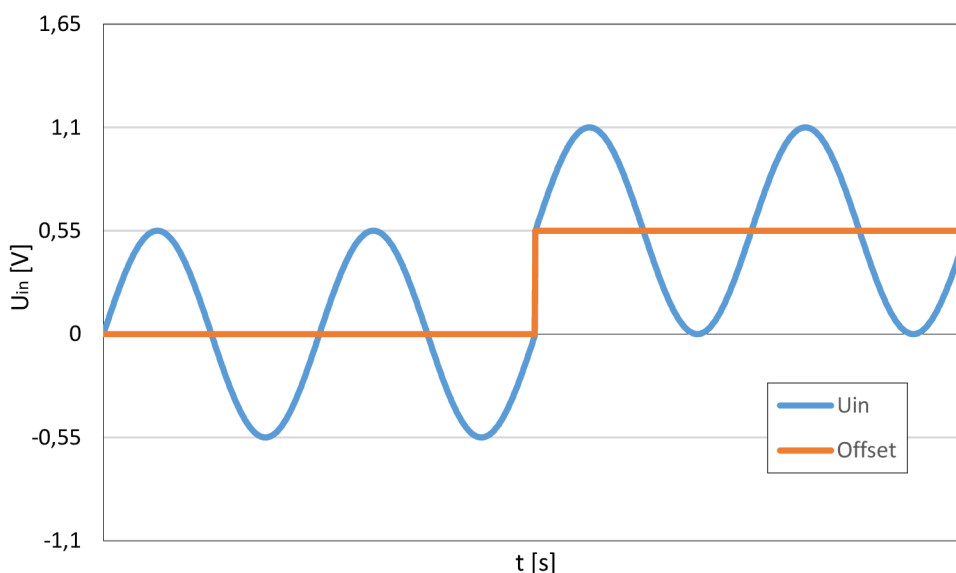
Pro návrh vlastního wattmetru byl zvolen bočník jako čidlo proudu a napěťový dělič jako čidlo napětí, a to z důvodu nízké ceny, menší velikosti (než např. transformátor) a jednoduchosti zapojení. K zobrazení naměřených a vypočtených hodnot disponuje vytvořený wattmetr LCD shieldem.

Z důvodu přesnějšího měření bylo funkcí *analogReference()* nastaveno vnitřní napětí na INTERNAL, tzn. přesnou hodnotu 1,1 V. Funkce *analogReference(INTERNAL)* zároveň nastavuje měřicí rozsah vstupních analogových pinů rovněž na 1,1 V [16].

Každá kapitola v této sekci popisuje finální stav navrženého wattmetru a pro přehlednost obsahuje podkapitolu, která popisuje provedené optimalizace a vyřešené problémy, kterými bylo dosaženo nynějšího stavu oproti původní verzi.

4.1 Offset pro vstupní napětí Arduina

Aby mohla být korektně snímána snížená napětí s informací o velikosti proudu i napětí, je nutné zavést hardwarový offset. Jak se vysvětluje v kapitole 4, Arduino UNO je nastaveno na napětí INTERNAL, a tak má nastaven měřicí rozsah od 0 V do 1,1 V. Jak dělič napětí, tak i oba výstupy bočniců jsou nastaveny na $U_{pp} = 1,1$ V (pp – anglicky peak to peak, český překlad jest špička-špička).



Obr. 4-1: Zobrazení vstupního napětí bez offsetu a s offsetem

Obr. 4-1 vykresluje v první polovině zobrazeného časového intervalu průběh vstupního napětí s nulovým offsetem. Arduino nedokáže měřit záporné napětí, pokud by tedy do obvodu byla vložena ochranná dioda, pro zabránění destrukce vývojového kitu, Arduino by při maximálním U_{in} , reálného síťového napětí 230 V, zobrazovalo pouze jeho polovinu, jelikož by byla na svorkách Arduina snímána pouze maximální výchylka 0,55 V. Zapojí-li se do obvodu offset 0,55 V, docílí se kýženého výsledku posunutím měřeného průběhu do měřitelného napěťového pásma Arduina. Maximální měřené napětí se dostane na správnou hodnotu 1,1 V, viz druhá polovina časového intervalu na obr. 4-1. Offset samotný se musí co nejvíce blížit hodnotě 0,55 V, není-li hodnota napětí offsetu přesná, dochází k ořezu kladné nebo záporné půlvlny, tím dochází k ztrátě informace a k znehodnocení měření. Aby nedošlo ke ztrátě validity snímaných dat, je nutné uvažovat rezervu pro měření, to má za následek nižší přesnost informací o snímaném obvodu.

Samotnému výpočtu, označení a umístění v obvodu a se věnuje kapitola 4.3.

4.2 Návrh děliče síťového napětí

Navržený dělič síťového napětí zobrazuje obr. 4-2 (odpory R_9 s $R_{10.1}$, $R_{10.2}$ a $R_{10.3}$) spolu s děličem napětí určeného pro nastavení offsetu vázaného na svorku GND (odpory R_{12} a R_{13}). K odporům R_9 a R_{13} jsou zároveň vázány kondenzátory C_5 a C_6 , které společně tvoří avizované RC články. Svorku A2 snímá ponížené síťové napětí, zatímco na svorku A5 je vyvedeno offsetové napětí.

Výpočet děliče vychází z rovnice 2.9, a protože je známo vstupní (síťové) i výstupní napětí (INTERNAL 1,1 V), lze úpravou této rovnice získat vztah 4.1, který vyjadřuje potřebný dělicí poměr. Při výpočtu je nutné uvažovat s nutnou rezervou při možné výchylce napětí sítě určenou normou, ta činí až $\pm 10\%$ (207 V – 253 V). Hodnota $\pm 0,55$ V představuje polovinu vnitřního napětí Arduina a společně s hardwarovým offsetem tvoří onu výchylku 1,1 V.

$$\frac{R_9}{R_{10} + R_9} \leq \frac{U_{out}}{\sqrt{2} \cdot U_{in}} \leq \frac{\pm 0,55}{\sqrt{2} \cdot 253} \leq 1,5372 \cdot 10^{-3} \quad (4.1)$$

Opětovnou modifikací rovnice 2.9 je možno získat přibližnou hodnotu teoretického odporu R_{10} , a to za předpokladu voleného malého odporu R_9 stejné hodnoty jako u RC článku, viz rovnice 4.2.

$$R_{10} = \frac{U_{in} \cdot R_9}{U_{out}} - R_9 = \frac{\sqrt{2} \cdot 253 \cdot 10000}{0,55} - 10000 = 6,4054 \text{ M}\Omega \quad (4.2)$$

Hodnota odporu R_{10} počítá s největším možným vstupním napětím, nicméně je nutné počítat i s odchylkami samotných součástek, z toho důvodu je zvolena hodnota 6,82 M Ω . Následně lze určit reálný dělicí poměr nově vytvořeného děliče napětí, viz 4.3.

$$\frac{R_9}{R_{10} + R_9} = \frac{10 \cdot 10^3}{6,82 \cdot 10^6 + 10 \cdot 10^3} = 1,46413 \cdot 10^{-3} \quad (4.3)$$

Reálný dělicí poměr splňuje podmínku z rovnice 4.3 s rezervou 4,754 %. Což je k relativně nízké přesnosti Arduina ideální. Maximální napětí na vstupu A2 a GND lze určit dosazením do rovnice 4.4.

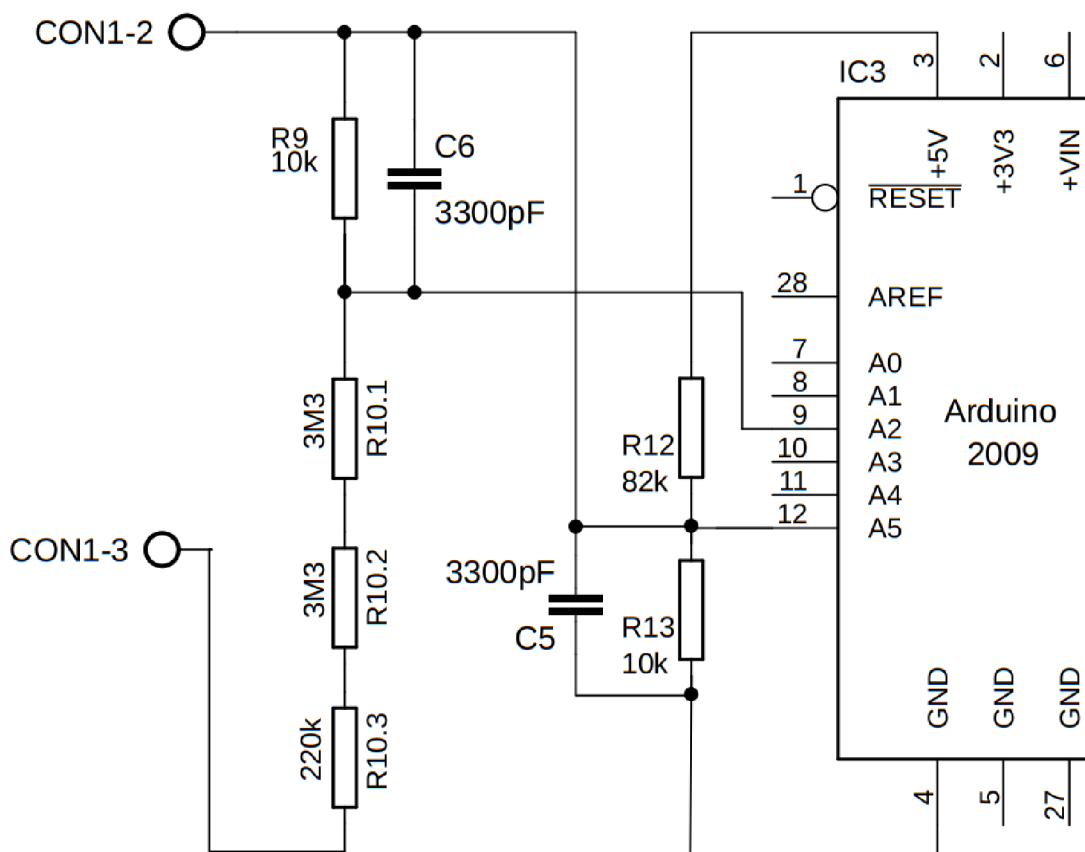
$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_9}{R_{10} + R_9} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230 \cdot 10 \cdot 10^3}{6,82 \cdot 10^6 + 10 \cdot 10^3} = 0,4762 \text{ V} \quad (4.4)$$

Dosazením maximálního možného napětí sítě do rovnice 4.4 získáme rovnici 4.5, jejímž výsledkem je maximální možné napětí mezi svorkami A2 a GND, avšak stále bez offsetu.

$$U_{outMAX} = \frac{U_{inMAX} \cdot R_9}{R_{10} + R_9} = \frac{\sqrt{2} \cdot 253 \cdot 10 \cdot 10^3}{6,82 \cdot 10^6 + 10 \cdot 10^3} = 0,5239 \text{ V} \quad (4.5)$$

Jak vyplývá z rovnice 4.5, maximální hodnota nepřekročila napětí 0,55 V, není tedy ztracena informace o velikosti napětí a vytvořený dělič napětí vyhovuje potřebám této práce. Reálným výstupem bude U_{outMAX_sOFF} , který představuje napětí zesílené s přičteným offsetem, viz vztah 4.6.

$$U_{outMAX_sOFF} = U_{outMAX} + 0,55 = 0,5239 + 0,55 = 1,0739 \text{ V} \quad (4.6)$$



Obr. 4-2: Zapojení děliče napětí se snímaným offsetem

4.3 Zapojení děliče pro hardwarový offset

Postup při výpočtu děliče napětí pro offset je identický s výpočty z kapitoly 4.2. Dělič napájí Arduino ze svorek +5 V a GND, je dimenzován na požadované výstupní napětí 0,55 V, polovinu maximálního nastaveného měřitelného napětí Arduina.

Na rozdíl od vztahu 4.1 nezáleží na podmínce minimální velikosti dělicího poměru. V tomto případě vzorec 4.7 stanovuje ideální dělicí poměr, kterému se musí reálný dělič co nejvíce přiblížit (viz kapitola 4.1).

$$\frac{R_{13}}{R_{12} + R_{13}} = \frac{U_{outOFF}}{\sqrt{2} \cdot U_{inOFF}} = \frac{0,55}{5} = 0,11 \quad (4.7)$$

Pro velikost odporu R_{13} (viz schéma na obr. 4-2 nebo obr. 4-5) se znovu nabízí možnost volit hodnotu 10 k Ω udávanou RC článkem, nicméně napěťový dělič vytvořený z rezistorů takového řádu by byl příliš měkký, následkem čehož by docházelo k příliš velkému kolísání napěťové hladiny tvořené tímto děličem.

Proto je zvolena hodnota 100 Ω . Opětovná modifikace vzorce 2.9 umožní výpočet R_{12} . Výpočet zobrazuje vztah 4.8.

$$R_{12} = \frac{U_{inOFF} \cdot R_{13}}{U_{outOFF}} - R_{13} = \frac{5 \cdot 100}{0,55} - 100 = 809,09 \Omega \quad (4.8)$$

Z typických hodnot rezistorů se pro odpor R_{12} vybere hodnota 820 Ω . Dosazením do základní rovnice 4.9 určíme výstupní napětí.

$$U_{outOFF} = U_{inOFF} \cdot \frac{R_{13}}{R_{12} + R_{13}} = \frac{5 \cdot 100}{820 + 100} = 0,5435 V \quad (4.9)$$

Na reálném prototypu desky offsetové napětí generované takovýmto děličem dosahovalo výstupního napětí 0,559 V, což lze pro stále nízkou odchylku akceptovat.

4.4 Zapojení bočníků

Jelikož analogové vstupy Arduina disponují pouze výše zmíněnou 10 bitovou šířkou, je nutné této skutečnosti uzpůsobit zapojení. Pokud by byl použit pouze jeden bočník, pracovalo by měření s velmi hrubým rozlišením 19,5 mA. Použití vhodné kombinace dvou bočníků R_1 a R_2 (viz schéma zapojení obr. 4-5) umožní přesnější měření při malých odebíraných proudech (zvoleno do 1 A) a hrubší rozlišení pro měřené proudy do 20 A v domovních rozvodech. Pro takto zvolené zapojení jsou ideální bočníky s parametry $R_1 = 0,25 \Omega$ a $R_2 = 0,005 \Omega$, jejich kombinací lze vytvořit funkční schéma wattmetru. Výpočtu jednotlivých bočníků se pak podrobně věnují podkapitoly 4.4.1 a 4.4.2.

Pro měření malých proudů jsou využívány oba odpory R_1 a R_2 . Jejich kombinace je v textu označena jako bočník B1. Úbytek na nich vzniklý zesiluje operační zesilovač IC1. Jeho výstup je vyveden na analogovu svorku A3.

Pro měření velkých proudů je využíván odpor R_2 , který je v textu označován jako bočník B2. Úbytek na tomto bočníku zesiluje operační zesilovač IC2 a je vyveden na analogovou svorku A1.

4.4.1 Návrh obvodu pro citlivé měření proudu

Jak bylo výše zmíněno, měření malých proudů zahrnuje oba bočníky R_1 a R_2 , Schottkyho diody (15SQ045) D_3 a D_4 , RC filtr $R_3 + C_1$ a zapojení neinvertujícího zesilovače IC1 tvořeného operačním zesilovačem MAX44251 a odpory R_4 a R_5 .

Schottkyho diody 15SQ045 disponují prahovým napětím 0,25 V [18]. Při překročení úbytku napětí 0,25 V na R_I dojde k přemostění tohoto prvního bočnicku a proud je veden přes tyto antiparalelně zapojené (z důvodu střídavého napětí) Schottkyho diody. Na R_I tedy nevznikají další výkonové ztráty, které by při absenci těchto diod dosahovaly až 100 W, což by vedlo k destrukci zařízení.

Hodnotu bočnicku R_I určuje vztah 4.10. Kde je U_{R1max} maximálním napětím na bočnicku R_I , daným propustným napětím Schottkyho diod a I_{B1max} je maximální proud, při kterém bude bočnickem B1 měřen. Tento proud byl nastaven na 1 A, tzn. rozlišení měření je cca 1 mA.

$$R_1 = \frac{U_{R1max}}{I_{B1max}} = \frac{0,25}{1} = 0,25 \Omega \quad (4.10)$$

Napětí měřené na svorce A3-GND zahrnuje druhý bočník R_2 o hodnotě 0,005 Ω . Vztah 4.11 jej tedy při výpočtu úbytku napětí bere v potaz, a jelikož je v sérii, je přičten k bočnicku R_I , těmito dvěma bočnický je tvořen bočník pro snímání malých proudů B1.

$$U_{B1max} = (R_1 + R_2) \cdot I_{RA1max} = (0,25 + 0,005) \cdot 1 = 0,255 V \quad (4.11)$$

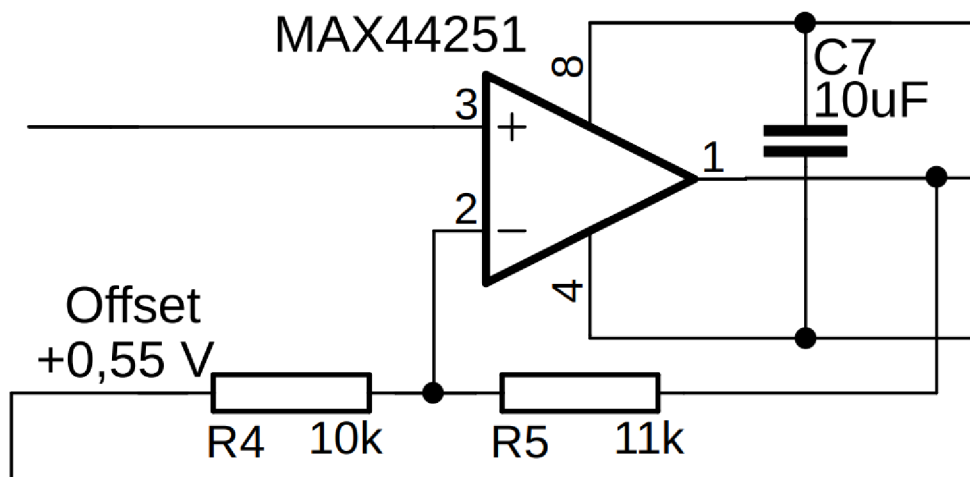
4.4.1.1 Výpočet neinvertujícího zesilovače IC1

Aby bylo možné měřit proud pomocí Arduina v maximálním možném rozsahu, je nezbytné přivést na svorky A3-GND maximální možné měřitelné napětí 1,1 V. Je tedy nutné určit zesílení napětíového signálu neinvertujícího zesilovače (IC1).

$$U_{Out_IC1max} = (U_{B1max} \cdot Ku_{B1}) + 0,55 \quad (4.12)$$

Úpravou předchozího vztahu 4.12 vzniká vzorec 4.13 pro výpočet hledaného zesílení. Operační zesilovač IC1 má invertující vstup připojen na napětí 0,55 V tvořeného hardwarovým offsetem. Maximální výstupní napětí z operačního zesilovače IC1 (U_{Out_IC1max}) se skládá z U_{B1max} , zesilovaného signálu a právě konstantní reference 0,55 V tvořené hardwarovým offsetem. Z toho důvodu je ve vztahu 4.13 offset vyjmut.

$$Ku_{B1} = \frac{U_{Out_IC1max} - 0,55}{U_{B1max}} = \frac{0,55}{0,255} = 2,1569 \quad (4.13)$$



Obr. 4-3: Zapojení neinvertujícího operačního zesilovače IC1

Obecný tvar rovnice neinvertujícího operačního zesilovače pro zapojení z obr. 4-3 zobrazuje vzorec 4.14.

$$U_{Out_IC1max} = (U_{B1max}) \cdot \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \quad (4.14)$$

Úpravou vzorce 4.14 vznikne vztah (4.15) pro výpočet R_5 . Dosazení následně zobrazuje vztah 4.16, kde je za R_4 znovu dosazen odpor 10 k Ω .

$$R_5 = R_4 \cdot \left(\frac{U_{Out_IC1max} - 0,55}{U_{B1max}} - 1\right) \quad (4.15)$$

$$R_5 = 10000 \cdot \left(\frac{0,55}{0,255} - 1\right) = 11568,63 \Omega \quad (4.16)$$

Z řady typických hodnot volíme 11 k Ω . Správnost volby rezistoru R_5 se ověří dosazením do vztahu 4.14, kdy musí být výsledné reálné výstupní napětí z IC1 menší nebo rovno 0,55 V (viz výpočet 4.17).

$$U_{Out_IC1max_Real} = 0,255 \cdot \left(1 + \frac{11000}{10000}\right) = 0,5355 V \quad (4.17)$$

Reálné napěťové zesílení je pak vypočteno vztahem 4.18.

$$K_{U_{B1r}} = \frac{U_{Out_IC1max_Real}}{U_{B1max}} = \frac{0,5355}{0,255} = 2,1 \quad (4.18)$$

4.4.2 Návrh obvodu pro měření široké škály proudu

Bočník B2 je určen ke snímání plného proudového rozsahu a je připojen na analogový vstup A1. Ve schématu na obr. 4-5 jej představuje odpor R_2 , k němu je vázán RC článek $R_6 + C_2$ a zapojení neinvertujícího operačního zesilovače IC2, jehož zesílení udávají odpory R_7 a R_8 .

Hodnota bočníku B2 byla zvolena již v kapitole 4.4. Velikost bočníku udává zejména požadavek na maximální ztrátový výkon, a to konkrétně 2 W. Úbytek napětí stanovuje vztah 4.19, kdy bočník B2 o velikosti $0,005 \Omega$ splňuje podmínku maximálního možného úbytku napětí s 50% rezervou, prochází-li jím maximální odebíraný proud.

$$\Delta U_{B2} = R_{B2} \cdot I_{B2max} = 0,005 \cdot 20 = 0,1 V \quad (4.19)$$

4.4.2.1 Výpočet neinvertujícího zesilovače IC2 pro B2

Invertující vstup je u IC2 připojen obdobně jako u operačního zesilovače IC1 k hardwarovému offsetu 0,55 V. To se opět promítne do rovnice maximálního výstupního napětí z IC2 odpočtem offsetového napětí (rovnice 4.20).

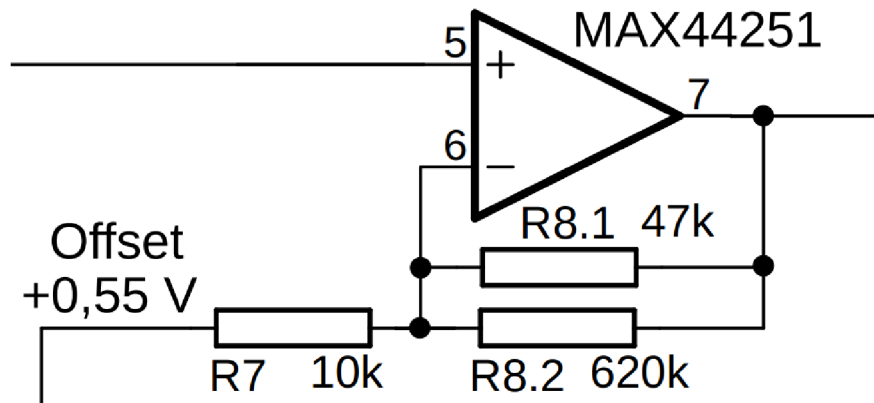
$$U_{Out_IC2max} = (U_{B2max} \cdot Ku_{B2}) + 0,55 V \quad (4.20)$$

Nabízí se výpočet napěťového zesílení dle vztahu 4.21, což je úprava předchozí rovnice.

$$Ku_{B2} = \frac{U_{Out_IC2max} - 0,55}{U_{B2max}} = \frac{0,55}{0,1} = 5,5 \quad (4.21)$$

Vhodnější variantou je vypočítat výstupní napětí obou operačních zesilovačů tak, aby dosahovaly stejné hodnoty, výsledkem čehož lze ve firmwaru dosáhnout rychlejšího výpočtu, jak zobrazuje vztah 4.22.

$$Ku_{B2} = \frac{U_{Out_IC1max_Real}}{U_{B2max}} = \frac{0,5355}{0,1} = 5,355 \quad (4.22)$$



Obr. 4-4: Zapojení neinvertujícího operačního zesilovače IC2

Obecný tvar rovnice neinvertujícího operačního zesilovače pro zapojení bočnicku B2 vychází z obr. 4-4, znázorňuje jej vzorec 4.23.

$$U_{Out_IC1max} = U_{Out_IC2max} = (U_{B2max}) \cdot \left(1 + \frac{R_8}{R_7}\right) \quad (4.23)$$

Stejný postup jako u bočnicku B1 určí přesnou hodnotu odporu R_8 (vztahy 4.24 a 4.25). Hodnotu odporu R_7 klasicky určuje základní RC článek.

$$R_8 = R_7 \cdot \left(\frac{U_{Out_IC2max} - 0,55}{U_{B2max}} - 1\right) \quad (4.24)$$

$$R_8 = 10000 \cdot \left(\frac{0,5355}{0,1} - 1\right) = 43550 \, \Omega \quad (4.25)$$

Takovou hodnotu nelze v řadě typických hodnot rezistorů nalézt, je proto vytvořena vhodnou kombinací paralelního zapojení odporů. V tomto případě byly zvoleny odpory 620 k Ω a 47 k Ω , výsledná kombinace se dostatečně blíží požadovanému odporu a je zobrazena ve vztahu 4.26.

$$R_{8komb} = \left(\frac{1}{620000} + \frac{1}{47000}\right)^{-1} = 43688,16 \, \Omega \quad (4.26)$$

Správnost volby rezistoru R_{8komb} se ověří dosazením do základního vztahu 4.23, kdy se musí výsledné napětí co nejvíce blížit $U_{Out_IC1max_Real}$. Z rovnice 4.27 lze vyčíst, že se výstupní napětí ze zesilovačů liší pouze o 1,382 mV, což je dostačující přesnost.

$$U_{Out_IC2max_Real} = 0,1 \cdot \left(1 + \frac{43688,16}{10000}\right) = 0,5369 \, V \quad (4.27)$$

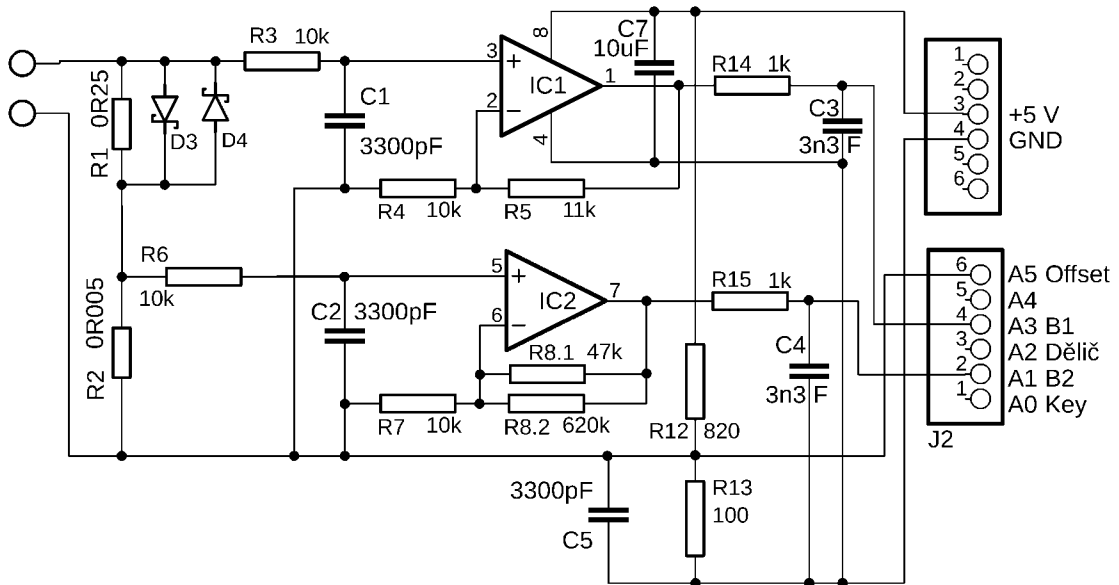
Reálné napěťové zesílení neinvertujícího operačního zesilovače pro bočník B2, je pak vypočteno vztahem 4.28.

$$Ku_{B2r} = \frac{U_{Out_IC2max_Real}}{U_{B2max}} = \frac{0,5369}{0,1} = 5,369 V \quad (4.28)$$

4.4.3 Operační zesilovače MAX44251

Operační zesilovače typu MAX44251 jsou ultrapřesné nízkošumové operační zesilovače s maximálním napěťovým offsetem 6 μ V, což jsou žádané vlastnosti pro tento projekt [19]. IC1 a IC2 (obr. 4-5) jsou fyzicky v jednom pouzdře, a mají tedy společné napájení, na pin 7 je přivedeno kladné napětí +5 V a pin 4 je připojen na zem Arduina (GND).

Obr. 4-5 zobrazuje zapojení dvou bočníků, Schottkyho diod, RC článků, operačních zesilovačů a děliče napětí pro nastavení hardwarového offsetu, o kterém pojednávají kapitoly 4.1 a 4.3.



Obr. 4-5: Zapojení bočníků s neinvertujícími OZ

4.5 RC článek

Vzhledem k odstavci 2.3, který pojednává o správném vzorkování signálu, jsou do obvodu pro správnou funkci napěťového i proudového kanálu zařazeny RC články typu dolní propust. Tyto články se chovají jako filtry A/D převodníků obou kanálů.

Frekvence A/D převodníků je 9600 kHz, úpravou vztahu 2.8 dostaneme Nyquistovu frekvenci jako 4800 Hz. Po uvážení schématu celého wattmetru lze odhadnout hodnotu R jako 10 k Ω . Úpravou vztahu 4.29, výpočet známé mezní frekvence, vznikne vztah 4.30 určený k výpočtu kondenzátoru C .

$$f_m = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.29)$$

$$C = \frac{1}{2\pi R f_m} = \frac{1}{2\pi \cdot 10000 \cdot 4800} = 3,316 \text{ nF} \quad (4.30)$$

V tomto bodě se nabízí zařazení RC článků, kde $R = 10 \text{ k}\Omega$ a $C = 3,3 \text{ nF}$. Takový RC článek při frekvencích blízkých 10 kHz má útlum vyšší než -40 dB, tím se zamezí znehodnocení měření [4]. Tyto RC články typu dolní propust jsou téměř pro celý obvod voleny jednotně a z hodnoty odporu 10 k Ω se v zapojení často vychází.

Obvod obsahuje tyto RC články (obr. 5-6):

- $R_3 + C_1$
- $R_6 + C_2$
- $R_9 + C_6$
- $R_{13} + C_5$
- $R_{14} + C_3$ ($R_{14} = 1 \text{ k}\Omega$)
- $R_{15} + C_4$ ($R_{15} = 1 \text{ k}\Omega$)

Poslední dva jmenované RC články jsou zařazeny na výstupy z operačních zesilovačů a z důvodu přesného měření disponují sníženým odporem.

Kondenzátor C_7 o velikosti 10 μF svým umístěním na napájení operačních zesilovačů, umístěných v jednom pouzdře, taktéž snižuje napěťové rušení.

4.5.1 Optimalizace zapojení RC článků

Na napájení operačních zesilovačů byl doplněn filtrační kondenzátor C_7 o hodnotě 10 μF , který vyhlazuje napájecí napětí, viz obr. 4-3. Důležitým faktorem je jeho umístění na desce. Musí být umístěn co nejbližee operačním zesilovačům, aby přívodní vodič za filtračním kondenzátorem nechytil další rušení.

Původní schéma neobsahovalo RC filtry umístěné na výstupy z operačních zesilovačů, konkrétně $R_{14} + C_3$ a $R_{15} + C_4$ o hodnotách odporu 10 k Ω . Doplněny byly s cílem odstranění šumu výstupního napětí, avšak odpory s takto vysokou hodnotou nedocílily kýženého výsledku. Po desetinásobném snížení jejich hodnoty se výstupní napětí z operačních zesilovačů ustálilo.

4.6 Zapojení LCD displeje

Existuje spousta variací LCD displejů, liší se počtem a šířkou řádků. Rozsah užívaných alfanumerických displejů u Arduina většinou zahrnuje rozlišení od 8x1 až po 40x4, kde první číslo značí délku řádku a druhé číslo počet řádků [20].

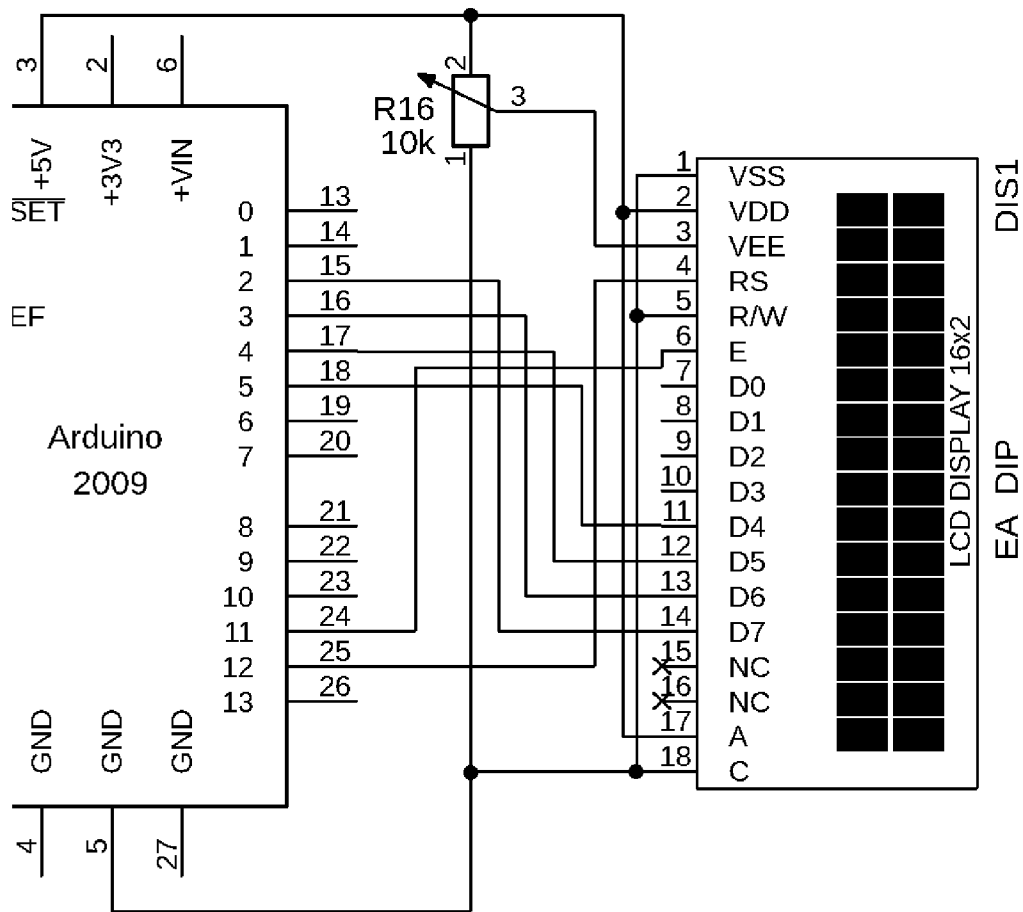
LCD displej jde k Arduinu UNO zapojit dvojím způsobem. Prvním způsobem je zapojení LCD displeje pomocí 16 pinového hřebínku, druhý způsob využívá obvodu PCF8574, který jako 8 bitový převodník umožňuje připojení přes sběrnici I²C. V této práci je využita verze bez převodníku, kde zapojíme celkem 10 vodičů, z toho 6 vodičů datových [20].

Tab. 4-1: Propojení pinů mezi LCD displejem 16x2 a Arduinem UNO

Značení LCD		Arudino	Info
VSS	GND	GND	Napájení
VDD	VCC	+ 5V	Napájení
VEE	V0	Potenciometr	Kontrast LCD
RS		PIN 12	Řízení řadiče
R/W		GND	Řízení řadiče
E		PIN 11	Řízení řadiče
D0	DB0		Datový pin
D1	DB1		Datový pin
D2	DB2		Datový pin
D3	DB3		Datový pin
D4	DB4	PIN 5	Datový pin
D5	DB5	PIN 4	Datový pin
D6	DB6	PIN 3	Datový pin
D7	DB7	PIN 2	Datový pin
A	LED+	+ 5V	Anoda podsvícení
K	LED- (C)	GND	Katoda podsvícení

Při zapojení LCD displeje je nutné myslet na jeho čitelnost, jelikož po prvním nahrání programu nemusí být text viditelný. Tuto problematiku řeší 10 kΩ potenciometr zapojený mezi pin VEE a zem. Po nastavení optimální čitelnosti (kontrastu) lze změřit přesnou hodnotu potenciometru a následně jen přes odpor dané hodnoty LCD displej připojit [20].

Výřez zapojení LCD displeje je k náhledu na obr. 4-6, zapojení pinů mezi LCD displejem a Arduinem UNO je navíc přehledně uvedeno v tab. 4-1, která obsahuje i variace názvů jednotlivých pinů.



Obr. 4-6: Zapojení LCD s potenciometrem

4.6.1 Arduino LCD Shield

Arduino LCD Shield, zobrazený na obr. 4-7, je modul kompatibilní s deskou Arduina UNO. Pomocí propojovacích hřebíků a dutinkových lišt lze tyto dva moduly pevně spojit, není tedy nutné moduly pájet či propojovat pomocí kabeláže. Výsledkem je kompaktní a lehce rozpojitelné spojení dvou modulů. Další výhodou LCD Shieldu je integrovaná klávesnice a osazený potenciometr k nastavení displeje.

LCD displej rozšířeného typu HD44780 je zapojen přes paralelní sběrnici, proto zabírá pro komunikaci pouze 6 digitálních pinů. Klávesnice obsahuje 5 ovládacích tlačítek a tlačítko reset. Jelikož jsou tlačítka zapojena úsporně přes dělič, zabírají jen analogový pin A0 [21].

Pro tyto vlastnosti byl Arduino LCD Shield pořízen a je v této diplomové práci používán.



Obr. 4-7: Arduino LCD Shield

5 NÁVRH DPS

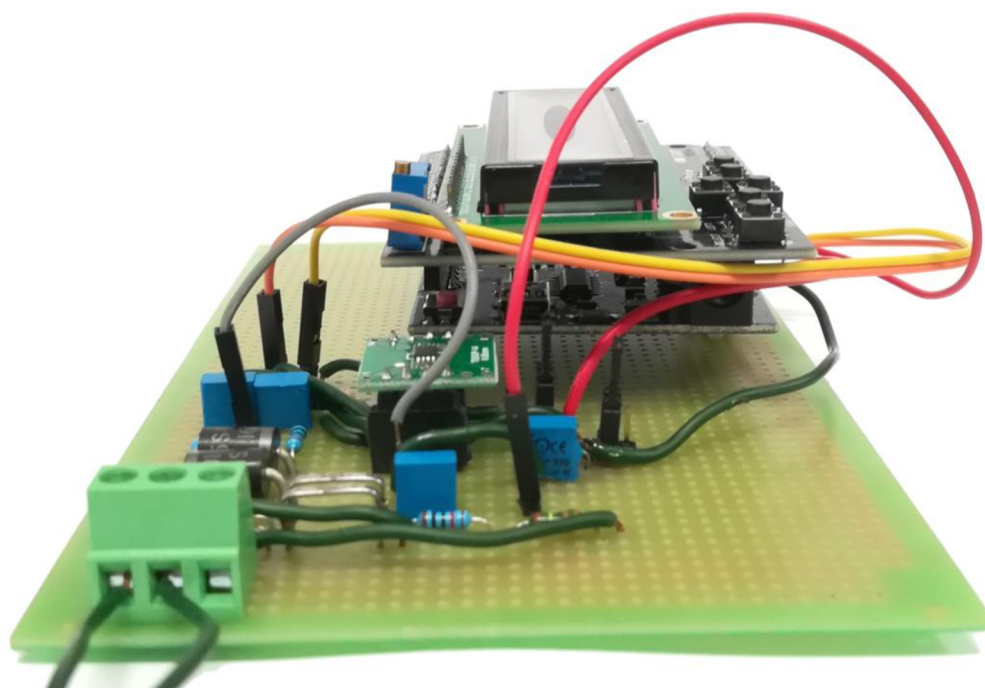
Návrh desky plošných spojů pro snímání napětí a proudu prošel třemi vývojovými stádii, prvním bylo testovací zapojení na univerzálním pájivém poli. Následoval první prototyp vyleptané desky, na kterém se po úpravách podařilo zprovoznit samotný wattmetr, zde byly fyzicky provedeny všechny optimalizace. Posledním stádiem je druhá verze desky, která obsahuje všechny optimalizace a je plně funkční.

Všechna schémata byla vytvořena v programu EAGLE 9.2.2 education od firmy Autodesk, ve stejném programu byly navrženy všechny desky plošných spojů.

5.1 Verze na univerzálním pájivém poli

Zapojení na univerzálním pájivém poli se vyznačuje velkým množstvím vyvedených měřicích pinů a obsahuje propojovací jumpry pro odpojení napájení operačních zesilovačů a odpojení offsetu 0,55 V, viz obr. 5-1. Operační zesilovače MAX4425 i Arduino jsou připojeny přes propojovací hřebínky a lišty. Zde byla testována funkčnost původního návrhu zapojení.

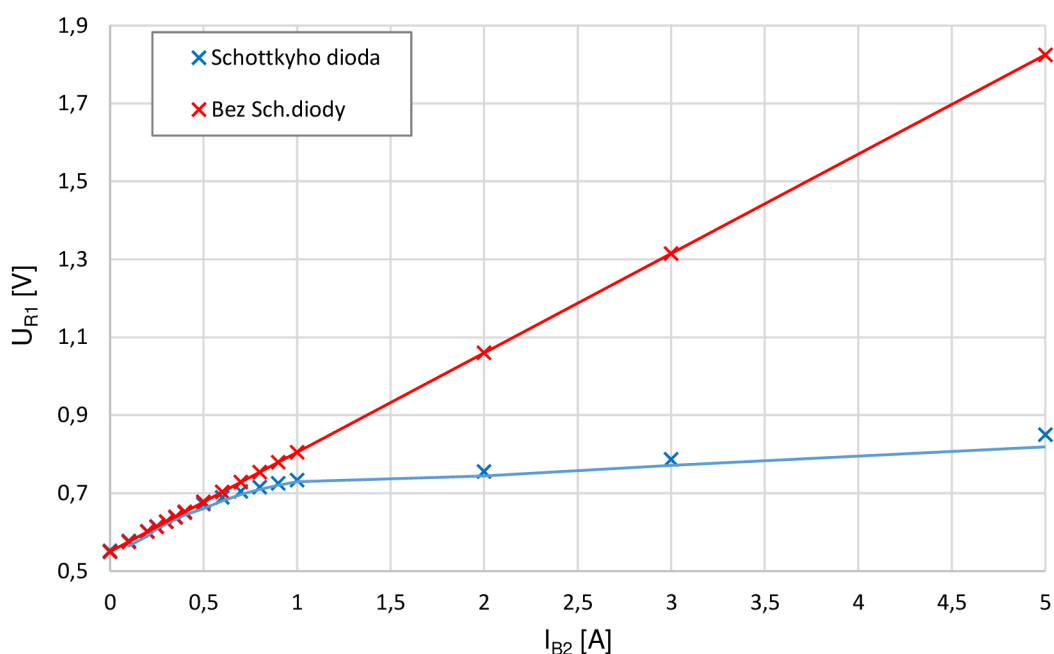
V desce jsou zapájeny vývodové součástky. Tato deska byla testována pouze na zdrojích stejnosměrného napětí a proudu. Použit byl například zdroj EP-603 s napětím do 30 V a maximálním proudem 2,5 A.



Obr. 5-1: Náhled zapojení na univerzálním pájivém poli

Byla například ověřena funkčnost zapojení se Schottkyho diodami, jak zobrazuje graf na obr. 5-2. Bez Schottkyho diod napětí lineárně stouvalo dle úbytku napětí na bočniku B1 tvořeného odporem R_I . Po připojení Schottkyho diod 15SQ015, které byly vyměněny za typ 15SQ045 s prahovým napětím 0,25 V, lze při protékajícím proudu 0,75 A vidět přemostění bočniku R_I . Proto na bočniku R_I nevzniká velký napěťový a výkonový úbytek.

Arduino i se stoupajícím napětím nemůže být poškozeno, jelikož operační zesilovače IC1 a IC2 nemohou zesílit napěťový signál na vyšší hladinu napětí, než kterou jsou napájeny. Na analogové vstupní piny Arduina tak může přijít napětí o maximální amplitudě +5 V, což je dovolená trvalá hodnota napětí.



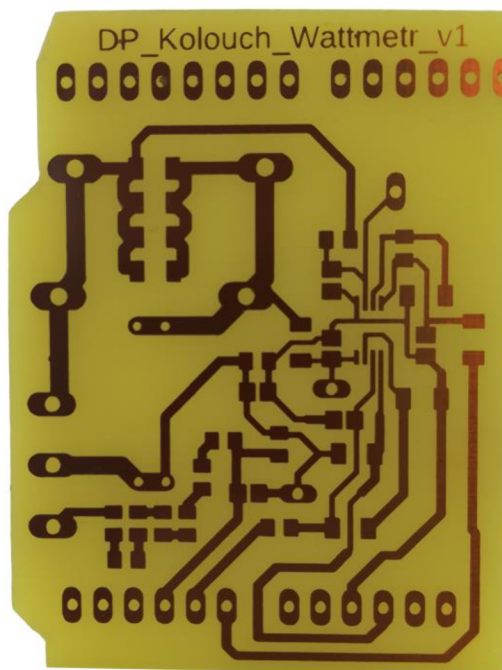
Obr. 5-2: Měření na vstupu operačního zesilovače IC1

5.2 První verze DPS

Deska byla navržena tak, aby fungovala podobně jako LCD Shield, kopíruje tedy tvar Arduina (viz obr. 5-3) a připojení k němu je rovněž provedeno pomocí dutinkových lišt.

Deska je provedena jako jednovrstvá a její rozměry jsou 53,3 mm na 40,5 mm. Silová část je vedena cestami o šířce 1,5 mm, na ostatních místech jsou cesty široké 0,5 mm. Plošky pro operační zesilovače a průchody pod SMD součástkami jsou vyleptány na šířku 0,3 mm.

Připojení do sítě je zajištěno svorkovnicí AK500/3, bočník R1 je tvořen čtyřmi paralelními SMD odpory s pouzdem 1206, bočník B2 je tvořen paralelní kombinací dvou přesných bočnicků o hodnotě $0,01 \Omega$ s pouzdem 0207/12. Posledními vývodovými součástkami jsou Schottkyho diody 15SQ045 v pouzdru R-6, ostatní odpory a kondenzátory jsou v klasických zapouzdřeních 1206 a 0805.



Obr. 5-3: Navržená deska plošných spojů v první verzi

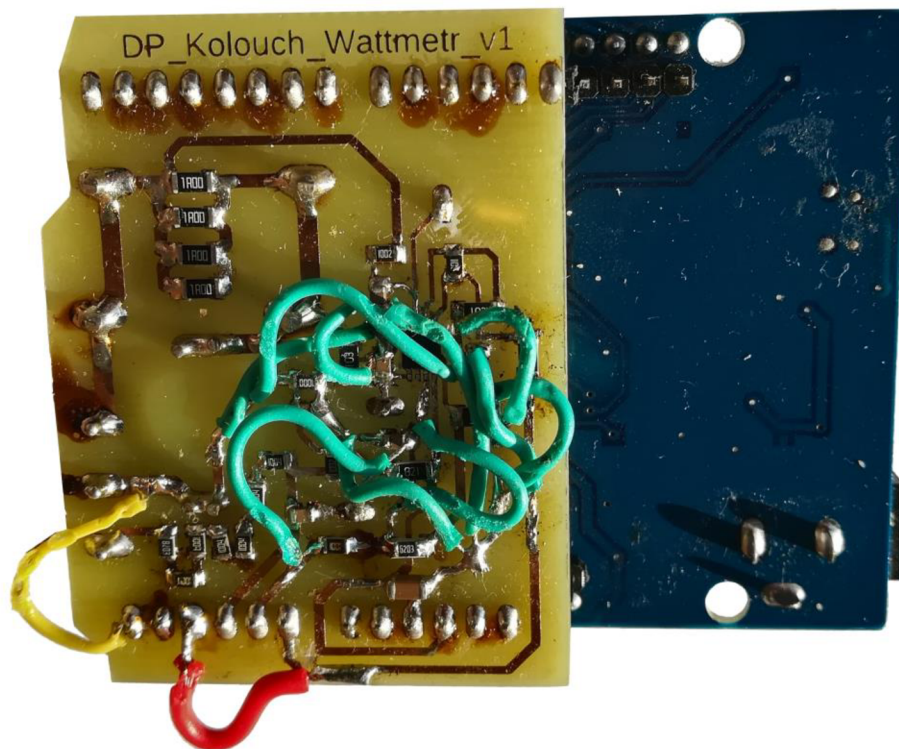
5.2.1 Optimalizace provedené na DPS

Bočník B1 byl původně napojen na analogový vstup Arduina A0. Při výčtu registrů na sériový monitor snímání proudu fungovalo do té chvíle, než se připojil LCD Shield. Po připojení registr přetékal, nabýval plné hodnoty 1023. Po proměření pinů A0 vůči zemi Arduina bylo naměřeno +5 V, při stisku libovolné klávesy se tato hodnota понížila. Datasheet k LCD Shieldu potvrdil domněnku, že pin A0 je využíván k ovládání klávesnice. Z tohoto důvodu je nově napěťový signál bočnicku B1 snímán analogovým vstupem A3.

Zapojením neinvertujících operačních zesilovačů IC1 a IC2 se věnují kapitoly 4.4.1.1 a 4.4.2.1. V těchto kapitolách se uvádí, že na invertující vstupy je přivedeno offsetové napětí +0,55 V. Avšak první verze desky připojuje na invertující vstupy zem Arduina.

Jelikož výčet z registrů zobrazoval nesmyslné hodnoty, byla deska proměřena a tato chyba následně odstraněna.

U RC článků umístěných na výstup operačních zesilovačů došlo taktéž k nesprávnému zapojení. Kondenzátory C_3 a C_4 jsou připojeny mezi výstupy z operačních zesilovačů a zemí Arduina až za odpory R_{14} a R_{15} . V původním návrhu byly nesprávně zapojeny před tyto odpory a rušily snímané napětí, tato chyba byla rovněž opravena.



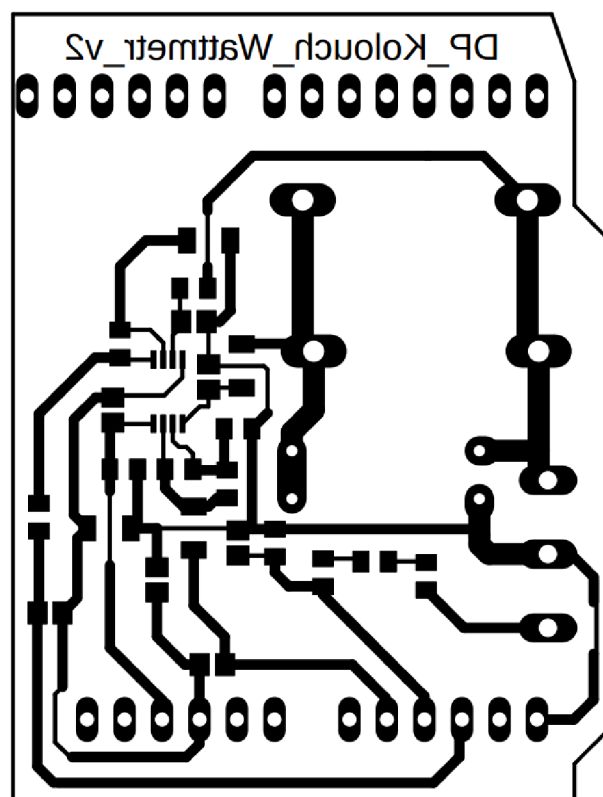
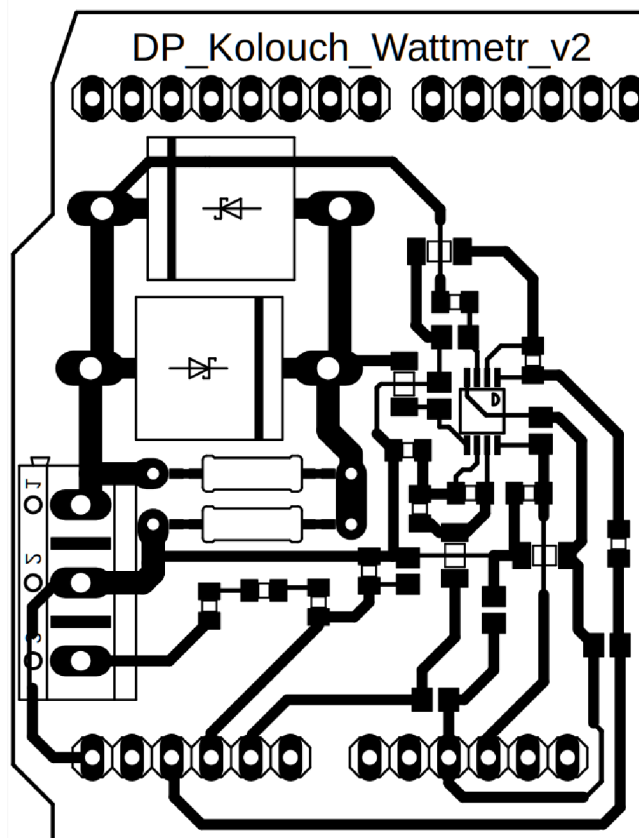
Obr. 5-4: Provedené hardwarové změny na první verzi DPS

5.3 Druhá verze DPS

Druhá verze desky plošných spojů opravuje všechny problémy zmíněné v kapitole 5.2.1. Rozměry a způsob vedení cest zůstává totožný. Oproti první verzi desky i oproti desce na pájivém poli jsou odstraněny vyvedené měřicí piny, které již nejsou potřeba.

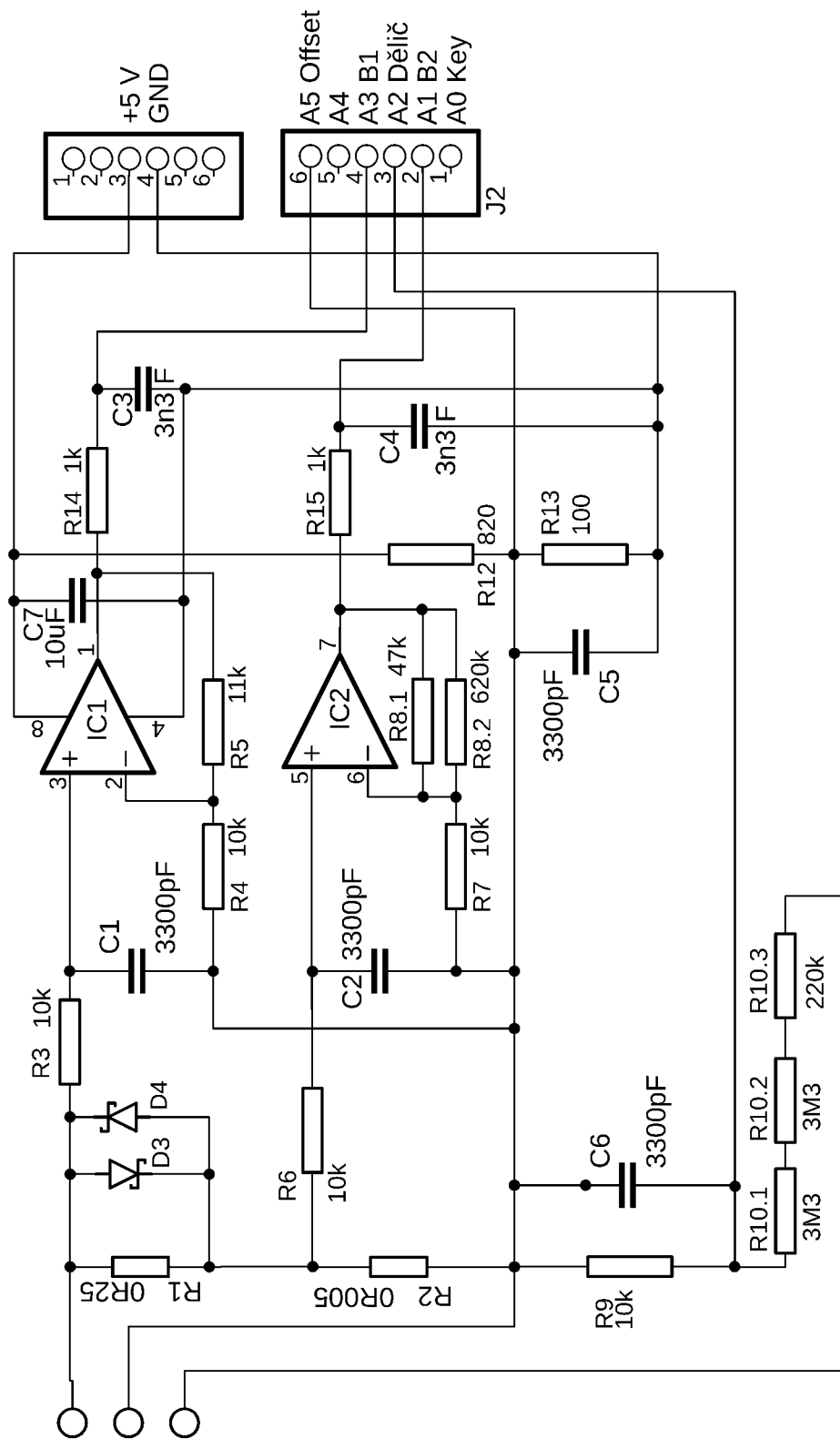
Pro co nejmenší rušení jsou umístěny RC filtry $R_3 + C_1$ a $R_6 + C_2$ do těsné blízkosti operačních zesilovačů, rovněž kondenzátor C_7 , jak již bylo řečeno v 4.5.1, je připojen do těsné blízkosti napájecích pinů (4 a 8) operačních zesilovačů.

Jak lze vidět na obr. 5-5, na desce se minimalizoval počet součástek a optimalizovalo se jejich rozmístění.



Obr. 5-5: Navržená finální verze DPS pro wattmetr

Obr. 5-6 zobrazuje vytvořené schéma wattmetru.



Obr. 5-6: Schéma navrženého wattmetru

6 FIRMWARE

Kód byl vytvořen v aplikaci Arduino IDE v1.8.2, software samotný popisuje kapitola 3.2. V průběhu vývoje bylo vytvořeno postupně 6 verzí programu. Právě poslední verzi popisuje celá tato kapitola.

Nejdůležitější částí firmwaru je přesný výpočet obvodových veličin, jelikož se z nich odvozují všechny výkony i odebraná elektrická energie.

6.1 Teorie zpětného výpočtu obvodových veličin

Arduino nerozlišuje kladná a záporná napětí. Jelikož je znám přesný offset, který se vyčítá (viz kód 1, řádek 220), lze jeho odečtením určit velikost a polaritu napětí na svorkách, vztah 6.1. Ve vztahu 6.1 je U_{reg} vyčtená hodnota z vybraného registru.

$$U = (U_{reg} - Offset) \quad (6.1)$$

Tab. 6-1 zobrazuje příklady vyčtených hodnot z registru A2 a jejich přepočtení na reálnou hodnotu napětí, to vše za předpokladu snímaného offsetu 0,55 V, který posune nulové napětí z hodnoty registru 0 na hodnotu 512. Při plném registru (1023) určí Arduino velikost síťového napětí na jeho maximální hodnotu +10 %, což činí 253 V, při nulové hodnotě registru je toto napětí záporné. To odpovídá hodnotám, pro které byl dělič navržen.

Tab. 6-1: Převod plnosti registru A2 na teoretickou hodnotu síťového napětí

Hodnota registru URMS	Dělič [V]
1023	253
768	126,5
512	0
256	-126,5
0	-253
312	-98,8281
875	179,3731
544	15,8125

6.2 Měření a korekce

V kódu je pro měření zahrnuta knihovna `TimerOne.h`, která používá hardwarový časovač pro spouštění periodického přerušení. V kódu je vytvořena funkce `timerISR()`, která obsahuje veškeré snímání obvodových veličin, podmínku pro přepínání rozsahu měřeného proudu, výpočty a průměrování, náhled této funkce je v kódu na řádcích 219 až 240.

Přerušení má v programu nejvyšší přednost a je nastaveno na každých 0,5 ms a opakuje se 200krát, jedno měření tedy zabere desetinu sekundy.

```
219     tlAnalog = analogRead(0);
220     Offset += analogRead(A5);
221     Ureg = analogRead(A2)-Offset_;
222     I1reg = analogRead(A3);
223     I2reg = analogRead(A1);
224
225     //Podminka rozlisujici, ktery bocnik ma prednost
226
227     if(I1reg>1000 || I1reg<(10)) //pokud I prvnim bocnikem pretece
228     {
229         Imp=(I2reg-Offset_)*20; //nasobeno pomerem mezi bocniky
230     }
231     else
232     {
233         Imp=I1reg-Offset_;
234     }
235
236     Iavg_ +=Imp;
237     Uavg_ +=Ureg;
238     ui_ +=Imp*Ureg;
239     Iforef_ +=Imp*Imp;
240     Uforef_ +=(float)Ureg*(float)Ureg;
```

Kód: Funkce `timerISR()`, načítání z registrů a podmínka pro rozlišení proudu

Poměr výstupních napětí z operačních zesilovačů IC1 a IC2 je názorně zobrazen v kódu. Podmínka `if` (řádek 227 až 234) rozlišuje mezi přesným rozlišením bočnicku B1 nebo hrubším rozlišením bočnicku B2 pro vyšší proudy. Podmínka rozlišení je vyřešena velmi jednoduše, pokud snímáný proud překročí maximální rozsah citlivějšího bočnicku,

dojde k přepnutí na registr bočníku pro větší proudy, ten je násoben 20 (řádek 229), což odpovídá poměru citlivosti.

Pokud by nebyl poměr mezi výstupními napětími z operačních zesilovačů celočíselný, muselo by se násobit konstantou typu *float*, čímž by se výrazně prodloužila doba výpočtu. V kódu se tedy pracuje co nejdéle s celočíselným poměrem, to umožňuje používat datový typ *long* [22].

Data jsou akumulována po dobu 5 period za účelem zvýšení přesnosti a stálosti v čase, viz řádky kódu 242 až 250. Jelikož jsou data zobrazována pouze na LCD displeji, nedochází ke ztrátě validity informace.

```
242     if (poc >= 200)
243         {
244             Offset /= 200;
245             Offset_ = (int)Offset;
246             Iavg = Iavg_ / 200;
247             Uavg = Uavg_ / 200;
248             ui = ui_ / 200;
249             Iforef = Iforef_ / 200;
250             Uforef = Uforef_ / 200;
```

Kód: Část podmínky *if* pro průměrování 200 naměřených vzorků

6.2.1 Výpočet napětí v kódu

Maximální rozlišení A/D převodníku v případě síťového napětí je 0,5188 V, což poukazuje na nepřiliš velkou přesnost měření malých napětí.

Pro výpočet síťového napětí je do kódu zapsána korekční konstanta C_u rovna 0,700867218. Zápis v kódu je zobrazen na 95. řádku.

6.2.2 Výpočet proudu v kódu

Maximální rozlišení A/D převodníku je pro malé proudy (1 A) rovno 0,002 A, pro vyšší proudy (do 20 A) 0,04 A.

Násobná konstanta C_i je rovna 0,00147588. Opět je v kódu zapsána za odmocninu (viz řádek 96).

95 $U_{ef} = \text{sqrt}(U_{foref}) * 0.700867218;$

96 $I_{ef} = \text{sqrt}(I_{foref}) * 0.0014705882352;$

Kód: Výpočet efektivních hodnot napětí a proudu

6.2.3 Efektivní hodnoty napětí a proudu

Kapitola 2.2 se věnovala výpočtu různých hodnot za předpokladu, že je znám spojitý signál. Jelikož mikroprocesor má k dispozici pouze vzorkovaný signál, je potřeba vzorce upravit. Zároveň je potřeba snímat obvod vzorkovací frekvencí minimálně dvakrát větší než je frekvence sítě, tato problematika byla vysvětlena v kapitole 2.3. Navržený obvod vzorkuje frekvencí 2 kHz, takže tuto podmínku splňuje 40krát.

Úpravou vzorce 2.5 vznikne vztah 6.2 pro efektivní napětí.

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{nT} \sum_0^{nT} u^2(t)} \quad (6.2)$$

Odstraněním integrálu ve vzorci pro výpočet efektivní hodnoty proudu 2.6 je získán vztah 6.3.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{nT} \sum_0^{nT} i^2(t)} \quad (6.3)$$

Na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je zobrazen výpočet efektivní hodnoty napětí a proudu s dvojitým zápisem korekčních konstant, kde U_{foref} a I_{foref} jsou zprůměrované kvadráty naměřených okamžitých hodnot obvodových veličin.

6.2.4 Výkony a odebraná energie

Činný výkon se určí vztahem 6.4.

$$P = \frac{1}{nT} \sum_0^{nT} u(t) \cdot i(t) [W] \quad (6.4)$$

V kódu se nejdříve určí součin okamžitých hodnot napětí a proudu, následně je hodnota součinu zprůměrovaná. Posledním krokem je vynásobení zprůměrovaného výkonu desetinným číslem tvořeného součinem proudové a napěťové korekční konstanty.

Zdánlivý výkon odpovídá součinu efektivní hodnoty napětí a efektivní hodnoty proudu, viz 2.7 a 6.5.

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef} [VA] \quad (6.5)$$

Jalový + deformační výkon (označený jako Q) se dopočítá jednoduše z trojúhelníku výkonu vztahem 6.6.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} [VA] \quad (6.6)$$

Pokud je znám činný a zdánlivý výkon, lze jednoduše určit i power factor (PF), a to poměrem činného výkonu vůči zdánlivému výkonu, což zobrazuje vztah 6.7.

$$PF = \frac{P}{S} [-] \quad (6.7)$$

Účinník je v kódu ošetřen podmínkou pro překročení, aby v jeho případě nebyl zobrazen účinník vyšší jak 1. Výpočty i podmínka jsou zobrazeny na řádcích kódu 98 až 114.

```

98     P=(float)ui*0.00103068692;
99     S=Uef*Ief;
100    Q=sqrt(S*S-P*P);
101    PF=P/S;
110    if (proE)
111    {
112        proE=0;
113        Energy += P/(10*3600);
114    }

```

Kód: Výpočet výkonů, PF a výpočet a akumulace energie

Odebranou elektrickou energií udává vztah 6.8. Energie je počítána vždy za desetinu vteřiny, což je 5 period sítě. Podělením výkonu číslem 10 získáme elektrickou energii ve Ws. Aby byly zobrazeny Wh, podělí se Ws konstantou 3600.

$$E_{cyklu} = \frac{P}{10 \cdot 3600} [Wh] \quad (6.8)$$

Princip kumulace zobrazuje vztah 6.9, v kódu je zapsána podmínka pro akumulaci energie na řádcích 110 až 114, kde $proE$ udává proběhnutí 5 period sítě.

$$E_n = E_{n-1} + E_{cyklu} \quad (6.9)$$

6.3 Menu a zobrazení na LCD

Vytvořený kód zahrnuje knihovnu *LiquidCrystal.h*, která umožňuje práci s LCD displejem. Ovládat samotné LCD je možné pomocí tlačítek (viz 4.6.1). Knihovna nastavuje ovládání tlačítek na napětí 5 V, kdy jednotlivá tlačítka dělí toto napětí. Při přepnutí vnitřního napětí Arduina na 1,1 V klávesy dělí místo původních 5 V pouze napětí 1,1 V, a tak dochází k vyřazení některých tlačítek. Jelikož je menu wattmetru jednoduché a zůstala funkční tlačítka nahoru (*UP*) a doprava (*RIGHT*), nebylo nutné měnit dělič na LCD shieldu. Pouze byla změřena analogová hodnota tlačítka *UP* a následně zanesena do podmínky ovládání menu.

Menu je pro přehlednost rozděleno na 4 obrazovky vždy po dvou hodnotách. Hodnoty jsou seřazeny tak, aby měl uživatel co největší přehled o měřeném obvodu. Mezi stránkami se přepíná právě tlačítkem *UP*. První stránka zobrazuje efektivní hodnoty napětí a proudu, druhá činný výkon s PF, třetí zdánlivý výkon a Q. Na poslední stránce menu je zobrazena odebraná elektrická energie a čas měření. Obr. 6-1 zobrazuje právě čtvrtou stránku menu.



Obr. 6-1: Zobrazení odebrané energie a čas měření na LCD

Aktualizace všech proměnných v menu nastává vždy po jedné vteřině, o to se stará funkce *pageRotation()*, kde je měřen čas od poslední aktualizace.

6.4 Provedené optimalizace firmware

Oproti původním verzím firmwaru došlo k několika změnám, například musely být přetyčovány některé datové typy u proměnných, jelikož docházelo k jejich zahlcování. Příklad přetytování lze vidět na řádce kódu 245, kde je přetyčován *Offset*.

Původní podmínka k přepínání mezi bočníky neobsahovala minimální mez, při měření záporných proudů měřil v programu pouze bočník B1 do cca -1 A. Podmínka byla do programu připsána.

Původní návrh firmwaru obsahoval u zpětných výpočtů obvodových veličin konstantní offset. V nynější verzi wattmetru je odečítán přesný offset měřený na pinu A5, (v kódu řádek 220), což výrazně zpřesnilo měření obvodových veličin.

Poslední změnou byl přesun příkazu snímajícího stisk tlačítka do přerušení. V původním umístění, ve smyčce *loop*, docházelo k přehlcení registru A0, což simulovalo stisk tlačítka, a pokud byl snímán proud vyšší než 1 A, docházelo k samovolnému přepínání mezi obrazovkami menu.

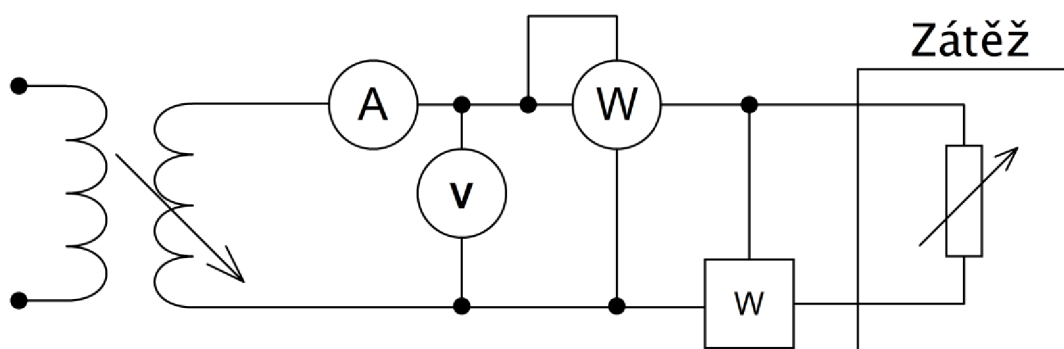
7 TESTOVACÍ MĚŘENÍ

Kontrolní měření má za úkol ověřit parametry realizovaného wattmetru. Měření obsahuje 3 části. Pro všechny části měření bylo zapojení měřicích přístrojů totožné. Měření napětí a proudu bylo testováno na obvodu zapojeném dle obr. 7-1.

Pro měření proudu byl použit ampérmetr HLA-2 SAP:001000052044-000. Napětí snímal digitální multimetr Agilent U1252A S/N TW48060226. Pro měření výkonu posloužil wattmetr GLI DKP 393 M246/1. Jako zátěž byl připojen reostat s maximálním odporem 98 Ω .

V testovacím měření jsou jako referenční hodnoty (dolní index *ref*) zapisovány hodnoty naměřené pomocí ampérmetru, voltmetru a wattmetru.

Hodnoty naměřené testovaným měřicím zařízením jsou označovány jako naměřené, tedy označeny dolním indexem *měř*.



Obr. 7-1: Zapojení pro měření napětí a proudu

Příklad výpočtu relativní chyby zobrazuje vztah 7.1, hodnoty jsou dosazeny z tab. 7-1, prvního řádku.

$$\delta_u = \frac{U_{m\check{r}} - U_{ref}}{U_{ref}} \cdot 100 = \frac{252,4 - 253,83}{253,83} \cdot 100 = -0,5634 \% \quad (7.1)$$

7.1 Měření napětí

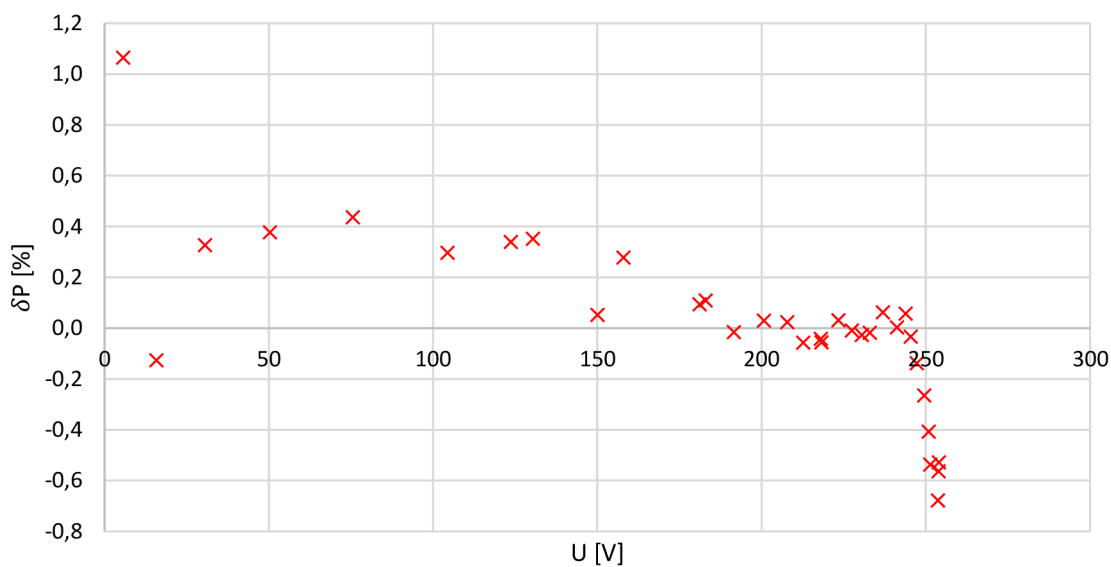
Již bylo zmíněno rozlišení A/D převodníku (0,5188 V). Pro měření napětí je rozlišení poměrně hrubé, z toho důvodu je u malých napětí větší relativní chyba, která dosahuje při nejnižších napětích až 1,06 %. Naměřené hodnoty s vypočtenou relativní chybou jsou zobrazeny v tab. 7-1.

Tab. 7-1: Naměřené a vypočtené hodnoty do maximálního síťového napětí

U_{ref}	$U_{měř}$	δ_u
[V]	[V]	[%]
253,83	252,40	-0,5634
253,65	251,93	-0,6781
253,92	252,58	-0,5277
251,35	250,00	-0,5371
250,83	249,81	-0,4066
249,47	248,81	-0,2646
247,22	246,88	-0,1375
245,35	245,27	-0,0326
243,86	244,00	0,0574
241,18	241,19	0,0041
236,91	237,06	0,0633
232,90	232,86	-0,0172
230,49	230,43	-0,0260
227,47	227,45	-0,0088
223,43	223,50	0,0313
218,27	218,15	-0,0550
217,99	217,90	-0,0413

U_{ref}	$U_{měř}$	δ_u
[V]	[V]	[%]
212,65	212,53	-0,0564
207,79	207,84	0,0241
200,74	200,80	0,0299
191,55	191,52	-0,0157
183,00	183,20	0,1093
181,11	181,28	0,0939
157,91	158,35	0,2786
150,10	150,18	0,0533
130,40	130,86	0,3528
123,67	124,09	0,3396
104,42	104,73	0,2969
75,54	75,87	0,4369
50,35	50,54	0,3774
30,54	30,64	0,3274
15,79	15,77	-0,1267
5,63	5,69	1,0657

Na obr. 7-2 je zobrazena relativní chyba vůči napětí.



Obr. 7-2: Vynesená relativní chyba v závislosti na měřeném napětí

7.2 Měření proudu

Při měření nejmenších proudů do 0,7 A nedocházelo k žádné odchylce od referenčního napětí, proto tab. 7-2 vynechává hodnoty 0,12 A až 0,43 A. Avšak graf zobrazený na obr. 7-3 tyto hodnoty zahrnuje, proudová osa je u obr. 7-3 v logaritmicím měřítku.

Vztah 7.2 zobrazuje výpočet absolutní chyby v tab. 7-2, dosazen je poslední řádek.

$$\Delta_i = I_{m\check{e}ř} - I_{ref} = 0,92 - 0,90 = 0,02 \text{ A} \quad (7.2)$$

Tab. 7-2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro proudy od 0,7 A do 2,55 A

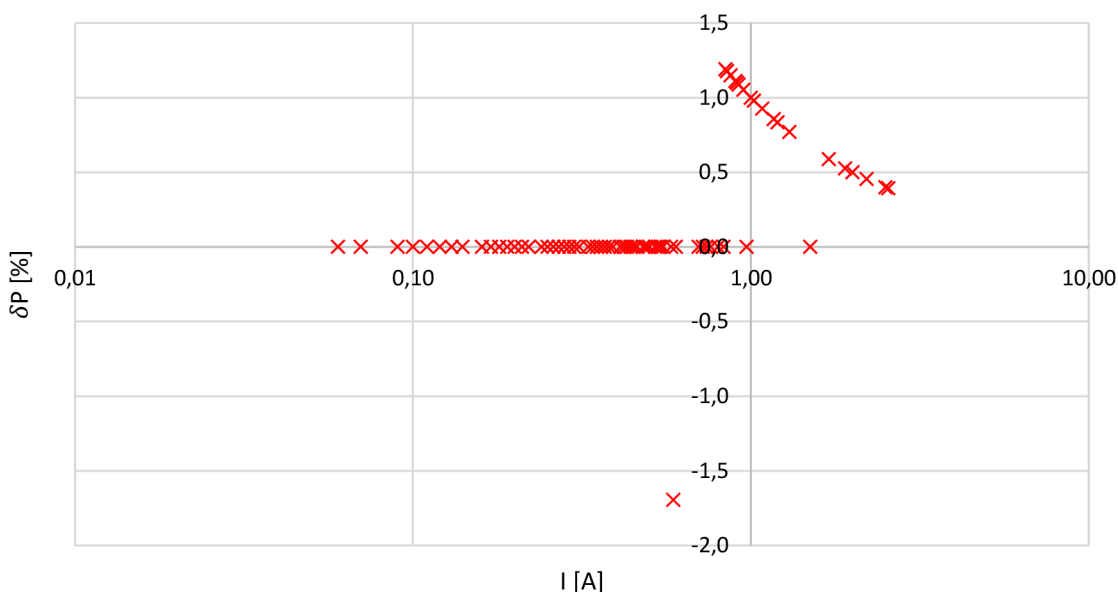
I _{ref}	I _{měř}	δ _i	Δ _i
[A]	[A]	[%]	[A]
0,05	0,05	-3,85	-0,002
0,06	0,06	0,00	0,00
0,07	0,07	0,00	0,00
0,09	0,09	0,00	0,00
0,10	0,10	0,00	0,00
0,11	0,11	0,00	0,00
...
0,36	0,36	0,00	0,00
0,37	0,37	0,00	0,00
0,38	0,38	0,00	0,00
0,39	0,39	0,00	0,00
0,41	0,41	0,00	0,00
0,42	0,42	0,00	0,00
0,43	0,43	0,00	0,00
0,44	0,44	0,00	0,00
0,45	0,45	0,00	0,00
0,46	0,46	0,00	0,00
0,48	0,48	0,00	0,00
0,49	0,49	0,00	0,00
0,50	0,50	0,00	0,00
0,52	0,52	0,00	0,00
0,53	0,53	0,00	0,00
0,54	0,54	0,00	0,00
0,55	0,55	0,00	0,00
0,58	0,58	0,00	0,00
0,59	0,58	-1,69	-0,01
0,60	0,60	0,00	0,00

I _{ref}	I _{měř}	δ _i	Δ _i
[A]	[A]	[%]	[A]
0,70	0,70	0,00	0,00
0,72	0,72	0,00	0,00
0,74	0,74	0,00	0,00
0,76	0,76	0,00	0,00
0,80	0,80	0,00	0,00
0,83	0,83	0,00	0,00
0,84	0,85	1,19	0,01
0,85	0,86	1,18	0,01
0,87	0,88	1,15	0,01
0,90	0,91	1,11	0,01
0,91	0,92	1,10	0,01
0,92	0,93	1,09	0,01
0,95	0,96	1,05	0,01
0,97	0,97	0,00	0,00
1,00	1,01	1,00	0,01
1,02	1,03	0,98	0,01
1,08	1,09	0,93	0,01
1,17	1,18	0,85	0,01
1,20	1,21	0,83	0,01
1,30	1,31	0,77	0,01
1,50	1,50	0,00	0,00
1,70	1,71	0,59	0,01
1,90	1,91	0,53	0,01
2,00	2,01	0,50	0,01
2,20	2,21	0,45	0,01
2,50	2,51	0,40	0,01
2,55	2,56	0,39	0,01

Maximální rozlišení A/D převodníku je pro malé proudy (1 A) rovno 0,002 A, pro vyšší proudy (do 20 A) 0,04 A.

První řádek tab. 7-2 je zatížen největší chybou při měření proudu, nicméně je nutné brát tento údaj s rezervou. Bočník pro malé proudy má sice rozlišení A/D převodníku 0,002 A, nicméně sestavený wattmetr zobrazuje na LCD minimální změnu setiny ampéru, čímž dochází při měření nejmenších proudů ke ztrátě přesnosti.

Největší odchylka nastala při referenčním proudu 0,85 A, kdy relativní chyba dosáhla 1,19 %. Následně se relativní chyba zmenšuje.

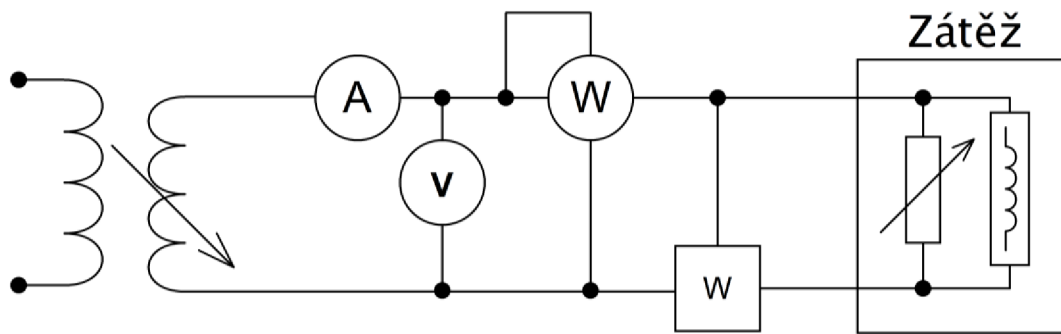


Obr. 7-3: Vynesená relativní chyba v závislosti na měřeném proudu

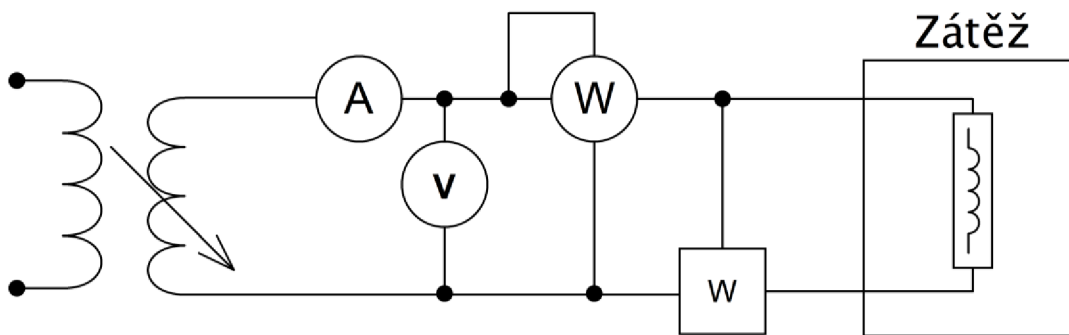
7.3 Měření výkonu

Pro měření výkonu byly využity všechny měřicí přístroje. Pro řádné ověření rozlišovací schopnosti vytvořeného měřicího zařízení byla do obvodu zapojena tlumivka LAYRTON ARC-P 20/23, jejíž odpor dosahoval hodnoty 64,7 Ω a indukčnost 958,3 mH.

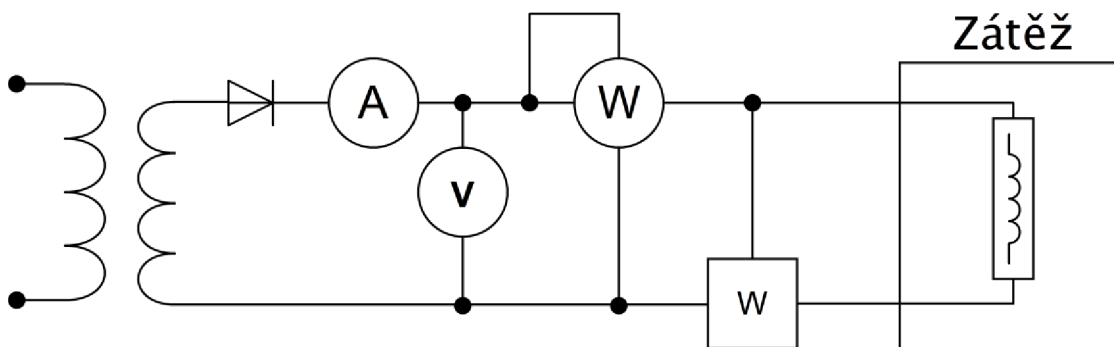
První měření probíhalo se zapojením reostatu a tlumivky paralelně, schéma na obr. 7-4. Při druhém měření byl odpojen reostat a byla měřena pouze tlumivka, viz obr. 7-5. Při třetím měření byl odstraněn autotransformátor a připojením fáze přes diodu byl vytvořen nesymetrický napájecí zdroj, dle schématu na obr. 7-6. Jako zátěž zůstala zapojená tlumivka.



Obr. 7-4: Zapojení prvního kontrolního měření pro měření výkonu



Obr. 7-5: Zapojení druhého kontrolního měření pro měření výkonu



Obr. 7-6: Zapojení třetího kontrolního měření pro měření výkonu

Naměřené a vypočtené hodnoty jsou přehledně zapsány do tabulky tab. 7-3, kde se referenční hodnota zdánlivého výkonu a power factoru PF dopočítala použitím vzorců 6.5 a 6.7.

Tab. 7-3: Naměřené hodnoty s dopočítaným S_{ref} a PF_{ref}

Měř.	U_{ref} [V]	$U_{měř}$ [V]	I_{ref} [A]	$I_{měř}$ [A]	S_{ref} [VA]	$S_{měř}$ [VA]	P_{ref} [W]	$P_{měř}$ [W]	PF_{ref} [-]	$PF_{měř}$ [-]
1	230,50	230,53	0,39	0,39	88,75	87,71	29	28,90	0,33	0,33
2	230,00	229,50	0,41	0,40	91,85	91,78	16	16,02	0,17	0,17
3	195,75	200,80	0,58	0,57	112,56	112,07	55	54,58	0,49	0,48

Tab. 7-4 zobrazuje naměřené relativní chyby zdánlivého výkonu, činného výkonu a power factoru. Lze vidět, že vytvořený wattmetr zvládá měřit složitější zapojení.

Tab. 7-4: Vypočtené relativní chyby PF, zdánlivého a činného výkonu

Měř.	δs	δp	δPF
	[%]	[%]	[%]
1	-1,18	-0,34	1,00
2	-0,07	0,12	0,19
3	-0,43	-0,76	-1,77

8 NÁKLADY

Tab. 8-1 shrnuje přibližné náklady na výrobu wattmetru, pokud by se nechala deska plošných spojů vyleptat a osadit externě.

Tab. 8-1: Přibližné náklady na výrobu wattmetru

Součástka	Kusů	Cena/ks	Cena
	[ks]	[Kč/ks]	[Kč]
Dutinková lišta	2	7,8	15,6
Piny	1	6,1	6,1
SMD rezistory	20	1,3	26
Keramické kondenzátory	6	4	24
Svorkovnice	1	10	10
Arduino UNO	1	194	194
LCD shield	1	231	231
OZ MAX44251	1	80	80
Schottkyho diody 15SQ045	2	19	38
DPS	1	60	60
	Cena celkem		684,7

9 ZÁVĚR

Diplomová práce obsahuje teorii nezbytnou k pochopení problematiky měření výkonu s uvedením základních vztahů. Je zde rozvedena problematika vzorkování signálu pro realizaci digitálního měření výkonu. Další kapitoly popisují možnosti snímání proudu a napětí jednotlivými čidly.

Praktická část se věnuje návrhu prototypu wattmetru za pomoci vývojového kitu Arduina UNO. Navazuje návrh schématu a výběr součástek obvodu pro snímání napětí a proudu. Je navržena deska plošných spojů. Značná část práce se věnuje popisu firmwaru s popisem klíčových částí programu. Postupně je vysvětlen algoritmus výpočtu měřených a zobrazovaných veličin (efektivní napětí a proud, zdánlivý výkon, činný výkon, power factor, energie).

Poslední část práce se zabývá měřením na realizovaném wattmetru. Měření probíhalo na různých typech zátěže (R, RL a nelineární). Pro ověření byly použity laboratorní přístroje.

Vytvořený wattmetr splňuje navržené požadavky na přesnost naměřených veličin. Měří napětí a proudy, přesně snímá výkony a power factor. Vyhodnocením bylo zjištěno, že přesnost měření výkonu je lepší než 2 %.

Literatura

- [1] Elektrodynamická soustava. *Praktické moderní výukové moduly v elektrotechnice, elektronice a automatizaci: Praktické úlohy měření v elektronice a automatizaci* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.souepl.cz/wp-content/ucitele/kulhanek/OPVK%202012/Analogove%20pristroje/elektrodynamicka%20soustava.html>
- [2] Wattmetr digitální klešťový CEM DT-3353. In: *GM ELECTRONIC* [online]. GM electronic, spol. s.r.o., 1990–2019 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/wattmetr-digitalni-klestovy-cem-dt-3353>
- [3] LEM. *Current transducer FHA40-P/SP600: Datasheet*. www.lem.com, 2010. Dostupné také z: <http://www.lem.com/docs/products/fhs%2040-p%20sp600.pdf>
- [4] ANALOG DEVICES. *Single-Phase Multifunction Metering IC with di/dt Sensor Interface: ADE7753*. 2010. Norwood: One Technology Way, 2010, 61 s. Dostupné také z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7753.pdf>
- [5] *Vybrané stati z výkonové elektroniky: Tepelné jevy, činný výkon* [online]. Vyd. 3. Brno: Vysoké učení technické, 2000 [cit. 2019-05-16]. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1736-6.
- [6] JURA, Pavel. *Signály a systémy: Část 3: Diskrétní signály a systémy*. 2. opr. vyd. Brno: Jura, 2010, 89 s.
- [7] BERNAT, Petr. *MĚŘENÍ VÝKONU V SOUSTAVĚ MĚNIČ - MOTOR* [online]. In: . Ostrava: Bernat, 2001, s. 6 [cit. 2017-01-20].
- [8] AUTORSKÝ ČLÁNEK, . Co je bočník a k čemu slouží?. *ProfiElektrika.cz* [online]. profiElektrika.cz, 2015 [cit. 2017-01-20].

- Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-02-05.1331239165>
- [9] KOLEKTIV AUTORŮ, . *Měřicí transformátor proudu* [online]. In: . profiElektrika.cz, b.r. [cit. 2017-01-20]. ISSN 1212-9933.
- [10] VOJÁČEK, Antonín. Co je, k čemu je a jak funguje Rogowského cívka?. *Automatizace.hw.cz* [online]. 2007 [cit. 2017-01-20].
Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>
- [11] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2731-7.
- [12] Měřič spotřeby elektrické energie DT-26. In: *GM ELECTRONIC* [online]. GM electronic, spol. s.r.o., 1990–2019 [cit. 2019-01-06].
Dostupné z: <https://www.gme.cz/meric-spotreby-elektricke-energie-dt-26>
- [13] MARGOLIS, Michael. *Arduino cookbook*. 2nd ed. Sebastopol, Calif.: O'Reilly, 2012. ISBN 978-1-449-31387-6.
- [14] Compare board specs. *ARDUINO* [online]. 2018 [cit. 2019-01-06].
Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Products/Compare>
- [15] EVANS, Brian. *Beginning Arduino programming*. New York: Distributed to the book trade worldwide by Springer Science Business Media, 2011. ISBN 978-1-4302-3777-8.
- [16] ARDUINO UNO REV3: Code: A000066. *ARDUINO* [online]. b.r. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [17] Arduino Uno. *Components101* [online]. Components101, 2019 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://components101.com/microcontrollers/arduino-uno>

- [18] *15SQ045: SCHOTTKY Diodes* [online]. Ed. 2. YANGZHOU YANGJIE SEMICONDUCTOR CO.,LTD, b.r. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.223-168.1.pdf>
- [19] *MAX44250/MAX44251/MAX44252: 20V, Ultra-Precision, Low-Noise Op Amps* [online]. Maxim Integrate, b.r. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX44250-MAX44252.pdf>
- [20] M., Luboš. LCD Displej. *ARDUINO NÁVODY: Webový magazín o ARDUINU* [online]. Havlíčkův Brod: ECLIPSE s.r.o., 2016 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/zaciname-s-arduinem/lcd-displej.html>
- [21] Arduino LCD Shield 16x2 a tlačítka. *Arduino: Návod* [online]. Havlíčkův Brod, 2018 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/arduino-lcd-shield-16x2-a-tlacitka.html>
- [22] *ARDUINO: Příručka programátora* [online]. Praha: hobbyrobot.cz, b.r. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.hobbyrobot.cz/wp-content/uploads/ArduinoPriruckaProgramatora.pdf>
- KOLOUCH, Petr. Koncept smart-meteringu pro domácnost [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/104825>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Michal Vrána.

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

<i>FEKT</i>	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
<i>VUT</i>	Vysoké učení technické v Brně
<i>PWM</i>	pulzně šířková modulace
<i>Wi-Fi</i>	bezdrátová komunikace v počítačových sítích
<i>SPI</i>	sériové periferní rozhraní
<i>I_{ref}</i>	vyčtená hodnota z registru pro měření proudu
<i>U_{ref}</i>	vyčtená hodnota z registru pro měření napětí

Symboly:

<i>u</i>	okamžité napětí	(V)
<i>i</i>	okamžitý proud	(A)
<i>U</i>	napětí	(V)
<i>I</i>	proud	(A)
<i>R</i>	odpor	(Ω)
<i>C</i>	kondenzátor	(F)
<i>p</i>	okamžitý výkon	(W)
<i>P</i>	průměrný výkon za čas	(W)
<i>E</i>	spotřebovaná elektrická energie	(Ws)
ω_s	vzorkovací úhlová frekvence	(rad/s)
ω_{smax}	maximální úhlová frekvence signálu	(rad/s)
<i>T_s</i>	vzorkovací perioda	(s)
<i>f_s</i>	vzorkovací frekvence	(Hz)
<i>t</i>	čas měření	(s)
<i>I_{ef}</i>	efektivní proud	(A)
<i>U_{ef}</i>	efektivní napětí	(A)
<i>cosφ</i>	účinník	(–)
<i>K_u</i>	napěťové zesílení	(–)
<i>C_i</i>	proudová korekční konstanta	(–)
<i>C_u</i>	napěťová korekční konstanta	(–)
<i>S</i>	zdánlivý výkon	(VA)