

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Elektrotechnická fakulta

Katedra výkonových elektrotechnických systémov

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2007

Martin Piet'ka

Diplomová práca

Priezvisko a meno: **Piet'ka Martin**

Rok: **2007**

Názov diplomovej práce: **Návrh a realizácia trojfázového vektorového wattmetra**

Fakulta: **Elektrotechnická**

Katedra: **KVES**

Počet strán: **50**

Počet obrázkov: **18**

Počet tabuliek: **14**

Počet grafov: **0**

Počet príloh: **6**

Počet použi. lit.: **12**

Anotácia v slovenskom jazyku:

Práca sa zaoberá kompletným návrhom a konštrukciou trojfázového vektorového wattmetra. Popisuje návrh hardvéru, zaoberá sa výpočtom efektívnych, stredných a maximálnych hodnôt, výkonov, harmonickou analýzou a komunikáciou s osobným počítačom, až po zhotovenie funkčného prototypu, na ktorom bola overená presnosť.

Anotácia v anglickom jazyku:

Work deals with complete proposal and construction of the three-phase vector wattmeter. It explains the proposal of the hardware, deals with the calculations of the effective, average and maximum values, powers, harmonic analysis and communication with the personal computer, up to construction of the functional prototype, on which has been the accuracy verified.

Kľúčové slová: Trojfázový wattmeter, digitálny signálový procesor, výkony, harmonická analýza, Free Master.

Vedúci diplomovej práce:

Doc. Ing. Pavol Rafajdus, PhD.

Konzultant diplomovej práce:

Recenzent diplomovej práce:

Dátum: **21.5.2007**

ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE

Elektrotechnická fakulta

Katedra výkonových elektrotechnických systémov

Diplomová práca

TEXTOVÁ ČASŤ

2007

Martin Piet'ka

Čestné vyhlásenie

Prehlasujem, že som zadanú diplomovú prácu vypracoval samostatne, pod odborným dohľadom vedúceho diplomovej práce a použil som literatúru len v práci uvedenú.

Žilina, 20. máj 2007

.....
vlastnoručný podpis

Pod'akovanie

Chcel by som sa poďakovať všetkým, ktorí mi odbornou, alebo inou formou prispeli k vypracovaniu diplomovej práce. Menovite by som chcel poďakovať Ing. Pavlovi Makyšovi, PhD. a Ing. Vladimírovi Vavrúšovi, vedúcemu diplomovej práce Doc. Ing. Pavlovi Rafajdusovi, PhD., a Ing. Petrovi Hudákovi zo spoločnosti Power - One s.r.o. za materiálnu pomoc.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja prostredníctvom finančnej podpory č. APVT-20-039602 a prostredníctvom projektu VEGA č.1/2052/05

Obsah

Zoznam symbolov a skratiek.....	10
1. NÁVRH TOPOLOGIE WATTMETRA.....	12
1.1 Merací prístroj a meranie.....	12
1.2 Vlastnosti wattmetra.....	12
1.3 Bloková schéma wattmetra.....	13
1.4 Snímače.....	14
1.4.1 Analógová časť.....	15
1.4.2 DSP časť.....	17
1.4.3 Panel LCD displeja a klávesnice.....	18
1.4.4 Optické oddelenie USB rozhrania.....	19
1.4.5 Zdroj.....	19
2. VÝBER ELEKTRONICKÝCH KOMPONENTOV.....	21
2.1 Snímače.....	21
2.2 Analógová časť.....	21
2.3 DSP časť.....	21
2.4 Panel LCD displeja a klávesnice.....	22
2.5 Optické oddelenie USB rozhrania.....	22
3. NÁVRH DOSIEK PLOŠNÝCH SPOJOV.....	23
4. SOFTVÉR PRE DSP PROCESOR.....	24
4.1 Opis DSP procesora DSP56F805.....	24
4.2 Prehľad použitej aritmetiky.....	25
4.3 Scalovanie.....	25
4.4 Popis programu.....	27
4.4.1 Vzorkovanie.....	27
4.4.2 Meranie frekvencie.....	27
4.4.3 Výpočty.....	28
4.4.4 Prepínanie rozsahov.....	29
4.4.5 Komunikácia s PC.....	29
4.4.6 Komunikácia s panelom.....	29
4.5 Charakteristické hodnoty harmonických a neharmonických priebehov a realizácia ich výpočtu v DSP procesore.....	30
4.5.1 Efektívna hodnota.....	30
4.5.2 Maximálna a minimálna.....	31
4.5.3 Stredná hodnota.....	31
4.5.4 Stredná usmernená hodnota.....	32
4.5.5 Činný výkon.....	32
4.5.6 Zdanlivý výkon.....	33
4.5.7 Jalový výkon.....	33
4.5.8 Deformačný výkon.....	34
4.5.9 Trojfázové výkony.....	34
4.6 Harmonická analýza.....	35
4.6.1 Fourierov rad.....	35
4.6.2 Matematické metódy harmonickej analýzy.....	36
4.6.2.1 Analytická metóda harmonickej analýzy.....	36
4.6.2.2 Numerická metóda harmonickej analýzy – Rungeho metóda.....	36
4.7 Digitálne filtre.....	38

4.7.1 Rozdelenie digitálnych filtrov.....	38
4.7.2 Digitálny dolnopriepustný filter.....	39
5. SOFTVÉR PRE PANEL DISPLEJA A KLÁVESNICE.....	40
6. SOFTVÉR PRE PC.....	41
7. MECHANICKÁ KONŠTRUKCIA.....	43
8. VERIFIKÁCIA NAMERANÝCH VELIČÍN.....	45
8.1 Určenie chyby merania a triedy presnosti.....	45
Záver.....	49
Zoznam použitej literatúry.....	50

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1 Číslíkový merací prístroj.....	13
Obr. 1.2 Blokovaná schéma wattmetra.....	14
Obr. 1.3 Blokovaná schéma analógovej časti.....	15
Obr. 1.4 Schéma zapojenia analógovej časti pre jednu fázu.....	15
Obr. 1.5 Blokovaná schéma DSP časti.....	18
Obr. 1.6 Blokovaná schéma panelu.....	18
Obr. 1.7 Blokovaná schéma USB rozhrania.....	19
Obr. 4.1 Blokovaná schéma DSP procesora.....	24
Obr. 4.2 Blokovaná schéma programu v DSP procesore.....	27
Obr. 4.3 Princíp merania frekvencie.....	28
Obr. 4.4 Vývojový diagram pre algoritmus spočítavania výkonov.....	35
Obr. 4.5 Analógový dolnopriepustný filter – RC článok.....	39
Obr. 6.1 Zobrazenie fázových napätí a fázových prúdov podľa merania na obr. 8.2.....	42
Obr. 7.2 Rez predným panelom.....	43
Obr. 7.3 Fotka vyhotovenia čelného panelu.....	44
Obr. 7.4 Fotka vyhotovenia zadného panelu.....	44
Obr. 8.1 Schéma zapojenia porovnávacieho merania -R zát'až.....	46
Obr. 8.2 Shcéma zapojenia pre meranie na trojfázovej R-L zát'aži.....	47

Zoznam tabuliek

Tab. 1.1 Veličiny merané wattmetrom.....	12
Tab. 1.2 Hodnoty rezistorov, meracie rozsahy a rozlíšiteľnosť pri meraní.....	17
Tab. 1.3 Spotreby jednotlivých obvodov a celkový odber.....	20
Tab. 4.1 Rôzne reprezentácie 16 bitových čísiel.....	25
Tab. 4.2 Prehľad niektorých aritmetických funkcií pre celočíselnú a zlomkovú aritmetiku.....	25
Tab. 4.3 Príklad prepočtu.....	26
Tab. 4.4. Typy posielaných dát.....	29
Tab. 4.5 Príklad komunikácie z DSP do panelu – posielanie frekvencie.....	30
Tab. 4.6. Rozdelenie digitálnych filtrov.....	39
Tab. 8.1 Výsledky merania presnosti wattmetra časť 1, R záťaž.....	46
Tab. 8.2 Výsledky merania presnosti wattmetra časť 2, R záťaž.....	47
Tab. 8.3 Meranie na trojfázovej R-L záťaži, časť 1.....	47
Tab. 8.4 Meranie na trojfázovej R-L záťaži, časť 2.....	47
Tab. 8.5 Porovnanie výsledkov harmonickej analýzy pre 3., 5. a 13. harmonickú.....	48

Zoznam symbolov a skratiek

PC	Personal Computer – osobný počítač
ADC	Analog to Digital Converter – analógovo-digitálny prevodník
DSP	Digital Signal Processor – signálový procesor
SMD	Surface Mount Devices – súčiastky vhodné na povrchovú montáž
RAM	Random Access Memory – operačná pamäť
LCD	Liquid Crystal Display - displej s kvapalnými kryštálmi
USB	Universal Serial Bus - univerzálna sériová zbernica
SCI	Serial Communcation Interface – sériové rozhranie
DPS	Doska Plošného Spoja
R	Rezistor
C	Kondenzátor
U_{RMS}	Efektívna hodnota napätia
I_{RMS}	Efektívna hodnota prúdu
U_{AVG}	Stredná hodnota napätia
I_{AVG}	Stredná hodnota prúdu
U_{AVR}	Stredná usmernená hodnota napätia
I_{AVR}	Stredná usmernená hodnota prúdu
P	Činný výkon
S	Zdanlivý výkon
Q	Jalový výkon
D	Deformačný výkon
N	Počet vzoriek za periódu
n	Aktuálna vzorka

Úvod

Potreba vývoja a výroby trojfázového vektorového wattmetra (ďalej len wattmeter) vznikla z potreby Katedry výkonových elektrotechnických systémov ako náhrada za poškodený wattmeter Infratek 305A (funkčná iba jedna fáza), namiesto ktorého sa používajú klasické analógové meracie prístroje. Tieto nespĺňajú všetky podmienky, ktoré prináša prax elektrických meraní. Najmä zhrnutie automatizácie meracieho procesu, presnosti, rýchlosti a reprezentácie výsledkov merania vhodného pre ďalšie spracovanie, najmä na osobnom počítači (PC). Táto práca popisuje kompletný postup vývoja trojfázového wattmetra od návrhu schém, dosiek plošných spojov a ich zhotovenia, vývoja programov až po mechanickú konštrukciu a zhotovenie funkčného prototypu.

1. NÁVRH TOPOLOGIE WATTMETRA

1.1 Merací prístroj a meranie

Meranie je proces získavania informácie o hodnote meranej veličiny, ktorý spočíva v experimentálnom porovnávaní hodnoty meranej veličiny so známymi hodnotami.

Merací prístroj je prístroj, ktorým sa vykonáva meranie. Elektronický merací prístroj je merací prístroj obsahujúci elektronické obvody, ktoré sa podieľajú na hlavných vlastnostiach prístroja. Merací prístroj v užšom slova zmysle poskytuje na svojom výstupe údaj o hodnote veličiny na vstupe. Meracie prístroje môžu byť podľa svojho údaja analógové, alebo číslicové. Analógové meracie prístroje, ktoré sú historicky staršie, poskytujú na svojom výstupe analógový údaj (výchylka ukazovateľa na stupnici); nameranú hodnotu musí určiť osoba čítajúca tento analógový údaj (vykoná digitalizáciu). Číslicové meracie prístroje udávajú nameranú hodnotu rovno vo formáte čísla.[12]

1.2 Vlastnosti wattmetra

Pred začiatkom samotného návrhu treba určiť vlastnosti prístroja. Wattmeter by mal merať a vypočítavať nasledujúce veličiny:

Tab. 1.1 Veličiny merané wattmetrom

	Veličiny	Maximálny rozsah
Napätie	Efektívna, stredná, stredná usmernená, maximálna, minimálna	± 1000 V
Prúd	Efektívna, stredná, stredná usmernená, maximálna, minimálna	± 70 A
Výkon	Činný, zdánlivý, jalový, deformačný	± 70 kW (VA, VAr, VAd)
Harmonická analýza napätia	Maximálna a efektívna hodnota	± 1000 V
Harmonická analýza prúdu	Maximálna a efektívna hodnota	± 70 A

Harmonická analýza výkonu	Činný, zdanlivý, jalový	±70 kW (VA, VAr)
Činiteľ výkonu (účinník)		±1
Frekvencia		300 Hz

Pre napätie a prúd sa počíta stredná hodnota z jednotlivých fáz pre každú veličinu tzn., že sa počíta napr. efektívna hodnota pre každú fázu a ich stredná hodnota. Pri výkonoch sa počíta súčet hodnôt v jednotlivých fázach. Spolu to je 29 rôznych hodnôt pre jednu fázu, pre tri fázy je to 102 hodnôt (28x3 +13 stredných hodnôt +4 súčtové+ frekvencia). Tieto hodnoty sa počítajú súčasne, na displeji možno naraz zobrazit' 16 hodnôt, v PC všetky.

Ďalšia požiadavka na wattmeter je vykonávať harmonickú analýzu po 50 harmonickú tzn.:pre každú harmonickú zložku možno vypočítať amplitúdu a fázový posun, z toho možno určiť efektívnu hodnotu napätia (prúdu) a činný, jalový a zdanlivý výkon pre danú harmonickú zložku.

Predpokladaná presnosť: 2%

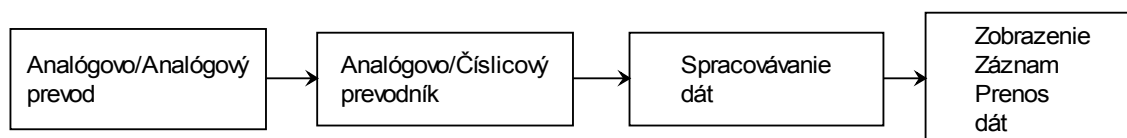
Dôležitým parametrom prístroja je aj jeho cena. Celkový návrh wattmetra je orientovaný na minimalizáciu nákladov a na dosiahnutie maximálnej presnosti.

1.3 Bloková schéma wattmetra

Činnosť prístroja možno rozdeliť na 4 základné bloky - vid'. obrázok 1.1.

Analógovo/analógový prevod tvorí snímač (snímač je časť meracieho prístroja, na ktorú priamo pôsobí meraná veličina) a analógové obvody slúžiace na úpravu signálu.

Analógovo/číslicový prevod prevádza analógovú veličinu do digitálnej podoby (digitalizuje).[12]



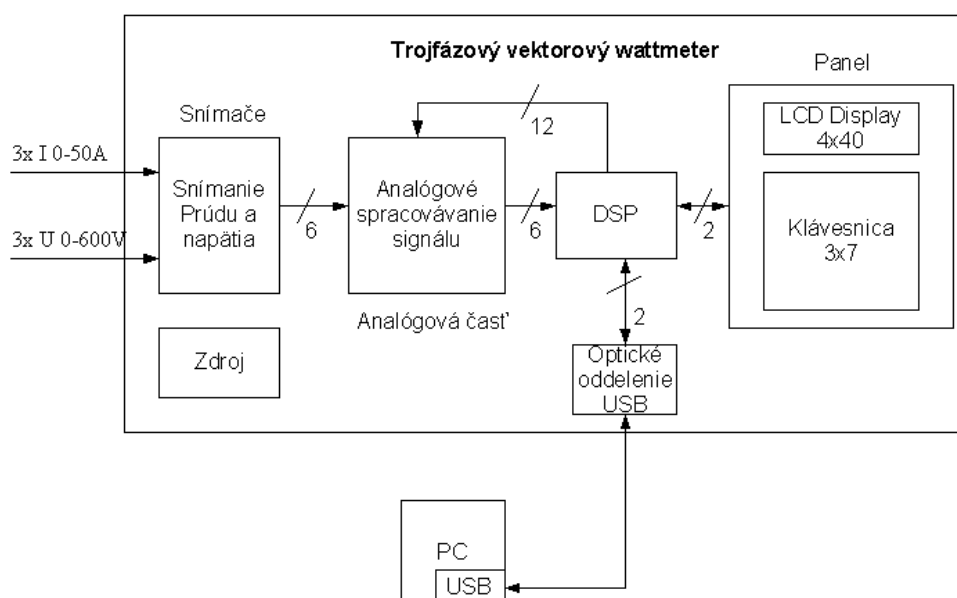
Obr. 1.1 Číslicový merací prístroj

Na obr. 1.2 je zobrazená bloková schéma mnou navrhnutého wattmetra. Skladá sa z

nasledujúcich funkčných blokov:

1. Snímače
2. Analógová časť
3. DSP časť
4. Panel LCD displeja a klávesnice
5. Optického oddelenia USB rozhrania
6. Zdroj

Jednotlivé časti tvoria funkčne, ale aj fyzicky jednotlivé celky a budú jednotlivo popísané v nasledujúcich kapitolách.



Obr. 1.2 Bloková schéma wattmetra

1.4 Snímače

Snímače tvoria galvanicky oddelené prúdové prevodníky pracujúce na princípe Hallovhov javu.

Hallovhov jav popisuje rovnica pohybu elektrónu v materiáli, cez ktorý prechádza v osi x prúd a je vystavený magnetickému poľu v osi z . V osi y vznikne rozdiel potenciálov – Hallovo napätie:

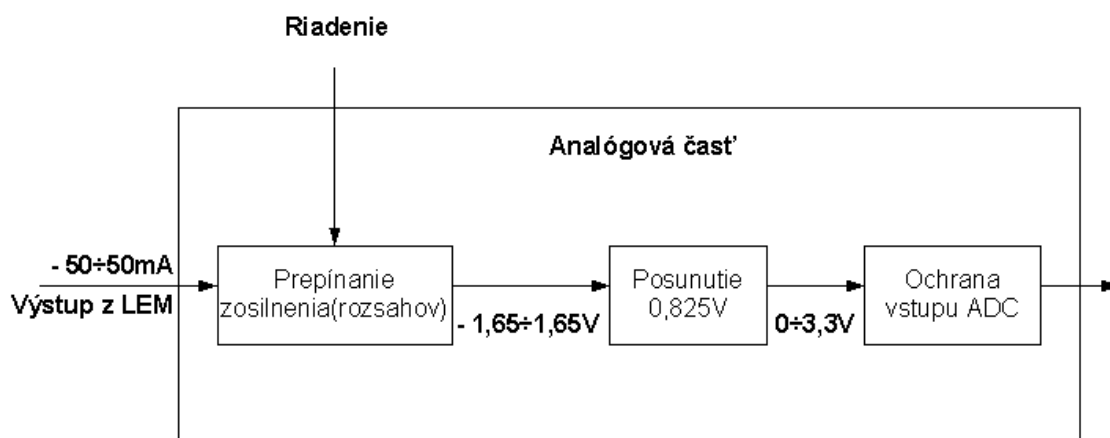
$$U_y = \mu \cdot E_x \cdot B \cdot b = \frac{I \cdot B}{n \cdot e \cdot d} = K_{BO} \cdot I \cdot B \quad (1.1)$$

Vyrábajú sa prevodníky pracujúce v otvorenej a uzavretej slučke, tie majú množstvo

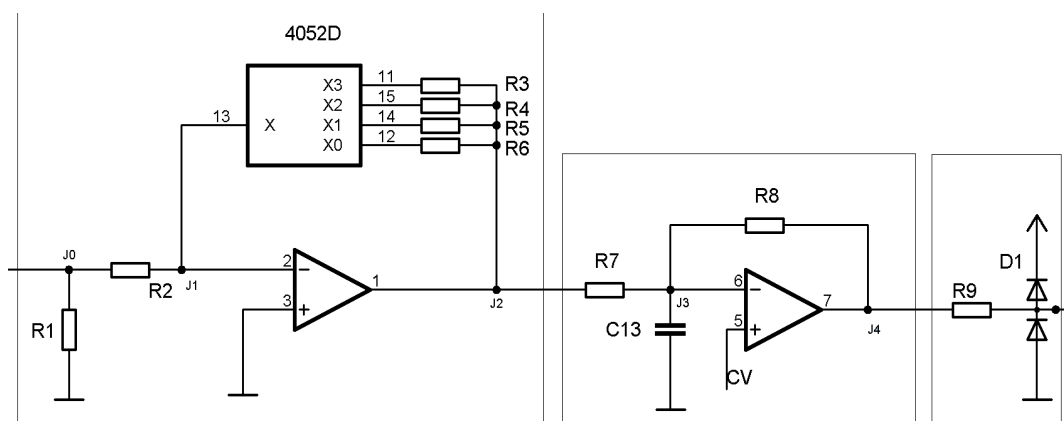
výhod ako napr.: širšie frekvenčné pásmo, teplotnú kompenzáciu, väčšiu presnosť a linearitu. Vo wattmetri sú použité snímače od firmy LEM.

1.4.1 Analógová časť

Keďže výstup zo snímačov prúdu a napätia je prúdový, je potrebné tento vhodne previesť na napätie, ktoré by mohlo byť na vstupe A/D prevodník. To znamená, že musí byť v rozsahu 0V až 3,3V. Pre lepšie využitie A/D prevodník a zlepšenie presnosti wattmetra sa meracie rozsahy prepínajú.



Obr. 1.3 Bloková schéma analógovej časti



Obr. 1.4 Schéma zapojenia analógovej časti pre jednu fázu

Blok prepínania rozsahov tvorí operačný zosilňovač (OZ) v invertujúcom zapojení, ktorého zosilnenie sa prepína analógovým multiplexom – obvod 4052, ktorý prepína

medzi tranzistormi R3 až R5 v spätnej väzbe OZ. Prepínanie rozsahov riadi DSP procesor. Výstupné napätie sa invertuje a posunie nasledujúcim stupňom o napätie $2xU_{cv}$. Výstupné napätie bude v rozsahu 0-3,3V. Pri prekročení tohto rozsahu napr. pri chybnom prepnutí rozsahu, alebo pri náhlej zmene vstupu, pokiaľ nezareaguje DSP prepnutím, je potrebná ochrana vstupu prevodníka. Tá je tvorená dvoma schotkyho diódami D1, D2 a tranzistorom R9. Ak napätie z výstupu OZ dosiahne úroveň 3,3V a viac, otvorí sa dióda D1 a výstupné napätie zostane zasaturované na úrovni 3,3V. Napätie na anóde diódy D1 je nutné nastaviť tak, aby napätie na výstupe dosiahlo maximálne 3,3V. V opačnom krajnom prípade, keď na výstupe OZ bude napätie menšie ako 0V bude vodivá dióda D2 a výstupné napätie bude rovné zápornej hodnote napätia na dióde v priepustnom smere. V tomto prípade je to 0,2 V (chotínsky dióda).

Hodnoty rezistorov R2 až R5 a rozsahy, ktoré určujú sú uvedené v tabuľke 1.2. Posúvacie napätie je vytvorené napäťovou referenciou U3 a následne doladené trimrom RT1. Schéma analógovej časti pre všetky fázy je v prílohe č.1 str. 1-4.

Rovnice pre výpočet výstupného napätia analógovej časti:

$$I_s = \frac{I_p}{1000}$$

$$U_{R1} = I_s \cdot R_1$$

$$A_1 = -\frac{R_{sp}}{R_2}$$

$$U_{J2} = U_{R1} \cdot A_1$$

$$I_{R7} = \frac{U_{J2} - U_{J3}}{R_7}$$

$$U_{OUT} = U_{J3} - R_8 \cdot I_{R7} = U_{J3} - \frac{R_7}{R_8} (U_{J2} - U_{J3}) = 2 \cdot U_{J3} - U_{J2} = 2 \cdot U_{J3} + \frac{I_p}{1000} \cdot \frac{R_{sp}}{R_2} \cdot R_1$$

Výpočet napätia U_{CV} :

$$I_p = 0 \Rightarrow U_{OUT} = \frac{1}{2} U_{ADCmax} = \frac{1}{2} 3.3 = 1.65V \Rightarrow U_{J3} = U_{CV} = \frac{1.65}{2} = 0.825V$$

Tab. 1.2 Hodnoty rezistorov, meracie rozsahy a rozlíšiteľnosť pri meraní

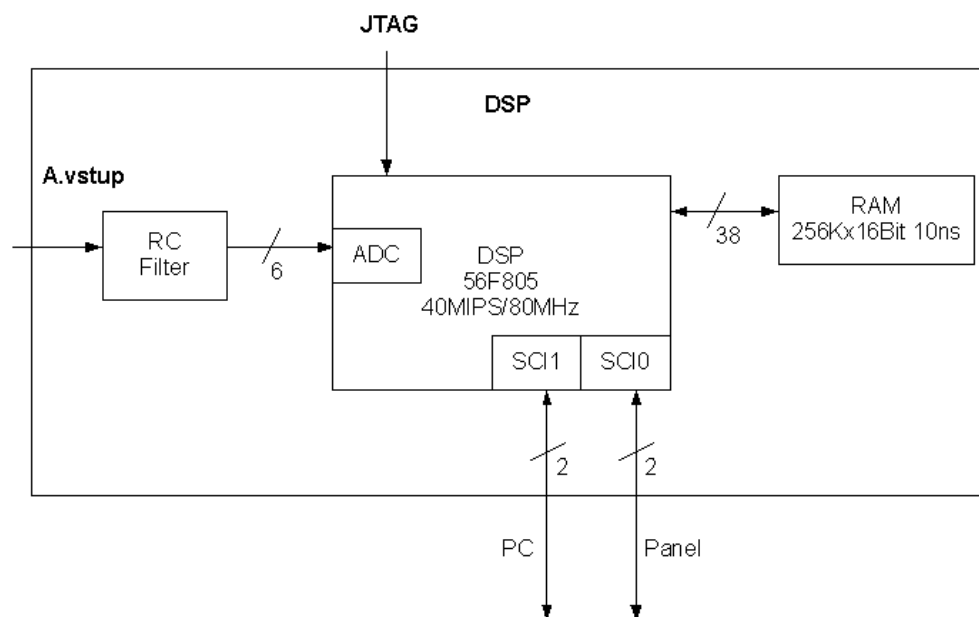
Meranie PRÚDU				
	R [kΩ]	A1	I_{M[max]}	Rozlíšiteľnosť [mA]
R3	22	-0,22	70,45	34,40163
R4	75	-0,75	20,67	10,09115
R5	150	-1,5	10,33	5,04557
R6	390	-3,9	3,97	1,94060
R2	100			

Meranie NAPÄTIA				
	R [kΩ]	A1	U_{M[max]}	Rozlíšiteľnosť [mV]
R3	56	-0,373333	996,43	486,53739
R4	100	-0,666667	558	272,46094
R5	150	-1,000000	372	181,64063
R6	560	-3,733333	99,64	48,65374
R2	150			

1.4.2 DSP časť

Táto časť digitalizuje a spracováva analógový signál, riadi analógovú časť, komunikuje s PC a s panelom a počíta všetky merané veličiny.

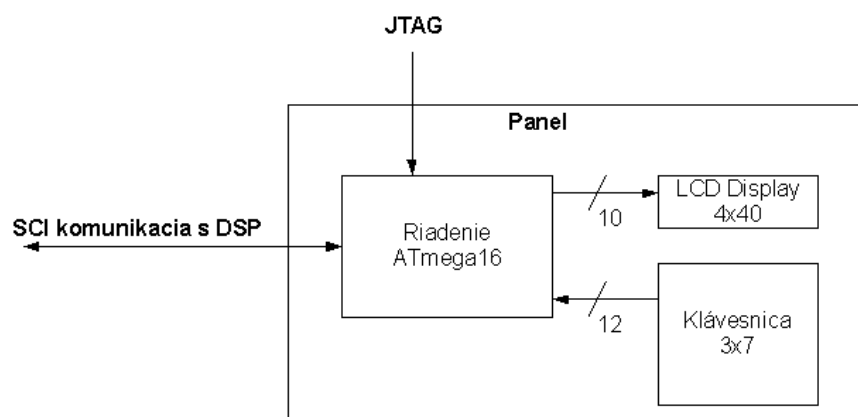
DSP časť sa skladá zo vstupného R-C filtra, (rezistory R1 až R7 a kondenzátory C1 až C7), ktorý slúži na odfiltrovanie vysokých frekvencií, ktoré by mohli spôsobovať rušenie pri meraní ADC prevodníkom, DSP procesora a pamäti RAM. Pamäť RAM slúži na ukladanie nameraných hodnôt pri harmonickej analýze, jej veľkosť je 256kB. DSP procesor komunikuje s PC a so zobrazovacím panelom cez SCI rozhranie (sériovou linku). Kompletná schéma je v prílohe č 1.str.7,8



Obr. 1.5 Bloková schéma DSP časti

1.4.3 Panel LCD displeja a klávesnice

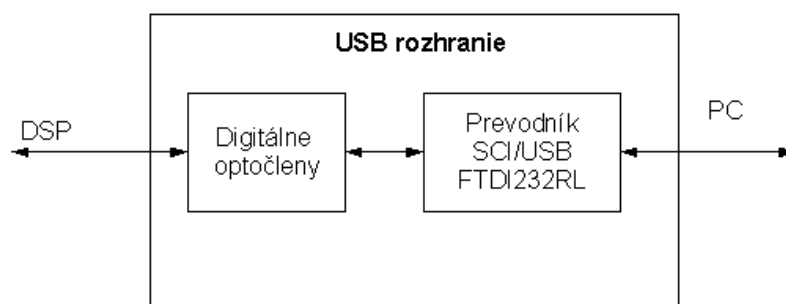
Slúži na zobrazovanie nameraných a vypočítaných hodnôt a na nastavenie wattmetra prostredníctvom klávesnice. LCD displej má 4 riadky po 40 znakov. V jednom riadku bude možné zobrazit' 4 merané veličiny v tvare $V=yyyyyy$ kde V označuje typ veličiny (U-napätie, I-prúd, P-činný výkon atď.). Kontrast a jas displeja je regulovaný pomocou PWM a možno ich menit' v nastavení. Klávesnica má 16 tlačidiel zapojených do matice (2 riadky a 8 stĺpcov). Ako riadiaci prvok je použitý 8 bitový mikroprocesor Atmel ATmega16, programuje sa cez JTAG rozhranie. Kompletná schéma je v prílohe č. 1 str.9



Obr. 1.6 Bloková schéma panelu

1.4.4 Optické oddelenie USB rozhrania

Optické oddelenie som sa rozhodol použiť kvôli bezpečnosti a kvôli tomu, aby sa predišlo možnému zničeniu wattmetra alebo počítača. Vo výbere komunikačného rozhrania som dal prednosť USB rozhraniu pred RS232 (sériový port) z dôvodu jeho väčšieho rozšírenia a jednoduchosti použitia (Plug&Play). Kompletná schéma je v prílohe č.1 str.5.



Obr. 1.7 Bloková schéma USB rozhrania

1.4.5 Zdroj

Ako zdroj je použitý klasický analógový zdroj, ktorý tvorí sieťový transformátor, usmerňovač a lineárne stabilizátory. Vo wattmetri sú použité napätia $\pm 12V$ pre napájanie snímačov, $\pm 12V$ a $\pm 5V$ pre napájanie analógovej časti a $5V$ pre napájanie DSP časti a panelu. Spotreba jednotlivých obvodov je v tab. 1.2. Celkový výkon transformátora je $30VA$. Kompletná schéma zdroja sa nachádza v prílohe č.1 na strane 6.

Tab. 1.3 Spotreby jednotlivých obvodov a celkový odber

Časť	Obvod	Ks	I _{SD} [mA]	I _s [mA]	V _{cc} [V]
Analog	HC4052	6	0,01	0,03	5
	LM324	3	3	9	±12
	LA55-P	3	60	180	±12
	LV25-600	3	35	105	±12
Panel	ATMega16	1	10	10	5
	LCD – logika	1	0,6	0,6	5
	LCD – podsviet.	1	200	200	5
Riadenie	DSP56F805	1	152	152	3,3
	Ram K6R4016V1D	1	150	150	3,3
USB	TLP113	1	20	20	3,3

Vcc	I _s [mA]
+Vcc	826
-Vcc	294

2. VÝBER ELEKTRONICKÝCH KOMPONENTOV

2.1 Snímače

Pri výbere snímačov som sa riadil cenou, meracím rozsahom a presnosťou. Vyberal som snímače od firmy LEM. Prúdový snímač je typu LA55-P s meracím rozsahom do 50 A a presnosťou 0,9 %, dobou odozvy 1 μ s. Napäťový snímač je typu LV-25-600 s meracím rozsahom do 600 V a presnosťou 0,8%, dobou odozvy 15 μ s.

2.2 Analógová časť

Aj keď na trhu existuje veľké množstvo analógových multiplexov, vybral som klasický CMOS 4052, kvôli jeho dostupnosti, cene a parametrom, ktoré sú mierne horšie v porovnaní s drahšími obvodmi, avšak pre túto aplikáciu postačujú aj vďaka možnosti kompenzácie chyby v DSP procesore.

Operačné zosilňovače sú klasické, 4 v jednom puzdre typ LM324. v SMD prevedení.

Rezistory sú veľkosti R0805 (SMD puzdro) s presnosťou 1%. Presnosť nie je v tomto prípade kritická, pretože ju možno kompenzovať.

Kondenzátory sú veľkosti C0805 (SMD puzdro), keramické.

2.3 DSP časť

Výber DSP procesora ovplyvnila najmä jeho dostupnosť, jeho súčasťou by mal byť AD prevodník. Keďže na katedre sa pracuje aj s procesorom 56F805 od firmy Freescale, ktorý týmto požiadavkám vyhovuje vybral som si ten. Je to 16 bitový signálový procesor s 31,5 K programovej flash pamäte a s 2 K dátovej RAM pamäte. Obsahuje 8 kanálový 12 bitový AD prevodník, 14 GPIO pinov, 2 SCI rozhrania a zbernicu pre pripojenie externej RAM pamäti. Jeho výkon je 40 MIPS.

Pamäť RAM je od firmy Samsung typu CMOS SRAM K6R4016V1D s rýchlosťou 10ns.

2.4 Panel LCD displeja a klávesnice

Pri výbere LCD displeja som vychádzal z počtu zobrazovaných veličín a z wattmetra Infratek 305A. Najoptimálnejší vzhladom na pomer cena/zobrazované znaky bol alfanumerický LCD displej 4x40 znakov LED podsvietením.

2.5 Optické oddelenie USB rozhrania

Na optické oddelenie sú použité digitálne optočleny (majú digitálny výstup) typu TLP113 ako prevodník medzi rozhraniami SCI a USB je použitý obvod FT232RL od firmy FTDI.

3. NÁVRH DOSIEK PLOŠNÝCH SPOJOV

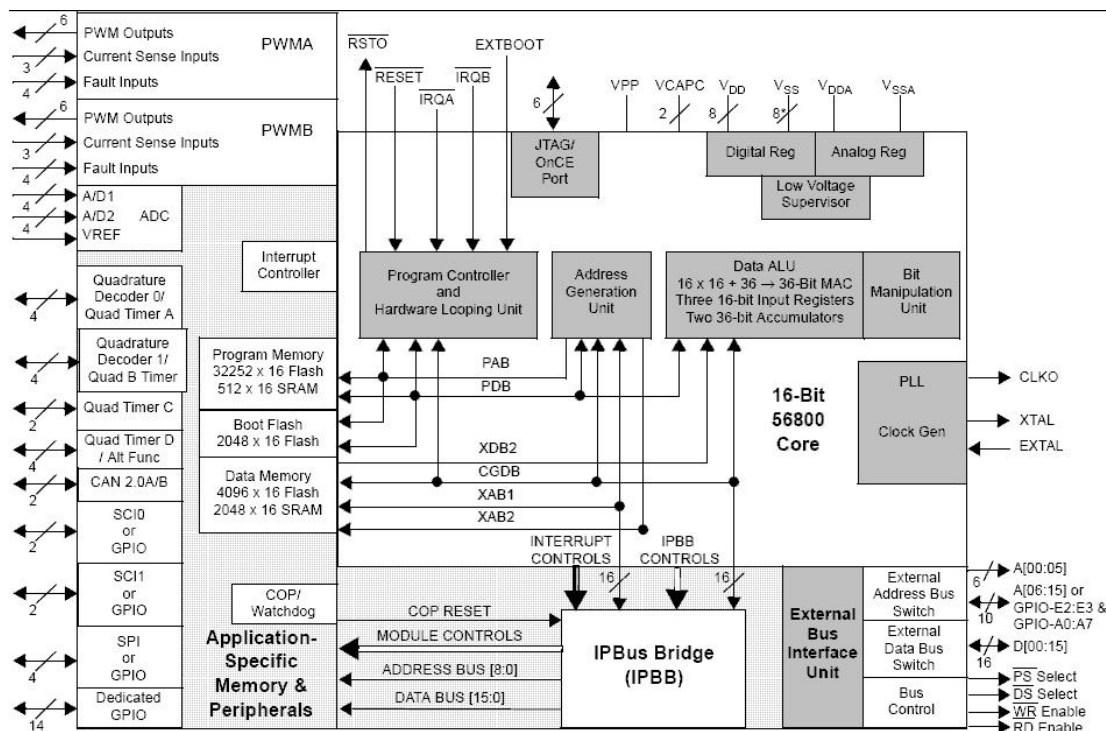
Pri návrhu dosiek plošných spojov som sa držal základných pravidiel pre návrh plošných spojov ako sú izolačné vzdialenosti, rozmiestnenie súčiastok vzhľadom na najmenšie rušenie atď. Plošné spoje boli navrhované v programe E.A.G.L.E. Dosky analógovej a DSP časti sú dvojvrstvové, ostatné jednovrstvové. Každý blok wattmetra je umiestnený na samostatnej doske plošného spoja. Toto je výhodné najmä pri výrobe prototypu, kedy pri poruche resp. pri zmene jednej časti ostatné zostanú zachované. V konečnej fáze by bolo vhodné DSP, analógovú časť a riadenie panela umiestniť na jednu dosku plošného spoja z dôvodu zníženia rušenia a zredukovania káblových prepojení. Všetky dosky plošných spojov sú zobrazené v prílohe č. 2.

4. SOFTVÉR PRE DSP PROCESOR

4.1 Opis DSP procesora DSP56F805

Vlastnosti procesora DSP56F805:

- Výkon 40 MIPS(mega instruction per second) pri 80 MHz
- 16 bitové jadro
- 31.5 K × 16-bitov programovej flash pamäti
- 512 × 16-bitov programovej RAM pamäti
- 4 K × 16-bitov dátovej flash pamäti
- 2 K × 16-bitov dátovej RAM pamäti
- 2 K × 16-bitov boot flash pamäti
- Do 64 K × 16-bitov externej programovej a dátovej pamäti
- Dva 6-kanálové PWM moduly
- Dva 4-kanálové, 12-bit A/D prevodníky
- Dva Quadrature Decoders
- CAN 2.0 B modul
- Dve sériové komunikačné rozhrania (SCI)
- Serial Peripheral Interface (SPI)
- 4 štvorité časovač
- JTAG/OnCETM port na ladenie a programovanie
- 4 vyhradených a 18 zdieľaných GPIO pinov
- 144-pinové LQFP puzdro



Obr. 4.1 Bloková schéma DSP procesora

4.2 Prehľad použitej aritmetiky

Pre programovanie DSP som používal program Code Warrior od firmy Metrowerks. Ten umožňuje prácu ako v jazyku C tak aj v asembleri. 16 bitové jadro procesora podporuje 4 typy číselných formátov a to: znamienkové a neznamienkové celo číselné (signed a unsigned integer), znamienkový a neznamienkový zlomkový (fraction). Tieto môžu byť v rozsahu 16, alebo 32 bitov. Pri všetkých výpočtoch používam znamienkový zlomkový tvar čísiel. Zlomkový aj celo číselný typ sú v podstate rovnaké, teda celo číselné, rozdiel je v ich reprezentácií a v práci s matematickými operáciami. V Tab. 4.1. je ukážka rôznej interpretácie toho istého čísla. V tabuľke 4.2. je prehľad matematických funkcií pre celo číselnú a zlomkovú aritmetiku. Prepočet medzi 16 bitovým zlomkovým a celo číselným tvarom je: $Zlomkový = Celo\ číselný / 2^{15}$, z toho vyplýva, že najmenšie fraction číslo je 0,000030517578125. Pre 32 bitový rozsah je to $Zlomkový = Celo\ číselný / 2^{32}$ a najmenšie číslo je $2,328 \cdot 10^{-10}$.

Tab. 4.1 Rôzne reprezentácie 16 bitových čísiel

Hexa	Desiatkovo	Fraction
\$7FFF	32767	0,99997
\$4000	16384	0,50000
\$0000	0	0,00000
\$C000	-16384	-0,50000
\$8000	-32768	-1,00000

Tab. 4.2 Prehľad niektorých aritmetických funkcií pre celočíselnú a zlomkovú aritmetiku

	Celoč.	Zlomk.16bit	Zlomk 32bit
Súčet	$x+y$	add(x,y)	L_add(x,y)
Rozdiel	$x-y$	subb(x,y)	L_subb(x,y)
Súčin	$x*y$	mult(x,y)	L_mult(x,y)

4.3 Scalovanie

Fraction číslo teda nie je skutočná hodnota, ale pomerná hodnota – pomer medzi skutočnou hodnotou a maximálnou skutočnou hodnotou, ktorá zodpovedá hodnote 1 vo fraction aritmetike. Teda pre každú veličinu treba nájsť maximálnu hodnotu. Tento proces sa nazýva scalovanie ([skejlovanie] z ang. scale – mierka, stupnica). Teda

$$(skutočná\ hodnota) = (maximálna\ skutočná) * (fraction\ hodnota) \quad (4.0)$$

Keďže pre meranie napätia a prúdu sú možné 4 rozsahy pre napätie a prúd budú 4 maximálne hodnoty. Tieto sa vyberajú podľa aktuálneho rozsahu. Ich hodnota sa zistí meraním: na vstup privedieme známe napätie (prúd). Vo FreeMastri (vid'. kap 6) zistíme fraction hodnotu. Z toho

$$(maximálna\ skutočná) = (skutočná\ hodnota) / (fraction\ hodnota) \quad (4.1)$$

Takýmto postupom treba nájsť maximálne hodnoty pre všetky rozsahy a fázy. To znamená, že pre každý rozsah budú tri maximálne hodnoty, ktoré môžu byť odlišné kvôli tolerancii rezistorov a snímačov. Jednoduchšie by bolo, keby maximálna hodnota bola iba jedna. Zjednodušil by sa tak výpočet priemerných hodnôt a aj komunikačný protokol s panelom a program v ňom. Z tohto dôvodu je iba jedno maximum ktoré je rovné maximálnej hodnote z maxím v jednotlivých fázach. Nameraná hodnota sa potom prenásobí koeficientom ktorý je rovný podielu maximálnej hodnoty v danej fáze a maximum maximálnych hodnôt. Pre lepšie pochopenie to ukážem na nasledovnom príklade v tabuľke 4.3

Tab. 4.3 Príklad prepočtu

Skutočná hodnota na svorkách	Maximálna hodnota pre danú fázu	Fraction hodnota	Prepočítavací koef.	Prep. Fraction hodnota
Hs	Hmax	Hf	Kp	Hfp
87,75	351	0,25000	0,9237	0,2309211
93,75	375	0,25000	0,9868	0,2467105
95	380	0,25000	1,0000	0,2500000

$$Hf = Hs / Hmax$$

$$Kp = Hmax / MAX(Hmax)$$

$$Hfp = Hf * Kp$$

V procesore:

```
II = mult(preocet_scale_i[0][ai.adr1],
```

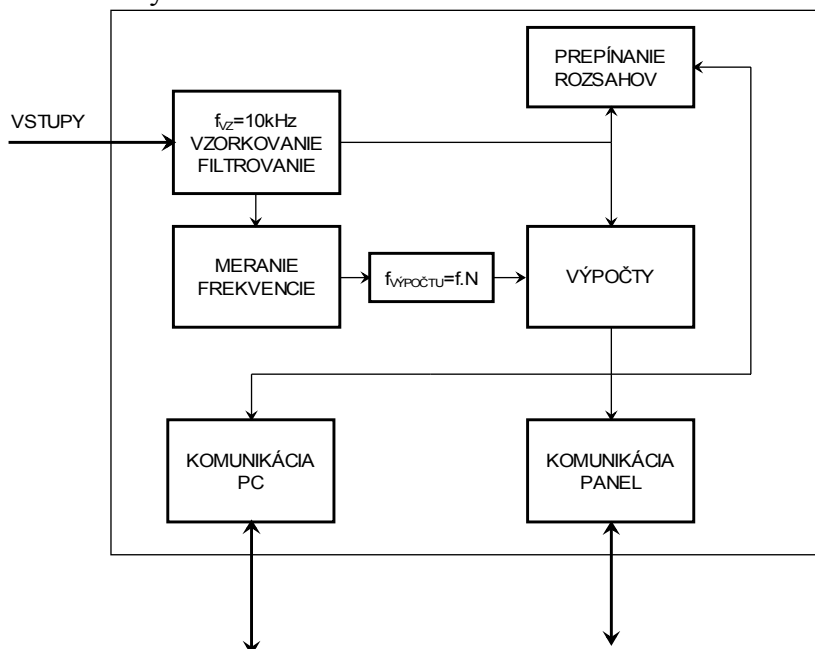
```
ioctl(ADC_A, ADC_READ_SAMPLE, II_pin));
```

Kde *preocet_scale_i[][]* je pole prepočítavacích koeficientov *Kp*

Pre výkony dostávame 4x4 tj 16 maximálnych hodnôt, keďže $p=u.i$, teda maximálna hodnota výkonu pre danú kombináciu rozsahov bude súčin maximálnych hodnôt napätia a prúdu.

4.4 Popis programu

Blokovú schému na obrázku 4.2 tvorí 6 blokov. Tieto sú tvorené obsluhami prerušení a rôznymi funkciami. V nasledujúcich kapitolách budú popísané jednotlivé bloky ako aj funkcie ktoré tieto bloky tvoria.



Obr. 4.2 Bloková schéma programu v DSP procesore

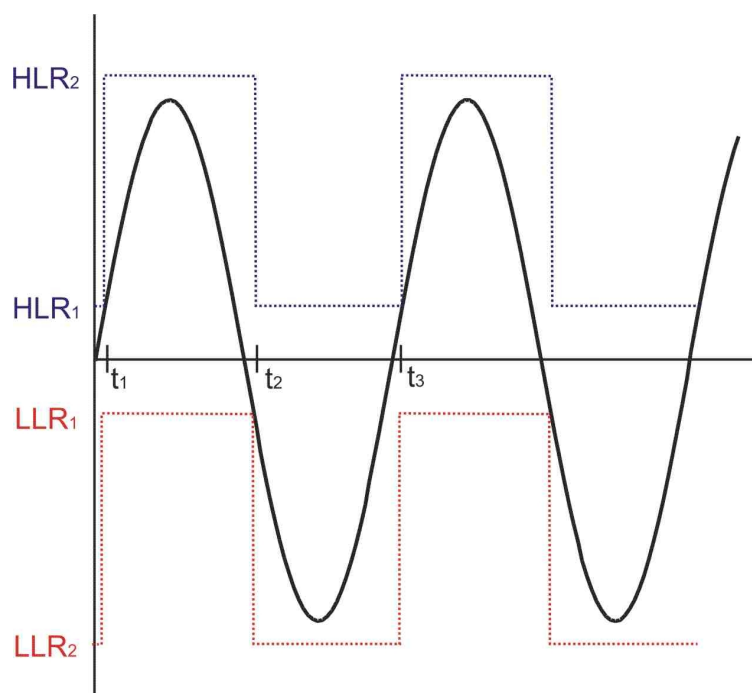
4.4.1 Vzorkovanie

A/D prevodník je štartovaný vo funkcii `ADC_start`, ktorá obsluhuje prerušenie od časovača `QT_C0`. Frekvencia vyvolávanie prerušenia a teda aj frekvencia štartovania A/D prevodníka je 10 kHz. Po skončení prevodu je vyvolaná funkcia `ADC_complete`, ktorá obsluhuje prerušenie od ukončenia prevodu. V nej sú navzorkované hodnoty prečítané a uložené do premenných `U1..U3` a `I1..I3`, ktoré reprezentujú okamžité hodnoty napätí a prúdov. Tieto sú následne filtrované a vyfiltrované hodnoty sa ukladajú do premenných `U1f..U3f` a `I1f..I3f`. Na filtrovanie je použitý dolnopriepustný filter (kap. 4.7.2).

4.4.2 Meranie frekvencie

Frekvencia sa meria z priebehu napätia v prvej fáze. Pri meraní je použité prerušenie od A/D prevodníka `Limit Error` a časovač `QD_D0` s frekvenciou 0,625 MHz. Princíp merania popisuje obrázok 4.3. Na začiatku je register `HLR` (high limit register) nastavený na hodnotu `HLR1` a register `LLR` (low limit register) na hodnoty `LLR2`. V

čase $t=t_1$, kedy hodnota meraného signálu presiahne hodnotu v registri HLR sa vyvolá prerušenie Limit Error a jeho obslužná funkcia `ADC_limit_interrupt`. Ak toto bolo vyvolané prekročením hodnoty HLR, tak sa spustí časovač `QD_D0`, register HLR sa nastaví na hodnotu `HLR2` a register LLR na hodnotu `LLR1`. V čase $t=t_2$ sa znova vyvolá prerušenie Limit Error, tentokrát je to z dôvodu, že hodnota signálu je menšia ako hodnota v registri LLR. Register HLR sa nastaví na hodnotu `HLR1` a register LLR na `LLR2`. V čase $t=t_3$ je opäť spustené prerušenie z dôvodu prekročenia hodnoty v registri HLR meraným signálom. V tomto okamihu sa zároveň zastaví časovač. Hodnota v registri časovača je priamo úmerná perióde meraného signálu. Minimálna frekvencia je obmedzená 16 bitovým registrom časovača, ktorého maximálna hodnota môže byť 65535, čo zodpovedá frekvencii 9,5 Hz. Maximálna frekvencia je obmedzená na 300 Hz.



Obr. 4.3 Princíp merania frekvencie

4.4.3 Výpočty

Výpočty hodnôt popísané v kapitole sa vykonávajú vo funkcií `vypocty_interrupt`. Táto je vyvolávané prerušením od časovača `QT_A1` s frekvenciou, ktorá je rovná 128 násobku frekvencie meraného signálu. Harmonická analýza je počítaná v hlavnej slučke programu.

4.4.4 Prepínanie rozsahov

Prepínanie rozsahov sa uskutočňuje vo funkcii *vypocty_interrupt* na základe porovnania maximálnej a minimálnej hodnoty s určenou hranicou. Ak maximálna a minimálna hodnota klesnú pod minimálnu hranicu rozsah sa prepne smerom dole, ak maximálna alebo minimálne hodnota presiahne maximálnu hranicu rozsah sa prepne smerom hore. Medzi maximálnou a minimálnou hranicou je hysterézne pásmo.

4.4.5 Komunikácia s PC

Komunikácia prebieha cez SCI rozhranie rýchlosťou 100000 Bd/s (10000 B/s). Komunikáciu s PC zabezpečuje funkcia *pcmasterRecorder* a obsluhy prerušení od sériovej linky *pcmasterRxTxIsr*, *pcmasterRxErrorIsr*, *pcmasterRxTxIsr*. Tieto funkcie sú v súbore *pcmaster.c*, ktorý bol vytvorený firmou Freescale Semiconductors.

4.4.6 Komunikácia s panelom

DSP procesor a riadiaci procesor panelu komunikujú spolu cez sériové rozhranie rýchlosťou 57600 Bd/s, čo predstavuje rýchlosť 5760 B/s. Komunikácia prebieha v rámcoch, každý ma 10 bitov (štart bit, stop bit a 8 dátových bitov)

Komunikačný protokol medzi procesormi má nasledovnú štruktúru:

Poradie bajtu	0	1	2	...	N-1	N
Význam bajtu	N	T	D₀	...	D_{N-3}	CRC

Kde

N – Celková veľkosť posielaných dát

T - Typ posielaných dát

$D_0..D_{N-3}$ – Dáta

CRC – Kontrolný súčet, $CRC=B[1] \text{ xor } B[2] \text{ xor } \dots \text{ xor } B[N-1]$

Bajt T (typ posielaných dát) môže mať nasledovné hodnoty:

Tab. 4.4. Typy posielaných dát

T	Funkcia
1	Nastaviť zobrazenie
2	Nastaviť rozsahy
3	Hodnoty pre prvé dva riadky
4	Podsvietenie a kontrast
5	Hodnoty pre riadky 3 a 4
8	Frekvencia

V tabuľke 4.3 je uvedený príklad komunikácie pre posielanie frekvencie. Frekvencia ktorá sa vypíše bude teda $f = \frac{625000}{0x30D4} = \frac{625000}{12500} = 50\text{Hz}$.

Tab. 4.5 Príklad komunikácie z DSP do panelu – posielanie frekvencie

Poradie	Hodnota	Význam
0	0x05	Veľkosť
1	0x08	Posielanie frekvencie
2	0xD4	Spodný bajt frekvencie
3	0x30	Vrchný bajt frekvencie
4	0xEC	CRC

4.5 Charakteristické hodnoty harmonických a neharmonických priebehov a realizácia ich výpočtu v DSP procesore

V nasledujúcich kapitolách popíšem charakteristické hodnoty harmonických a neharmonických priebehov a ich výpočet s implementáciou v procesore.

4.5.1 Efektívna hodnota

Efektívna hodnota striedavého prúdu sa rovná hodnote jednosmerného prúdu, ktorý má rovnaké tepelné účinky ako daný striedavý prúd. Podľa tejto definície možno odvodiť vzťah pre určenie efektívnej hodnoty: teplo, ktoré vznikne na rezistore s odporom R vytvorené jednosmerným prúdom = teplu ktoré vytvorí striedavý prúd na tom istom rezistore

$$RI^2 T = R \int_0^T i^2 dt \quad (4.1)$$

úpravou dostaneme

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (4.2)$$

Pojem efektívnej hodnoty rozširujeme aj na iné veličiny napr. pre napätie.

Vzťah pre efektívnu hodnotu harmonickej veličiny platí aj pre efektívnu hodnotu ľubovoľnej neharmonickkej veličiny. Po prepise rovnice 4.2 do diskrétného tvaru dostaneme

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^N \frac{1}{N} i[n]^2} \quad (4.3)$$

kde N je počet vzoriek za jednu periódu, n je aktuálna hodnota. V procesore je zápis nasledovný:

sum_II_rms=L_add(sum_II_rms,L_mult(II_f,II_f)>>M);

Kde *sum_II_rms* je 32 bitová fraction premenná, *II_f* je aktuálna nameraná hodnota.

Na konci periódy sa suma odmocní:

n.II_rms=Sqrt(sum_II_rms);

n.II_rms je 16 bitová premenná, ktorá obsahuje efektívnu hodnotu (v tomto prípade prúdu *II*) vo fraction tvare. Pre skutočnú hodnotu treba fraction hodnotu vynásobiť maximálnou hodnotou prúdu na danom rozsahu, ktorá zodpovedá fraction hodnote 1.

Funkcia *Sqrt* je upravená funkcia *MCLIB_Sqrt* z knižnice *MCLIB*.

4.5.2 Maximálna a minimálna

Pod maximálnou hodnotou rozumieme najväčšiu okamžitú hodnotu. Táto je však smerodajná len pre izoláciu (ak ide o napätie) a nesúvisí bezprostredne s efektívnou hodnotou (pri neharmonických priebehoch). U neharmonických priebehov s výraznou maximálnou hodnotou sa často nazýva aj špičkovou hodnotou. Minimálna hodnota je najmenšia okamžitá hodnota.

V procesore vyzerá hľadanie maximálnej hodnoty nasledovne:

if (II_max1 < II_f) II_max1 = II_f;

a hľadanie minimálnej hodnoty

if (II_min1 > II_f) II_min1 = II_f;

kde *II_max1*, *II_min1* sú pomocné premenné

4.5.3 Stredná hodnota

Strednú hodnotu definujeme pri periodických veličinách dvojakým spôsobom. Stredná hodnota za celú periódu je totožná s jednosmernou zložkou. Označuje sa spravidla indexom 0 teda napr. Pre prúd

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (4.4)$$

v diskretnom tvare

$$I_0 = \sum_{n=0}^N \frac{1}{N} i[n] \quad (4.5)$$

Pre striedavé veličiny je stredná hodnota rovná nule.

V procesore

sum_II_avg += II_f;

na konci periódy

n.II_avg = sum_II_avg >> M;

4.5.4 Stredná usmernená hodnota

Magneto-elektrický merací prístroj s dvojcestným usmerňovačom meria strednú hodnotu usmerneného prúdu (napätia), (matematicky vyjadrenú ako $|i|$) za jednu periódu, teda

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt \quad (4.6)$$

v diskretnom tvare

$$I_0 = \sum_{n=0}^N \frac{1}{N} |i[n]| \quad (4.7)$$

v procesore:

sum_II_avg_rec += abs_s(II_f);

4.5.5 Činný výkon

Prvotná definícia činného výkonu je

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad (4.8)$$

je to teda stredná hodnota okamžitého výkonu $p=ui$ za jednu periódu.

v diskretnom tvare

$$P = \sum_{n=0}^N \frac{1}{N} u[n] i[n] \quad (4.9)$$

V procesore:

PI_p = L_mult(UI_f, II_f);

sum_PI = L_add(sum_PI, PI_p >> M);

Kde P_{I_p} je okamžitá hodnota činného výkonu

4.5.6 Zdanlivý výkon

je definovaný ako súčin efektívnych hodnôt napätia a prúdu.

$$P_S = S = UI \quad (4.10)$$

V procesore:

$$n.SI = \text{mult}(n.II_rms, n.UI_rms);$$

4.5.7 Jalový výkon

Názor na to, čo nazvať jalovým výkonom v prípade neharmonických veličín nie je jednotný, pretože druhá odmocnina rozdielu druhých mocnín zdanlivého a činného výkonu nemá rovnaký význam ako u neharmonických veličín. Druhú mocninu zdanlivého výkonu môžeme rozložiť na súčet troch členov

$$P_S^2 = U^2 I^2 = \left(\sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k \right)^2 + \left(\sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k \right)^2 + \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{k-1} [U_k^2 I_l^2 + U_l^2 I_k^2 - 2U_k I_k U_l I_l \cos(\varphi_k - \varphi_l)] \quad (4.11)$$

Prvý člen je druhá mocnina činného výkonu, druhý člen môžeme považovať za druhú mocninu jalového výkonu, ak ho definujeme analogicky s definíciou činného výkonu ako súčet jalových výkonov jednotlivých harmonických. Pre jalový výkon teda platí

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k \quad (4.12)$$

Tento výpočet je nepoužiteľný z dôvodu nepoznania všetkých harmonických zložiek a aj keby sa vykonala harmonická analýza celého spektra signálu, tento výpočet by bol časovo náročný.

Podľa rovnice 4.13 možno vypočítať celkový jalový výkon. Nevýhoda tohto výpočtu je, že treba do pamäte uložiť celú periódu nameraného signálu

$$Q = \sum_{n=0}^N \frac{1}{N} i[n] \cdot u\left[n - \frac{N}{4}\right] \quad (4.13)$$

V procesore:

```
for (x=0;x<96;x++)
{
```

```

        sum_Q1=L_add(sum_Q1,L_mult(U1n[x],I1n[x+32])>>M);
    }
    for (x=96;x<128;x++)
    {
        sum_Q1=L_add(sum_Q1,L_mult(U1n[x],I1n[x-96])>>M);
    }
    n.Q1=round(sum_Q1);

```

4.5.8 Deformačný výkon

je definovaný vzťahom

$$P_d = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{k-1} [U_k^2 I_l^2 + U_l^2 I_k^2 - 2U_k I_k U_l I_l \cos(\varphi_k - \varphi_l)]} \quad (4.14)$$

tento je nulový ak napätie a prúd obsahujú tie isté harmonické, pričom fázový posun priebehu prúdu voči napätiu každej harmonickej je rovnaký a zároveň aj pomer fázora napätia k fázoru prúdu každej harmonickej.

Jednotlivé druhy výkonov navzájom súvisia vzťahom

$$P_s = \sqrt{P^2 + P_Q^2 + P_d^2} \quad (4.15)$$

a z toho

$$P_d = \sqrt{P_s^2 - P_Q^2 - P^2} \quad (4.16)$$

V procesore:

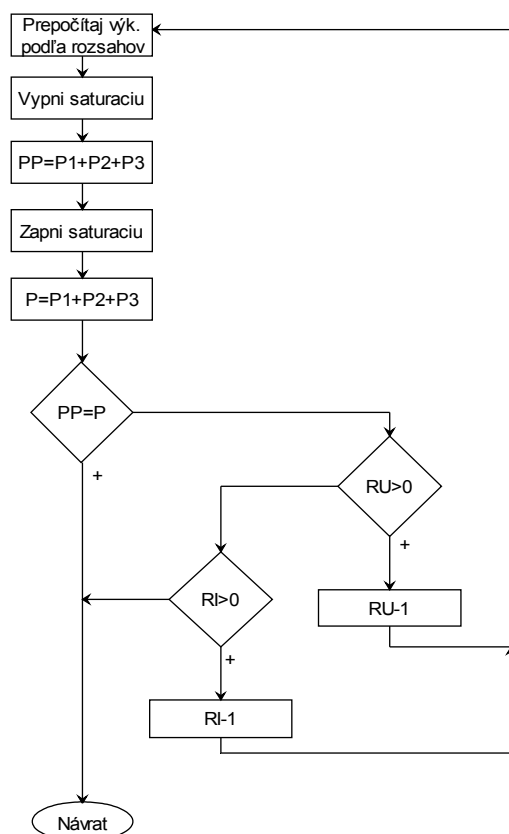
```

sum_Q1=L_add(L_mult(n.Q1,n.Q1),L_mult(n.P1,n.P1));
n.D1=Sqrt(L_abs(L_sub(L_mult(n.S1,n.S1),sum_Q1)));

```

4.5.9 Trojfázové výkony

Trojfázový výkon (činný, jalový, zdanlivý alebo deformačný) je súčet výkonov v troch fázach. Pri jeho počítaní treba brať ohľad na to, že výkon v každej fáze môže mať iné maximum (napätie alebo prúd v jednotlivých fázach majú rôzne rozsahy) a treba ich prepočítať na rovnaký rozsah, alebo súčet by bol väčší ako 1 (vo fraction aritmetike). Keďže maximálna fraction hodnota je 1, súčet by buď zostal zasaturovaný na 1 alebo by pretekol a výsledok by nezodpovedal skutočnosti. Preto treba kontrolovať pretečenie a ak toto nastane treba zvýšiť rozsah, znova prepočítať výkony podľa rozsahov a spočítať výkony. Toto sa opakuje až pokiaľ je výsledok správny. Vývojový diagram tohto algoritmu je na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Vývojový diagram pre algoritmus spočítavania výkonov

4.6 Harmonická analýza

Pod harmonickou analýzou rozumieme postup, ktorým určíme koeficienty Fourierovho radu U_{mk} , y_k alebo A_k , B_k , prípadne koeficienty komplexného Fourierovho radu C_k . Metódy harmonickej analýzy delíme na matematické a experimentálne.

4.6.1 Fourierov rad

Ľubovoľnú periodickú funkciu $f(t)=f(t+kT)$ môžeme rozložiť do Fourierovho radu s teoreticky nekonečným počtom členov. Fourierov rad sa vyskytuje v troch tvaroch:

1. rad obsahuje iba sínusové alebo kosínusové členy:

$$u(t)=U_0+U_{m1}\sin(\omega_1t+\psi_1)+U_{m2}\sin(\omega_2t+\psi_2)+\dots+U_{mk}\sin(\omega_kt+\psi_k)\dots \text{ alebo}$$

$$u(t)=\sum_{k=0}^{\infty} U_{mk} \sin(k \omega_k t + \psi_k) \quad (4.17)$$

2. rad obsahuje sínusové aj kosínusové členy. V tomto tvare sa už nevyskytujú

počiatočné fázy ψ_k , pričom

$$\begin{aligned} A_k &= U_{mk} \cos \psi_k & B_k &= U_{mk} \sin \psi_k \\ U_{mk} &= \sqrt{A_k^2 + B_k^2} & \psi_k &= \arctg \frac{B_k}{A_k} \end{aligned}$$

$$u(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (A_k \sin(k \omega_k t) + B_k \cos(k \omega_k t)) \quad (4.18)$$

3. Fourierov rad v komplexnom tvare

4.6.2 Matematické metódy harmonickej analýzy

Môžu byť analytické, grafické a numerické.

4.6.2.1 Analytická metóda harmonickej analýzy

Ak je periodická funkcia zadaná analyticky, t.j. ako rovnica, môžeme použiť analytický spôsob harmonickej analýzy

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k \omega_1 t) dt \\ B_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k \omega_1 t) dt \end{aligned} \quad (4.19)$$

4.6.2.2 Numerická metóda harmonickej analýzy – Rungeho metóda

Rungeho metóda je vlastne približné numerické riešenie integrálov 4.19, ktoré nahradíme konečnými sumami. Períodu analyzovanej funkcie rozdelíme na N rovnakých dielikov a prejdeme z diferenciálu dx na konečnú diferenciu $\Delta x = 2\pi/N$, ktorá zodpovedá jednému dieliku rozdelenej periódy. Potom n -tý dielik má x -ovú súradnicu

$$x_n = n \Delta x = \frac{2\pi n}{N}$$

a hodnota funkcie $f(x)$ v tomto dieliku je $f(x_n) = f\left(\frac{2\pi n}{N}\right) = y_n$. Potom môžeme napísať

$$\begin{aligned}
 A_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega_1 t) \sin(k \omega_1 t) dt = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^N y_n \sin\left(kn \frac{2\pi}{N}\right) \frac{2\pi}{N} \\
 B_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega_1 t) \cos(k \omega_1 t) dt = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \sum_{n=0}^N y_n \cos\left(kn \frac{2\pi}{N}\right) \frac{2\pi}{N}
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

Ak bude počet dielikov N konečný potom platia približné vzťahy

$$\begin{aligned}
 A_k &\approx \frac{2}{N} \sum_{n=0}^N y_n \sin\left(kn \frac{2\pi}{N}\right) \\
 B_k &\approx \frac{2}{N} \sum_{n=0}^N y_n \cos\left(kn \frac{2\pi}{N}\right)
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

ktoré budú presnejšie, čím väčšie bude N . Náhrada integrálov pre určenie koeficientov A_k a B_k konečnými sumami zodpovedá náhrade analyzovanej funkcie $f(x)$ stupňovitým priebehom. Pri výpočte súčtov teda predpokladáme, že hodnoty funkcie $f(x)$ a funkcií $\sin(kx)$ a $\cos(kx)$ sú v každom intervale s dĺžkou $\Delta x = 2\pi/N$ konštantné. Čím je teda rád harmonickej vyšší, tým menej je splnená podmienka konštantnosti funkcií v jednotlivých intervaloch a tým sú získané hodnoty A_k a B_k menej presné. Väčšina funkcií elektrických periodických veličín, ktoré sa v praxi vyskytujú, má tú vlastnosť, že s rastúcim rádom vyšších harmonických klesá ich amplitúda. Rungeho metóda je vhodná práve na analýzu takýchto funkcií. Z hľadiska presnosti by sme mali voliť N čo najväčšie. Keďže s rastúcim N rastie aj prácnosť a doba trvania výpočtu, treba voliť N kompromisne – ak chceme určiť k -tu harmonickú, musíme voliť $N > 2k$. [5]

V rovnici 4.21 sa vyskytujú funkcie sínus a kosínus. Ich výpočet je časovo náročný a keby sa mali ich hodnoty počítat' v každom kroku, tak by bola táto metóda výpočtu časovo náročná. Argument týchto funkcií je pre daný počet dielikov N a pre rovnaké n konštantný. Preto ak zvolím $k=1$ bude výsledkom týchto funkcií sínusovka a kosínusovka. Pre $k=2$ to bude sínusovka a kosínusovka s dvojnásobnou frekvenciou. Ak vytvorím dve polia jedno pre sínus a jedno kosínus, ktoré budú mať N členov vytvorených podľa nasledujúcich rovníc:

$$\text{pole pre sínus} \quad \text{sil}[n]_{n=0}^N = \sin\left(n \frac{2\pi}{N}\right) \tag{4.22}$$

$$\text{pre kosínus} \quad \text{col}[n]_{n=0}^N = \cos\left(n \frac{2\pi}{N}\right) \tag{4.23}$$

tak pre $k=2$ to bude každý druhý člen, pre $k=3$ každý tretí atď. Týmto sa počítanie sínusu a kosínusu v rovnici 4.21 zredukuje na výber z poľa, na celo číselné násobenie a na zvyšok po celo číselnom delení.

V procesore:

```
sumr=0;sumi=0;
for (n=0;n<N;n++)
{
    sumr+=mult(x[n],cos[(n*k)%N]);
    sumi+=mult(x[n],sin[(n*k)%N]);
}
sumr>>=M;
sumi>>=M;
sumr16=(int)sumr;
sumi16=(int)sumi;
//vypocet amplitudy
A=Sqrt(L_add(L_mult(sumr16,sumr16),L_mult(sumi16,sumi16)));
vysl.cos=div_s(sumr16,A);
vysl.sin=div_s(sumi16,A);
vysl.A=A<<1;
```

4.7 Digitálne filtre

Digitálne filtre majú dve základné použitia: na oddelovanie signálov, ktoré sú skombinované a na rekonštrukciu signálu, ktorý je poškodený alebo skreslený. Analógové filtre majú rovnaké použitie, ale filtre digitálne môžu dosiahnuť lepšie výsledky. Medzi ich hlavné výhody patrí jednoduchá aplikácia a zmena parametrov filtra bez potreby zmeny hardvérovej časti.[8]

4.7.1 Rozdelenie digitálnych filtrov

Digitálne filtre možno rozdeliť podľa oblasti v ktorej sú použité a podľa spôsobu ich realizácie. Podľa oblasti v ktorej pracujú sa delia na :

- a) filtre pracujúce v časovej oblasti – použitie napr. pre filtrovanie, odstránenie jednosmernej zložky, vyhladzovanie priebehov atď.
- b) filtre pracujúce vo frekvenčnej oblasti – slúžia na oddelenie jedného pásma frekvencie od ostatných napr. dolno a hornopriepustný filter atď.

Podľa realizácie na:

- a) konvolučné FIR (finite impulse response)

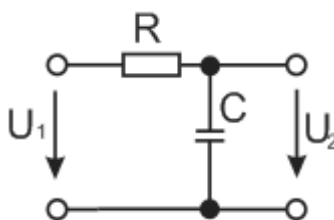
b) rekurzívne IIR (infinite impulse response)[8]

Tab. 4.6. Rozdelenie digitálnych filtrov

		Spôsob realizácie	
		Konvolúcia	Rekurzia
Oblasť	Časová	Moving average	Single pole
	Frekvenčná	Windowed-sinc	Chebyshev

4.7.2 Digitálny dolnopriepustný filter

Tento vzťah možno odvodiť aj z rovnice pre analógový RC filter nasledovne:



Obr. 4.5 Analógový dolnopriepustný filter – RC článok

Rovnice popisujúce RC článok na obr. 4.5:

$$\begin{aligned}
 U_1 &= i_c R + u_c & i_c &= C \frac{du_c}{dt} \\
 U_1 &= RC \frac{du_c}{dt} + u_c & u_c &= U_2 \\
 U_1 &= \frac{T_f}{T_s} dU_2 + U_2 & T_f &= RC \quad T_s = dt
 \end{aligned}$$

kde T_s je perióda vzorkovania (pre aktuálne nastavenie je to $1 \cdot 10^{-4}$ s), T_f časová konštanta filtra

Po prepise na diskkrétne časové kroky nahradíme dU_2 za $U_2[n] - U_2[n-1]$

a dostávame výslednú rovnicu pre digitálny filter

$$U_2[n] = U_1[n] - K_f (U_2[n-1] - U_1[n]) \tag{4.24}$$

$$K_f = \frac{T_f}{T_f + T_s} = \frac{T_f}{T_f + 1 \cdot 10^{-4}} \tag{4.25}$$

Kde $U_2[n]$ je nová filtrovaná hodnota (v aktuálnom čase t), $U_2[n-1]$ filtrovaná hodnota o periódu späť (v čase $t - T_s$), $U_1[n]$ meraná hodnota v čase t , K_f koeficient filtra

V procesore:

$$II_f = \text{add}(II, \text{multi}(\text{filter_}i1, \text{sub}(II_f, II)));$$

5. SOFTVÉR PRE PANEL DISPLEJA A KLÁVESNICE

Procesor ATmega16, ktorý tvorí riadiacu jednotku je programovaný cez rozhranie JTAG, ktoré umožňuje procesor programovať, ladiť a krokovať program. Na písanie programu v jazyku C a na kompiláciu kódu som používal program CodeVisionAVR, na komunikáciu s procesorom cez rozhranie JTAG program AVR Studio

Základné časti programu sú:

- funkcia na obsluhu klávesnice
- funkcie obsluhy sériovej linky a komunikačného protokolu
- funkcie pre zobrazovanie nameraných dát
- funkcie pre nastavovanie rozsahov a zobrazení

6. SOFTVÉR PRE PC

Na komunikáciu s DSP procesorom, na zobrazovanie nameraných dát a na ich grafickú reprezentáciu je použitý program FreeMastre (prv známeho ako PC Master) vyvinutý firmou Freescale na ovládanie a ladenie vnorených aplikácií pomocou grafického prostredia bežiaceho na PC.

FreeMaster poskytuje nasledovné možnosti:

- Grafické prostredie
- Jednoduchú navigáciu
- Jednoduché pripojenie pomocou RS232, JTAG, CAN
- Real-time prístup k hodnotám premenných vo vnorenej aplikácii
- Real-time vizualizácia pomaly meniacich sa dát v okne Scope
- Vizualizácia rýchlo sa meniacich dát pomocou Recorder-a
- Vzdialená komunikácia pomocou komunikačného servera, ktorá umožňuje pripojenie k vnorenej aplikácii cez lokálnu sieť LAN alebo Internet
- Podpora navigačných a popisných stránok v HTML
- ActiveX rozhranie, ktoré dovoľuje ovládať a komunikovať s vnorenou aplikáciou pomocou VBScript-u a Jscript-u
- Rozhranie ktoré spája Matlab s FreeMaster ActiveX objektom

Vďaka týmto vlastnostiam sa FreeMaster v spojení s wattmetrom stáva výkonným nástrojom a výborným pomocníkom pri elektrických meraniach.

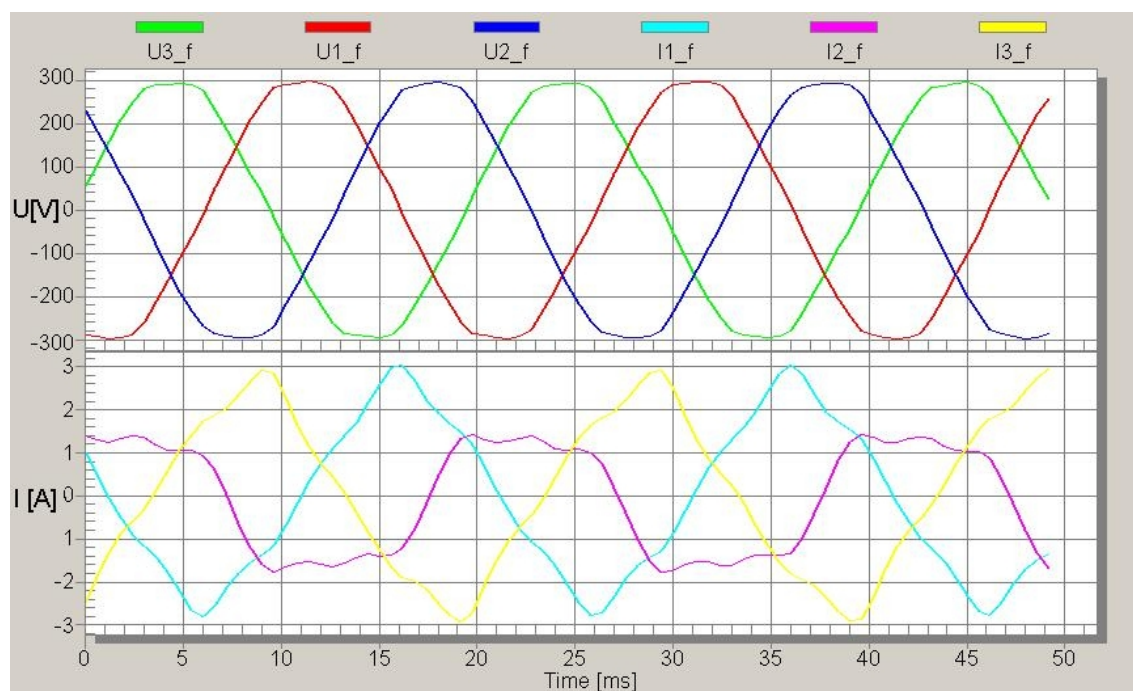
Napr. vizualizácia meraných dát pomocou recorder-u umožňuje zobrazit' naraz všetky napätia a prúdy, to by bolo doteraz možné len s použitím troch dvojkanálových osciloskopov (alebo jedného 4-kanálového a jedného 2-kanálového) a troch prúdových sond, a aj tak by sa nám nepodarilo všetky priebehy zosynchronizovať. Pomocou recorder-u je to možné, dáta je možné ukladať na disk, alebo exportovať ako obrázok. Nevýhodou je malá rýchlosť vzorkovania, ktorá je daná frekvenciou spúšťania recorder-u v DSP procesore. Tá je pevná a je rovná 2 kHz. Veľkosť zásobníka recorderu je v

procesore nastavená na 500 bajtov, keďže premenné sú 16 bitové (2 bajty), je možné zobrazit' 255 hodnôt. Pri časovej základni 0,5 ms je to teda 0,1275 sekundy. Ak chceme zobrazit' v jednom okne napríklad 6 premenných, na jednu premennú vychádza 42 hodnôt. Dĺžka zaznamenaného časového úseku bude 21 ms. Ak chceme zaznamenať dlhší časový úsek, musíme zvoliť násobok časovej základne.

Pomocou scope-u je možné naraz graficky zobrazovať časovú závislosť, alebo závislosť veličín od inej veličiny. Teda je možné zobrazit' napr. závislosť $P=f(U)$, alebo zobrazit' naraz všetky merané veličiny, ukladať ich priebeh na disk v textovej podobe a následne ich importovať do Excelu alebo Matlabu na ďalšie spracovanie, alebo ich exportovať ako obrázok.

Pomocou ActiveX objektu je možné prepojiť FreeMaster s ľubovoľnou aplikáciou, ktorá bude napr. automatizovať meranie, meniť rozsahy atď. Príklad, ako môže vyzerat' zobrazenie dát zobrazuje obrázok 6.1.

Podrobný manuál k aplikácii FreeMaster je v [9].



Obr. 6.1 Zobrazenie fázových napätí a fázových prúdov podľa merania na obr. 8.2

7. MECHANICKÁ KONŠTRUKCIA

Wattmeter je umiestnený v skrinke zloženej z kazety Bopla IZP 36380 (rám a bočné steny), vrchného a spodného krycieho plechu a predného a zadného panelu. Dosky plošných spojov sú izolovane uchytené na kovovom plate, ktoré je umiestnené na ráme kazety.

Na zadnej strane predného panela je umiestnený LCD displej a doska plošného spoja klávesnice. V paneli sú vyrezané otvory pre displej a tlačidlá, ktoré vyčnievajú 0,5 mm nad rovinu panela. Prednú stranu panela prekrýva fólia na ktorej sú zobrazené tlačidlá a ich popisky. Skutočné vyhotovenie zobrazuje obrázok 7.3. Takýmto spôsobom je vytvorená náhrada fóliovej klávesnice, ktorej výroba by bola finančne náročná, keďže ide o prototyp zariadenia a nepočíta sa so sériovou výrobou. Rez predným panelom je na obrázku 7.2.

Na zadnom paneli je umiestnený konektor pre pripojenie napájania, vypínač, konektor pre pripojenie USB rozhrania a meracie svorky. Vyhotovenie zobrazuje obrázok 7.4. Meracie svorky sú zdvojené, na vnútornej strane prepojené medeným pásikom s prierezom 10 mm^2

Výkresy predného, zadného panela a kazety sú v prílohe.

Ochrana pred nebezpečným dotykom neživých častí je zabezpečená zemnením zadného panelu a plata.



1. Fólia
2. Displej
3. Mikrotlačidlá
4. Skrutky
5. Dosky plošných spojov
6. Plech

Obr. 7.2 Rez predným panelom



Obr. 7.3 Fotka vyhotovenia čelného panelu



Obr. 7.4 Fotka vyhotovenia zadného panelu

8. VERIFIKÁCIA NAMERANÝCH VELIČÍN

8.1 Určenie chyby merania a triedy presnosti

Meranie a merací prístroj je vždy zaťažené určitou nepresnosťou. Chyba merania (chyba výsledku merania) je miera nesúladu medzi nameranou a skutočnou hodnotou danej veličiny. Chyby merania sa dajú rozčleniť podľa rôznych hľadísk. Podľa spôsobu vyjadrenia veľkosti chýb sa rozlišujú na absolútne a relatívne. Absolútna chyba merania je rozdiel nameranej a skutočnej hodnoty meranej veličiny, a preto sa udáva v rovnakých jednotkách ako meraná veličina.

$$\text{Absolútna chyba merania} \quad \Delta = x_{\text{nameraná}} - x_{\text{skutočná}} \quad (8.1)$$

Relatívna chyba merania je podiel absolútnej chyby merania a skutočnej hodnoty meranej veličiny, najčastejšie sa udáva v percentách.[12]

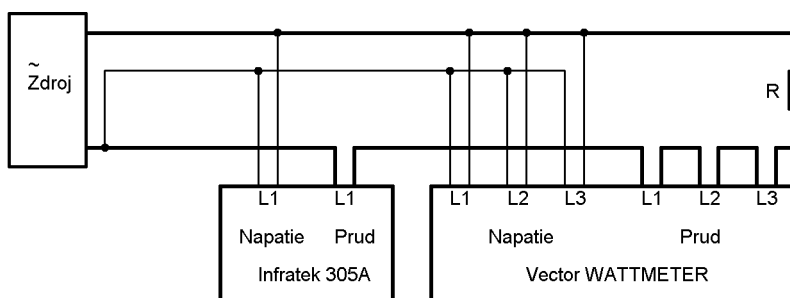
$$\text{Relatívna chyba} \quad \delta = \frac{\Delta}{x_{\text{skutočná}}} \quad (8.2)$$

Trieda presnosti je trieda meracích prístrojov, ktoré spĺňajú metrologické požiadavky zamerané na udržanie chýb v špecifikovaných medziach. Trieda presnosti sa zvyčajne udáva konvenčne dohodnutým číslom, alebo symbolom a nazýva sa značka (index) triedy. Triedy presnosti bývajú zväčša stanovené normami. Ak máme prístroj triedy presnosti TRP s meracím rozsahom M , potom absolútna chyba prístroja môže byť v medziach

$$\Delta = \pm \left(\frac{TRP}{100} \right) M \quad (8.3)$$

Chybu merania wattmetrom som určoval na základe porovnávacieho merania. Ako referenčný merací prístroj som si vzal pre jednofázové meranie na odporovej wattmeter Infratek 305A, z ktorého bola využitá funkčná 1. fáza. Schéma zapojenia merania je na obrázku 8.1. Výsledky meraní sú uvedené v tabuľkách 8.1 a 8.2. Pri meraní trojfázovej odporovo-indukčnej záťaže (trojfázový transformátor naprázdno) a pri harmonickej bol použitý sieťový analyzátor DEWETRON PNA-560. Schému zapojenia ukazuje obrázok 8.2. Výsledky meraní sú v tabuľkách 8.3 a 8.4, meranie harmonickej analýzy je v

tabuľke 8.5. Ako vidno z tabuliek, najväčšia chyba bola pri meraní jalového výkonu a stredných hodnôt. Percentuálna chyba z aktuálneho rozsahu prekročila hranicu 1 % iba pri meraní jalového výkonu a činiteľa výkonu. Prístroj je teda možné zaradiť do triedy presnosti 1, okrem merania jalového výkonu.



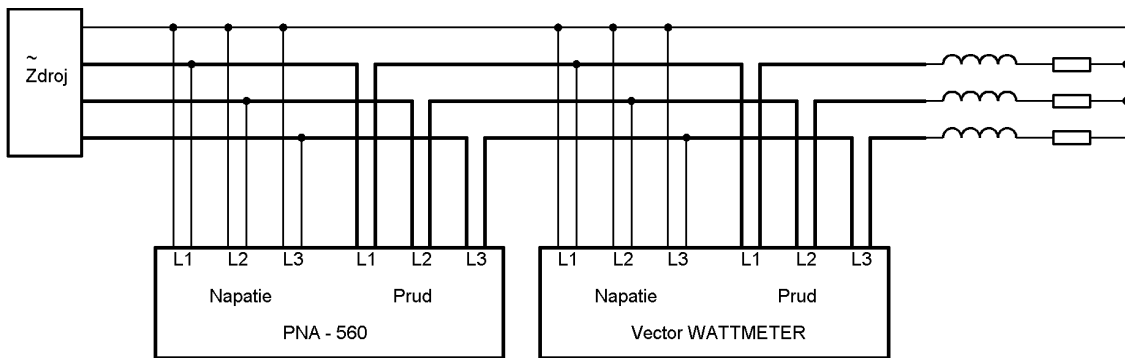
Obr. 8.1 Schéma zapojenia porovnávacieho merania -R záťaž

Tab. 8.1 Výsledky merania presnosti wattmetra časť 1, R záťaž

	Merací rozsah			Skutočná	Chyba merania Δ				Relatívna chyba δ [%]				% z rozsahu
	U [V]	I [A]	P		L1	L2	L3	Priemer	L1	L2	L3	Priemer	
	80,89	18,65	1508,76										
P [W]	43,06	42,88	42,88	43,02	0,03	-0,15	-0,15	0,11	0,08	-0,35	-0,35	0,26	0,01
S [VA]	43,10	42,92	42,88	42,50	0,60	0,42	0,38	0,47	1,42	0,99	0,88	1,10	0,03
Q [VAar]	1,86	1,86	1,95	0,07	1,79	1,79	1,88	1,82	2557,1	2557,1	2685,7	2600,0	0,12
I _{rms} [A]	1,79	1,77	1,79	1,77	0,03	0,00	0,02	0,02	1,46	0,22	1,18	0,95	0,09
U _{rms} [V]	23,96	24,12	23,89	23,91	0,05	0,21	-0,02	0,09	0,20	0,88	-0,09	0,39	0,12
cos ϕ [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,11	-0,11	0,00	0,07	0,07
I _{max} [A]	2,48	2,43	2,45	2,44	0,04	-0,01	0,01	0,02	1,51	-0,52	0,40	0,81	0,11
U _{max} [V]	33,06	33,06	32,82	32,57	0,49	0,49	0,25	0,41	1,50	1,50	0,78	1,26	0,51
I _{avg} [A]	-0,02	-0,03	-0,02	0,01	-0,03	-0,04	-0,03	0,03	-260,0	-380,0	-330,0	323,3	0,17
U _{avg} [V]	0,17	-0,10	-0,04	-0,01	0,18	-0,09	-0,02	0,10	-1418,1	693,4	190,7	767,4	0,12
I _{avr} [A]	1,68	1,58	1,60	1,59	0,09	-0,01	0,01	0,03	5,39	-0,57	0,36	2,10	0,18
U _{avr} [V]	21,54	21,71	21,47	21,43	0,11	0,28	0,04	0,15	0,52	1,31	0,20	0,68	0,18
f [Hz]	49,90	x	x	50,00	-0,10	x	x	-0,10	-0,20	x	x	x	x

Tab. 8.2 Výsledky merania presnosti wattmetra časť 2, R záťaž

	Merací rozsah			Skutočná	Chyba merania Δ				Relatívna chyba δ [%]				% z rozsahu
	U [V]	I [A]	P		L1	L2	L3	Priemer	L1	L2	L3	Priemer	
	806,47	40,68	32807,2										
	L1	L2	L3										
P [W]	1270,60	1251,70	1247,70	1277,70	-7,10	-26,00	-30,00	21,03	-0,56	-2,03	-2,35	1,65	0,06
S [VA]	1270,60	1251,70	1246,70	1244,20	26,40	7,50	2,50	12,13	2,12	0,60	0,20	0,98	0,04
Q [VAar]	5,10	5,30	4,80	0,03	5,07	5,27	4,77	5,04	16900	17567	15900	16789	0,02
I _{ms} [A]	9,87	9,78	9,82	9,80	0,07	-0,03	0,01	0,03	0,69	-0,26	0,12	0,36	0,09
U _{ms} [V]	130,93	130,34	129,11	128,79	2,14	1,55	0,32	1,34	1,66	1,20	0,25	1,04	0,17
cos ϕ [-]	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I _{max} [A]	13,60	13,44	13,52	13,68	-0,07	-0,24	-0,15	0,15	-0,54	-1,73	-1,12	1,13	0,38
U _{max} [V]	179,37	178,19	177,01	176,87	2,50	1,32	0,14	1,32	1,41	0,75	0,08	0,75	0,16
I _{avg} [A]	0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,02	0,02	0,00	0,02	-204,2	-194,1	-32,2	143,5	0,04
U _{avg} [V]	0,17	-0,17	-0,15	0,61	-0,44	-0,79	-0,76	0,66	-72,0	-128,0	-123,9	108,0	0,08
I _{avr} [A]	8,80	8,72	8,76	8,78	0,02	-0,06	-0,02	0,03	0,20	-0,71	-0,21	0,37	0,08
U _{avr} [V]	117,13	116,51	115,43	114,86	2,27	1,65	0,57	1,50	1,98	1,44	0,50	1,30	0,19
f [Hz]	49,90	x	x	50,00	-0,10	x	x	-0,10	-0,20	x	x	x	x



Obr. 8.2 Schéma zapojenia pre meranie na trojfázovej R-L záťaži

Tab. 8.3 Meranie na trojfázovej R-L záťaži, časť 1

	Merací rozsah			Hodnoty podľa PNA	Chyba merania Δ				Relatívna chyba δ [%]				% z rozsahu		
	U [V]	I [A]	P		L1	L2	L3	Priemer	L1	L2	L3	Priemer			
	806,47	18,65	15040,67												
	L1	L2	L3												
P [W]	-8,17	48,18	129,91	-14,00	42,00	125,00	5,83	6,18	4,91	5,64	-41,64	14,70	3,93	20,09	0,04
S [VA]	417,45	293,90	417,00	403,00	287,00	413,00	14,45	6,90	4,00	8,45	3,59	2,40	0,97	2,32	0,06
Q [VAar]	415,20	280,30	390,13	403,00	287,00	393,00	12,20	-6,70	-2,87	7,26	3,03	-2,33	-0,73	2,03	0,05
I _{ms} [A]	1,89	1,34	1,91	1,86	1,33	1,90	0,03	0,00	0,01	0,01	1,83	0,15	0,37	0,78	0,08
U _{ms} [V]	221,17	220,21	217,40	217,10	217,50	216,89	4,07	2,71	0,51	2,43	1,87	1,25	0,24	1,12	0,30
cos ϕ [-]	-0,02	0,16	0,31	-0,04	0,15	0,31	0,02	0,01	0,01	0,01	-47,22	9,93	1,80	19,65	1,24

Tab. 8.4 Meranie na trojfázovej R-L záťaži, časť 2

	Merací rozsah			Hodnoty podľa PNA	Chyba merania Δ				Relatívna chyba δ [%]				% z rozsahu		
	U [V]	I [A]	P		L1	L2	L3	Priemer	L1	L2	L3	Priemer			
	400	4,4	1760												
	L1	L2	L3												
P [W]	7,87	7,81	15,19	7,00	7,00	15,00	0,87	0,81	0,19	0,62	12,43	11,57	1,27	8,42	0,04
S [VA]	24,31	16,39	23,88	24,00	16,00	24,00	0,31	0,39	-0,12	0,27	1,29	2,44	-0,50	1,41	0,02
Q [VAar]	22,90	13,30	19,50	23,00	14,00	19,00	-0,10	-0,70	0,50	0,43	-0,43	-5,00	2,63	2,69	0,02
I _{ms} [A]	0,26	0,17	0,26	0,26	0,17	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55	0,52	-1,08	0,72	0,04
U _{ms} [V]	94,66	94,24	93,34	93,31	93,43	93,10	1,35	0,81	0,24	0,80	1,45	0,87	0,26	0,86	0,20
cos ϕ [-]	0,32	0,48	0,64	0,31	0,46	0,63	0,01	0,02	0,01	0,01	3,39	3,88	1,00	2,75	1,16

Tab. 8.5 Porovnanie výsledkov harmonickej analýzy pre 3., 5. a 13. harmonickú

Harm.		Merací rozsah			Hodnoty podľa PNA			Chyba merania Δ			% z rozsahu		
		U [V]	I [A]										
		806,47	18,65		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
3	I _{rms} [A]	0,120	0,290	0,180	0,118	0,293	0,172	0,002	-0,003	0,008	0,011	-0,016	0,043
	U _{rms} [V]	0,400	1,000	0,900	0,380	0,840	1,000	0,020	0,160	-0,100	0,002	0,020	-0,012
5	I _{rms} [A]	0,170	0,135	0,176	0,166	0,130	0,170	0,004	0,005	0,006	0,021	0,027	0,032
	U _{rms} [V]	5,100	5,200	4,900	5,100	5,200	4,800	0,000	0,000	0,100	0,000	0,000	0,012
13	I _{rms} [A]	0,010	0,005	0,007	0,006	0,004	0,005	0,004	0,001	0,002	0,021	0,005	0,011
	U _{rms} [V]	1,400	1,100	0,900	1,400	1,300	1,560	0,000	-0,200	-0,660	0,000	-0,025	-0,082

Záver

Práca popisuje vývoj trojfázového wattmetra postupne od popisu vlastností, voľbu jednotlivých komponentov, popisuje matematické metódy výpočtu jednotlivých veličín a metódy harmonickej analýzy až po mechanickú konštrukciu. Na základe týchto návrhov som vytvoril prototyp, s ktorým som uskutočnil meranie na overenie presnosti. Ako je uvedené v kapitole 8, trieda presnosti wattmetra je 1, čo znamená, že odchýlka meranej veličiny bude maximálne 1 % z daného rozsahu, čo je veľmi dobrý výsledok vzhľadom na použitie najlacnejších snímačov a použitie klasických operačných zosilňovačov v analógovej časti. Aj napriek tomu zostáva veľký priestor na vylepšenie vlastností wattmetra ako po hardvérovej tak aj po softvérovej stránke, najmä zdokonalenie metód výpočtu jalového a deformačného výkonu, úprava hardvéru s dôrazom na vyššiu presnosť a vytvorenie osobitného softvéru pre PC.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Katalógové listy jednotlivých obvodov
- [2] Manuál k demo doske 56F805
- [3] Manuál wattmetra Infratek 305A
- [4] A-radio B1996/3
- [5] Prof. Ing. Miloslav Neveselý, DrSc.: *Analýza elektrických obvodov II*, EDIS, Žilina, 2002
- [6] Doc. Ing. Juraj Gyárfáš, CSc., Ing. Peret Kukuča, CSc.: *Výkony deformovaných prúdov a napätí*, ALFA, Bratislava, 1988
- [7] Ing. Václav Čížek, CSc., *Diskrétní Fourierova transformace*, ČSAV, Praha, 1979
- [8] Steven W. Smith : *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing, San Diego, 1999
- [9] Michal Hanak : *FreeMaster for Embedded Applications User Manual*, Roznov Czech System Center, 2004
- [10] DSP56800_Quick_Start User's Manual, Motorola Inc, 2003
- [11] DSP56800 16-Bit Digital Signal Processor Family Manual, Motorola Inc, 2003
- [12] Ing. Miloslav Čejka, CSc. : *Elektronické měřicí systémy*, Skriptum Vysoké učení technické v Brně ,2002