

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra počítačů

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jan Bönisch**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Výpočetní technika

Název tématu: **Realizace firmware měřicího jádra elektroměru**

Pokyny pro vypracování:

Realizujte firmware měřicího jádra třífázového čtyřkvadrantního elektroměru. Toto měřicí jádro bude využito jako reálný výrobek nasazený v síti AMM. Měřicí jádro bude měřit napětí, proud a činný a jalový výkon. Vyberte klíčové součástky systému, analyzujte, navrhnete a implementujte firmware měřicího jádra a následně ověřte přesnost měření na testovacím hardwaru.

Všechny části projektu budou pečlivě dokumentovány v souladu se zvyklostmi softwarového inženýrství. Součástí práce bude také příručka uživatele.

Seznam odborné literatury:

- [1] HAASZ,V., SEDLÁČEK,M. Elektrická měření (Přístroje a metody).. ČVUT Praha,2003. ISBN 80-01-02731-7.
- [2] Vedral, J. - Fischer, J.: Elektronické obvody pro měřicí techniku, Vydavatelství ČVUT,Praha 1999, vydání 2., 340 s., ISBN 80-01-02966-2
- [3] Vladimír Haasz, Jaroslav Roztočil, Jiří Novák: Číslicové měřicí systémy, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000, vydání 2., 315 s.
- [4] tištěná nebo na internetu dostupná firemní dokumentace Texas Instruments a Microchip

Vedoucí: Ing. Martin Molhanec, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2013/2014

doc. Ing. Miroslav Šnorek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 9. 4. 2013

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra počítačů



Diplomová práce

Realizace firmware měřicího jádra elektroměru

Bc. Jan Bönisch

Vedoucí práce: Ing. Martin Molhanec, CSc.

Studijní program: Elektrotechnika a informatika, strukturovaný magisterský

Obor: Informatika a výpočetní technika

Praha 2014

Poděkování

Největší poděkování patří mé rodině, bez jejíž podpory by moje studium nebylo vůbec možné. Poděkování patří také zaměstnavateli, firmě ZPA Smart Energy, a.s., za vstřícný přístup a podporu mého studia. A poděkování patří také Ing. Martinu Molhancovi, vedoucímu práce, za jeho vstřícnou pomoc při tvorbě této práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 2.1.2014

.....

Abstract

This master thesis deals with the three-phase four-quadrant electricity meter metering core firmware design. Basic goal and fundamental demands are defined in the thesis introduction. Several evaluation kit variants are discussed from the circuit design point of view in the next section. The analytical section of the thesis introduces all the necessary electrical quantities measurement methods and describes basic measuring circuits' abilities. Next section (design) deals with the theoretical fundamentals implementation and brings bit-demand analysis of the metering core computations. Implementation chapter defines necessary data structures and functions for the quantities computations and other functionalities interface. Last chapter presents testing and verification results which were performed on one of the evaluation kits.

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem firmware měřicího jádra třífázového čtyřkvadrantního elektroměru. V úvodní části jsou definovány základní požadavky a následně diskutovány základní varianty obvodového provedení ladícího vzorku. Analytická část práce uvádí do měření pro tuto práci důležitých elektrických veličin a popisuje základní možnosti měřících obvodů. Návrhová část se zabývá implementací teoretických základů a analýzou bitové náročnosti těchto výpočtů. Implementační kapitola definuje datové struktury a funkce jak pro výpočet, tak rozhraní pro další funkcionality. V závěru práce pak kapitola testování ověřuje funkčnost celého řešení měřením na ladícím vzorku.

Obsah

1 Úvod.....	13
2 Úvodní studie.....	15
2.1 Současný stav.....	15
2.2 Požadavky.....	15
2.2.1 Funkční.....	15
2.2.2 Nefunkční.....	16
2.3 Návrh řešení.....	16
2.4 Studie proveditelnosti.....	20
2.5 Rizika.....	21
3 Analýza.....	24
3.1 Měření elektrických veličin.....	24
3.1.1 Elektromechanické systémy.....	24
3.1.2 AD převodníky.....	25
3.1.2.1 Převodníky s postupnou aproximací.....	25
3.1.2.2 Převodníky typu Σ - Δ	25
3.2 Měření proudu – proudové převodníky.....	26
3.2.1 Odporový převodník, bočník.....	26
3.2.2 Proudový transformátor.....	26
3.2.3 Rogowského cívka.....	27
3.2.4 Hallova sonda.....	27
3.2.5 Efektivní hodnota.....	27
3.3 Měření napětí.....	28
3.3.1 Efektivní hodnota.....	28
3.3.2 Měření pomocí AD převodníku.....	28
3.4 Měření výkonu.....	29
3.4.1 Teorie, stejnosměrný výkon, střídavý výkon.....	29
3.4.2 Mechanické systémy.....	30
3.4.3 Elektronické systémy.....	30
3.5 Měření energie.....	30
3.5.1 Teorie, stejnosměrné a střídavé průběhy napětí a proudů.....	30
3.5.2 Mechanické systémy.....	30
3.5.3 Elektronické systémy.....	31
3.5.4 Třífázové měřicí systémy.....	32
4 Použité metodiky a technologie.....	33
4.1 Ladění na HW úrovni.....	33
4.2 Vývojové prostředí.....	33
4.3 Zálohování.....	34
4.4 Spolupráce více programátorů.....	34
5 Návrh.....	36
5.1 Blokové schéma ladícího přípravku.....	36
5.2 Diagram aktivity algoritmu měření.....	37
5.3 Firmware.....	38
5.3.1 Činná energie.....	38
5.3.2 Měření jalové energie.....	39

5.3.3	Neharmonické průběhy napětí a proudu.....	39
5.3.4	Definice požadovaných výstupních hodnot.....	39
5.3.5	Implementace teoretických vztahů.....	40
5.3.5.1	Výpočty s každou sadou vzorků.....	40
5.3.5.2	Výpočty na konci měřicí periody.....	41
1	Výpočet efektivního napětí.....	42
2	Výpočet efektivního proudu.....	42
3	Přírůstek energie za měřicí periodu.....	44
5.3.6	Analýza datových typů pro optimální práci s pamětí.....	45
6	Implementace.....	47
6.1	Definice datových struktur a rozhraní.....	47
6.1.1	Struktury pro práci v právě probíhající měřicí periodě.....	47
6.1.1.1	Vzorek napětí a proudu jedné fáze.....	47
6.1.1.2	Sada vzorů napětí a proudů pro další zpracování.....	47
6.1.2	Struktury pro uložení rozpracovaných dat během měřicí periody.....	48
6.1.3	Struktury pro uložení posledně vypočítaných okamžitých hodnot.....	48
6.1.3.1	Popis přírůstku energie.....	48
6.1.3.2	Společná struktura probíhající i ukončené periody.....	48
6.1.4	Struktury pro uložení energetických a s nimi spojených časových registrů.....	49
6.1.4.1	Sada energetických registrů.....	49
6.1.4.2	Časové registry.....	49
6.1.4.3	Celková paměť kumulativních registrů.....	50
6.1.5	Ostatní.....	50
6.1.5.1	Generátory impulsních výstupů.....	51
6.2	Základní struktura FW.....	51
6.3	Hierarchie přerušení.....	51
6.4	Popis realizace sběru vzorků.....	52
6.5	Zpracování vzorků.....	53
6.6	Měřicí perioda.....	54
6.7	Generátory impulsních výstupů.....	54
6.8	Měření frekvence.....	55
6.9	Hlavní smyčka.....	56
6.10	Práce s pamětí.....	57
6.11	Bezpečné úložiště.....	58
6.11.1	Inicializace.....	58
6.11.2	Ukončení.....	59
6.11.3	Aktualizace.....	59
6.11.4	Nulování.....	59
7	Testování.....	60
7.1	Testovací přípravek.....	60
7.2	Ověření měření činné energie.....	64
7.3	Ověření měření jalové energie.....	67
7.4	Ověření měření s jedním oscilátorem.....	69
8	Závěr.....	71
9	Zkratky a vysvětlivky.....	72
10	Literatura.....	73
11	Obsah příloženého CD-ROM.....	74

Seznam obrázků

Obrázek 1: Elektroměr a funkcionality.....	16
Obrázek 2: Zaměření diplomové práce.....	17
Obrázek 3: Elektroměr se specializovaným integrovaným obvodem.....	17
Obrázek 4: Speciální integrované obvody pro měření s universálním mikroprocesorem.....	18
Obrázek 5: Universální mikroprocesor s externími AD převodníky.....	19
Obrázek 6: Universální mikroprocesor s integrovanými AD převodníky.....	19
Obrázek 7: Blokové schéma převodníku s postupnou aproximací.....	25
Obrázek 8: Blokové schéma Σ - Δ převodníku.....	26
Obrázek 9: Proudový transformátor, zdroj [13].....	26
Obrázek 10: Rogowského cívka, zdroj [14].....	27
Obrázek 11: Hallova sonda, zdroj [15].....	27
Obrázek 12: Princip funkce elektromechanického indukčního elektroměru, zdroj [1].....	31
Obrázek 13: Blokové schéma ladícího přípravku pro jednofázový elektroměr.....	36
Obrázek 14: Blokové schéma ladícího přípravku pro třífázový elektroměr.....	37
Obrázek 15: Diagram aktivity.....	38
Obrázek 16: Hierarchie přerušení.....	52
Obrázek 17: Schema třífázové měřicí desky.....	61
Obrázek 18: Třífázová měřicí deska v krabici.....	61
Obrázek 19: Schéma desky s mikroprocesorem.....	62
Obrázek 20: Deska s mikroprocesorem.....	63
Obrázek 21: Měřicí přípravek.....	63
Obrázek 22: Přesnost měření činné energie v 1. fázi.....	65
Obrázek 23: Přesnost měření činné energie v 2. fázi.....	65
Obrázek 24: Přesnost měření činné energie v 3. fázi.....	66
Obrázek 25: Přesnost měření činné energie ve všech fázích.....	66
Obrázek 26: Přesnost měření jalové energie v 1. fázi.....	67
Obrázek 27: Přesnost měření jalové energie v 2. fázi.....	68
Obrázek 28: Přesnost měření jalové energie v 3. fázi.....	68
Obrázek 29: Přesnost měření jalové energie ve všech fázích.....	69
Obrázek 30: Přesnost měření činné energie ve všech fázích s jedním oscilátorem.....	70

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání vlastností základních variant řešení elektroměru.....	20
Tabulka 2: Analýza rizik dle FMEA.....	22
Tabulka 3: Význam symbolů ve vztazích pro práci se sadou vzorků.....	40
Tabulka 4: Význam symbolů ve vztazích pro výpočty na konci měřicí periody.....	41
Tabulka 5: Analýza bitové náročnosti výpočtu energie.....	42
Tabulka 6: Analýza bitové náročnosti výpočtu efektivního napětí.....	43
Tabulka 7: Analýza bitové náročnosti upraveného výpočtu efektivního napětí.....	43
Tabulka 8: Analýza bitové náročnosti výpočtu efektivního proudu.....	44
Tabulka 9: Analýza bitové náročnosti upraveného výpočtu efektivního proudu.....	45
Tabulka 10: Maximální parametry pro návrh bitové šíře energetických registrů.....	46
Tabulka 11: Ukázky pro posouzení návrhu bitové šířky energetických registrů.....	46
Tabulka 12: Návrh bitové šířky energetických registrů z hlediska přetečení.....	46

1 Úvod

Energie v různých podobách se stává čím dál cennější komoditou na světových trzích. Proto jsou na její distribuci a prodej kladeny stále větší nároky. Je třeba neplýtvat energií nejen na straně odběratelů, ale také minimalizovat ztráty při její distribuci. Proto vznikají systémy, které se snaží tyto požadavky plnit a přinášet i další možnosti. Doposud se podrobnější sledování provádělo pouze u velkých odběratelů energií. Těch ovšem není velké množství a proto bylo poměrně snadné realizovat potřebné funkcionality a přenosové kanály, například pomocí vytáčeného spojení, případně pevných linek přímo mezi měřicím místem a datovým centrem. V naší legislativě se pravděpodobně brzy objeví požadavek na takovéto systémy pro střední odběry a je otázkou času, kdy bude třeba komunikovat se všemi měřicími místy i v maloobdobě, především v domácnostech. Na systémy tohoto typu jsou kladeny diametrálně jiné požadavky než na prapůvodní sledování velkoobdobě energií. Je třeba vyvinout vhodné měřicí přístroje za přijatelnou cenu, vybudovat dostatečně robustní síť pro potřeby takového systému a řešit spoustu dalších problémů, které takto komplexní systém přináší.

Má práce se soustředí na návrh nového elektroměru, který bude součástí takového systému. I přes všechny funkční a komunikační požadavky musí elektroměr umět především měřit. Musí měřit nejenom elektrickou energii, ale z pohledu systému budou zajímavé další hodnoty, které bude možno odvodit z okamžitých hodnot napětí, proudu a výkonu. Budu se zabývat základním obvodovým návrhem, resp. výběrem nejdůležitějších součástí a pak především návrhem a realizací programového vybavení tzv. měřicího jádra čtyřkvadrantního elektroměru. Výstupem budou tzv. energetické registry, tedy ten nejdůležitější údaj, který elektroměr poskytuje, a dále pak výše zmíněné okamžité hodnoty napětí, proudu, výkonu, účinnosti a frekvence. Závěrem práce bude realizace funkčního vzorku a ověření jeho funkce a přesnosti měření.

Následuje stručné shrnutí následujících kapitol. Ve druhé kapitole bude nastíněna aktuální situace v oblasti statických elektroměrů, shrnuty základní požadavky na jejich vlastnosti, popsány možnosti řešení a diskutována vybraná varianta. Analytická třetí kapitola ve stručnosti uvede základní potřebné postupy a teoretické vztahy potřebné pro měření elektrických veličin. Čtvrtá kapitola se bude věnovat volbě technologií použitých při tvorbě a ladění firmware. Pátá kapitola již podrobněji konkretizuje návrh měřicího jádra z pohledu aplikace teoretických postupů. Šestá kapitola podrobněji popíše vlastní implementaci

nejdůležitějších kroků. Sedmá kapitola zhodnotí výsledky základních měření ověřující správnost funkce z pohledu elektroměru. Poslední osmá kapitola zhodnotí postup a výsledek celé práce a nastíní možnosti dalšího rozšiřování.

2 Úvodní studie

2.1 Současný stav

V oblasti výroby elektroměrů panuje na celosvětovém trhu velká konkurence. Namátkou uvedu několik velkých výrobců: Landis&Gyr, Siemens, Echelon, Iskra. Všechny moderní měřicí přístroje už jsou tzv. statické elektroměry, což znamená, že už se nejedná o nějakou formu elektromechanických přístrojů, ale jedná se o řešení založené na číslicovém zpracování signálů.

Velká většina z těchto výrobců se snaží zachytit trend chytrých elektroměrů s dálkovou komunikací. V zásadě jsou na výběr dvě možnosti.

První z nich je jen výroba samostatného elektroměru, jehož vlastnosti jsou přizpůsobeny nějakému obecnějšímu standardu, jakým je například PLC komunikace PRIME, nad kterou je dále využíváno normy DLMS. Takovýto výrobek pak může být snadno nasazen v infrastruktuře jiného výrobce, případně v kombinaci s produkty více výrobců. Nerespektování obecnějších standardů lze kompenzovat jedině maximální otevřeností, kvalitní dokumentací a výraznou podporou při použití takového výrobku jinou firmou.

Druhou možností je snaha o vývoj ucelenějšího systému, nejen samotného měřicího přístroje. Otázkou však zůstává do jaké úrovně, resp. jak rozsáhlý by tento systém měl být. Tato varianta také umožní využití proprietárních technologií v určitých úrovních systému bez nutnosti publikování svého know-how, i když se takovýto postup může pro některé potenciální zákazníky jevit jako nevýhoda. Jisté respektování obecnějších standardů se však předpokládá na rozhraní mezi vlastním systémem a nadřazeným systémem, například už zavedeným informačním systémem u energetických společností a podobně.

2.2 Požadavky

Vzhledem k rozsahu a cíli práce se budeme zabývat jen požadavky na samotné měřicí jádro budoucího elektroměru.

2.2.1 Funkční

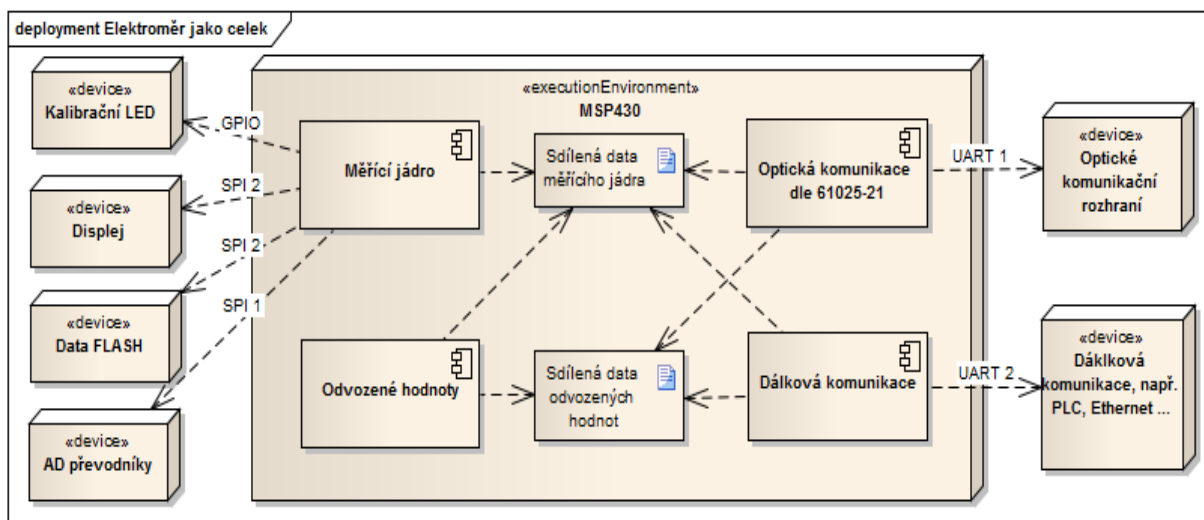
- jednofázové a třífázové měření
- měření napětí
- měření proudu

- měření činného a jalového výkonu
- měření činné energie
- měření jalové energie ve 4 kvadrantech
- dva kalibrační optické výstupy

2.2.2 Nefunkční

- splňuje požadavky norem EN 50470-1, EN 50470-3, EN 62053-23 a EN 62052-11
- měření v činné energie ve třídách přesnosti A nebo B
- měření jalové energie ve třídě přesnosti 2 nebo 3
- implementace v jazyku C
- důraz na celkově nízkou cenu budoucího elektroměru
- jednoduché a snadno použitelné rozhraní po další funkcionalitě elektroměru

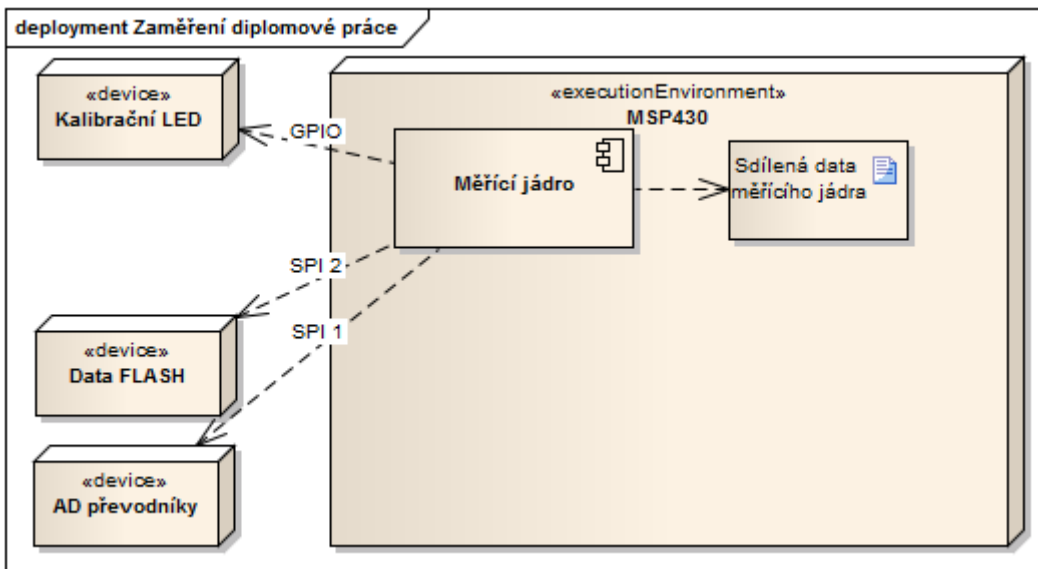
2.3 Návrh řešení



Obrázek 1: Elektroměr a funkcionalita

Obrázek 1 ukazuje základ zamýšleného elektroměru. Jak je vidět, měřicí jádro obstarává nejen základní měření, ale i spolupráci s dalšími součástkami, možno však lépe říci ovladače dalších součástek připojených k mikroprocesoru. Ostatní funkcionality jsou závislé na měřícím jádře, resp. na jeho výpočtech a rozhraní v podobě funkcí.

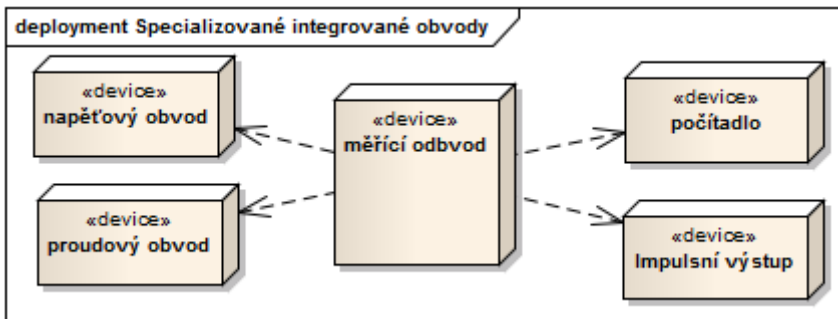
Zde je dobré zmínit funkcionalitu odvozených hodnot. Tato komponenta na základě dat dodávaných měřícím jádrem poskytuje další důležité hodnoty - uvedme například zdánlivý výkon, účinník, různé druhy třířákových veličin, kterými jsou třířákový proud, výkon apod.



Obrázek 2: Zaměření diplomové práce

Obrázek číslo 2 je částí celkového návrhu, který je cílem diplomové práce. Porovnáním s předchozím obrázkem je patrné, že se jedná se o nejdůležitější část, bez které nelze vybudovat funkční elektroměr.

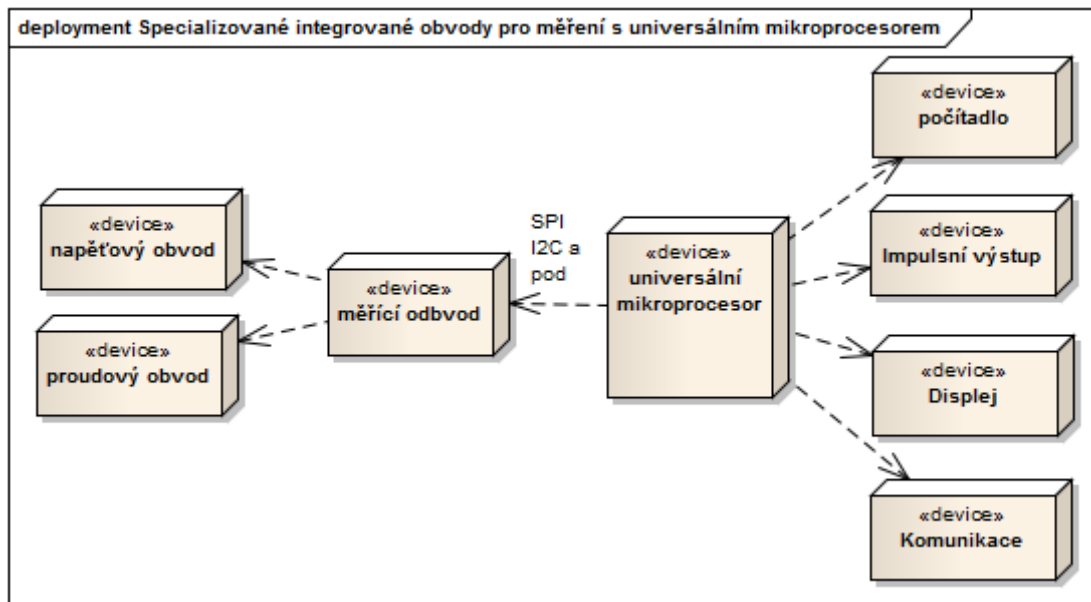
K návrhu hardware elektroměru je možno přistoupit mnoha způsoby, v následujícím textu budou prodiskutovány základní varianty, ze kterých je možno volit.



Obrázek 3: Elektroměr se specializovaným integrovaným obvodem

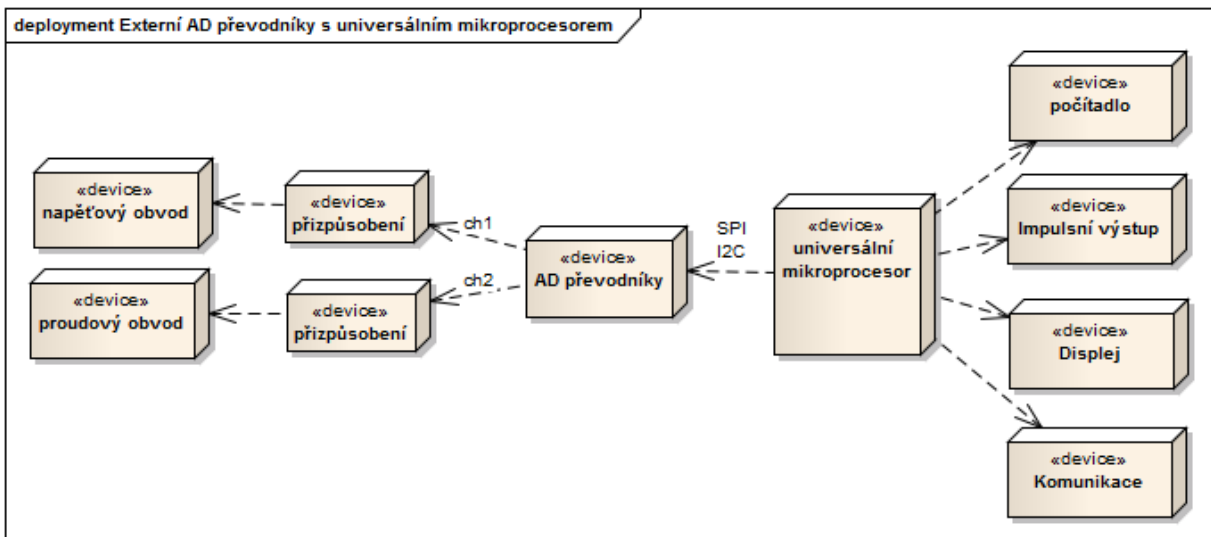
Řada výrobců vyráběla nebo vyrábí jednoúčelové obvody, na jejichž vstupy se přivedou vhodně upravené průběhy napětí a proudu, jak ukazuje obrázek číslo 3. Jako výstup tyto obvody obvykle poskytují impulsní výstup, kde je buď pevně, nebo případně volitelně nastavená energie odpovídající jednomu pulsu. Dále mohou tyto obvody umět řídit krokové motorky, ke kterým je připojeno mechanické počítadlo, ve výjimečných případech pak umí řídit displej s tekutými krystaly. Tyto obvody byly využívány v prvních konstrukcích statických elektroměrů, a to především z důvodu nízkých výkonů cenově dostupných universálních mikroprocesorů a AD převodníků.

Vývoj jednoúčelových a vysoce specializovaných čipů je z ekonomického hlediska velmi náročný a vyžaduje následně velké objemy výroby. Také přináší problém s modifikací a doplňováním funkcionalit. Obrázek číslo 4 sice obsahuje specializovaný měřicí obvod, ten je však doplněn universálním mikroprocesorem.



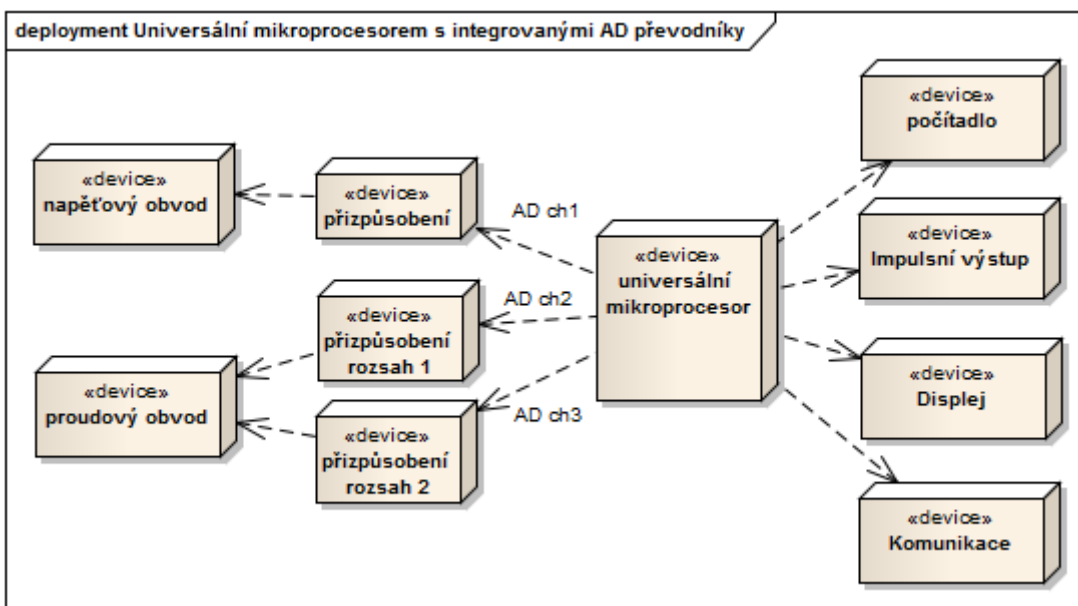
Obrázek 4: Speciální integrované obvody pro měření s universálním mikroprocesorem

Podobně jako předchozí kategorie obvodů i zde jako vstup slouží vhodně upravené obrazy okamžitého napětí a proudu. Avšak tyto obvody obsahují nějaké rozhraní pro komunikaci s universálním mikroprocesorem, např. rozhraní SPI nebo I2C. Pomocí tohoto rozhraní je možné zjistit nejen přírůstek energie, ale například také efektivní hodnoty napětí a proudu a další informace.



Obrázek 5: Universální mikroprocesor s externími AD převodníky

Se vzrůstajícím výkonem cenově dostupných mikroprocesorů se nabízela další možnost, a tou je použití vyhovujícího externího AD převodníku, respektive jejich potřebného počtu, jak ukazuje obrázek číslo 5. Veškerá tíha výpočtu, především násobení pak byla přenesena na mikroprocesor.



Obrázek 6: Universální mikroprocesor s integrovanými AD převodníky

Postupně jsou mikroprocesory vybavovány množstvím periférií přímo na čipu, mezi které patří i AD převodníky a proto již bylo možno použít variantu na obrázku číslo 6 s jedním „chytrým“ obvodem doplněným o potřebné převodníky měřených napětí a proudů, . Zpočátku je však rozlišení převodníků příliš malé pro realizaci elektroměru, proto bylo třeba rozlišení zvýšit jiným způsobem, například měřením na několika rozsazích, případně s řízeným

zesílením vstupních zesilovačů. Toto však přináší nejen komplikace a zdražení hardware, ale má také vliv na zatížení procesoru, protože je třeba zpracovávat vzorky proudu v obou rozsazích a na konci měřicí periody potom na základě detekce přetečení zvolit, které hodnoty budou použity pro další výpočty.

2.4 Studie proveditelnosti

V současné době panuje na trhu čipů vhodných pro konstrukci elektroměru poměrně velká konkurence. Je možno pozorovat snahu výrobců o přizpůsobení se požadavkům trhu a je zajímavé sledovat různé koncepce od řešení typu stovebnice až po kompletní jednočipová řešení.

Hned v úvodu bylo zamítnuto řešení s výpočtem pomocí Fourierovy transformace. Není požadována velká přesnost při měření jalové energie a proto bude využita jednodušší metoda, která měří jen jalovou energii první, ale také dominantní harmonické složky. Tato volba umožní výběr méně výkonných, ale hlavně levnějších mikroprocesorů.

Následující tabulka stručně uvádí další možnosti, jejichž podrobnější popis bude následovat.

Základní návrh	Rozlišení převodníků	Další nutný HW	Modifikace výpočtu	Další funkcionality
samostatné specializované obvody	vyšoké	minimální	ne	ne
externí specializované obvody	vyšoké	minimální	ne	ano
vše v jednom čipu	nízké	nutno více rozsahů přizpůsobení	ano	ano
externí převodníky	vyšoké	přizpůsobení	ano	ano

Tabulka 1: Porovnání vlastností základních variant řešení elektroměru

Mezi nejdůležitější volby patří to, zdali bude použito jednočipové řešení, nebo se návrh určitým způsobem rozpadne na několik částí, kde nastupuje také cenové hledisko výsledného návrhu. Tato cena však neobsahuje jen cenu součástek, ale projevuje se i následná složitost při výrobě. Zde je nejvýraznějším parametrem kalibrace hotového elektroměru. Pokud by bylo použito řešení s více rozsahy, pak je třeba kalibrovat každý rozsah zvlášť, což přináší celkově delší dobu potřebnou pro výrobu přístroje.

V době výběru nebylo k dispozici příliš jednočipových řešení s převodníkem s dostatečným rozlišením. V prvním kole byl vytypován obvod MSP430F6733, který měl 3 AD

převodníky Σ - Δ s rozlišením 24 bitů a jeden dvanáctibitový SAR převodník s multiplexorem. S tímto obvodem by podle simulací bylo možno realizovat elektroměr požadovaných vlastností. Bohužel však multiplexor u SAR převodníku neumožňoval měřit více než 3 externí vstupy, což je pro třífázový elektroměr nedostačující, protože je třeba měřit také napětí napájecího zdroje a teplotu.

Nakonec zvítězilo více-čipové řešení, tedy universální mikroprocesor společně se sadou externích 24-bitových převodníků Σ - Δ v dalším čipu. Důvody této volby jsou především tyto:

1. Jednodušší návrh analogové části, kdy se mohou převodníky umístit co nejbližší ke snímacím a přizpůsobovacím obvodům, a dál již signály putují v číslicové podobě do mikroprocesoru.
2. Objevila se možnost dodávek levných LCD displejů s radičem přímo na skle, tím odpadla nutnost LCD radiče v mikroprocesoru.
3. Velmi příznivá cena externích převodníků firmy Microchip a to jak ve verzi se 6, tak i se 3 převodníky (MCP3903 resp. MCP3901).

Následně pak byl vybrán mikroprocesor MSP430F5437.

2.5 Rizika

Následující analýza rizik FMEA se pokusí určit a pojmenovat návrhová rizika, která mohou vzniknout jak při vývoji měřícího jádra, tak následně použitím měřícího jádra v základním provedení elektroměru.

Potenciální porucha	Potenciální následky poruchy	Závažnost	Potenciální příčiny / mechanismy poruch	Vyskyt	Odhadnutí	RPN	Doporučené opatření	Zodpovědnost
Chyba v teoretickém základu	Projekt nelze realizovat	10	Nepochopení základních fyzikálních jevů	1	1	10	Studium fyziky a matematiky	FW
Chyba v implementaci teoretických vztahů	Nepřesnost měření	7	Nedostatečné pochopení teoretických podkladů	3	2	42	Důkladná teoretická příprava před implementací	FW
Chyba v návrhu ladícího přípravku	Nepřesnost měření nebo celková nefunkčnost	5	Nedostatek zkušeností s novými součástkami	5	2	50	Průběžné provizorní opravy a zároveň zahrnutí opravy do další verze	FW
Přetečení při výpočtu průběžných hodnot	Nepřesnost měření	3	Chybný návrh datových struktur	4	3	36	Důkladné ověření přesnosti v celém rozsahu provozních parametrů	FW
Chyby v přenosu dat mezi převodníky a mikroprocesorem	Nepřesnost měření nebo celková nefunkčnost	6	Rušení přenosu dat	5	3	90	Testování citlivosti na rušení a její operativní odstraňování provizorními úpravami	FW
Nedostatečný výkon mikroprocesoru	Nelze pokračovat se stávajícím mikroprocesorem	7	Špatný odhad výpočetní náročnosti	3	2	42	Důkladná teoretická a analytická příprava	FW
Nedostatek paměti RAM	Nelze pokračovat se stávajícím mikroprocesorem	7	Špatný odhad paměťové náročnosti	3	2	42	Důkladná teoretická a analytická příprava	FW
Nedostatek paměti FLASH pro program a konstanty	Nelze pokračovat se stávajícím mikroprocesorem	7	Špatný odhad paměťové náročnosti	3	2	42	Důkladná teoretická a analytická příprava	FW
Vzájemné ovlivnění různých částí kódu	Nepřesnost měření nebo celková nefunkčnost	4	Nepozornost při implementaci, přehlédnutí	8	6	192	Průběžné a pečlivé testování při výraznějších změnách	FW

Tabulka 2: Analýza rizik dle FMEA

Na počátku vývoje se projektu účastní relativně malá skupina vývojářů, proto zodpovědnost je hrubě rozdělena mezi vývojáře hardware a firmware. Po odladění základu bude skupina nutně rozšířena o další vývojáře, tento stav však už není zaměřením této diplomové práce.

Z tabulky vyplývá, že největší riziko je ve vzájemném ovlivnění různých částí kódu. Toto zjištění potvrzují i praktické zkušenosti. Chyby tohoto typu se velmi špatně hledají, často je velmi obtížné chybu zopakovat, proto je třeba věnovat pozornost průběžnému testování. RPN hodnocení tohoto rizika ukazuje obecnou potřebu důkladného zkoušení a testování po celou dobu vývoje.

Dalším závažným rizikem je rušení přenosu dat mezi mikroprocesorem a převodníkem. V obvyklých provozních podmínkách se tak silná rušení nevyskytují, ovšem je třeba dodržet požadavky norem a zařízení se musí vypořádat s předepsanými ztíženými podmínkami. Vzhledem k tomu, že přenos dat je pro vlastní měření nejdůležitější, je třeba věnovat

zvýšenou pozornost návrhu plošného spoje a dalšímu obvodovému řešení.

Třetím rizikem podle analýzy se jeví chyba v návrhu ladícího přípravku. Vzhledem k tomu, že se pracuje s doposud nepoužívanými součástkami, dá se předpokládat, že první verze ladícího přípravku bude zatížena chybami, které bude nutno provizorně odstraňovat. Výskyt těchto chyb ve fázi ladícího přípravku je ovšem cennou zkušeností, která najde uplatnění při návrhu finálního výrobku.

Zajímavé je, že nejnižší RPN má Chyba v teoretickém základu přes to, že by taková chyba měla fatální dopad na projekt jako celek. Způsoby měření a matematické postupy jsou však dobře ověřeny, třeba už existencí konkurenčních výrobků ať už současných, nebo předchozích řešení se specializovanými obvody.

3 Analýza

Protože výsledek práce přímo souvisí s měřením elektrických veličin, popíšeme si v úvodu možnosti a způsoby měření.

3.1 Měření elektrických veličin

3.1.1 Elektromechanické systémy

Jako první přístroje byly používány výhradně přístroje s elektromechanickým systémem. Principem těchto přístrojů je převod měřené veličiny na její silové působení nebo kroucí moment, jehož závislost na měřené veličině je známá. Změna polohy pohyblivé části pak ukazuje hodnotu na stupnici. Nejčastěji se vyskytují magnetoelektrické přístroje, u kterých je pohyblivá část realizována cívkou, která se nachází v magnetickém obvodu permanentního magnetu. Proud procházející cívkou pak vyvolá kroucí moment, který působí proti síle spirálových pružin, kterými je do této cívky proud přiváděn. Takto lze zkonstruovat nejjednodušší stejnosměrný ampérmetr. Voltmetr je pak realizován stejným mechanickým systémem, tedy ampérmetrem, k němuž se sériově připojí předřadný rezistor. Při měření střídavých veličin s nulovou stejnosměrnou složkou tento přístroj ukazuje nulovou výchylku, proto je třeba přidat usměrňovač. S touto modifikací pak přístroj ukazuje střední hodnotu signálu. Často se však stupnice kalibruje pro efektivní hodnotu definovaného průběhu, nejčastěji pro sinusový průběh.

Další skupinou jsou přístroje s termočlánkem. Jejich principem je to, že měřený proud prochází topným vodičem, který ohřívá termočlánek, jehož napětí pak odpovídá měřenému proudu. Výhodou tohoto systému je, že měří střídavý proud bez nutnosti použití usměrňovače, navíc poskytuje přímo efektivní hodnotu bez ohledu na průběh měřeného proudu.

Elektromagnetické přístroje využívají dvou feromagnetických segmentů, kde jeden je pohyblivý a druhý pevný. Oba tyto segmenty jsou souhlasně magnetovány cívkou a proto se navzájem odpuzují. Vyvolaný kroucí moment je opět vyvíjen proti pružině, která však nemusí být z vodivého materiálu.

Jako posledního zástupce v tomto neúplném výběru uvedeme přístroje s elektrodynamickým měřicím systémem. U těchto přístrojů je výchylka dána vzájemným působením pevné a pohyblivé cívky. Kroucí moment opět působí proti pružinám, kterými je přiváděn proud do pohyblivé cívky.

Všechny uvedené měřicí systémy převádějí měřenou veličinu na výchylku ukazatele. Pro

následné číslicové zpracování nejsou tedy příliš vhodné, bylo by nutné přístroj vybavit nějakým snímáním polohy pohyblivé části.

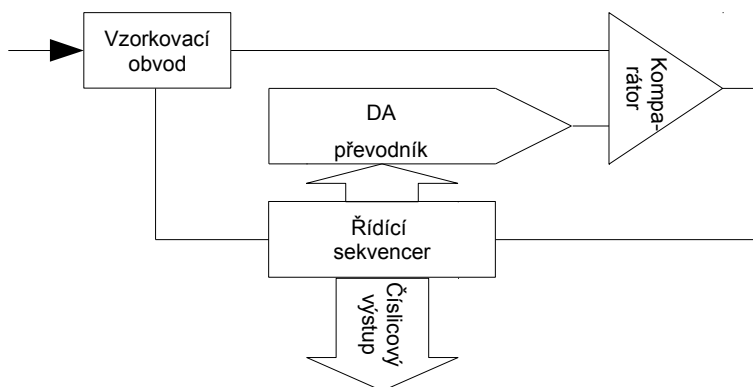
3.1.2 AD převodníky

AD převodník je obvod, který převádí vstupní spojitou veličinu na číselné hodnoty, které jsou diskrétní jak v hodnotě, tak v čase. Diskretizace hodnoty je dána tím, že převodník má definovaný počet bitů na výstupu, proto jsou snímané hodnoty kvantovány do tohoto rozlišení. Diskretizace v čase je dána tím, že samotný převod vyžaduje nějaký čas, a tento čas pak určuje maximální počet vzorků na jednotku času.

Existuje mnoho typů převodníků, pro tuto práci mají význam především 2 dále ve zkratce popisované typy.

3.1.2.1 Převodníky s postupnou aproximací

Tento převodník pracuje na principu porovnání měřeného napětí a napětí vytvářeného digitálně analogovým převodníkem, tedy napětí, jehož hodnota odpovídá kombinaci na jeho číslicovém vstupu. U tohoto typu převodníku je třeba měřenou hodnotu kvantovat v čase pomocí vzorkovacího obvodu. Tento obvod po dobu převodu udržuje stejnou hodnotu vstupního napětí, která byla na vstupu při zahájení převodu. Pomocí přídavných logických obvodů je v pevně daném počtu kroků nalezena číselná hodnota odpovídající napětí na výstupu vzorkovacího obvodu a tedy napětí, které bylo na jeho vstupu při zahájení převodu.

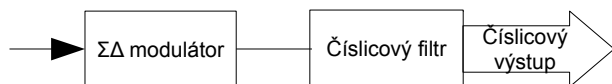


Obrázek 7: Blokové schéma převodníku s postupnou aproximací

3.1.2.2 Převodníky typu $\Sigma\text{-}\Delta$

Převodník využívá několika algoritmů číslicového zpracování, jejichž důkladný popis přesahuje rozsah této práce. Jeho funkci lze rozdělit na sigma-delta modulátor a číslicový filtr. Velmi zjednodušeně lze říci, že výstupem modulátoru je dvoustavový signál, jehož časový

průběh odpovídá měřenému napětí. Číslicový filtr pak tento signál zpracuje do výsledné číselné podoby. Velkou výhodou těchto převodníků je to, že díky svému principu dovedou potlačit šum vstupního signálu, jsou relativně jednoduché a poskytují velké rozlišení při rychlosti dostatečné pro konstrukci elektroměru.



Obrázek 8: Blokové schéma Σ - Δ převodníku

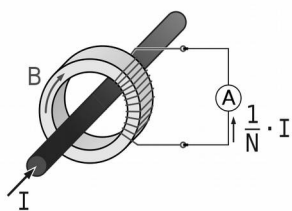
3.2 Měření proudu – proudové převodníky

S ohledem na cíl práce bude třeba umět měřit okamžitou hodnotu proudu protékajícího elektroměrem. Vzhledem k číslicovému zpracování odebíraných dat se bude jednat o převod proudu na napětí, které je následně snímáno AD převodníkem.

3.2.1 Odporový převodník, bočník

Nejjednodušší převodník využívající úbytku napětí na měřicím odporu, případně na měřicím odporu bočníku. Tento odpor je velmi malý. Nevýhodou tohoto měření je velký šum u malých proudů, a proto tedy omezený rozsah měřeného proudu. Hodí se pro proudy do cca 30A. Další velkou nevýhodou tohoto převodu je obtížná realizace 3F elektroměru, kdy z principu není možné galvanické spojení mezi měřicími odpory, a s tím spojené komplikace obvodové realizace. Výhodou je nízká cena.

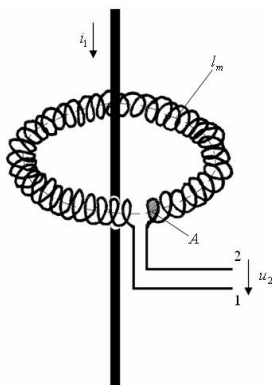
3.2.2 Proudový transformátor



Obrázek 9: Proudový transformátor, zdroj [13]

Vodič, kterým protéká proud je obklopen cívkou proudového transformátoru. Na výstup této cívky je připojen rezistor, který převádí proud vytvářený cívkou na napětí, které je následně snímáno AD převodníkem. V závislosti na provedení cívky je možné dosahovat relativně velkých proudových rozsahů, řádově od miliampér do stovek ampér. Tento způsob snímání umožňuje měření jen střídavých proudů. Realizace 3F elektroměru je díky galvanickému oddělení jednoduchá. Nevýhodou je vyšší cena.

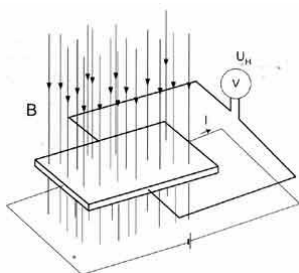
3.2.3 Rogowského cívka



Obrázek 10:
Rogowského cívka,
zdroj [14]

Podobně jako proudový transformátor, je i zde vodič protékán proudem a prochází toroidně vinutou cívkou. Tato cívka však oproti proudovému transformátoru je navinuta na nemagnetickém jádře. Výstupní napětí odpovídá derivaci okamžité hodnoty měřeného proudu a pro zjištění aktuálního průběhu je tedy nutné tento signál integrovat.

3.2.4 Hallova sonda



Obrázek 11: Hallova sonda, zdroj [15]

Sonda využívá Hallova jevu. Úzká polovodičová destička je protékána proudem. Pokud je tato destička vložena do magnetického pole, jsou náboje v destičce přeskupeny tak, že je možno naměřit tzv. Hallovo napětí. Magnetické pole u proudového snímače vzniká průchodem proudu vodičem a toto pole indukuje magnetický tok v jádře, v jehož vzduchové mezeře je umístěna Hallova sonda. Hallovo napětí je pak úměrné proudu procházejícímu měřicím vodičem.

3.2.5 Efektivní hodnota

U střídavých průběhů proudu, ať již harmonických nebo ostatních, je možno tyto průběhy

popisovat různými hodnotami. Je možno udávat střední hodnotu, maximální okamžitou hodnotu, také frekvenci a podobně. V energetické praxi se ustálilo použití takzvané efektivní hodnoty, která udává velikost stejnosměrného proudu, který způsobí stejné tepelné účinky na čistě odporové zátěži jako popisovaný střídavý průběh.

Výkon, který se na odporu přemění v teplo, je pro stejnosměrný proud dán vztahem:

$$P = U I_{ef} = R I_{ef}^2$$

Pro střídavý proud pak platí:

$$P = \frac{\int_0^T R i^2(t) dt}{T} = R \frac{\int_0^T i^2(t) dt}{T}$$

Z uvedených vztahů následně odvodíme efektivní proud:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{\int_0^T i^2(t) dt}{T}}$$

3.3 Měření napětí

3.3.1 Efektivní hodnota

Používání a odvození efektivní hodnoty napětí je obdobné jako u proudu, proto zde již uvedeme výsledný vztah.

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{\int_0^T u^2(t) dt}{T}}$$

3.3.2 Měření pomocí AD převodníku

Pro měření napětí v elektroměru pomocí AD převodníků není třeba žádných komplikovaných řešení. Elektroměr jako takový je galvanicky spojen se sítovým napětím, takže galvanické oddělení není nutno realizovat. Celý problém se tedy redukuje do podoby napět'ového děliče. Je však třeba dbát zvýšené pozornosti při volbě rezistorů, které budou pro dělič použity vzhledem k poměrně velkému napětí, které na nich bude. Obvykle postačí více sériově zapojených rezistorů, čímž se sníží jejich napět'ové namáhání.

3.4 Měření výkonu

3.4.1 Teorie, stejnosměrný výkon, střídavý výkon

Výkon ve stejnosměrném obvodu je definován vztahem:

$$P = U \cdot I$$

Pro střídavé obvody je třeba zavést pojem okamžitý výkon, který platí jen v definovaném čase:

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

Střední hodnotu výkonu dostaneme integrací předchozího vztahu.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$

Tato střední hodnota je také nazývána činným výkonem, tedy výkonem, který koná nějakou práci.

Pokud uvažujeme harmonické průběhy napětí a proudu, pak po dosazení a úpravách dojdeme ke vztahu

$$P = UI \cos \varphi$$

kde φ je fázový posun mezi napětím a proudem. Ze vztahu je patrné, že maximální hodnota výkonu je při nulovém fázovém posuvu.

Pro střídavé průběhy je dále zaveden pojem jalového výkonu:

$$P = UI \sin \varphi$$

I zde je ze vztahu patrné, že minimální jalový výkon je právě při nulovém fázovém posuvu.

Dále je definován zdánlivý výkon, který je dán vztahem:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Pro neharmonické průběhy je třeba uvažovat výkony všech harmonických složek:

$$P = U_0 I_0 \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n$$

$$Q = UI = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

kde D je deformační výkon.

3.4.2 Mechanické systémy

Násobení napětí a proudu je realizováno mechanickým provedením měřicího systému. Nejvíce používaný je elektrodynamický nebo ferodynamický měřicí systém, kde jedna cívka, obvykle ta pevná, je protékána měřeným proudem, a pohyblivá cívka snímá napětí.

3.4.3 Elektronické systémy

U elektronických systémů jsou v podstatě dvě možnosti. První možností je realizace násobení přímo měřícím obvodem. Výsledek násobení je možno poté zobrazit pomocí voltmetru, případně převést pomocí AD převodníku a dále jej zpracovávat číslicově. Druhou možností je pomocí dvou AD převodníků odděleně vzorkovat napětí a proud, a následné násobení a další výpočty již provádět číslicově, obvykle pomocí mikropočítače.

3.5 Měření energie

3.5.1 Teorie, stejnosměrné a střídavé průběhy napětí a proudů

Práce vykonaná elektrickým proudem za daný časový interval - nebo jinak řečeno přírůstek energie - za tento časový interval je pro stejnosměrný obvod dána vztahem:

$$\Delta W = P \cdot t_m$$

Pro střídavý obvod:

$$\Delta W = \int_0^{t_m} p(t) dt = \int_0^{t_m} u(t)i(t) dt$$

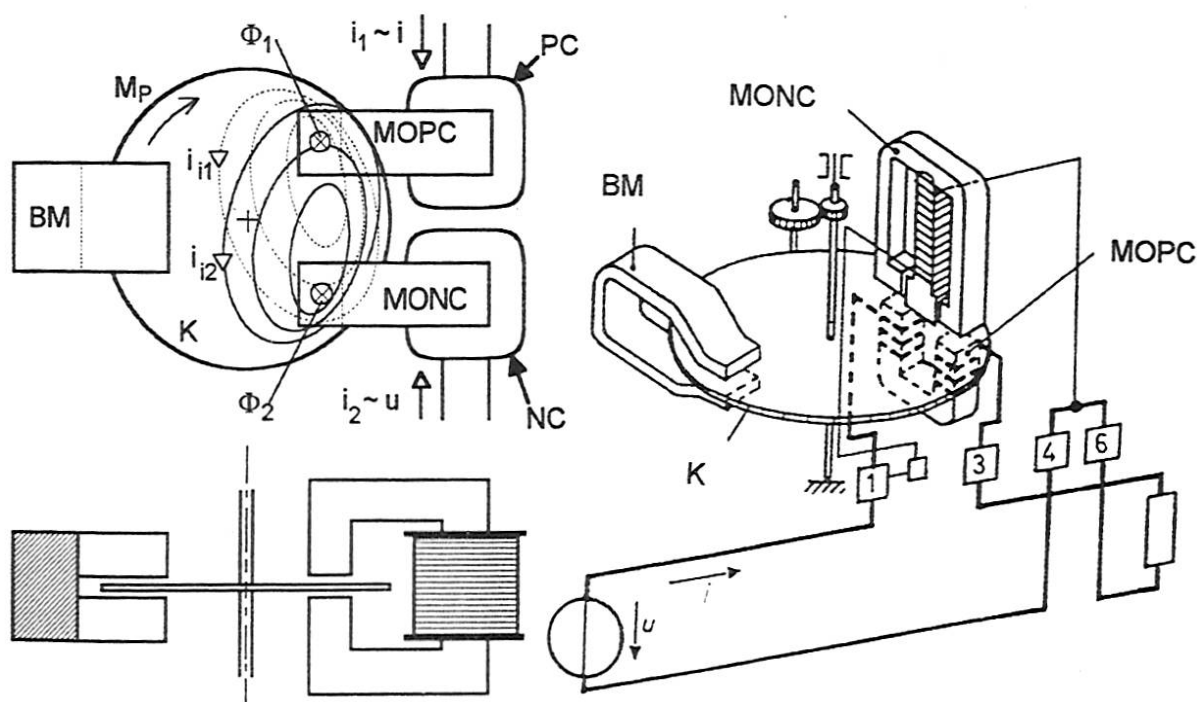
Elektrickou energii měříme pomocí integračního wattmetru neboli elektroměru.

3.5.2 Mechanické systémy

Mechanické systémy patří do kategorie indukčních měřících přístrojů, která byla záměrně v úvodním přehledu vynechána, protože logicky patří až k měření energie, k jiným účelům se nehodí.

Systém jednofázového elektroměru se skládá z pěti základních částí. První je rotačně uložený hliníkový kotouček, na jehož osu je připojeno počítadlo otáček, jehož hodnota bude odpovídat doposud zaregistrované energii. Dále pak obsahuje napěťovou a proudovou cívku, v mezerách jejichž magnetických obvodů je umístěn kotouček. Předposlední částí je

permanentní magnet, i v jeho mezeře magnetického obvodu je umístěn kroužek. Poslední částí je počítadlo registrující počet otáček kotoučku. Vířivé proudy indukované oběma cívkami společně vytvářejí kroutící moment. Proti tomuto momentu působí brzdící obvod realizovaný výše zmíněným magnetickým obvodem permanentního magnetu. Tímto způsobem je dosaženo toho, že rychlost otáčení odpovídá měřenému výkonu. Počítadlo pak zajišťuje integraci tohoto výkonu do podoby energie.



Obrázek 12: Princip funkce elektromechanického indukčního elektroměru, zdroj [1]

Tento základní měřicí systém byl následně vylepšován a doplňován o další funkce, například mechanickou zábranu zpětného chodu nebo více počítadel pro čítání energie v různých tarifech s přepínáním pomocí elektrického signálu. Objevovala se dokonce zařízení pro snímání otáčení kotoučku, resp. detekce průchodu barevné značky, která je na kotoučku. Tento signál bylo možné následně zpracovávat číslicovým způsobem, případně vlastní počítadlo bylo realizováno elektronicky.

3.5.3 Elektronické systémy

Elektronické elektroměry, neboli statické elektroměry, je možno realizovat jako integrační wattmetry, tedy pro měření výkonu je možno použít celou škálu výše uvedených metod a snímačů. Samozřejmě zde zůstává možnost realizovat wattmetr s obvodovou násobičkou a už vynásobený signál dále vzorkovat AD převodníkem. Toto řešení se může zdát jako jednodušší oproti realizaci se dvěma AD převodníky.

Ovšem dva AD převodníky poskytují další možnosti pro realizovaný měřicí přístroj, který pak může měřit i okamžité napětí, proud, dokonce i fázový posuv mezi napětím a proudem a tím nejen činný výkon, ale i výkon jalový a zdánlivý.

3.5.4 Třífázové měřicí systémy

Pro měření třífázové energie je třeba sledovat všechny tři fáze. V mechanické podobě působí měřicí cívky na kotouče osazené na společné ose a tím je také dán způsob určení celkové energie. Problém nastává v případě, že energie neteče ve všech fázích stejným směrem. Okamžitý výkon určí tento systém tak, že sečte okamžité výkony v jednotlivých fázích včetně znaménka. To znamená, že znaménko výsledku udává převažující směr toku energie.

Elektronické měření už neobsahuje onu „společnou osu“, je tedy možno získat výslednou hodnotu i jinými postupy, ať už obvodovým řešením sčítání, nebo především programovým vybavením u řešení s odděleným měřením napětí a proudu. Zde opět platí, že odděleným měřením napětí a proudu je možno získat mnoho dalších informací než jen pouhý aktuální výkon a z něho odvozenou elektrickou energii.

4 Použité metodiky a technologie

Jelikož se jedná o tvorbu nízkourovňového programového vybavení, které se pohybuje až na hranici firmware, nebude v této práci využíváno pokročilých technologií softwarového inženýrství a objektového přístupu k programování a tvorbě software v širším smyslu.

4.1 Ladění na HW úrovni

Mikroprocesory rodiny MSP430 poskytují rozhraní pro ladění kódu přímo v aplikaci. Toto rozhraní je postaveno na rozhraní JTAG, které bylo původně určeno pro testování již zapouzdřených integrovaných obvodů. Rozšířením tohoto rozhraní byla přidána možnost ovládání čipu s mikroprocesorem, které zahrnuje komplexní možnosti od prací s pamětí FLASH až po řízení a dohled nad během mikroprocesoru včetně práce s obsahem registrů, umístování zastavovacích bodů a podobně. Toto rozhraní výrazně zjednodušuje, ale také výrazně zlevňuje proces tvorby a ladění firmware oproti dřívějším vysoce specializovaným jednoúčelovým hardwarovým simulátorům, jejichž cena se pohybovala o několik řádů výše.

Dokonce i v tak specializované oblasti, jako jsou ladící rozhraní konkrétního mikroprocesoru, resp. rodiny mikroprocesorů, panuje na trhu relativně velká konkurence, kde lze nalézt nabídku od bezejmenných asijských výrobců až pro renomované firmy. Volba padla na firemní zařízení MSP430 USB-FET, protože jsme jich už několik ve firmě měli a bylo tedy logické je nadále používat. Navíc zástupci firmy jsou ochotni pružně reagovat na naše požadavky v případě zničení těchto zařízení, kterému se během vývoje lze jen těžko vyhnout. Je sice možno pořídit levnější zařízení, jedná se však o asijskou produkci, která bohužel svou kvalitou nemůže soupeřit s americkými nebo evropskými výrobky.

4.2 Vývojové prostředí

Už v úvodu, v kapitole Nefunkční požadavky, byl uveden požadavek implementace měřicího jádra v jazyce C. Ten byl zvolen proto, že se jedná o jazyk nízké úrovně, který umožní tvorbu optimálního kódu, který se velmi přibližuje kódu psaném v čistém assembleru. Ostatně některé části bylo nutné v assembleru napsat. V tom případě volba jazyka C je opět výhodná, protože psaní smíšeného kódu je podporováno a dobře dokumentováno.

Zbývá tedy už jen volba vývojového prostředí. Na trhu je několik produktů různých firem, např. Keil, IAR Systems, které nabízejí svá vývojová prostředí pro práci s mikroprocesory Texas Instruments. Ale i samotná firma TI nabízí vývojové prostředí Code Composer Studio.

Vzhledem k tomu, že v budoucnu bude na projektu spolupracovat více programátorů, bylo třeba vzít v úvahu i pořizovací cenu těchto vývojových prostředků, která může být nepříjemně vysoká. Jednáním s dodavateli nakonec padla volba na Code Composer Studio, jednak vzhledem k příznivé ceně, ale také k tomu, že nakoupené licence dovolí tvorbu kódu bez jakýchkoliv omezení pro všechny mikroprocesorové platformy, které Texas Instruments nabízí.

Během práce se několikrát projevilo, že Code Composer Studio je relativně nový produkt, který trpí některými nedostatky. Vstřícné jednání zástupců firmy TI však vedlo k jejich postupnému odstraňování i na základě mých připomínek, a to i díky tomu, že jsme dostávali aktualizace dlouho před jejich oficiálním vydáním. To by se sice mohlo jevit jako potenciálně nebezpečné v případě, že by kompilátor generoval kód s chybami, ale protože jsem vždy kontroloval výsledný strojový kód, bylo toto riziko relativně malé. Zajímavé bylo, že některé chyby se projevily i u konkurenčních vývojových prostředí, například chybné zobrazení proměnných uložených v registrech, jejichž šířka byla větší než 16 bitů. Ale opět zde platí, že se známými chybami se dá pracovat daleko lépe, než chyby složitě hledat.

4.3 Zálohování

Otázka zálohování je velmi důležitá, protože během vývoje může dojít ke zničení téměř čehokoliv. A při vývoji elektroměru, který se připojuje do sítě nízkého napětí toto platí tím spíše a proto je nutné zálohování věnovat velkou pozornost.

Pro denní zálohování byl vybrán protokol RSync, kde serverová část může běžet jak na systémech Windows, tak na systémech založených na Linuxovém jádře. Klientských programů je opět k dispozici několik. Byla zvolena grafická nadstavba QTDSync, která umožní relativně snadno tvorbu zálohovacích dávek pomocí grafického uživatelského rozhraní.

Pro zálohování byla také zvolena taktika prostorového rozložení, kdy zálohy jsou umístěny na vzdáleném serveru, což by mělo např. vyřešit katastrofu v podobě požáru nebo povodní.

4.4 Spolupráce více programátorů

Výše zmíněné denní zálohování plní především ochranu proti katastrofám v podobě nenadálého zničení vývojových prostředků, především počítače a v něm uložených vývojových dat. Při spolupráci více programátorů je však nutno řešit společnou práci nad stejnými zdrojovými kódy. Nabízí se triviální řešení, kdy každý programátor má přiděleno

množinu zdrojových kódů, do kterých může zasahovat jen on. Výsledek by byl uložen na serveru, v lepším případě by bylo využito mechanismu přístupových práv k souborům.

V dnešní době jsou však k dispozici daleko elegantnější řešení, která umožní i práci více lidí na jednom zdrojovém souboru, přičemž je možno takovéto dílčí změny automaticky slučovat. V případně nejasného řešení samozřejmě musí zasáhnout člověk. Tyto prostředky je také možno integrovat do samotného vývojového prostředí, což nadále výrazně zjednoduší práci.

Zvoleno bylo řešení SVN, kde serverová část opět běží na operačním systému Linux, klienti mohou být na různých platformách, v našem případě Windows 7. Navíc tento systém umožňuje nahlížet do předchozích verzí souborů, hledat změny a podobně, čili takový jednoduchý, avšak dostatečný základ správy vygenerovaných verzí firmware. Spravování SVN je opět téma, které přesahuje rámec této práce.

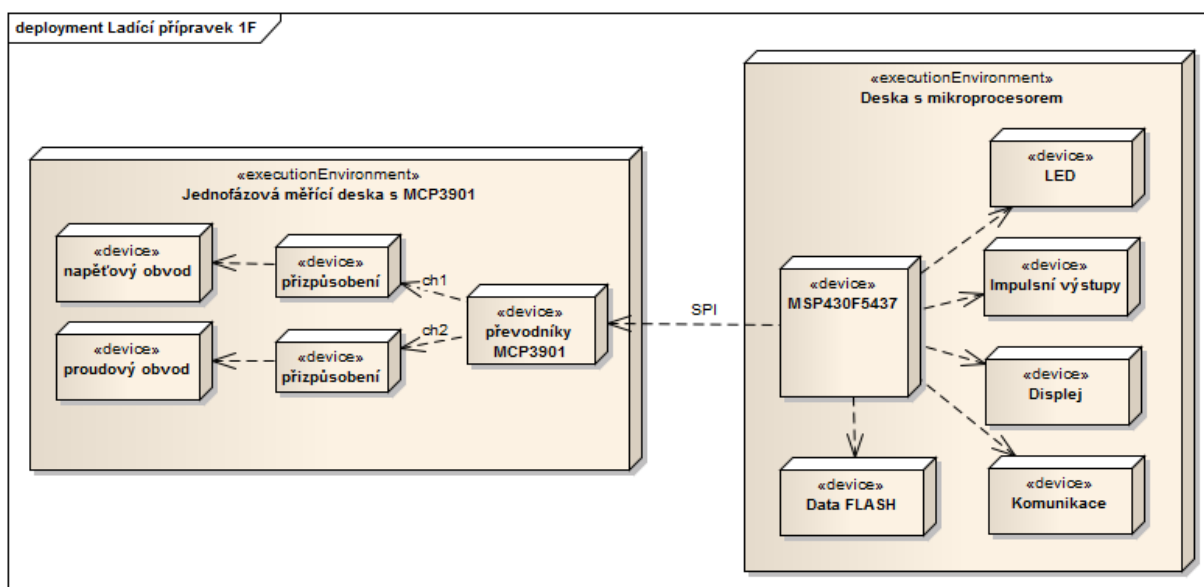
5 Návrh

Kapitola se bude zabývat návrhem měřicího jádra z pohledu aplikace teoretických postupů uvedených v analytické kapitole.

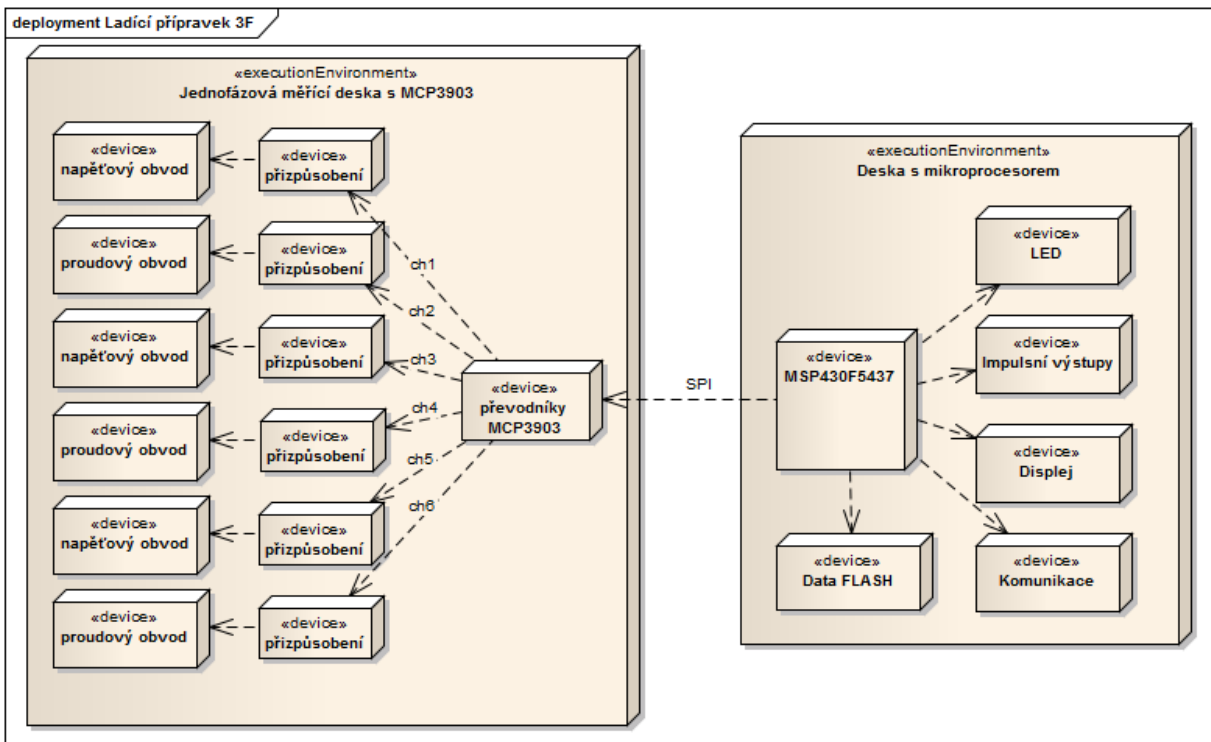
5.1 Blokové schéma ladícího přípravku

Ladící přípravek se skládá se dvou základních částí. První částí je plošný spoj, na kterém je umístěn mikroprocesor, externí paměť typu Flash, displej s řadičem na skle, rozhraní optické komunikace a impulsní výstupy. Tyto základní komponenty budoucího elektroměru jsou doplněny několika led diodami a nepoužité piny procesoru jsou vyvedeny na konektory.

K této desce je možné připojit desky s externími převodníky. Desky jsou dvě a to jedna pro jednofázový elektroměr, na které je osazen převodník MCP3901, a dále deska pro třífázový elektroměr s převodníkem MCP3903. Na obou deskách jsou mimo integrovaných obvodů s převodníky také pasivní součástky realizující přizpůsobovací obvody pro měření napětí a proudů. Na deskách je také osazen krystal, který v počátečních fázích práce přinese určité zjednodušení. Ve finálním elektroměru bude hodinový signál pro převodníky dodávat mikroprocesor.



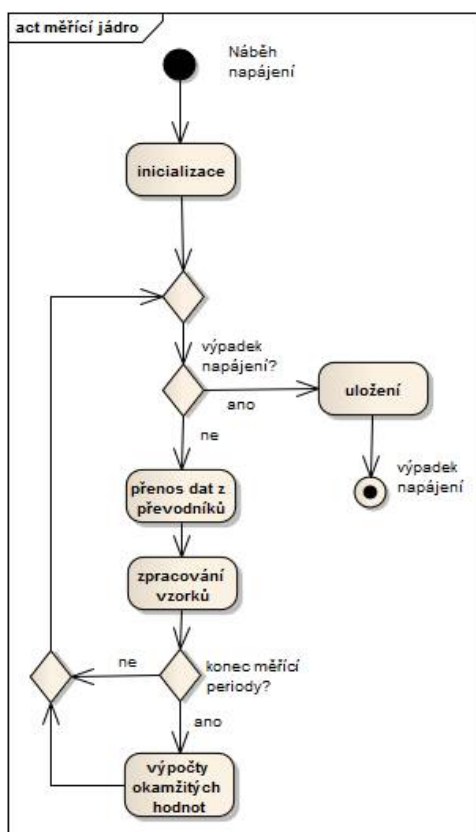
Obrázek 13: Blokové schéma ladícího přípravku pro jednofázový elektroměr



Obrázek 14: Blokové schéma ladícího přípravku pro třífázový elektroměr

5.2 Diagram aktivity algoritmu měření

Diagram aktivity na obrázku 15 naznačuje, jak probíhá výpočet během sběru a zpracování dat v průběhu měřicí periody a na jejím konci. Ve skutečnosti je sekvenční provádění rozloženo do dvou úrovní přerušení (viz Hierarchie přerušení), které umožní běh dalších funkcionalit „na pozadí“ měření, jinak řečeno, měření je pro ostatní funkcionality něco, co je samostatné a tyto funkcionality nemohou toto měření ovlivnit. Zvolený mikroprocesor však neumožňuje takové oddělení procesů, proto se oddělení odehrává na úrovni zdrojových kódů. Bohužel při necitlivém přístupu je samozřejmě možné měření a jeho přesnost ovlivnit a to velmi zásadně.



Obrázek 15: Diagram aktivity

5.3 Firmware

V závislosti na růstu výkonu mikroprocesorů lze klást na výsledný produkt větší nároky. Tyto nároky se dělí na dvě základní roviny. První rovinou je samotné měření, kde se zvyšují požadavky na přesnost, případně na škálu poskytovaných dat. Druhou rovinou jsou další funkce celého zařízení, například funkce spínacích hodin, funkce proudového omezovače, sledování kvality sítě s dlouhodobým záznamem, detekce napadení a v poslední době také požadavky na propojení jednotlivých elektroměrů s nadřazenými systémy.

Z hlediska této práce se budu věnovat jen první rovině, tedy samotnému měření.

Dále je dobré zavést pojem měřicí perioda. Jedná se o interval, během kterého jsou sbírána a zpracovávána data a na konci tohoto intervalu jsou vypočteny okamžité hodnoty a započítány přírůstky do energetických registrů.

5.3.1 Činná energie

V teoretické části o měření energie je uveden vztah, ve kterém je integrována okamžitá hodnota výkonu po daný čas. Reálný elektroměr, který odebírá vzorky napětí a proudu v diskrétním čase už nebude pracovat s integrálem, tento přechází v sumu. Suma pak probíhá

přes celou měřicí periodu, během které je odebráno n vzorků.

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i i_i$$

5.3.2 Měření jalové energie

Z dat dostupných pro výpočet činné energie je sice možné spočítat zdánlivý výkon a tím i účinník, při tomto postupu je však ztraceno znaménko účinníku a tím tedy i důležitá informace o druhu jalové zátěže.

Výpočet jalové energie je podobný jako u činné, ve vztahu však vystupuje vzorek napětí s fázovým posunem 90° . Prozatím ponechme stranou, kde bude tato hodnota získána. Integrál opět přechází v sumu, která opět probíhá přes měřicí periodu s n vzorky.

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i^{90} i_i$$

5.3.3 Neharmonické průběhy napětí a proudu

Výše uvedené vztahy platí jen pro harmonické průběhy napětí a proudu. Pro neharmonické je třeba provést tyto výpočty pro všechny harmonické složky. Zde je možné využít rychlé Fourierovy transformace. Tento postup však vyžaduje výrazné navýšení výkonu mikroprocesoru a tím zvýšení ceny celého přístroje.

5.3.4 Definice požadovaných výstupních hodnot

Základní funkce elektroměru je zřejmá, jedná se o energetické hodnoty. Ty se dále rozdělí na činné a jalové, čímž pro každou měřenou fázi požadujeme tyto energie:

1. odběr činné energie
2. dodávka činné energie
3. odběr jalové induktivní energie
4. odběr jalové kapacitní energie
5. dodávka jalové induktivní energie
6. dodávka jalové kapacitní energie

Dále budou požadovány tzv. okamžité hodnoty některých veličin. Zde je nutno uvést, že slovo okamžité je poněkud zavádějící, protože tyto hodnoty jsou výsledkem zpracování měřicí periody.

1. efektivní napětí
2. efektivní proud
3. činný výkon se znaménkem
4. jalový výkon se znaménkem
5. frekvence

5.3.5 Implementace teoretických vztahů

5.3.5.1 Výpočty s každou sadou vzorků

Sadou vzorků se rozumí vzorek napětí a proudu u jednofázového elektroměru, resp. vzorky napětí a proudů ve všech fázích třífázového elektroměru. Tyto výpočty probíhají v přerušení a je třeba provést maximální optimalizaci na rychlost, protože představují největší trvalou zátěž procesoru.

symbol	význam
F_{sample}	Frekvence odběru vzorků
F_{mains}	Frekvence sítě
k	Zpoždění napětí u_{90} o k vzorků
k_r	Celá část zpoždění vzorků u_{90}
k_f	Zlomková část zpoždění vzorků u_{90}
u_{90n}	Napětí zpožděné o 90° (tj. 5ms při 50Hz)
S_u	Suma napětí
S_{uu}	Suma kvadrátů napětí
S_i	Suma proudů
S_{ii}	Suma kvadrátů proudu
S_{ap}	Suma činného výkonu
S_{rp}	Suma jalového výkonu

Tabulka 3: Význam symbolů ve vztazích pro práci se sadou vzorků

Pro výpočet energetických přírůstků a okamžitých hodnot na konci měřicí periody je třeba s každou sadou vzorků provést další operace. Symboly začínající malým písmenem s představují průběžné součty, které budou použity na konci měřicí periody a následně vynulovány, aby mohly sbírat hodnoty pro další měřicí periodu. Význam konkrétního symbolu je uveden v tabulce a není jej třeba podrobněji komentovat.

Zvláštní komentář ale zaslouží implementace výpočtu jalové energie. V teoretické části je používán napěťový zpožděný napěťový vzorek. Vzhledem ke vzorkovací frekvenci

převodníků, resp. pevnému rastru odběru sady vzorků, není možno změřit napětí v potřebném časovém okamžiku. Nezbyvá tedy, než požadovanou hodnotu napětí získat jiným způsobem, odvodit ji z dostupných vzorků. Napěťové vzorky jsou ukládány v kruhovém zásobníku, který realizuje potřebné zpoždění. Zvolil jsem prostou metodu lineární interpolace.

Přesné zpoždění vzorku získáme ze vztahu

$$k = \frac{F_{sample}}{4 F_{mains}}$$

Z něj musíme odvodit, jak moc vzdálené vzorky použijeme pro výpočet interpolovaného napětí:

$$k_r = \text{celá část}(k)$$

$$k_f = k - k_r$$

A nyní již máme všechny potřebné údaje pro výpočet interpolovaného vzorku. Index v hranatých závorkách udává pozici v kruhovém bufferu, pro přehlednost zde není uvedena operace kongruence modulo, pomocí které lze realizovat výše zmíněný kruhový zásobník a tím výrazně snížit velikost paměti pro realizaci zpoždění.

$$u_{90[n]} = (u_{[n-k_r-1]} - u_{[n-k_r]}) * k_f + u_{[n-k_r]}$$

5.3.5.2 Výpočty na konci měřicí periody

Po zpracování daného počtu vzorků, tedy na konci měřicí periody je třeba zpracovat vypočtené hodnoty do podoby přírůstku činné a jalové energie a efektivních hodnot napětí a proudu.

symbol	význam
x	Počet vzorků na periodu
Σu	Suma napětí, viz. s_u
Σu^2	Suma kvadrátů napětí, viz. s_{uu}
Σi	Suma proudu, viz. s_i
Σi^2	Suma kvadrátů proudu, viz. s_{ii}
Σui	Suma výkonu, viz. s_{ap} a s_{rp}
U_{ef}	Efektivní hodnota napětí
I_{ef}	Efektivní hodnota proudu
ΔE	Přírůstek energie

Tabulka 4: Význam symbolů ve vztazích pro výpočty na konci měřicí periody

1 Výpočet efektivního napětí

Výchozí vzorec pro efektivní napětí uvedený v analytické části je jednak upraven převodem integrálu na sumu, zároveň je zde přidána ještě korekce stejnosměrné složky. Stejnosměrnou složku je možno chápat jako průměrnou hodnotu napětí během měřicí periody. Vzhledem k tomu, že kódování hodnoty vzorku napětí je prováděno jako bezznaménkové číslo, pak nulové napětí odpovídá jistému nenulovému číslu. Proto nelze korekci stejnosměrné hodnoty vynechat. Tato korekce také nemůže být konstantní, stejnosměrná složka se může měnit a to jak kvůli parametrům sítě, tak ji může ovlivňovat samotné zapojení měřících obvodů a tolerance použitých součástek. Takto modifikovaný vztah ještě upravíme do jednodušší podoby:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{\sum u^2}{x} - \left(\frac{\sum u}{x}\right)^2} = \sqrt{\frac{\sum u^2}{x} - \frac{(\sum u)^2}{x^2}} = \sqrt{\frac{1}{x^2} (x \sum u^2 - (\sum u)^2)} = \frac{\sqrt{(x \sum u^2 - (\sum u)^2)}}{x}$$

Následující tabulka obsahuje detailní analýzu výpočtu z hlediska počtu bitů, získané údaje budou potřeba při návrhu datových struktur.

Symbol	Bitů	Výpočet
x	12	
u	16	
Σu	28	16+12
u ²	32	16+16
Σu ²	44	16+16+12
xU _{ef}	28	Max(12+16+16+12, 2*(16+12)) / 2
U _{ef}	16	Max(12+16+16+12, 2*(16+12)) / 2-12

Tabulka 5: Analýza bitové náročnosti výpočtu energie

2 Výpočet efektivního proudu

Výchozí vzorec pro efektivní napětí uvedený v analytické části je jednak upraven převodem integrálu na sumu, zároveň je zde přidána ještě korekce stejnosměrné složky. Stejně jako u napětí je korekce nutná vzhledem ke kódování hodnot proudových vzorků a dalším vlivům.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{\sum i^2}{x} - \left(\frac{\sum i}{x}\right)^2} = \sqrt{\frac{\sum i^2}{x} - \frac{(\sum i)^2}{x^2}} = \sqrt{\frac{1}{x^2} (x \sum i^2 - (\sum i)^2)} = \frac{\sqrt{(x \sum i^2 - (\sum i)^2)}}{x}$$

Opět provedeme analýzu výpočtu z hlediska počtu bitů.

Symbol	Bitů	Výpočet
x	12	
i	24	
Σi	36	24+12
i ²	48	24+24
Σi ²	60	24+24+12
xI _{ef}	36	Max(12+24+24+12, 2*(24+12)) / 2
I _{ef}	24	Max(12+24+24+12, 2*(24+12)) / 2 - 12

Tabulka 6: Analýza bitové náročnosti výpočtu efektivního napětí

Zde již narážíme na problém, výsledek výpočtu pod odmocninou má 70 bitů, což by přinášelo komplikace při implementaci. Je třeba upravit výpočet tak, aby bylo třeba maximálně 64 bitů.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{\sum i^2}{x} - \left(\frac{\sum i}{x}\right)^2} = \sqrt{\frac{\sum i^2}{x} - \frac{(\sum i)^2}{x^2}} = \sqrt{\frac{1}{x} \left(\sum i^2 - \frac{(\sum i)^2}{x} \right)} = \frac{\sqrt{\sum i^2 - \left(\frac{\sum i}{\sqrt{x}}\right)^2}}{\sqrt{x}}$$

A znovu provedeme analýzu upraveného výpočtu z hlediska počtu bitů.

Symbol	Bitů	Výpočet
x	12	
√x	6	
I	24	
Σi	36	24+12
i ²	48	24+24
Σi ²	60	24+24+12
√	60	Max(24+24+12, (24+12-6)*2)
x ^{1/2} I _{ef}	30	Max(24+24+12, (24+12-6)*2) / 2
I _{ef}	24	Max(24+24+12, (24+12-6)*2) / 2 - 6

Tabulka 7: Analýza bitové náročnosti upraveného výpočtu efektivního napětí

Výsledek výpočtu v odmocnině má 60 bitů, toto je už použitelné, ke ztrátě dochází v druhém členu pod odmocninou před jeho umocněním.

3 Přírůstek energie za měřicí periodu

Hlavní funkcí elektroměru je měření energie, každou měřicí periodu vznikne přírůstek do energetického registru. Teoretický vztah je opět doplněn korekcí, která však zde nemá význam stejnosměrné složky, ale je to kompenzace kódování hodnot napěťových a proudových vzorků. Bez této korekce by byl výsledek vždy kladný a neodrážel by zaregistrovanou energii. Po aplikaci korekce může být výsledek i záporný, znaménko zde získává význam směru toku energie. Kladný výsledek je považován za odběr energie, záporný pak za její dodávku. Postup výpočtu je shodný jak pro činnou, tak i jalovou energii, liší se jen v hodnotách odvozených od napětí. Základní vztah pro výpočet:

$$\Delta E = \frac{\sum ui}{x} - \frac{\sum u}{x} \frac{\sum i}{x} = \frac{x \sum ui - \sum u \sum i}{x^2}$$

Následuje opět bitová analýza:

Symbol	Bitů	Výpočet
x	12	
u	16	
i	24	
Σu	28	16+12
Σi	36	24+12
Σui	52	16+24+12
x2ΔE	64+s	Max(12+16+24+12, 16+12+24+12)
ΔE	40+s	Max(12+16+24+12, 16+12+24+12)-12-12

Tabulka 8: Analýza bitové náročnosti výpočtu efektivního proudu

A opět došlo k problému, číslo v čitateli potřebuje 64 bitů, ovšem bez znaménka, proto je třeba výpočet upravit tak, aby bylo pro znaménko místo s tím, že to znamená ztrátu přesnosti výpočtu.

$$\Delta E = \frac{\sum ui}{x} - \frac{\sum u}{x} \frac{\sum i}{x} = \frac{\sum ui - \frac{\sum u \left(\frac{\sum i}{\sqrt{x}} \right)}{\sqrt{x}}}{x}$$

Analýzou ověříme upravený výpočet.

Symbol	Bitů	Výpočet
x	12	
u	16	
i	24	
Σu	28	16+12
Σi	36	24+12
Σui	52	16+24+12
$\Sigma u \Sigma i$	64	16+12+24+12
$x\Delta E$	52+s	Max(16+24+12, 16+12+24+12-12)
ΔE	40+s	Max(12+16+24+12, 16+12+24+12)-12

Tabulka 9: Analýza bitové náročnosti upraveného výpočtu efektivního proudu

5.3.6 Analýza datových typů pro optimální práci s pamětí

Výše uvedená analýza bitové náročnosti implementace výpočtů neobsáhla další důležitý aspekt, kterým je formát a rozlišení energetických registrů. Zde jsou proti sobě požadavky na rozlišení a paměťovou náročnost. Sice by se mohlo zdát, že paměti nebude potřeba mnoho, ale je třeba si uvědomit, že výše zmíněných sad šesti energetických registrů může být v případě třífázových elektroměrů až 1+3+8 (totál, fázové, tarifní) a že je nutno umět tyto registry rychle uložit a načíst do záložní paměti při výpadku napájecího napětí. Proto se tomuto návrhu budu věnovat podrobněji.

Pro návrh je třeba stanovit maximální výkon, který bude možno navrhovaným elektroměrem měřit. Už v tomto bodě je třeba ale počítat s budoucím rozšířením o tzv. nepřímé měření. Při tomto způsobu připojení elektroměru je pro proud, napětí nebo obě veličiny použito měřících transformátorů proudu a napětí. To samozřejmě výrazně změní maximální výkon oproti tomu, který by odpovídal přímému připojení. Pro nepřímá připojení je třeba zavést parametr, který zohledňuje parametry měřících transformátorů. Těmto parametrům budeme říkat faktor proudu a faktor napětí. Pro elektroměry využívající tohoto měřícího jádra se uvažuje s maximálním faktorem proudu 400 a maximálním faktorem napětí 20. Dalším potřebným parametrem pro odhad je samozřejmě čas, jako minimum bylo zvoleno 20 let, kdy po tuto dobu nesmí dojít k přetečení energetických registrů. Následující tabulka shrnuje všechny potřebné parametry pro další postup:

Parametr	Hodnota	Jednotka	Popis
U_{ef}	8400	V	Maximální efektivní hodnota napětí s faktorem
I_{ef}	2400	A	Maximální efektivní hodnota proudu s faktorem
T_{live}	20	Rok	Doba životnosti elektroměru
X_{phase}	3		Maximální počet fází

Tabulka 10: Maximální parametry pro návrh bitové šíře energetických registrů

Nyní již můžeme přikročit k hledání potřebného počtu bitů pro uložení stavu energetických registrů. V následujícím postupu je odvozen vztah pro max. energii v závislosti na vstupních parametrech.

$$P_{max} = X_{phase} U_{ef} I_{ef} [W]$$

$$E_{max} = 31557600 T_{live} X_{phase} U_{ef} I_{ef} [Ws]$$

$$E_{max} = 8766 T_{live} X_{phase} U_{ef} I_{ef} [Wh]$$

$$E_{max} = 8,766 T_{live} X_{phase} U_{ef} I_{ef} [kWh]$$

Dosažením do vzorců si můžeme udělat náhled na velikost čísel v binárním tvaru:

Parametr	Hodnota	Jednotka	\log_2	Popis
P_{max}	60480000	W	25	Maximální výkon
P_{max}	60480	kW	15	Maximální výkon
E_{max}	3,82E+16	Ws	56	Maximální energie po dobu T_{live} s výkonem P_{max}
E_{max}	1,06E+13	Wh	44	Maximální energie po dobu T_{live} s výkonem P_{max}
E_{max}	1,06E+14	0,1 Wh	47	Maximální energie po dobu T_{live} s výkonem P_{max}

Tabulka 11: Ukázky pro posouzení návrhu bitové šířky energetických registrů

Je také možné se na rozlišení podívat obráceně, tedy že volíme počet bitů pro uložení energie a zjišťujeme, po jakou dobu nedojde k přetečení hodnoty registru při maximálním měřeném výkonu:

Jednotka	bitů	let
Wh	44	33,18231
Wh	48	530,9169
0,1 Wh	48	53,09169

Tabulka 12: Návrh bitové šířky energetických registrů z hlediska přetečení

Na základě výše uvedených podkladů bude pro uložení stavu použito 48 bitů v rozlišení 0,1 Wh, což umožní dodržet minimální požadovanou dobu do přetečení registru a rozlišení zároveň vyhovuje současným požadavkům velké většiny potenciálních zákazníků. Bohužel se však nejedná o standardní číselný formát v kompilátorech jazyka C, což s sebou přináší mírné komplikace v podobě nutnosti naprogramování podpory práce s tímto formátem. Pro výpočty je možno převést tento formát do standardního rozlišení 64 bitů a poté zase uložit jen 48 bitů. Navíc je zde požadavek tzv. dekadického přetečení, to znamená, že např. po čísle 999 se počítadlo „přetočí“ a ukáže 000 (binární přetečení by mohlo vypadat např. 255 → 000, což je krajně nevhodné). Pokud se s dekadickým přetečením počítá při návrhu nadřazených systémů, pak nemusí znamenat žádný nepřekonatelný problém.

6 Implementace

Tato kapitola se bude věnovat detailnějšímu popisu implementace měřicího jádra. Nebude popisovat celek, ale bude se věnovat důležitým aspektům, jakými jsou datové struktury a popis práce s nimi, případně podrobnější slovní popis základních funkcionalit.

6.1 Definice datových struktur a rozhraní

Jelikož není při implementaci použito objektového návrhu, je třeba myšlené objekty rozdělit na dvě části. První částí jsou struktury a jejich instance v paměti RAM. Druhá část jsou volání funkcí, které s těmito strukturami pracují. Popis je rozčleněn do 3 základních skupin, tedy zpracování odebraných vzorků, následně práce s daty na konci měřicí periody a ostatní.

6.1.1 Struktury pro práci v právě probíhající měřicí periodě

6.1.1.1 Vzorek napětí a proudu jedné fáze

```
typedef struct{
    UINT16 u;           //napeti je 16 bitu
    UINT32 i;           //proud je 24 bitu
} MC02_UI_SAMPLE;
```

Tato struktura slouží jako základ pro předávání hodnot mezi obsluhou převodníku a zpracováním nové sady vzorků.

6.1.1.2 Sada vzorů napětí a proudů pro další zpracování

```
typedef struct{
    MC02_UI_SAMPLE phase[CFG_NUMBER_OF_PHASES]; //pekny strukturovany tvar
} MC02_UI_SAMPLES;                               //pro dalsi praci
```

Tato struktura již reflektuje jednofázové a třífázové provedení elektroměru a slouží pro předání dat mezi procedurou načtení a předzpracování vzorků a zpracováním vzorků během měřicí periody.

6.1.2 Struktury pro uložení rozpracovaných dat během měřicí periody

Vzhledem ke zvolenému principu práce s paměti z důvodu časové optimalizace jsou struktury pro probíhající měřicí periodu a ukončenou měřicí periodu sloučeny dohromady v podobě konstrukce typu union. Vše dohromady bude popsáno v následující kapitole.

6.1.3 Struktury pro uložení posledně vypočítaných okamžitých hodnot

6.1.3.1 Popis přírůstku energie

```
typedef struct {
    INT16 sign;          ///

```

Struktura sdružuje popis jak činného, tak jalového výkonu a přírůstku energie. Záměrně je zde odděleno znaménko, protože se častěji využívá absolutní hodnoty, např. při rozdělování energetického přírůstku do registrů. Převod na znaménkový typ je snadný.

6.1.3.2 Společná struktura probíhající i ukončené periody

```
typedef union{
    struct{ //podoba pro zpracovani vzorku
        UINT32 su;          ///

```

Tato struktura je v paměti pro každou fázi hned dvakrát. Jednou pro probíhající měřicí periodu a podruhé jako dočasná paměť pro okamžité hodnoty, které byly vypočítány během poslední měřicí periody. Pro čtení okamžitých hodnot je tedy nutné vědět, které z těchto

zmíněných dvou obsahuje platná data a také je nutné zajistit čtení, které nepoškodí ukončení měřicí periody během čtení. Pro zajištění obou požadavků poskytuje jádro tato volání. Názvy i pojmenování parametrů jsou samovysvětlující, detaily jsou uvedeny v programátorské dokumentaci.

```
void mc02_read_phase_var(void *dst, void* src, int len);
#define mc02_read_phase_uint16(ptr) ((UINT16)mc02_read_phase_uint64(ptr))
    ///

```

Jako ukazatel je použit ukazatel na první instanci struktury v paměti. Funkce pak zajistí případnou změnu na druhou instanci a samozřejmě zajišťují ochranu proti změně během čtení.

6.1.4 Struktury pro uložení energetických a s nimi spojených časových registrů

Použité datové typy položek s prefixem NVRAM_ napovídají, že s touto strukturou se bude zacházet jinak než obvykle, tedy že její stav je během výpadku napájecího napětí uložen v paměti, která nevyžaduje napájení. Po obnovení napájení je obsah obnoven. Mechanismus zálohování paměti je popsán ve zvláštní kapitole.

6.1.4.1 Sada energetických registrů

```
typedef struct {
    NVRAM_UINT48 act_pos;    ///

```

Struktura obsahuje všechny potřebné registry, registry jsou uloženy jako 48bitové číslo.

6.1.4.2 Časové registry

```
typedef struct {
    NVRAM_UINT32 working_time;    ///

```

Dalším typem kumulativních registrů jsou časové registry. Tyto registry udržují informace o důležitých stavech celého zařízení, tedy běhové časy, ale také doby, po které byla čítána energie do tarifních registrů. Obsah časového registru obsahuje počet vteřin od 1.1.2000, což eliminuje známý problém s časovým razítkem např. v operačních systémech UNIX.

6.1.4.3 Celková paměť kumulativních registrů

```
typedef struct {
    NVRAM_UINT16    flags;                ///

```

Tato struktura obsahuje všechny kumulativní registry elektroměru. Navíc také postfix názvu celé struktury napovídá, že se jedná o zálohovanou paměť. Pro přístup k položkám této paměti je opět třeba věnovat pozornost z důvodu možné změny během čtení.

```
#define mc02_read_nvram(dst,src,len)    hal_memcpy(dst,src,len)
    ///

```

Během vývoje došlo k přesunu funkcí pro bezpečné čtení do společných funkcí jádra elektroměru. Princip ochrany je zde takový, že během přenosu dat ze struktury je dočasně zakázáno přerušení a tím je eliminována změna dat během čtení. Je však třeba dbát na to, že přenos velkého bloku dat by mohl vést ke ztrátě některých vzorů a tím ovlivnění přesnosti měření. Z důvodu kompatibility jsou proto vytvořena tato makra s prefixem mc02_.

6.1.5 Ostatní

Ostatní struktury budou pro větší přehlednost popsány v kapitolách, které se týkají konkrétní funkcionality.

6.1.5.1 Generátory impulsních výstupů

Struktura slouží pro práci generátorů impulsních výstupů. Způsob generování je popsán ve zvláštní kapitole.

6.2 Základní struktura FW

Základní struktura FW odpovídá blokovému schématu ladícího přípravku. Po vlastní inicializaci řídicího procesoru a jeho periférií je třeba nakonfigurovat externí převodníky a případně další externí součástky.

Převodníky v pravidelném rytmu generují přerušovací signál pro procesor, který na něj reaguje nejprve načtením dat z převodníku a následně jejich zpracováním. Tato část FW je časově nejvíce kritická, protože nejvyšší měrou určuje zatížení procesoru a tedy i výpočetní výkon, který bude moci být následně využit pro ostatní funkcionality elektroměru.

Na konci měřicí periody je třeba nově získané hodnoty zpracovat do podoby okamžitých hodnot a přírůstků energetických registrů.

Hlavní programová smyčka pak řeší jen základní systémové události a v budoucnu bude spolupracovat se systémem kooperativního multitaskingu, ve kterém poběží ostatní funkcionality. Ukončení hlavní smyčky má za úkol především včasné a spolehlivé uložení stavu energetických registrů a ostatních důležitých hodnot, o které se nesmí přijít při výpadku napájecího napětí ani při absenci záložního bateriového napájení.

6.3 Hierarchie přerušování

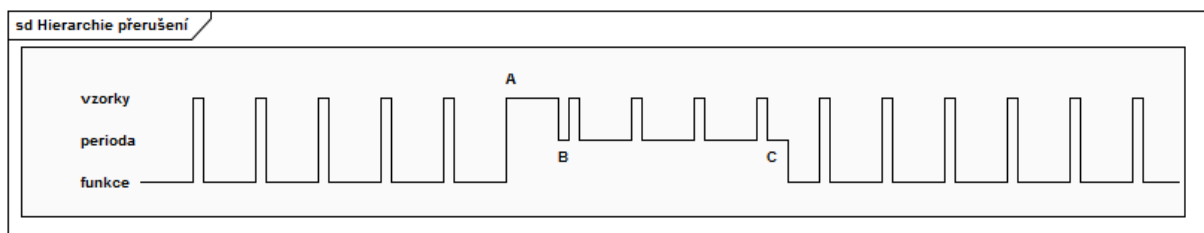
Přerušování je možno rozložit do dvou skupin:

1. již dále nepřerušitelná
2. přerušitelná obsluhou přerušování s vyšší prioritou

V první skupině pracují ovladače periférií na nejnižší úrovni a především provádějí zpracování vzorků z převodníku. Obsluha těchto přerušování musí být co nejrychlejší, proto zde budou nastaveny maximální optimalizace překladače na rychlost na úkor délky kódu.

Do druhé skupiny spadá především zpracování dat na konci měřicí periody. Vzhledem k časově náročnějšímu výpočtu musí být práce tohoto kódu přerušována sběrem dat pro novou měřicí periodu. S tím se váže problém s datovými strukturami v paměti, jehož řešení bude

popsáno níže.



Obrázek 16: Hierarchie přerušeni

Obrázek 16 ukazuje část rozdělení procesorového času mezi základní úlohy elektroměru. Horní řádek s popisem „vzorky“ představuje dobu, po kterou mikroprocesor zpracovává vzorky sejmuté převodníky. Je vidět, že tato činnost je největší zátěží. Časový bod A představuje zpracování posledních vzorků v měřicí periodě. Čas zpracování je delší, protože je třeba uložit průběžně spočítaná data a inicializovat hodnoty pro sběr dat v následující měřicí periodě. Časový bod B představuje přechod k výpočtům na konci měřicí periody. Druhý řádek s popisem „perioda“ ukazuje dobu, po kterou jsou prováděny výpočty na konci měřicí periody. Zde je možné si všimnout toho, že výpočty jsou přerušovány zpracováním dat pro následující měřicí periodu. V časovém bodě C jsou dokončeny všechny výpočty na konci měřicí periody. Poslední řádek s popisem „funkce“ ukazuje zbylý procesorový čas, který bude využit pro další funkcionality, které už ale nejsou obsahem této práce. Mohou to být například funkce spínacích hodin, profilování různých hodnot, záznamník událostí apod.

6.4 Popis realizace sběru vzorků

Externí převodníky pravidelně generují přerušovací signál, když mají připravena data. Na toto přerušeni reaguje mikroprocesor zahájením přenosu dat do vnitřní paměti. Aby tento proces minimálně zatěžoval procesor, je využito DMA periferie, která zajistí přenos dat do paměti bez účasti jádra mikroprocesoru a s jeho minimálním zpomalením. Přesněji řečeno je u zvoleného mikroprocesoru třeba využít dvou DMA kanálů. První kanál zajišťuje vysílání znaků na SPI, bez toho nelze v režimu SPI master přijímat. Druhý kanál pak realizuje vlastní příjem dat, která odebírá z SPI řadiče a ukládá je do paměti. Po dokončení generuje DMA další přerušeni, které se již stará o zpracování odebraných vzorků.

Při návrhu a modelování jádra elektroměru bylo využíváno bezznaménkového kódování naměřených hodnot, resp. kódování s posunutou nulou. Převodníky však generují data se znaménkem ve formátu dvojkového doplňku. Protože nebylo žádoucí celý kód přepisovat a tím přijít již o poměrně dobře odladěný a vyzkoušený kód, přistoupil jsem raději ke konverzi do bezznaménkového formátu, která není tolik výpočetně náročná. Toto řešení jsem také volil

z důvodu snadného oddělení HW závislé části, kterou je možné relativně snadno přepracovat, například z důvodu změny externích převodníků.

6.5 Zpracování vzorků

Zpracování vzorků nejvíce ovlivňuje výkonové zatížení mikroprocesoru. Proto je třeba vše podřídit maximální rychlosti provedení funkce. Při překladu je použit nejvyšší stupeň optimalizace na rychlost.

Funkce realizuje tyto činnosti:

1. Zpoždovací linka pro získání zpožděných vzorků napětí potřebných pro výpočet jalové energie.
2. Z důvodů kompenzace fázového posuvu měřících obvodů je možno vzorek napětí pro činný výkon také posouvat o celé vzorky dopředu nebo dozadu, jemný posun vzorkovacího času zajišťují externí měřící převodníky.
3. Měření frekvence fázového napětí. Zde je implementován detektor průchodu nulou s hysterezí. Tento detektor je ve třífázovém elektroměru také použit pro sledování správného sledu fází.
4. Pomocí napěťových vzorků získaných v bodech 1 a 2 jsou provedeny všechny aktualizace průběžných hodnot měřící periody, jak byly popsány v kapitole Výpočty s každou sadou vzorků. Pro tyto výpočty bylo zpočátku využíváno funkcí napsaných v assembleru, následná měření však ukázala, že kompilátor C dosahuje obdobných výsledků a proto bylo volání assemblerových funkcí nahrazeno přímo funkcemi v jazyce C.
5. Aktualizace stavu impulsních výstupů
6. Detekce konce měřící periody. Při její detekci je třeba provést časově náročné přepnutí mezi průběžnými daty a daty měřící periody. Problém se jeví celkem triviálně, ale při naivním přístupu, za který považuji překopírování hodnot z jedné paměťové oblasti do druhé a následné mazání pracovní oblasti, dojde zcela jistě ke ztrátě minimálně jedné sady vzorků. Právě proto jsem volil dvě instance jedné datové struktury, mezi kterými se přepíná. Toto přepnutí tedy odstraní jedno dlouhé kopírování. Bohužel není možné se zbavit nutnosti nulování pracovní struktury. Tato činnost je však rychlejší než kopírování i při použití standardních knihovních funkcí. I tak ale byla rychlost

nedostatečná, proto pro mazání paměti používám poslední volný DMA kanál, který již dosahuje potřebné rychlosti. Během mazání vykonává mikroprocesor další kód, který obsluhuje generátory impulsů a měření frekvence.

6.6 Měřící perioda

Pokud zpracování vzorků detekuje vznik nové měřící periody, je třeba zpracovat nová data před tím, než se opustí obsluha přerušeni. Ovšem je nutné povolit přerušeni od příchodu nových vzorků, které jsou průběžně zpracovány, protože výpočty nových dat jsou relativně dlouhé a pravidelná ztráta příchozích vzorků by velmi negativně ovlivnila přesnost měření.

Jsou prováděny tyto výpočty:

1. výpočet kalibrované efektivní hodnoty napětí
2. výpočet kalibrované efektivní hodnoty proudu
3. výpočet kalibrované hodnoty přírůstku činné energie a výkonu
4. vložení přírůstku do požadovaných energetických registrů, impulsních generátorů
5. výpočet kalibrované hodnoty přírůstku jalové energie a výkonu
6. vložení přírůstku do požadovaných energetických registrů, impulsních generátorů
7. výpočet hodnot pro hysterese detektor průchodu nulou
8. výpočty parametrů pro výpočet zpozděných vzorků na základě naměřené frekvence napětí
9. aktualizace dat pro impulsní generátory
10. aktualizace provozního času a času v tarifu

6.7 Generátory impulsních výstupů

Optický kalibrační výstup je velice důležitá součást celého elektroměru. Tento výstup slouží nejen pro ověření funkce při výrobě, ale také pro ověření správné funkce u zákazníka na pracovišti obvykle nazývaném cejchovna.

```
typedef struct{
    INT64 energy;           ///
```



```

    UINT8 flags;           /// viz masky MC_02_IMP_xxx
} MC02_PULSEOUT;        ///rezerva

```

Výstup generuje impulsy o definované délce, kdy každý impuls znamená, že elektroměrem proteklo určité kvantum energie. Impulsy je třeba vysílat co možná rovnoměrně. Samozřejmě se nesmí žádná energie ztrácet, proto má generátor svůj akumulátor, který po překročení nastavené úrovně způsobí vyslání impulsu. Vzhledem k tomu, že elektroměr svá měření vystavuje na konci měřicí periody, pak i vysílání impulsů bude rozloženo po tuto dobu. Vysílání však bude zatíženo zpožděním, protože nejprve je třeba jedné měřicí periody pro sběr dat. Výpočet přírůstku a modifikaci paměťových struktur pro vysílače také nelze realizovat okamžitě na konci měřicí periody, proto ke zpoždění přibude délka měřicí periody ještě jednou. Toto však není na závadu, všechna zaregistrovaná energie bude odvysílána. Řešení má také další výhodu v tom, že pokud parametry impulsu nepostačují k odvysílání potřebného počtu impulsů během měřicí periody, je tato neodvysílaná energie akumulována a odpovídající impulsy odvysílány po poklesu protékající energie. Samozřejmě toto přetížení je možné jen po určitou dobu.

6.8 Měření frekvence

```

typedef struct{
    UINT16 voltage_low_level;    ///<           //0
    UINT16 voltage_high_level;   ///<           //2
    UINT16 edge_counter_isr;     ///<           //4
    UINT16 edge_counter;        ///<           //6
    UINT16 timer;               ///<           //8
    UINT16 freq;                ///<<naměřená frekvence [1/128Hz] //10
    UINT8 flags;                ///<<příznaky měření frekvence //12
} MC02_FREQ_MEASURE;

```

Měření frekvence by v případě měření jen činné energie bylo jen doplňující. Ale pro výpočet jalové energie zvoleným způsobem je frekvence velmi důležitým parametrem, na základě kterého se odvozuje hodnota zpožděného vzorku napětí. Jelikož měřicí obvody nejsou vybaveny žádnými obvody pro detekci průchodu napětí nulovou hodnotou, je nutno toto řešit programově. Řešení poskytuje hysterese komparátor, který relativně spolehlivě detekuje průchod směrem nahoru a dolů okolo nulového napětí. Vzhledem k možnosti výskytu stejnosměrné složky jsou meze pro komparátor počítány na základě hodnot získaných v průběhu měřicí periody. Ideální sinusový průběh napětí je v reálných podmínkách poškozen různými harmonickými i neharmonickými průběhy. Pro zajištění přesného měření je třeba tyto chyby eliminovat pomocí většího množství průchodů nulou. Měření tedy probíhá tak, že

se zjišťuje počet průchodů nulou za určitý časový interval, čím je interval delší, tím je změřená hodnota přesnější. Tato metoda byla zvolena proto, že pokud dochází ke změnám frekvence napájecího napětí, pak tyto změny jsou velice pomalé a proto nevádí delší doba pro získání použitelné hodnoty.

Vedlejším produktem měření frekvence je detektor správnosti připojení třífázového elektroměru, který detekuje, že jsou připojeny všechny 3 fáze a nikoliv např. 1 fáze do všech napětíových vstupů a také, že jsou fáze ve správném pořadí. Lze si vybavit analogii s 3F motorem, který se má vždy točit jedním směrem.

6.9 Hlavní smyčka

Hlavní programová smyčka v ladícím přípravku nemá mnoho funkcí. Je však třeba počítat s dalším rozvojem funkcionalit, a to nejen samotného měřicího jádra, ale i dalších, které budou přibývat a které bude možné doplnit do elektroměru až po jeho nasazení pomocí dálkové výměny FW.

Mezi hlavní úkoly hlavní programové smyčky patří kontrola spolupráce s externími převodníky. Vlivem vnějšího rušení může docházet k výpadkům komunikace, případně i nečekané změně konfigurace těchto převodníků. Proto neustálý dohled monitoruje správnou činnost a v případě detekce problému se pokusí o jeho odstranění. Tato funkcionalita je relativně nešetná k budoucímu kooperativnímu multitaskingu, ovšem je třeba mít na paměti, že základní funkcí elektroměru je měření a to není možné bez fungujících převodníků.

Hlavní programová smyčka také řeší některé základní systémové události, mezi které patří systémová vteřina, na kterou jsou a budou navázány další akce, jako je například průběžné uložení kumulativních hodnot, dále pak okamžitý nebo plánovaný restart celého systému a podobně.

Jak již bylo zmíněno, elektroměr bude v budoucnu podporovat kooperativní multitasking. Zde se předpokládá nouzové zastavování procesů, které poruší pravidla kooperace. Proto je už teď v hlavní smyčce realizována příprava na tuto činnost, která spočívá v tom, že každé opakování hlavní smyčky hned v úvodu inicializuje zásobník mikroprocesoru, tedy dovede „zahodit“ to, co tam mohlo zbýt po špatně fungujícím procesu.

V hlavní smyčce je také obsluhován HW dohled nad během mikroprocesoru. S ním je nepřímou svázaná i doba, po kterou bude moci proces využívat mikroprocesor. Proces bude samozřejmě násilně ukončen ještě před aktivací HW ochrany, ale je samozřejmě možné, že proces bude tak špatně napsán, že jej nebude možné ani takto zastavit, např. pokud globálně

zakáže přerušení. Pak je poslední možností nápravy právě HW dohled, který způsobí restart celého systému a tím tedy i aspoň pokus o vyřešení problému.

6.10 Práce s pamětí

Celý elektroměr obsahuje několik typů pamětí. Nejjednodušší práce je s pamětí RAM, kam je možno přistupovat přímo pomocí prostředků programovacího jazyka C, případně jeho standardních knihovných funkcí. Komplikovanější situace však nastává při práci s pamětí typu FLASH, která má určitá specifika. Navíc tyto paměti budou v zamýšleném elektroměru hned dvě. Jedna je přímo na čipu mikroprocesoru a je primárně určena jako paměť programu. Ovšem nic nebrání jejímu využití i jako datového úložiště, protože HW mikroprocesoru takový přístup umožňuje. Navíc je zde také výhoda v tom, že hodnoty energetických registrů jsou uloženy přímo na čipu a jsou tedy chráněny před neoprávněným přístupem. Toto neplatí pro druhou paměť FLASH, která je k mikroprocesoru připojena přes SPI rozhraní. Tuto paměť už lze těžko chránit před její výměnou, případně vnější modifikací, má ale jednu podstatnou výhodu a tou je její velikost. V této paměti je možno uchovávat např. velmi dlouhou historii stavu energetických registrů, je zde možno ukládat záznamy o činnosti elektroměru a podobně. Plánováno je také využití této paměti jako mezikladu při dálkové výměně firmware mikroprocesoru, kdy bude do této paměti postupně přenesen programovací předpis, který po jeho validaci použije jádro elektroměru pro vlastní výměnu firmware. Tato problematika ovšem přesahuje rámec této práce.

Z výše zmíněných důvodů jsem proto realizoval universální funkce pro práci s pamětí. Z pohledu volajícího se nerozlišuje, o jakou paměť se jedná. Funkce však na základě adresy rozdělují příkazy mezi jednotlivé paměti. Tento koncept umožní například to, že níže popsané bezpečné úložiště může pracovat jak ve vnitřní paměti mikroprocesoru v případě ukládání energetických hodnot, tak také v externí paměti, kde bude sloužit pro ukládání často se měnících údajů kvůli omezenému počtu mazacích cyklů.

Funkce pro universální přístup k paměti jsou orientovány především na paměti typu FLASH, proto je zde také možnost například zjištění velikosti mazatelné oblasti, zjištění vymazání definovaného bloku paměti, samozřejmě také mazání, zápis a čtení.

Jsou k dispozici i funkce simulující práci paměti typu EEPROM, tedy je možno změnit obsah menšího úseku paměti, než je nejmenší mazatelná oblast. Tato simulace samozřejmě musí pracovat v režimu načtení, modifikace, smazání a uložení celé nejmenší mazatelné

oblasti. Toto se samozřejmě projeví na rychlosti provedení a je třeba mít na paměti omezený počet těchto operací v jednom bloku. Svůj význam má však tato funkce pro ukládání konfiguračních parametrů, které se mění jen velmi zřídka nebo v některých případech jen při výrobě.

6.11 Bezpečné úložiště

Pro bezpečné uložení hodnot kumulativních registrů je třeba realizovat podporu. Z obecného hlediska se jedná o mechanismus, který na základě konfiguračních dat zajistí uložení a načtení obecně definované souvislé oblasti paměti RAM. Na první pohled by se mohlo zdát, že funkce úložiště nepotřebuje rozumět datům, která ukládá. Opak je však pravdou. Při ukládání kumulativních hodnot je třeba také zajistit, aby nebyla uložena menší hodnota, než která už v úložišti je, jinak řečeno, aby registry „necouvly“. Proto jsou funkce doplněny o možnost provádět i takovouto kontrolu. Pro práci s úložištěm je vhodné využívat datových typů s prefixem NVRAM_, které dodržují jistou společnou „štábní kulturu“ a definují také nestandardní 48 bitový typ vhodný právě pro uložení hodnot energetických registrů.

Úložiště pracuje jako kruhová fronta, může obsahovat více záznamů. Prvním důvodem je bezpečnost, kdy každý záznam je chráněn pomocí algoritmu CRC16 a při poškození je použit nejnovější nepoškozený záznam. Druhým důvodem je rozložení zápisů v paměti typu FLASH. Tato paměť se vyznačuje tím, že je možné mazat jen určité ucelené oblasti. Zápis do vymazaného prostoru je však možný i po jednotlivých bitech. Počet mazacích cyklů je však omezen a při intenzivnějším používání by mohlo dojít k poškození paměti.

Funkci úložiště lze rozdělit na tři základní funkce, které budou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

6.11.1 Inicializace

Jinak řečeno obnovení paměti ze zálohy. Funkce vyhledá nejnovější nepoškozený záznam a ten vloží do paměti RAM. Pokud se žádný vhodný záznam nenajde, pak je příslušná paměť vynulována. K tomuto jevu může dojít při smazání oblasti úložiště, např. po prvním spuštění po nahrání firmware do procesoru je oblast prázdná. Dalším a relativně zajímavým úkolem této funkce je zajistit místo pro uložení nového záznamu. Možná se zdá, že to do této funkce nepatří, ale je třeba si uvědomit, že mazání je právě ta časově nejnáročnější operace u paměti typu FLASH. Proto je dobré provést případné mazání v době, kdy se dá předpokládat, že je dostatek času pro jeho provedení. Naopak výpadek napájení je časově kritická část, proto

připravené místo pro záznam výrazně zrychlí uložení chráněných dat.

6.11.2 Ukončení

Jinak řečeno uložení chráněné paměti. Funkce vyhledá vhodné místo a provede uložení. Pokud není místo nalezeno, musí jej samozřejmě vytvořit. Navíc zde může proběhnout volitelná kontrola ukládaných dat, např. proti výše zmíněnému „couvnutí“ energetických registrů.

6.11.3 Aktualizace

Jinak řečeno průběžné uložení. Probíhá podobně jako výše zmíněné ukončení, ale navíc ještě provede přípravu volného prostoru pro další zápis. Toto průběžné uložení je používáno z bezpečnostních důvodů, např. jako prevence před nenadálým restartem mikroprocesoru z důvodu vnějšího rušení.

6.11.4 Nulování

Některé údaje v chráněné paměti je třeba umět nulovat. Prosté vynulování jen v paměti RAM by mělo za následek aktivace funkce ochrany proti „couvání“ a byla by použita posledně známá hodnota. Proto je třeba implementovat funkci, která zajistí nulování definované části paměti se všemi potřebnými konsekvencemi, tedy především nutností propagace tohoto nulování i do záznamů v úložišti.

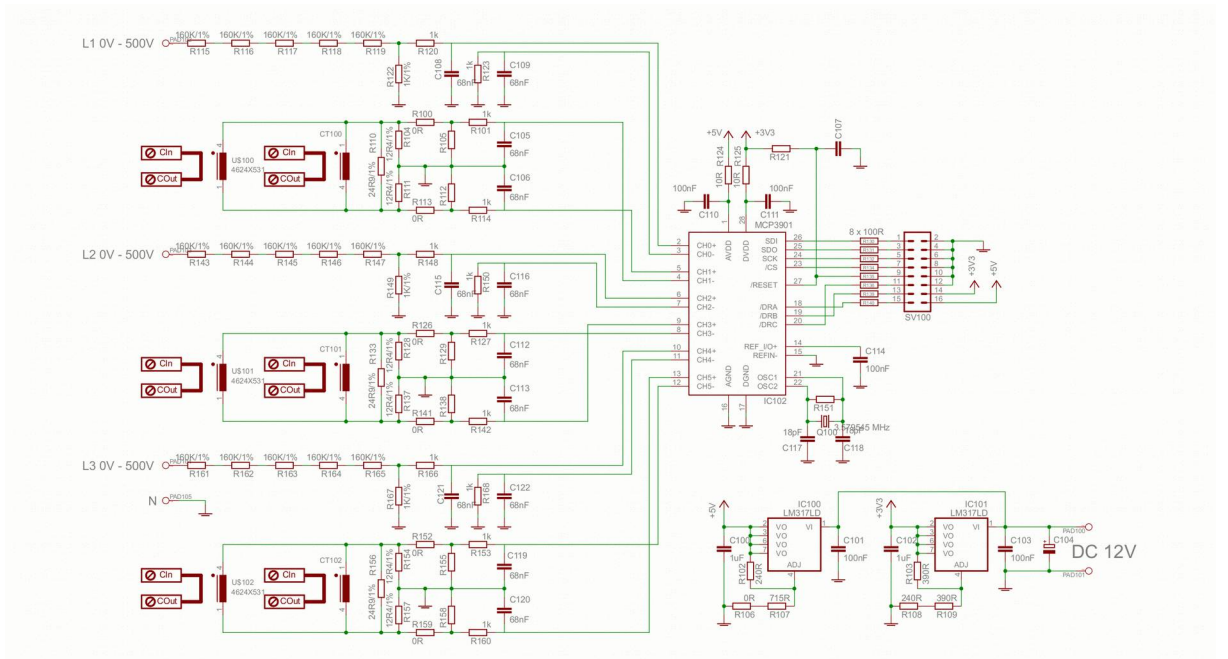
7 Testování

Ověřování správné funkce celého přípravku bylo prováděno zjišťováním přesnosti měření za různých podmínek. Pro měření byla využívána jednopoziční měřicí stolice ED8208 firmy ZERA. Měření probíhala nejprve po jednotlivých fázích, následně pak při všech fázích současně. Při měření byl měněn fázový úhel mezi napětím a proudem. Při zkouškách se porovnávala přesnost měřicího přípravku proti etalonu, který je součástí měřicí stolice. Odchylka je v grafech uváděna v procentech. Při zkouškách bylo zjištěno, že měřicí přístroj, se kterým se ladící přípravek porovnával má přesnost přibližně 0,4%, což není úplně ideální, nicméně pro potřeby ověření správnosti algoritmů výpočtu je dostačující.

Při měření činné a jalové energie popsané v 7.2 a 7.3 byl ladící přípravek osazen dvěma hodinovými oscilátory, externí AD převodníky měly svůj krystal 8,388 Mhz, mikroprocesor pak používá hodinkový krystal 32,768 kHz, z kterého pomoci fázového závěsu vyrábí frekvenci 16,777 MHz pro taktování jádra mikroprocesoru.

7.1 Testovací přípravek

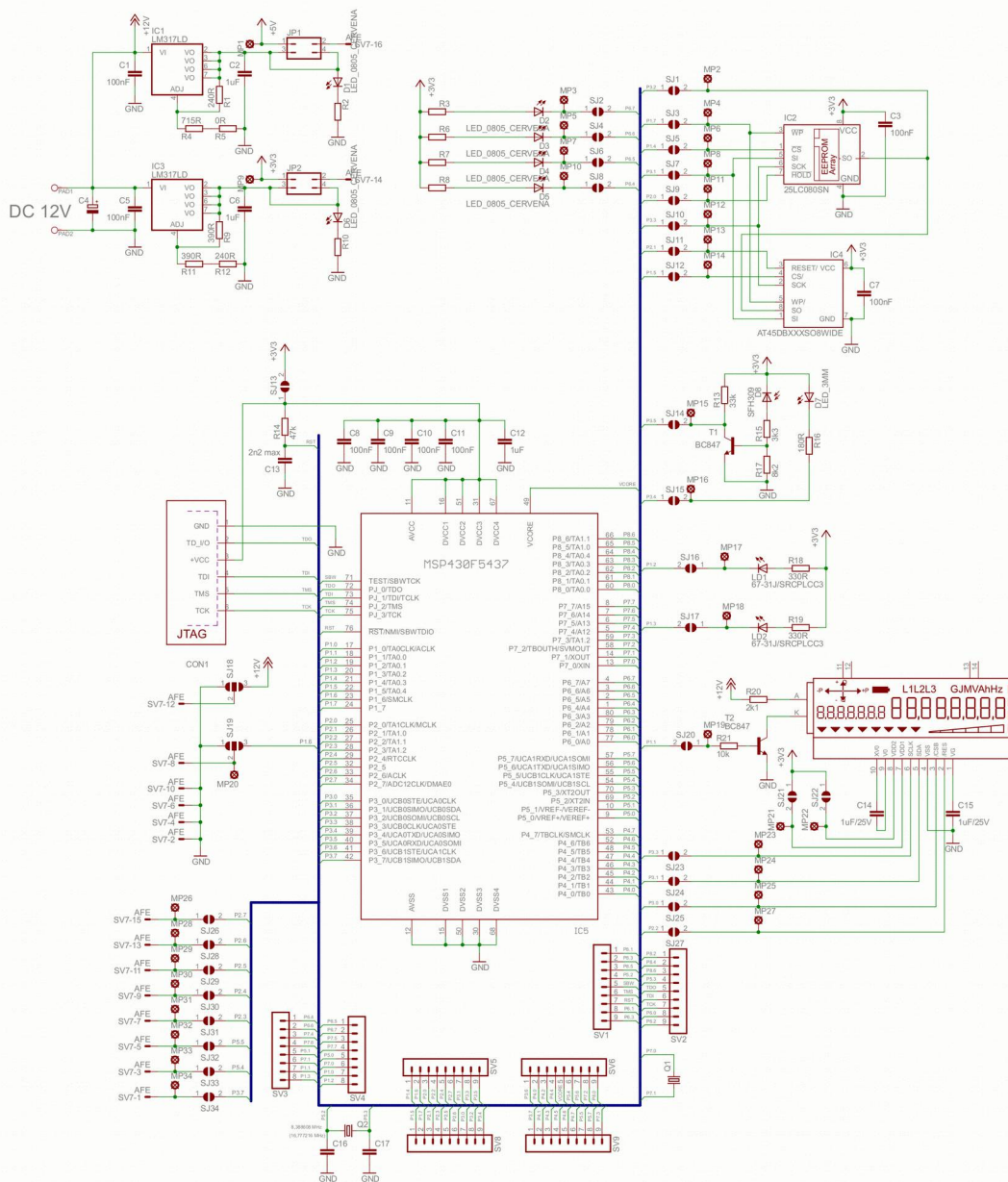
V návrhové části práce bylo naznačeno rozdělení přípravku na dvě desky, a to desku s externími AD převodníky a potřebnými měřicími a přizpůsobovacími obvody (obr. 17 a 18) a desku s mikroprocesorem a k němu připojenými dalšími periferiemi (obr. 19 a 20). Na obrázku 18 je nad deskou s převodníky umístěna deska s provizorním třífázovým zdrojem, který napájí celý přípravek při měření. Měření pak bylo prováděno na sestavě, kterou ukazuje obrázek 21.



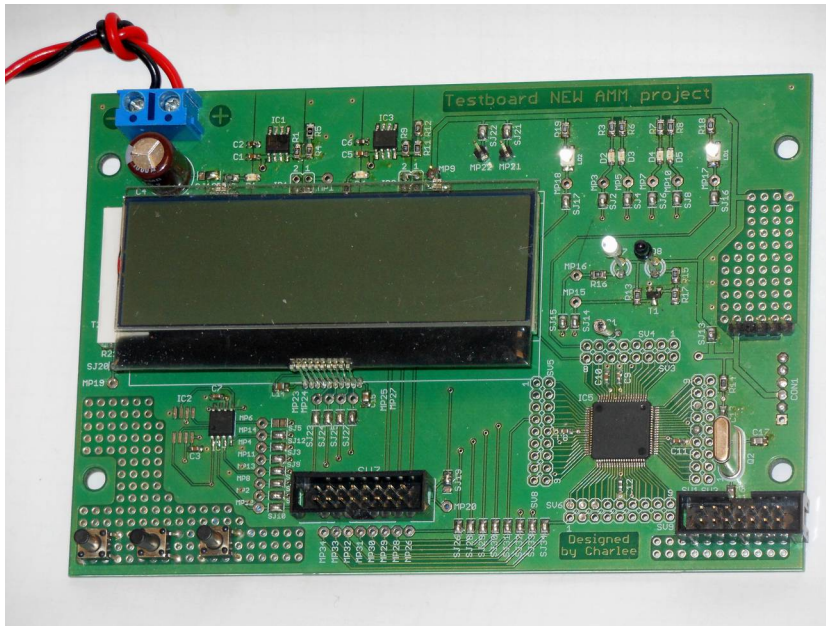
Obrázek 17: Schema třířázové měřicí desky



Obrázek 18: Třířázová měřicí deska v krabici



Obrázek 19: Schéma desky s mikroprocesorem



Obrázek 20: Deska s mikroprocesorem

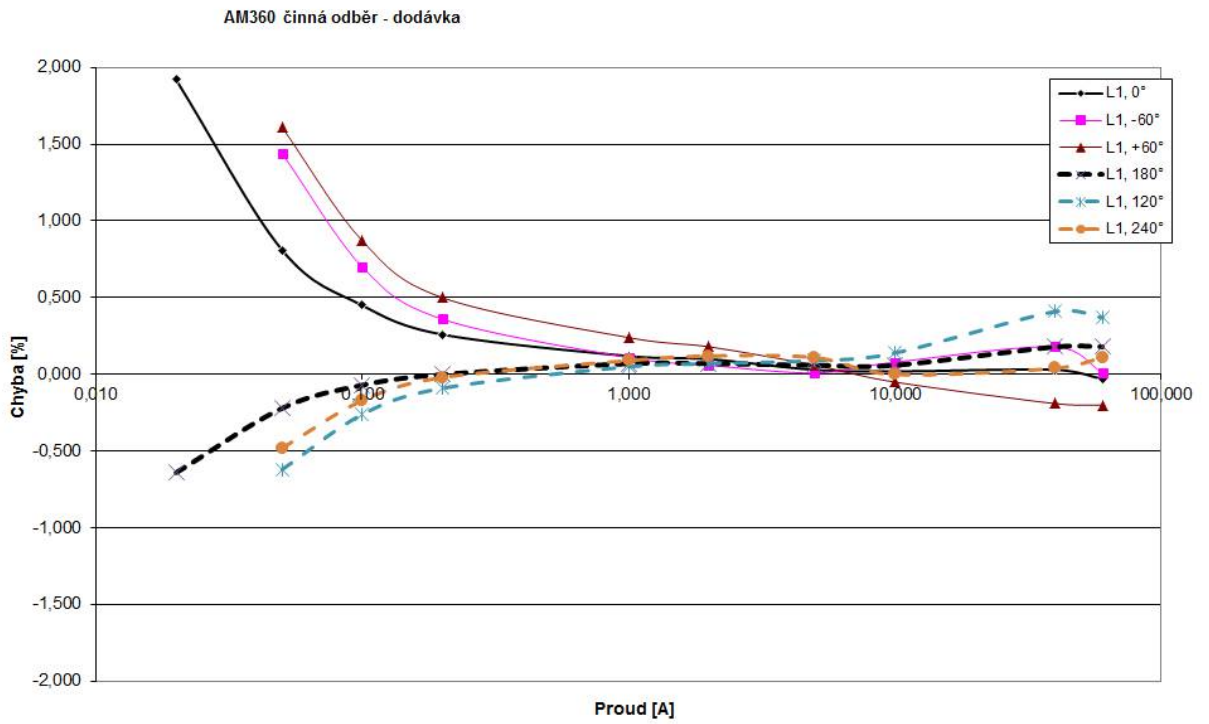


Obrázek 21: Měřicí přípravek

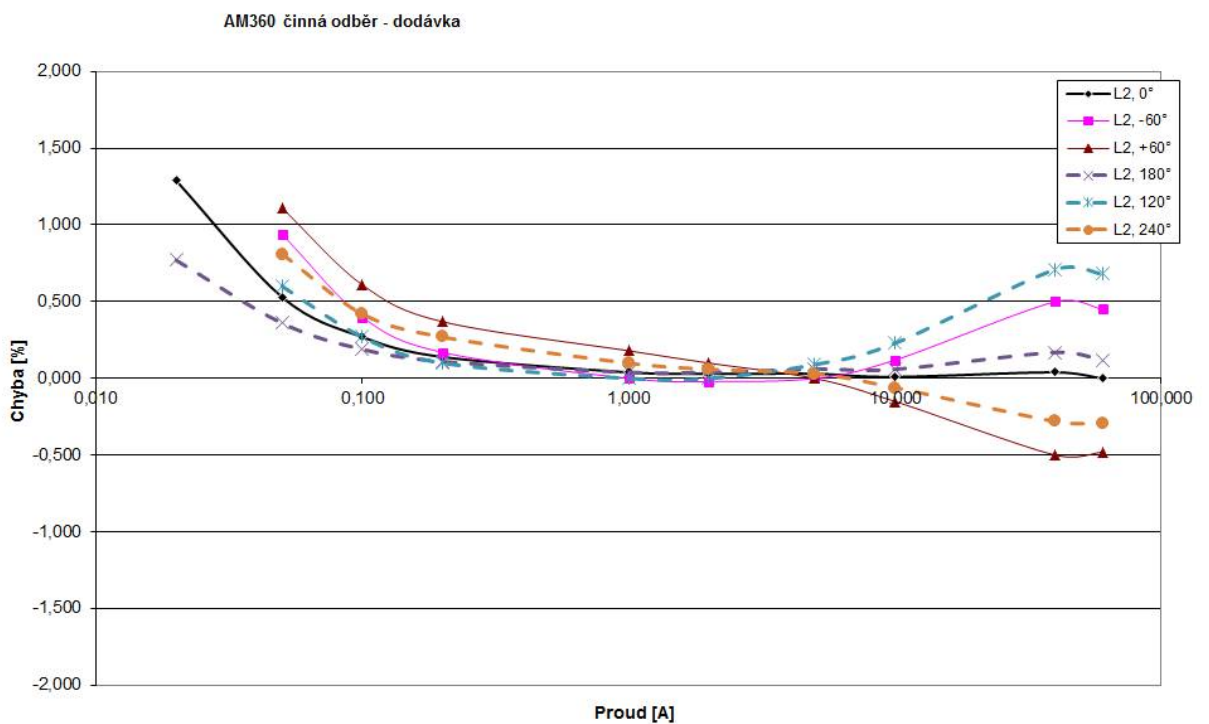
7.2 Ověření měření činné energie

Obrázky 22 až 24 ukazují přesnost měření po jednotlivých fázích, obrázek 25 při průtoku energie ve všech fázích zároveň, kdy všechny tři fáze mají stejné vlastnosti, tedy jak hodnoty napětí a proudů, tak i vzájemného fázového posuvu mezi proudem a napětím. Je vidět, že při nízkých proudech se přesnost zhoršuje. Toto je způsobeno nízkou úrovní vstupního signálu z proudového transformátoru, který je navíc zatížen rušením, takzvaným brumem. Tento vliv byl na základě předchozích zkušeností předpokládán, návrh hardware nebyl optimalizován. Algoritmus výpočtu je připraven na možnost kalibrace tohoto brumu, na ladícím přípravku však nebyla tato korekce použita. S optimalizací zapojení se počítá až při návrhu finálního výrobku, resp. jeho desky tištěných spojů. Mírně odlišné chování třetí fáze na obrázku 24 je způsobeno odlišnými vlastnostmi proudového transformátoru a samozřejmě se projeví při třífázovém měření na obrázku 25.

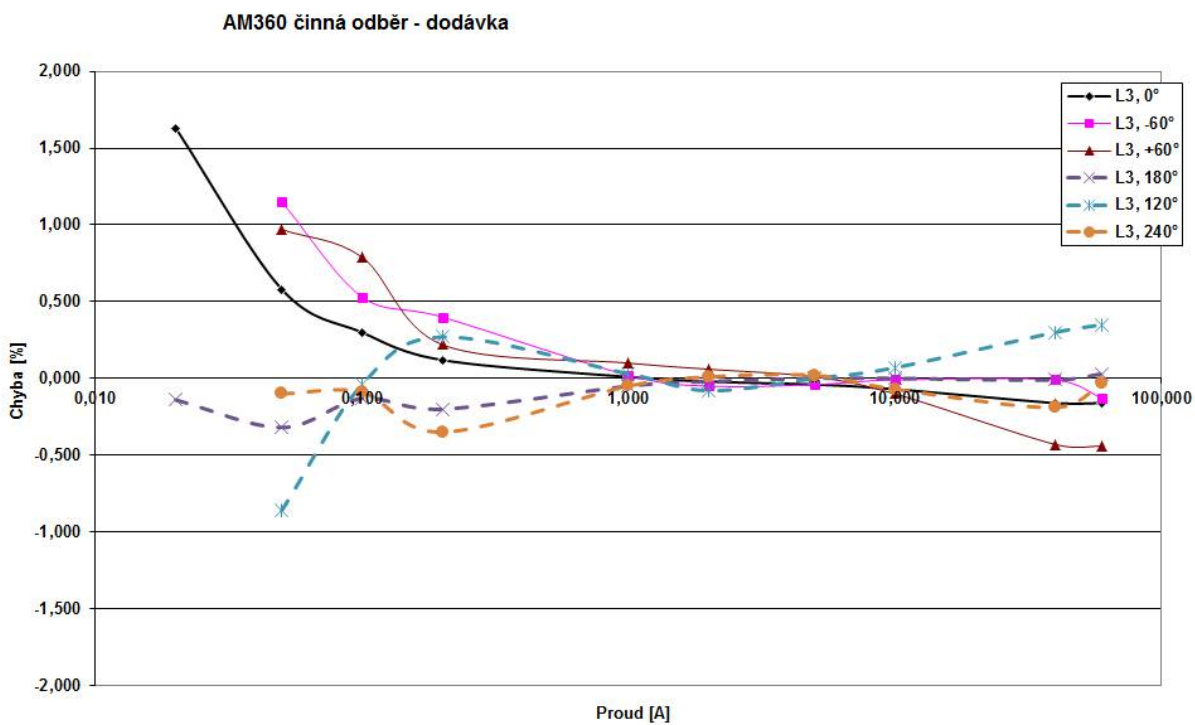
Přesnost pohybuje v očekávaných mezích. Pro výrobu finálních elektroměrů však bude nutné dosáhnout větší přesnosti z důvodu opakovatelnosti hromadné výroby.



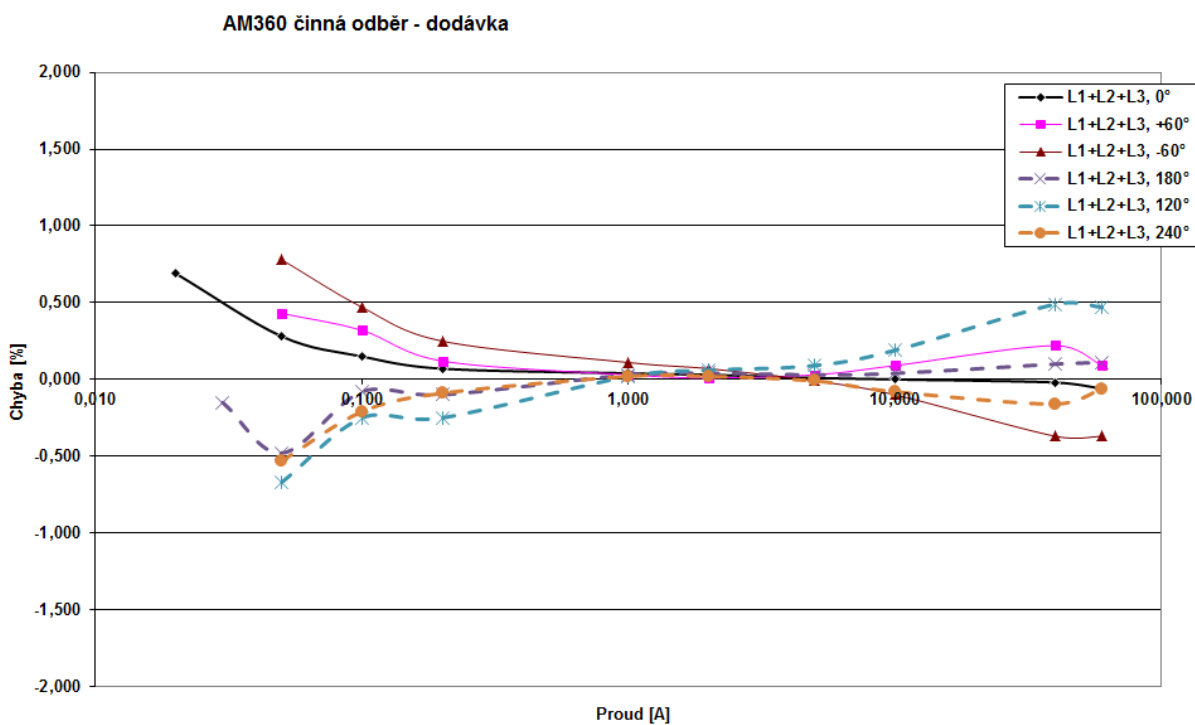
Obrázek 22: Přesnost měření činné energie v 1. fázi



Obrázek 23: Přesnost měření činné energie v 2. fázi



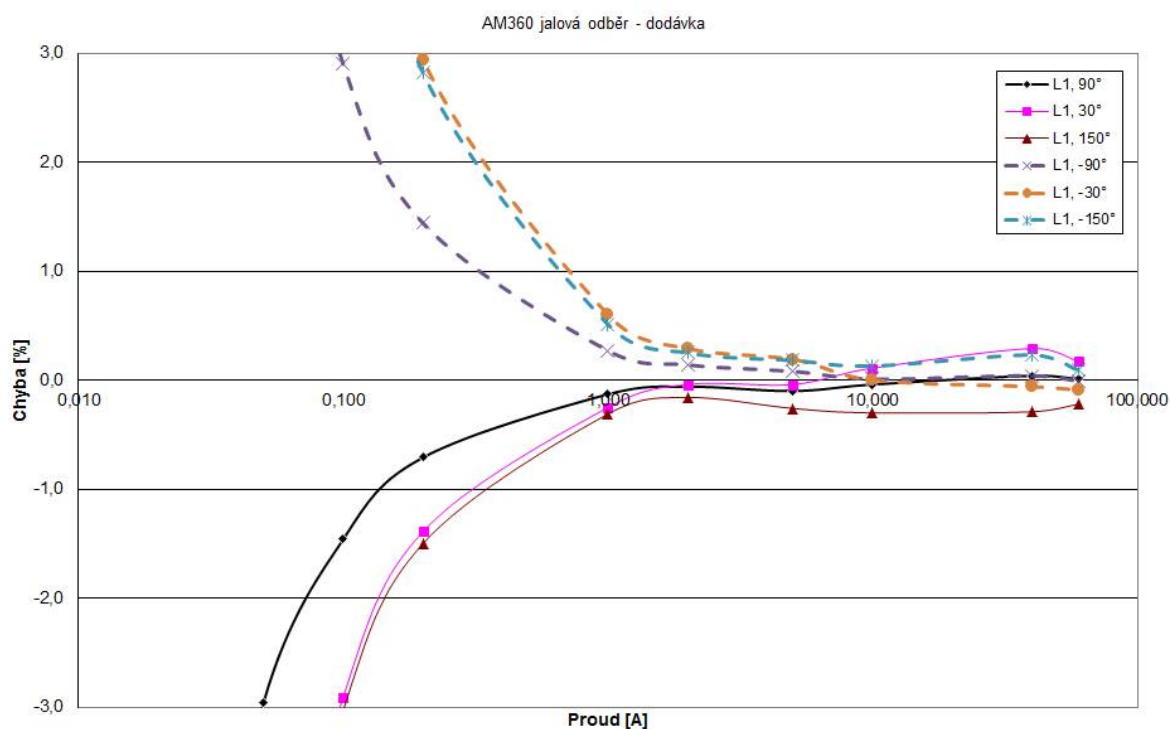
Obrázek 24: Přesnost měření činné energie v 3. fázi



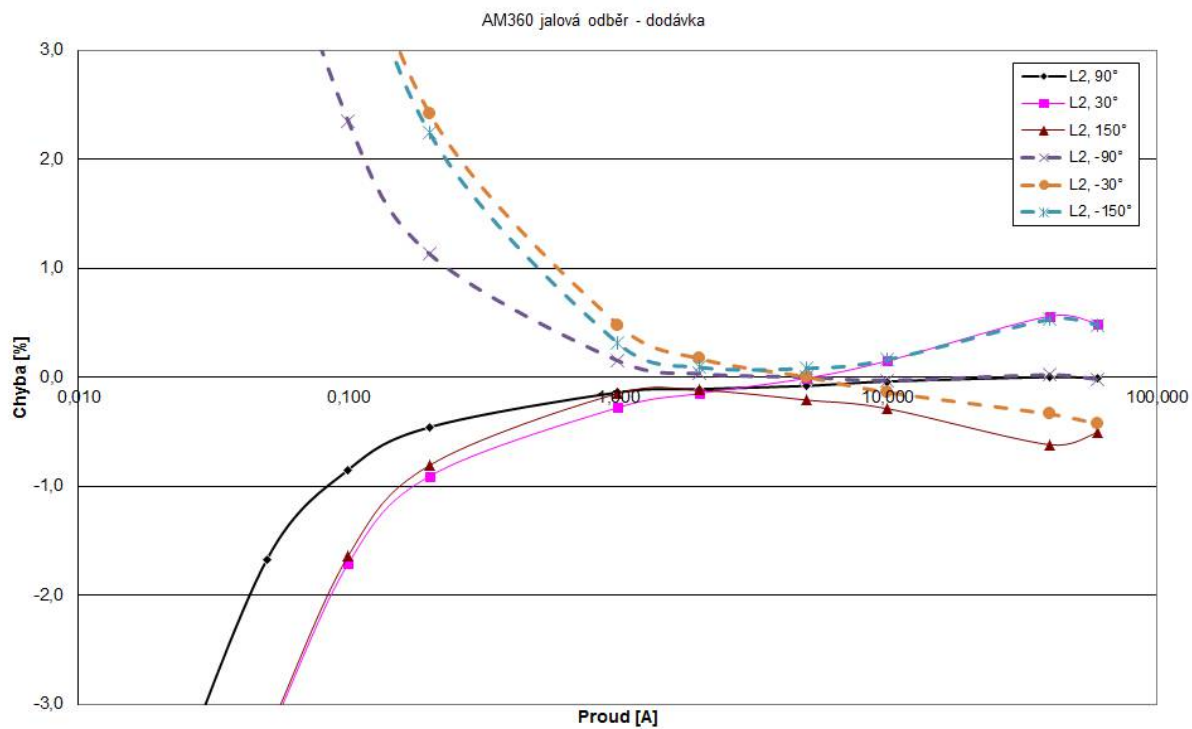
Obrázek 25: Přesnost měření činné energie ve všech fázích

7.3 Ověření měření jalové energie

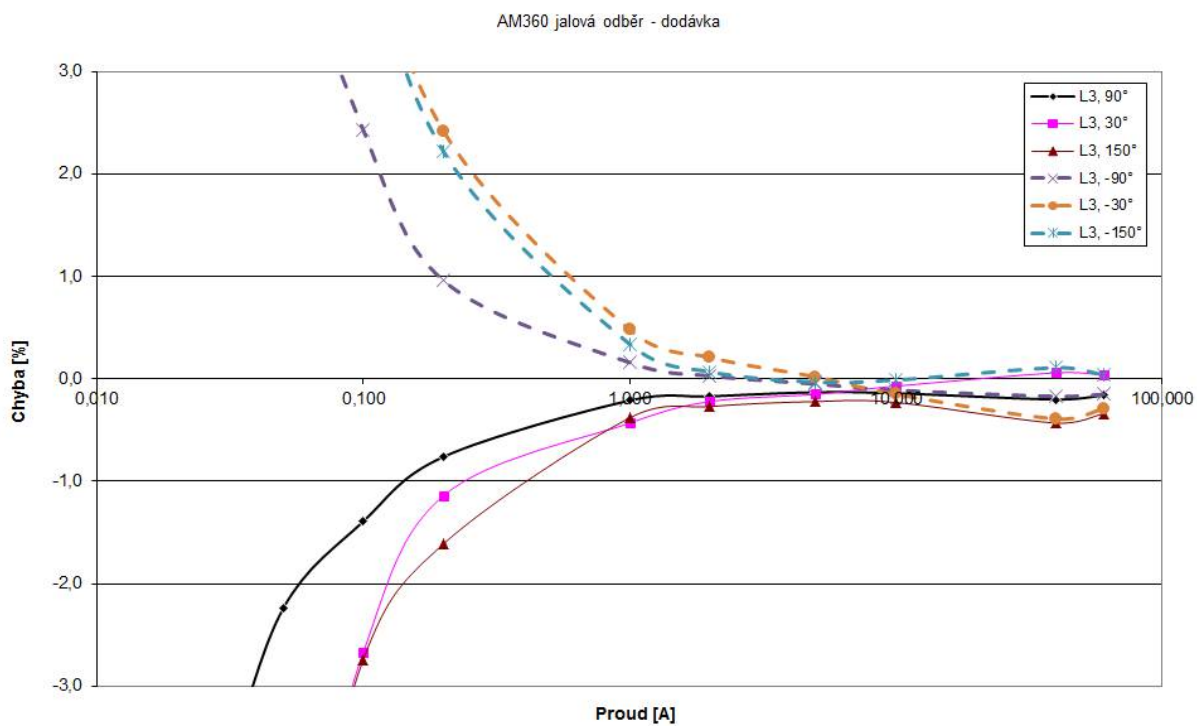
Obrázky 26 až 28 ukazují měření na jednotlivých fázích, obrázek 29 pak měření při průtoku energie všemi fázemi. U jalové energie se nepožaduje velká přesnost měření, přesto jsou naměřené výsledky dobré. Mimo vlivů uvedených u měření činné energie zde vstupuje další faktor, kterým je použitý způsob měření jen dominantní první harmonické složky, resp. jeho nutná interpolace napěťového vzorku ze dvou okolních vzorků v měřícím rastru. Tato interpolace je také závislá na frekvenci měřeného napětí.



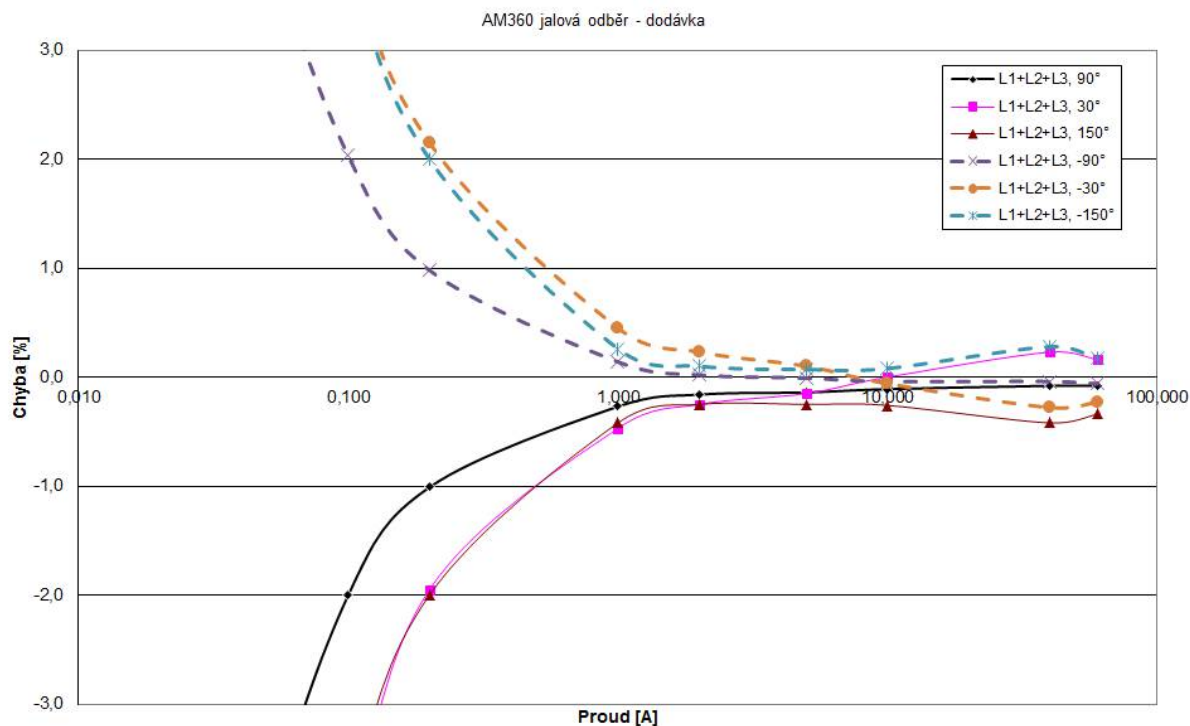
Obrázek 26: Přesnost měření jalové energie v 1. fázi



Obrázek 27: Přesnost měření jalové energie v 2. fázi



Obrázek 28: Přesnost měření jalové energie v 3. fázi

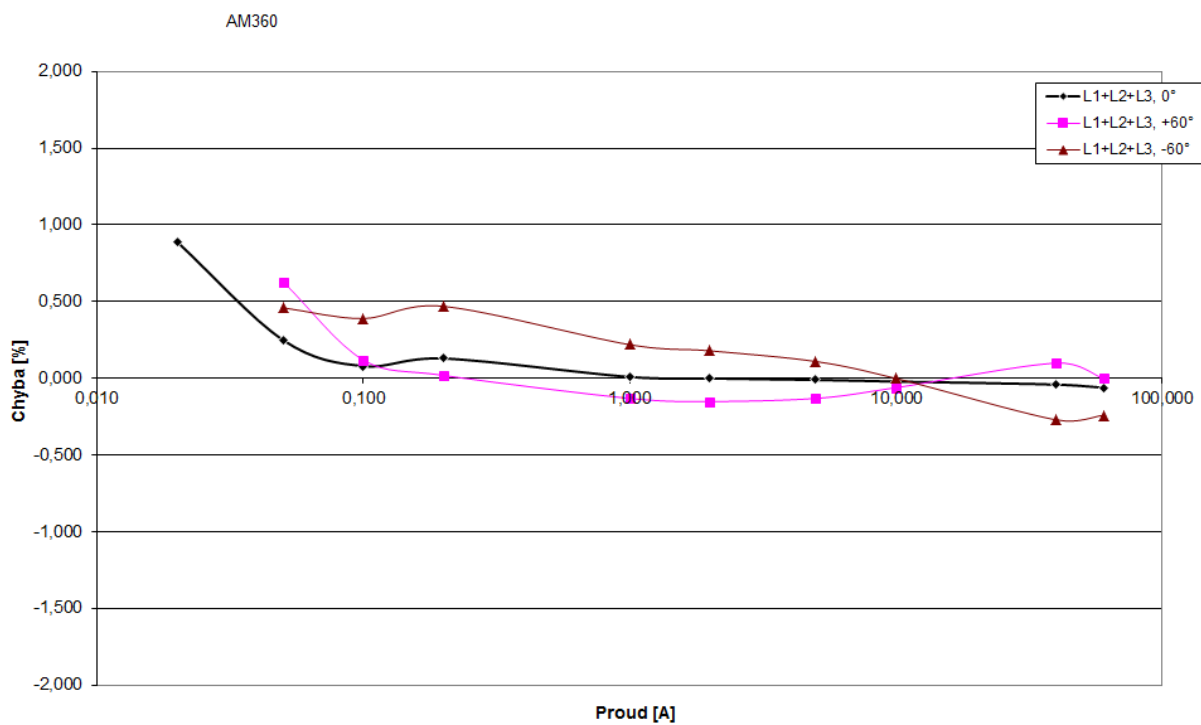


Obrázek 29: Přesnost měření jalové energie ve všech fázích

7.4 Ověření měření s jedním oscilátorem

Z ekonomického hlediska se nevyplatí realizovat oba krystalové hodinové oscilátory, proto bylo nutno ověřit, zdali nedojde ke zhoršení vlastností při použití jednoho krystalového oscilátoru s krystalem 32,768 kHz. Pomocí fázového závěsu je nejprve generována frekvence 16,777 MHz pro jádro mikroprocesoru, následně je pak pomocí na čipu dostupné periferie čítače vydělena na 8,388 MHz potřebných pro provoz externích AD převodníků.

Naměřené výsledky na obrázku číslo 30 v porovnání s obrázkem 24 ukazují, že tato změna nemá na přesnost měření vliv. Mírné rozdíly v číselných hodnotách jsou způsobeny výše zmíněnou nepřesností měřicího přístroje, se kterým se ladící přípravek porovnával.



Obrázek 30: Přesnost měření činné energie ve všech fázích s jedním oscilátorem

8 Závěr

Pečlivá příprava a předchozí zkušenosti s tvorbou firmware pro elektroměry vedla ke vytyčenému cíli. Měřicí jádro správně zpracovává data získaná vzorkováním měřicími obvody do požadovaného tvaru a poskytuje všechna data a funkce, které jsou potřeba pro spolupráci s dalšími budoucími funkcionalitami, které byly naznačeny na obrázku č. 1 v kapitole návrhu.

Testy varianty vybrané ve studii proveditelnosti, tedy externí převodníky, ukázaly i jeden vážnější nedostatek. Slabým místem je právě digitální komunikace mezi mikroprocesorem a převodníky. Při zvolené vzorkovací rychlosti je potřeba už relativně rychlé časování SPI sběrnice. To bude působit potíže při certifikaci elektromagnetické kompatibility v oblasti vyzařování. Poměrně velká vzdálenost mezi řídicím procesorem a převodníky také přináší problém v podobě rušení vlastní komunikace, proto bylo nutné zařadit do firmware dohled nad komunikací s převodníky a řešení případného chybového stavu. Problémy se podařilo částečně vyřešit snížením hodinového kmitočtu SPI sběrnice na nejmenší možnou hodnotu. Ve finálním výrobku bude třeba dbát velké pozornosti na obvodové zabezpečení této sběrnice proti rušení oběma směry.

Výsledky měření na ladících přípravcích ukazují, že bude možné dodržet předepsané třídy přesnosti a ostatní požadavky dané normami uvedenými v nefunkčních požadavcích.

9 Zkratky a vysvětlivky

PLC	Komunikace po silovém vedení (z anglického Power Line Communication)
DLMS	Device Language Message Specification
GPIO	Vstup/výstup pro všeobecné použití (z anglického General Purpose Input Output)
SPI	Sériové rozhraní pro periferie (z anglického Serial Peripheral Interface)
UART	Universální sériové asynchronní rozhraní (z anglického Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
I2C	Seriová sběrnice (z anglického Inter-Integrated Circuit)
AD	Analogo-digitální
ADC	Analogo-digitální převodník
LED	Světloemitující dioda
LCD	Displej s tekutými krystaly
chx	Kanál x
AD chx	Kanál x analogo-digitálního převodníku
SAR	AD převodník s postupnou aproximací
FMEA	Analýza možného výskytu a vlivu vad (z anglického Failure Mode and Effects Analysis)
1F	Jednofázový
3F	Třífázový
JTAG	Standard pro testování a programování integrovaných obvodů (z anglického Joint Test Action Group)
SVN	Systém pro správu a verzování zdrojových kódů (zkratka z původního anglického Subversion)
RAM	Paměť s náhodným přístupem (z anglického Random Access Memory)
FW	Firmware – základní nebo jediné programové vybavení pevně svázané s hardware
HW	Hardware – plošný spoj, součástky ...
DMA	Přímý přístup do paměti (z anglického Direct Memory Access)

10 Literatura

- [1] HAASZ, Vladimír. *Elektrická měření: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 337 s. ISBN 80-010-2731-7.
- [2] VEDRAL, Josef a Jan FISCHER. *Elektronické obvody pro měřicí techniku: přístroje a metody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 340 s. ISBN 80-010-2966-2.
- [3] HAASZ, Vladimír, Jaroslav ROZTOČÍL a Jiří NOVÁK. *Číslicové měřicí systémy*. 2. přepr. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02219-6.
- [4] TEXAS INSTRUMENTS. *Mixed Signal Microcontroller: MSP430F5438A, MSP430F5437A, MSP430F5436A, MSP430F5435A, MSP430F5419A, MSP430F5418A* [online]. 2010, 2013 [cit. 2013-12-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/msp430f5437a>
- [5] TEXAS INSTRUMENTS. *MSP430F5437A Device Erratasheet* [online]. 2012, 2013 [cit. 2013-12-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/litv/pdf/slaz288i>
- [6] TEXAS INSTRUMENTS. *MSP430x5xx and MSP430x6xx Family: User's Guide* [online]. 2008, 2013 [cit. 2013-12-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/litv/pdf/slau208m>
- [7] MICROCHIP. *MCP3901: Two-Channel Analog Front End* [online]. 2011 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22192d.pdf>
- [8] MICROCHIP. *MCP3903: Six Channel Delta Sigma A/D Converter* [online]. 2011 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25048B.pdf>
- [9] ČSN EN 62052-11. *Vybavení pro měření elektrické energie (AC) - Všeobecné požadavky, zkoušky a zkušební podmínky : Část 11: Elektroměry*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [10] ČSN EN 50470-3. *Vybavení pro měření elektrické energie (AC) : Část 3: Zvláštní požadavky - Statické činné elektroměry (třída A, B a C)*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [11] ČSN EN 62053-23. *Vybavení pro měření elektrické energie (AC) - Zvláštní požadavky : Část 23: Statické elektroměry pro jalovou energii (třídy 2 a 3)*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [12] ČSN EN 50470-1. *Vybavení pro měření elektrické energie (AC): část 1: Všeobecné požadavky, zkoušky a zkušební podmínky – Měřicí zařízení (třídy A, B a C)*. Praha: Úad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [13] Current transformer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Current_transformer
- [14] Rogowského cívk. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Rogowsk%C3%A9ho_c%C3%ADvka
- [15] Hallova sonda. *Elekrika.cz* [online]. 2006 [cit. 2013-12-17]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-04-01.2480110481>

11 Obsah příloženého CD-ROM

\	Tato diplomová práce v souboru bonisjan_2014dip.pdf
\doc	Elektronické dokumenty odkazované v literatuře
\sw	Instalace vývojového prostředí Code Composer Studio
\prj	Projekt obsahující firmware měřicího jádra pro Code Composer Studio

