

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Měřič elektrického výkonu (energie) na bázi
integrovaných obvodů pro měření elektrické energie**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan HUCEK**
Osobní číslo: **E09B0274P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Měřič elektrického výkonu (energie) na bázi integrovaných obvodů pro měření elektrické energie**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


Návrh elektronického systému pro měření el. výkonu s integrovanými obvody od firmy Analog Devices.

1. Seznámení s integrovanými obvody pro měření el. výkonu.
2. Návrh zařízení pro měření výkonu.
3. Realizace vzorku.
4. Měření na vyvinutém zařízení a zhodnocení výsledků.


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. Application Notes, Analog Devices

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Milan Štork, CSc.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Konzultant bakalářské práce: **Prof. Ing. Milan Štork, CSc.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá realizací elektronického systému k měření elektrické energie (výkonu). Nejprve jsou v práci teoreticky popsány různé principy měření elektrické energie, ať už pro stejnosměrné nebo střídavé veličiny. Následuje zhodnocení zadané metody, čímž je realizace systému na bázi integrovaných obvodů (dále jen IO) pro měření el. energie. Dále pak pokračuje výběrem specifických IO, určených pro měření el. energie od firmy Analog Devices, potřebné pro návrh systému. Realizovaný výsledný elektronický systém by měl být schopen měřit různé typy energií, podle typu IO a s určitou přesností, kde záleží na nastavení integrovaného obvodu.

Klíčová slova

Elektrická energie (výkon), měření spotřeby, činný výkon (energie), jalový výkon (energie), zdánlivý výkon (energie), IO ADE7753, IO ADE7758

Abstract

Electrical power meter-based integrated circuits for measurement of electrical energy. Pilsen, 2012. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Prof. Ing. Milan Štork, CSc.

This thesis deals with the implementation of an electronic system for measuring electrical energy (power). First, theoretical work describes the different principles of measurement of electricity, either for DC or AC variable. Following evaluation of the specified method, which is based on the realization of integrated circuits (IC hereafter) to measure electrical energy. Then continues by selecting specific ICs designed to measure power energy from Analog Devices, required for system design. Implemented resulting electronic system should be able to measure different types of energy, according to the type of IO and with some accuracy, which depends on the setting of the integrated circuit.

Key words

Electrical energy (power), consumption measurement, active power (energy), reactive power (energy), apparent power (energy), integrated circuit ADE7753, integrated circuit ADE7758

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou/ diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 7.6.2012

Jméno příjmení

.....

Obsah

OBSAH	6
ÚVOD	7
SEZNAM SYMBOLŮ	8
TEORETICKÝ ÚVOD	9
1.1 PRINCIP MĚŘENÍ VÝKONU (EL. ENERGIE)	9
1.2 PRINCIP MĚŘENÍ VÝKONU (EL. ENERGIE) V ELEKTRONICKÝCH SYSTÉMECH NA BÁZI IO.....	11
1.3 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ A PARAMETRŮ IO PRO MĚŘENÍ EL. ENERGIE OD FIRMY ANALOG DEVICE	12
2 PRINCIP FUNKCE OBVODŮ ADE7753 A ADE7758	13
2.1 OBVOD ADE7753.....	13
2.1.1 Měření činného výkonu.....	14
2.1.2 Měření jalového výkonu.....	17
2.1.3 Měření zdánlivého výkonu	18
2.2 OBVOD ADE7758.....	19
3 REALIZACE SYSTÉMU PRO MĚŘENÍ, NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ A NÁSLEDNÉ OŽIVOVÁNÍ	20
3.1 KOMUNIKACE S MCU.....	25
3.2 SPI (SERIAL PERIPHERAL INTERFACE).....	26
3.3 TESTOVÁNÍ	27
3.4 KALIBRACE MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU	31
ZÁVĚR	33
POUŽITÁ LITERATURA	1
PŘÍLOHY	2

Úvod

Elektrická energie je už několik desítek let naší součástí, bez které si už ani nedokážeme představit život. Způsobů, jak vyrobit el. energii jakožto relativně čistý zdroj energie máme dnes mnoho, od větrných elektráren až po elektrárny jaderné. Stejně tak jako je důležité umět el. energii vyrobit, je také umět změřit energetickou spotřebu. Lidé mají rádi přehled o tom jakou spotřebu el. energie mají jejich spotřebiče, v důsledku čehož můžou své spotřebiče používat efektivněji.

Předkládaná práce se zabývá realizací elektronického systému pro měření el. výkonu (energie) na bázi integrovaných obvodů. Důvodem vzniku zadání je realizace měřiče el. výkonu pro laboratorní účely. Způsob řešení vychází ze znalosti měřících integrovaných obvodů, díky kterým lze navrhnout a následně realizovat systém pro měření el. výkonu.

Seznam symbolů

A [-].....	Ampérmetr
V [-].....	Voltmetr
Z [ohm].....	Zátěž
U [V].....	Napětí
I [A].....	Proud
P [W].....	Činný výkon
Q [VAr].....	Jalový výkon
S [VA].....	Zdánlivý výkon
E [kWh].....	Elektrická energie
1f,3f [-].....	Počet fází
W [-].....	Wattmetr
U, V, W [-].....	Označení fází
N [-].....	Nulový vodič
MCU/CPU [-].....	Mikroprocesor
A/D [-].....	Převodník
G [-].....	Generátor

Teoretický úvod

Tato část práce má za cíl seznámení se základní teorií potřebnou pro pochopení principů měření el. výkonu (el. energie).

1.1 Princip měření výkonu (el. energie)

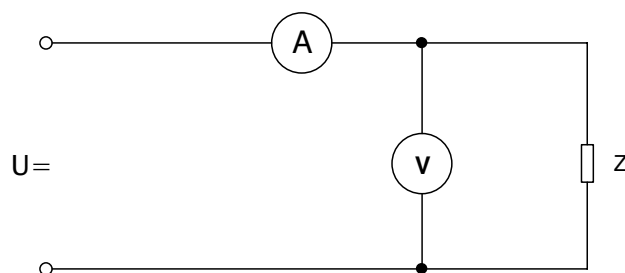
Existuje několik druhů elektrického výkonu. Jako první uvedu princip měření výkonu v obvodech stejnosměrného proudu. Základní vztah pro výpočet výkonu v těchto obvodech je:

$$P=UI \text{ [W]} \quad (1.1)$$

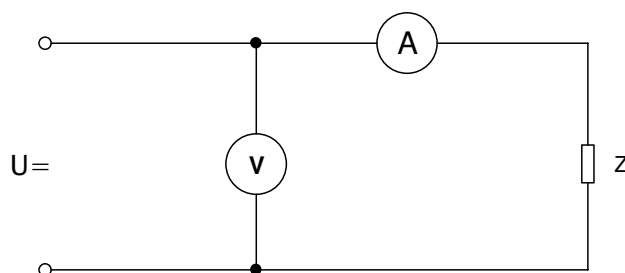
a vztah pro výpočet energie je:

$$E = \int_0^T P dt \text{ [kWh]} \quad (1.2)$$

Kde U [V] a I [A] jsou konstantní veličiny tzn. v čase neměnné. Ze vztahu je patrné, že výkon lze nepřímo zjistit změřením proudu a napětí na zátěži. Názorné zapojení je na obr.1.1 a obr.1.2.



Obr.1.1 Zapojení pro nepřímé měření výkonu vhodné pro malé hodnoty zátěže Z [ohm]



Obr.1.2 Zapojení pro nepřímé měření výkonu vhodné pro velké hodnoty zátěže Z [ohm]

Pro minimalizaci chyby měření lze u obr.1.1 provést odečtení od proudu změřeného A-metrem proud V-metrem, a u obr.1.2 provést odečtení od napětí změřeného na V-metru úbytek napětí na A-metru, nebo změřit napětí a proud jednotlivě.

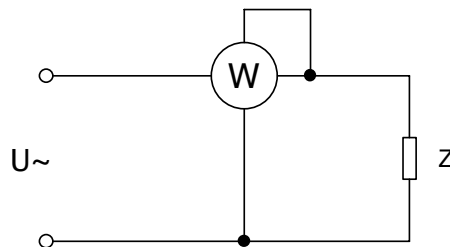
Další je princip měření výkonu harmonického střídavého proudu, kde pro jednofázovou síť (dále jen 1f) platí tyto vztahy:

$$P=UI\cos(\varphi) [W] \quad (1.3)$$

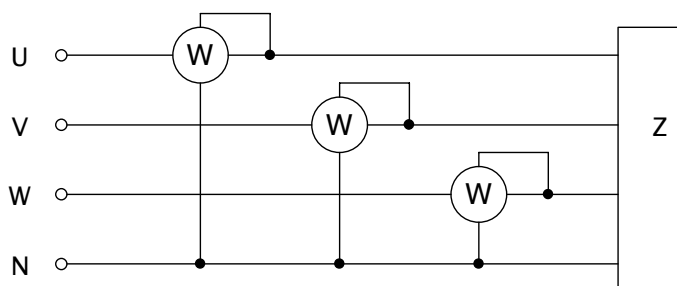
$$Q=UI\sin(\varphi)[VAr] \quad (1.4)$$

$$S=UI=\sqrt{P^2+Q^2} [VA] \quad (1.5)$$

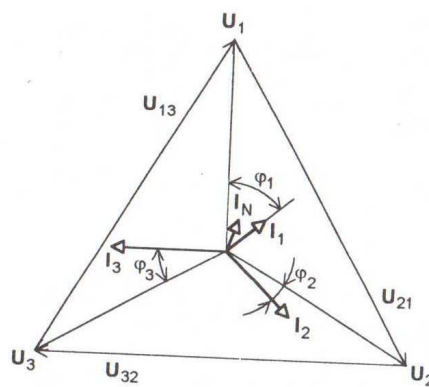
Kde φ je fázový posun mezi fázorem napětí a fázorem proudu na zátěži. Určuje nám ho charakter zátěže. Např. pro čistě odporovou zátěž je fázový posun mezi napětím a proudem nulový tzn. $\varphi=0^\circ$ a proto účinník $\cos\varphi=1$, tedy platí rovnice (1.1). Měření výkonu na 1f resp. 3f sítích se nejčastěji provádí pomocí wattmetrů a to buďto elektromechanickými nebo elektronickými. Zde se jedná o přímé metody měření. Způsoby zapojení elektromechanických W-metrů jsou na obr.1.3, obr.1.4, obr.1.6 a obr.1.7. Názorné zobrazení fázorového diagramu 3f sítě je pak na obr.1.5.



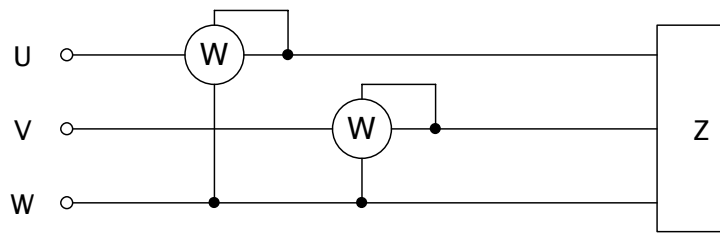
Obr.1.3 Zapojení wattmetru pro měření činného výkonu v 1f síti



Obr.1.4 Zapojení wattmetrů pro měření činného výkonu v 3f síti

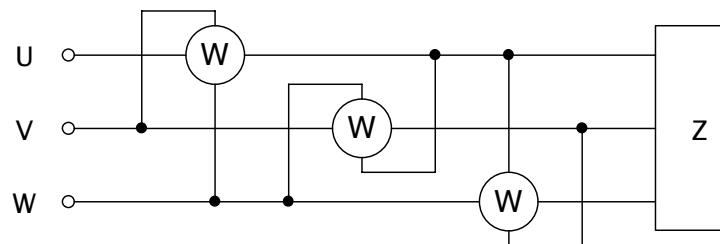


Obr.1.5 Fázorový diagram 3f sítě



Obr.1.6 Aronovo zapojení pro měření činného výkonu v 3f síti

Činný výkon podle zapojení obr.1.4 a obr.1.6 je pak dán součtem měřených hodnot.



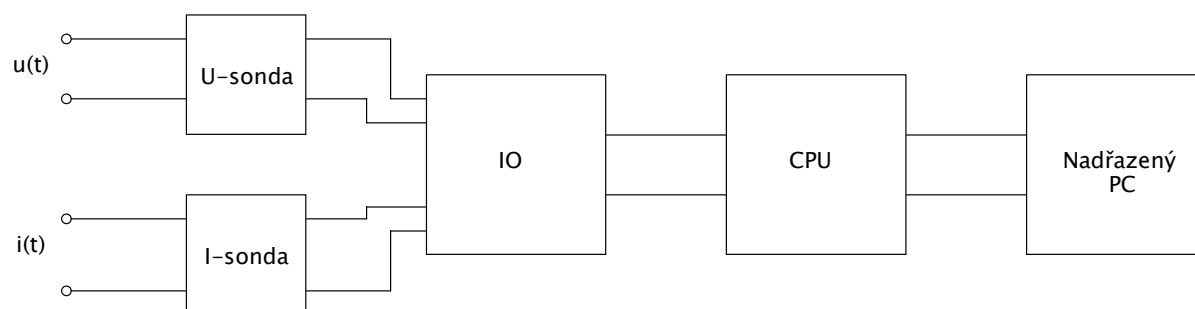
Obr.1.7 Zapojení wattmetrů pro měření jalového výkonu v 3f síti

Jalový výkon podle obr.1.7 je dán součtem měřených hodnot. Princip většiny elektromechanických wattmetrů je založen na soustavě elektrodynamické. Jedná se o dvě cívky pevnou (proudová) a natáčivou (napěťová). Soustava využívá síly, které působí mezi pevnou a natáčivou cívkou vznikající při průchodu proudu těmito cívkami.

Elektrická energie je definována vztahem (1.2). Měření spotřeby el. energie se provádí za pomoci tzv. elektroměrů nejčastěji indukčních. Indukční soustava využívá hliníkový kotouček do kterého se indukují vířivé proudy, které vytvářejí společně s magnetickými poli elektromagnetů pohybový moment. Zapojují se stejně jako wattmetry. V poslední době jsou již tyto elektroměry nahrazovány elektronickými elektroměry.

1.2 Princip měření výkonu (el. energie) v elektronických systémech na bázi IO

Základní blokové schéma pro měření el. výkonu je na obr.1.8. Snímání napětí lze provést buďto na odporu nebo měřícím transformátorem. Obdobně lze provést snímání proudu, kde snímáme proud nepřímo pomocí napětí na bočníku nebo opět měřícím transformátorem. Signál přivedený na vstup IO je patřičně upraven tak, aby nedošlo k poškození obvodu tzn. např. snížení napěťové hladiny signálu. IO plní více funkcí, jako je A/D převod signálu, zpracování signálu ve výpočetní jednotce a korekce vypočtených hodnot, které jsou převedeny na výstup. CPU nám nastavuje IO podle potřeb (nastavuje registry IO) a čte data (výkony) z registrů IO, které pak posílá na zobrazovací jednotku (LCD).



Obr.1.8 Blokové schéma elektronického systému pro měření výkonu
IO- integrovaný obvod, CPU- mikroprocesor

1.3 Porovnání vlastností a parametrů IO pro měření el. energie od firmy Analog device

Obvody pro jednofázové měření:

ADE7953(multifunkční) - lze použít pro měření: činný výkon; jalový výkon; zdánlivý výkon; efektivní hodnota proudu; efektivní hodnota napětí

- Chyba měření pro: činný, jalový výkon 0,1%
- Chyba měření pro: efektivní hodnotu proudu, napětí 0,2%
- Šířka měřicího pásma: 1,23 kHz
- Napájení: 3,3V, 7mA
- Pouzdro typu LFCSP s 28 vývody

ADE7753- lze použít pro měření: činný výkon; jalový výkon; zdánlivý výkon; efektivní hodnota proudu; efektivní hodnota napětí

- Chyba měření pro: činný výkon 0,1%
- Chyba měření pro: efektivní hodnotu proudu, napětí 0,5%
- Šířka měřicího pásma (kanál 1): 14 kHz
- Šířka měřicího pásma (kanál 2): 140 Hz
- Napájení: 5V, 3mA
- Pouzdro typu SSOP s 20 vývody

Výše zmíněné obvody mají stejný rozsah pracovní teploty (od -40°C do +85°C), chybu fáze mezi kanály ($\pm 0,05^\circ$) a komunikační rozhraní (SPI).

Obvody pro vícefázové měření:

ADE7858(multifunkční)- lze použít pro měření: činný výkon; jalový výkon; zdánlivý výkon; efektivní hodnota proudu; efektivní hodnota napětí

- Chyba měření pro: činný, jalový výkon 0,1% - 0,2%
- Chyba měření pro: efektivní hodnotu proudu, napětí 0,2%
- Šířka měřicího pásma: 2kHz
- Pouzdro typu LFCSP se 40 vývody

ADE7758- lze použít pro měření: činný výkon; jalový výkon; zdánlivý výkon; efektivní hodnota proudu; efektivní hodnota napětí

- Chyba měření pro: činný výkon 0,1%
- Chyba měření pro: efektivní hodnotu proudu, napětí 0,5%
- Šířka měřicího pásma (kanál 1): 14 kHz
- Šířka měřicího pásma (kanál 2): 260 Hz
- Pouzdro typu SOIC se 24 vývody

ADE7754- lze použít pro měření: činný výkon; zdánlivý výkon; efektivní hodnota proudu; efektivní hodnota napětí

- Chyba měření pro: činný výkon 0,1%
- Chyba měření pro: efektivní hodnotu proudu 2%
- Chyba měření pro: efektivní hodnotu napětí 0,5%
- Šířka měřicího pásma: 14 kHz
- Pouzdro typu SOIC se 24 vývody

Výše zmíněné obvody mají stejný rozsah pracovní teploty (od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$), velikost napájení (5V), chybu fáze mezi kanály ($\pm 0,05^{\circ}$) a komunikační rozhraní (SPI).

Pro systém elektronického měření energie jsem vybral 1f obvod ADE7753 a 3f obvod ADE7758. Podmínkou byla sběrnice SPI, pouzdro typu SSOP nebo SOIC a schopnost měřit činný jalový a zdánlivý výkon, což tyto obvody splňují.

2 Princip funkce obvodů ADE7753 a ADE7758

2.1 Obvod ADE7753

Vlastnosti integrovaného obvodu ADE7753:

- Má vysokou přesnost, podporuje normy IEC 60687/61036/61268 a IEC 62053-21/62053-22/62053-23.
- Digitální integrátor umožňující přímé rozhraní s proudovými senzory s di/dt výstupem.
- Operační zes. v proudovém kanálu umožňuje přímé připojení bočníku nebo měřicího transformátoru.
- Měří činnou, jalovou a zdánlivou energii
- Digitální kalibrace energie, fáze a vstupního offsetu
- Kompatibilní s SPI sériovým rozhraním a pulzní výstup
- Má teplotní senzor
- Napájecí napětí 5V
- Nízká spotřeba, typicky 25mW
- Pouzdro typu SSOP s 20 vývody

$$u(t) = \sqrt{2} * U \sin(\omega t) \text{ [V]} \quad (2.1)$$

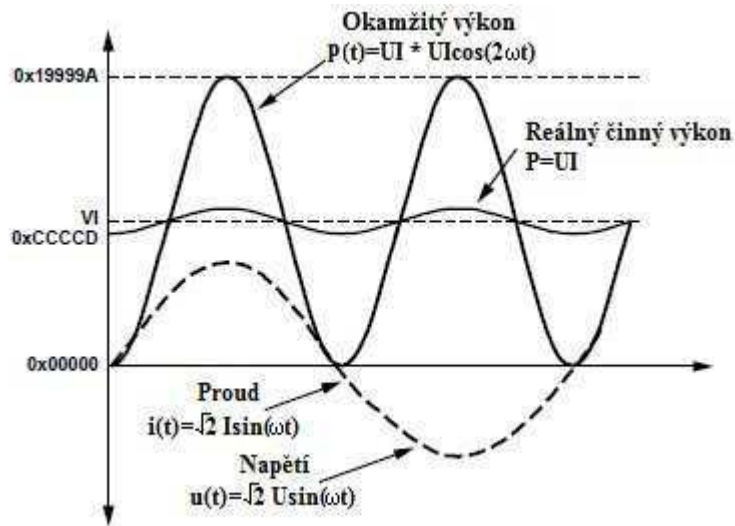
$$i(t) = \sqrt{2} * I \sin(\omega t) \text{ [A]} \quad (2.2)$$

$$p(t) = u(t) * i(t) \text{ [W]} \quad (2.3)$$

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt = UI \text{ [W]} \quad (2.4)$$

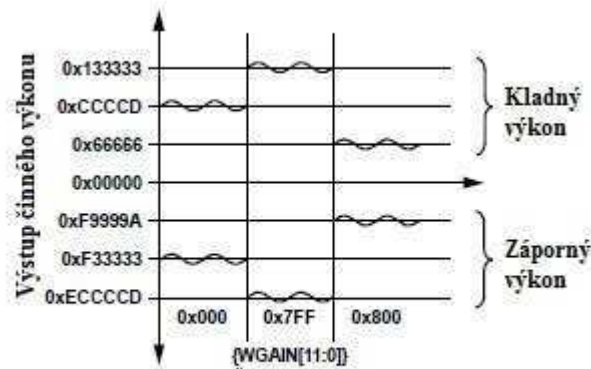
$$p(t) = UI - UI \cos(2\omega t) \text{ [W]} \quad (2.5)$$

Činný výkon je přitom roven stejnoměrné složce okamžitého činného výkonu $p(t)$, který je dán vztahem (2.3). Stejnosečná složka je extrahována filtrem DPF jenž je vidět na obr. 2.2. Průběhy jsou vidět na obr.2.3.



Obr.2.3 Zobrazení průběhu činného výkonu

Charakteristika filtru není ideální, a proto je signál činného výkonu zvlněný v důsledku signálu okamžitého výkonu. Zvlnění je sinusové a lze odstranit výpočtem energie. Činný výkon je tedy získáván z okamžitého činného výkonu filtrem typu dolní propust. Lze mu upravit rozsah registrem WGAIN obr.2.2, při zapsání do registru WGAIN=0x7FF se rozsah zvýší o 50%, naopak při zapsání do registru WGAIN=0x800 se rozsah o 50% sníží, jak je vidět na obr.2.4.



Obr.2.4 Kalibrace rozsahu činného výkonu

Energie je definovaná vztahem (2.6).

$$\text{registr } AENERGY = E = \int P dt \text{ [kWh]} \quad (2.6)$$

Obvod ADE7753 dosahuje integrace signálu činného výkonu spojitým akumulováním činného výkonu do vnitřního 49-bitového registru, kde horních 24 bitů reprezentuje registr AENERGY obr.2.2. Akumulace v diskrétním čase je ekvivalentní se vztahem (2.7).

$$\text{registr } AENERGY = E = \int p(t) dt = \lim_{t \rightarrow 0} \left\{ \sum_{n=1}^{2^N} p(nT) \times T \right\} \text{ [kWh]} \quad (2.7)$$

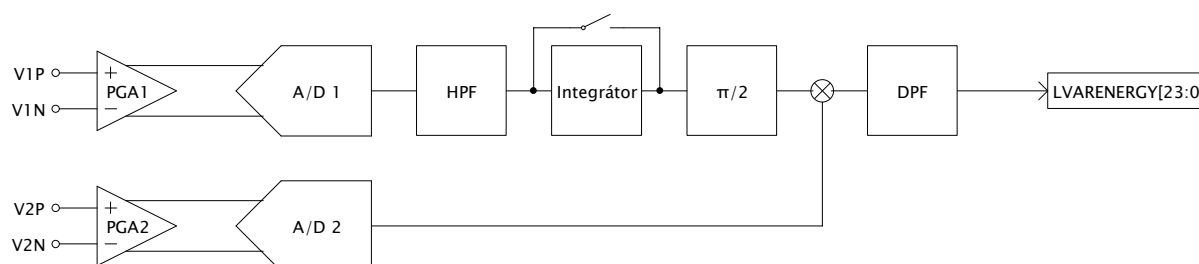
n -číslo vzorku v diskrétním čase

T - perioda vzorku

Integrace odstraňuje již zmíněné sinusové složky, které se můžou vyskytnout v signálu činného výkonu. Akumulace činného výkonu do registru výkonu je neustálá. Přidávání energie do registru je znaménkové, proto se negativní energie odečte od obsahu činné energie. Výjimku tvoří, pokud pře-nastavíme bit POAM registru MODE, pak se akumuluje pouze pozitivní činná energie.

ADE7753 také poskytuje pulzní výstup pro kalibrační účely. To umožňuje D/F převodník a pomocí registrů CFDEN a CFNUM lze nastavovat výstupní frekvence

2.1.2 Měření jalového výkonu



Obr. 2.5 Princip měření jalové energie (výkonu)

PGA- operační zesilovač, A/D- převodník (analog na digital), HPF- filtr typu horní propust, $\pi/2$ - posun o 90° , DPF- filtr typu dolní propust

Princip měření jalového výkonu je zobrazen na obr.2.5. Obr.2.5 je obdobný obr.2.2, důležitý rozdíl je blok $\pi/2$, který posouvá signál proudového kanálu o 90° . Okamžitý jalový výkon $q(t)$ je definován průběhy napětí a proudu, z nichž jeden z nich je vůči druhému posunutý o 90° . Rovnice (2.8) vyjadřuje okamžité napětí $u(t)$ a rovnice (2.9) vyjadřuje okamžitý proud $i(t)$, který je posunut o 90° . Další rovnice (2.10) definuje okamžitý jalový výkon $q(t)$. Vyjádření $q(t)$ rovnicí (2.11) používá obvod ADE7753.

$$u(t) = \sqrt{2} * U \sin(\omega t + \theta) \text{ [V]} \quad (2.8)$$

$$i(t) = \sqrt{2} * I \sin(\omega t + \pi/2) \text{ [A]} \quad (2.9)$$

$$q(t) = u(t) * i(t) \text{ [VAr]} \quad (2.10)$$

$$q(t) = UI \sin(\theta) + UI \sin(2\omega t + \theta) \text{ [VAr]} \quad (2.11)$$

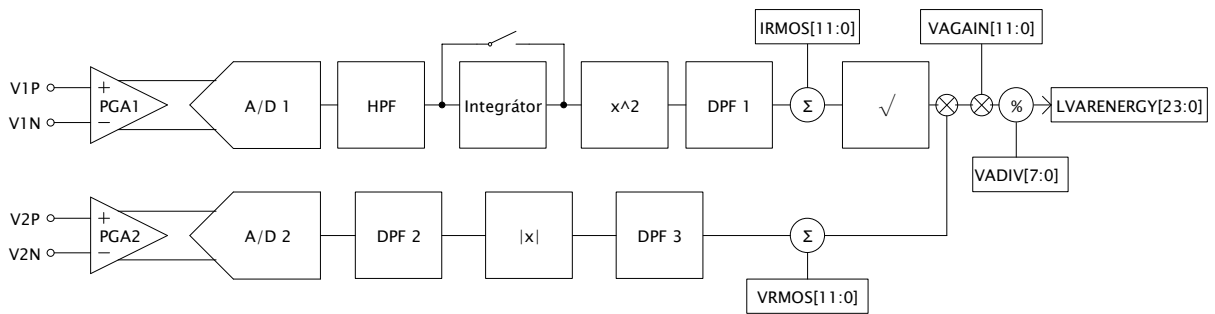
θ - fázový rozdíl mezi napěťovým a proudovým kanálem

$$Q = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} q(t) dt = UI \sin(\theta) \text{ [VAr]} \quad (2.12)$$

Průměrný jalový výkon je dán rovnicí (2.12). Jalový výkon se rovná stejnosměrné složce průběhu okamžitého jalového výkonu $q(t)$. Stejnosměrná složka průběhu okamžitého jalového výkonu je pak extrahována filtrem DPF, s cílem získat informace o jalovém výkonu.

Funkce akumulace jalové energie je stejná jako akumulace energie činné.

2.1.3 Měření zdánlivého výkonu



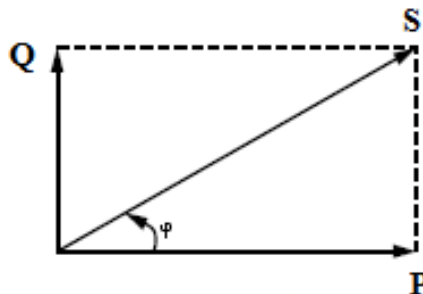
Obr. 2.6 Princip měření zdánlivé energie (výkonu)

PGA- operační zesilovač, A/D- převodník (analog na digital), HPF- filtr typu horní propust, DPF- filtr typu dolní propust

Princip měření zdánlivého výkonu S je naznačen na obr.2.6. Jedná se o násobení efektivních hodnot napětí a proudu, vyjádřené vztahem (2.13). Zdánlivý výkon je také možné vyjádřit tzv. „trojúhelníkem výkonů“ na obr.2.7, ze kterého lze odvodit vztah (2.14). Zdánlivý výkon je nezávislý na fázovém posunu φ .

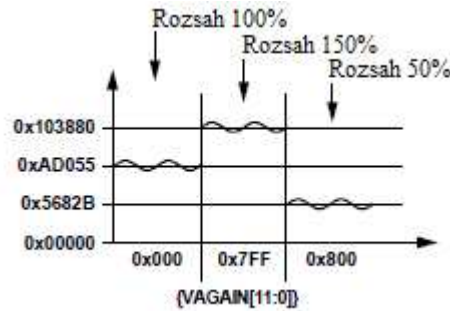
$$S = U_{ef} * I_{ef} [VA] \quad (2.13)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} [VA] \quad (2.14)$$



Obr. 2.7 Trojúhelník výkonů

Rozsah zdánlivého výkonu může být upraven registrem VAGAIN. Pokud je registr roven hodnotě VAGAIN=0x7FF, potom je rozsah zdánlivého výkonu o 50% vyšší, naopak při VAGAIN=0x800 je rozsah o 50% nižší viz. obr.2.8.



Obr. 2.8 Kalibrace rozsahu zdánlivého výkonu

Zdánlivá energie je dána vztahem (2.15). ADE7753 dosahuje integrace zdánlivého výkonu neustálou akumulací zdánlivého výkonu do vnitřního registru o velikosti 49 bitů. Horních 24 bitů je přístupno pomocí registru VAENERGY. Akumulace v diskrétním čase je ekvivalentní se vztahem (2.16). Registr RVAENERGY slouží ke čtení zdánlivé energie a po přečtení se resetuje na 0.

$$\text{registr VAENERGY} = SE = \int s(t) dt \quad (2.15)$$

$$\text{registr VAENERGY} = SE = \lim_{T \rightarrow 0} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} s(nT) \times T \right\} \quad (2.16)$$

n -číslo vzorku v diskrétním čase

T - perioda vzorku

Akumulace činného výkonu do registru výkonu je neustálá. Přidávání energie do registru je znaménkové, dokonce i když zůstává zdánlivá energie teoreticky vždy pozitivní.

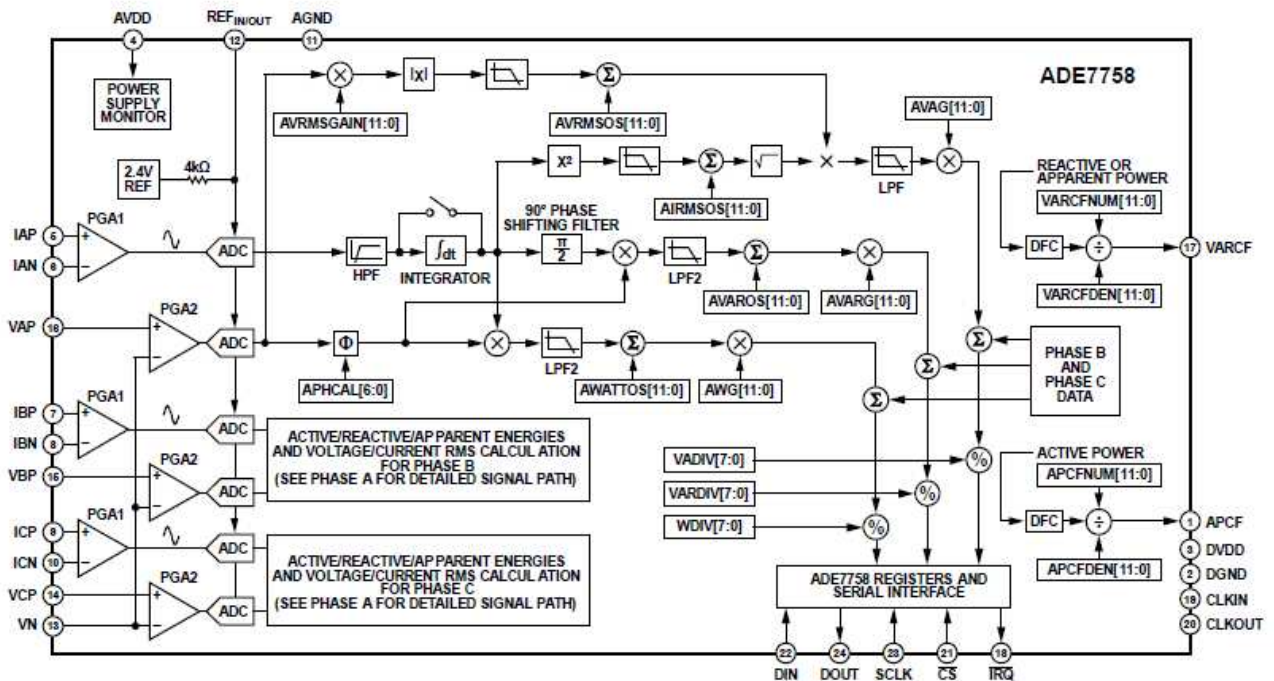
2.2 Obvod ADE7758

Vlastnosti integrovaného obvodu ADE7758:

- Má vysokou přesnost, podporuje normy IEC 60687/61036/61268 a IEC 62053-21/62053-22/62053-23.
- Kompatibilní s 3f / 3 vodičové vedení a 3f/ 4vodičové vedení
- Digitální integrátor umožňující přímé rozhraní s proudovými senzory s di/dt výstupem.
- Operační zes. v proudovém kanálu umožňuje přímé připojení bočníku nebo měřicího transformátoru.
- Měří činnou, jalovou a zdánlivou energii
- Digitální kalibrace energie a fáze
- Kompatibilní s SPI sériovým rozhráním, dva pulzní výstupy, 1. pro činný

výkon a 2. nastavitelný mezi jalovým a zdánlivým výkonem

- Napájecí napětí 5V
- Nízká spotřeba, typicky 70mW
- Pouzdro typu SOIC s 24 vývody



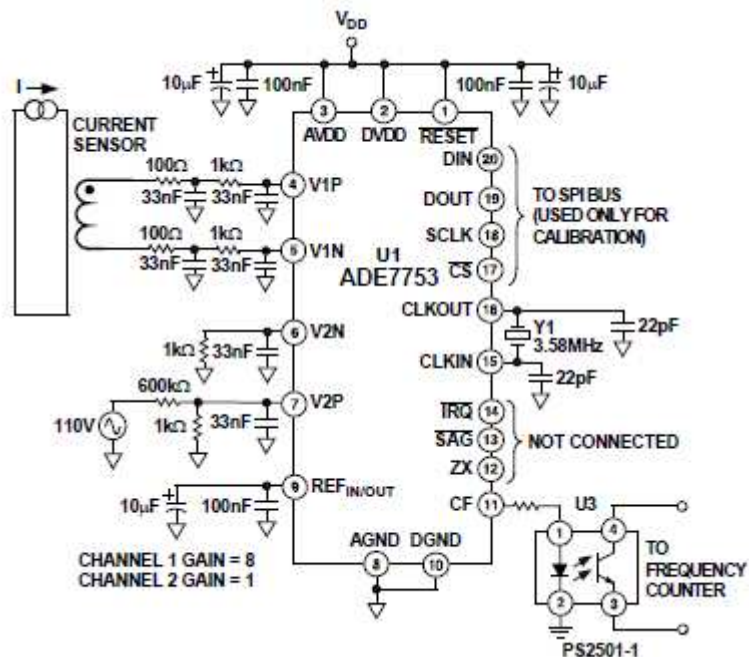
Obr. 2.9 Blokové schéma obvodu ADE7758 uvedené v datasheetu [2]

ADE7758 (viz. obr.2.9) je IO pro 3f měření s vnitřním zapojením téměř stejným jako v případě ADE7753, jen s tím rozdílem že obsahuje některé části zapojení 3x. Z toho důvodu již dále není popisován princip činnosti obvodu.

3 Realizace systému pro měření, návrh desky plošných spojů a následné ožívání.

Pro realizaci měřicí části systému pro 1f měření s ADE7753 jsem použil testovací zapojení uvedené v datasheetu [1] viz. obr.2.9. Kde piny AVDD- analogové napájení, DVDD- digitální napájení a RESET jsou připojeny na napájecí napětí. Piny V1P a V1N jsou určeny pro přívod signálu z proudového senzoru a piny V2P,V2N jsou určeny pro přívod napěťového signálu. Pin REF in/out je určen jako výstup referenčního napětí o hodnotě $2,4V \pm 8\%$, nebo jako vstup externího referenčního napětí. Piny AGND- analogová zem a DGND- digitální zem jsou připojeny ke společné zemi a to tak, že jsou spojeny pouze

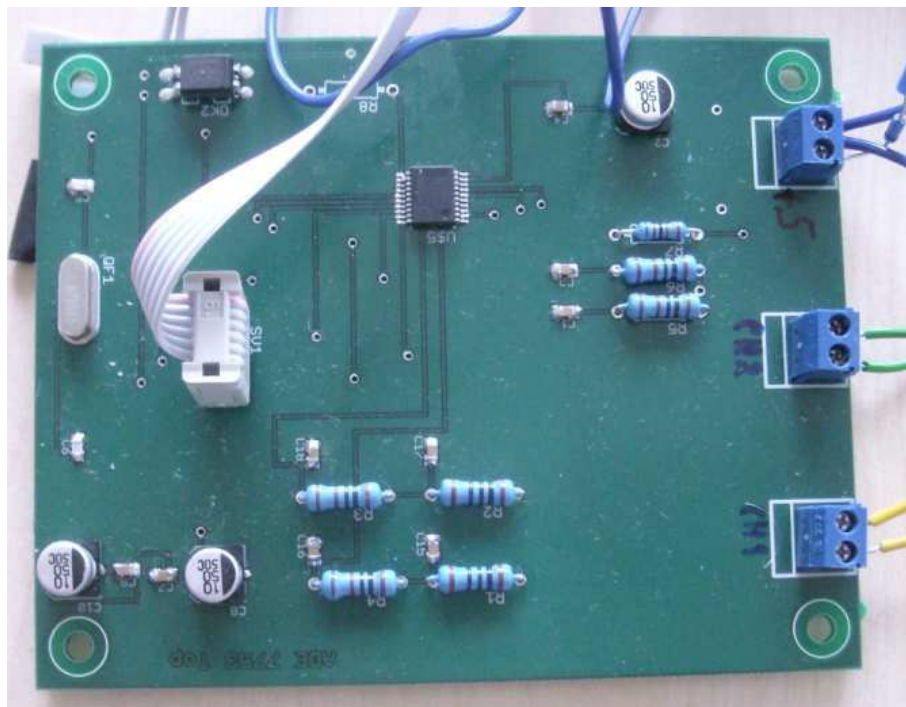
v jednom bodě. Pin CF je pulzní výstup sloužící ke kalibračním účelům. Piny CLKIN- vstup hodin a CLKOUT- výstup hodin jsou připojeny ke krystalu o frekvenci 3,579545MHz. Piny DIN, DOUT, SCLK a CS jsou vyvedeny na dvouřadý header společně s výstupem frekvenčního čítače. Rozdíl v mém zapojení (příloha A) je absence proudového senzoru ve schématu zapojení, resp. jsem vyvedl vstupy určené pro senzory na svorky a tak je možné použít jak bočník tak měřící transformátor.



Obr. 3.1 Základní zapojení ADE7753 uvedené v datasheetu [1], pro I_f měření

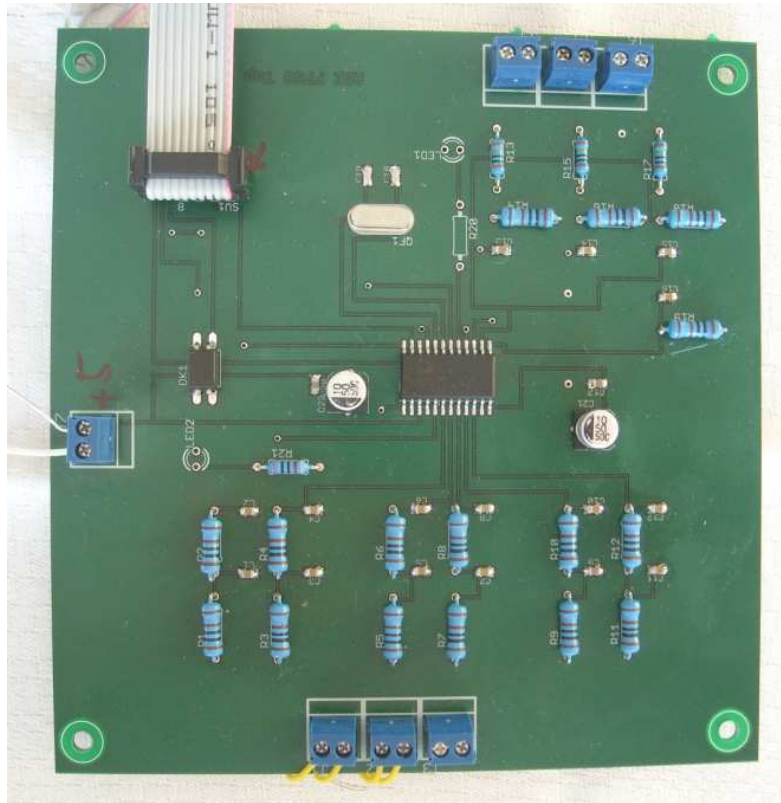
Desku plošných spojů (příloha A) jsem zpracoval v programu Eagl. Je to dvouvrstvá deska, tzn. má dvě vodivé vrstvy, dvě nepáživé masky a s osazením součástek pouze na jedné vrstvě. Vodivé spojení mezi vrstvami je provedeno pokovenými otvory. Pro uchycení je deska opatřena i upevňovací otvory. Ukázka již osazené desky je na obr.3.2.

Po osazení bylo třeba provést oživení desky tzn. ověřit jestli je funkční. Desku jsme připojily na napájení a za pomoci osciloskopu jsme na krystalu změřily sinusový průběh o frekvenci 3,579MHz, dále jsme na pinu REF in/out naměřily 2,39V což odpovídalo předpokladu $2,4V \pm 8\%$. Deska se jevila jako funkční. Pro další měření ji bylo třeba propojit s CPU a se el. spotřebičem.



Obr.3.2 Fotografie osazené desky s obvodem ADE7753, pro 1f měření

Pro realizaci měřicí části systému pro 3f měření s ADE7758 jsem použil testovací zapojení uvedené v datasheetu[2] viz. obr.3.3. Kde piny AVDD- analogová zem a DVDD- digitální zem jsou připojeny na napájecí napětí. Piny IAP,IAN/IBP,IBN/ICP,ICN jsou určeny pro přívod signálu z proudových senzorů a piny VAP,VBP,VCP,VN jsou určeny pro přívod napěťového signálu. Piny AGND- analogová zem a DGND- digitální zem jsou připojeny na společnou zem, tak že jsou propojeny pouze v jednom bodě. Pin REF in/out je určen jako výstup referenčního napětí o hodnotě $2,4V \pm 8\%$, nebo jako vstup externího referenčního napětí. Piny CLKIN a CLKOUT jsou určeny pro připojení ke zdroji hodinových impulsů, kde je použit krystal o frekvenci 10MHz. Piny APCF a VARCF jsou pulzní výstupy, v případě APCF je to pulzní výstup činného výkonu a v případě VARCF lze tento výstup nastavit jako pulzní výstup jalového výkonu nebo pulzní výstup zdánlivého výkonu. Ostatní piny jsou připojeny na dvouřadý header a jsou určeny ke komunikaci s MCU. Rozdíl v mém zapojení (příloha B) je absence proudových senzorů, resp. jsem vyvedl vstupy určené pro senzory na svorky a tak je možné použití jak bočníků tak měřících transformátorů.

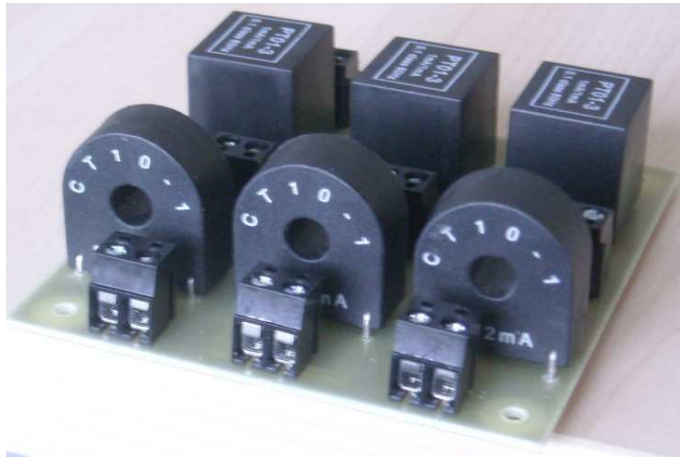


Obr.3.4 Fotografie osazené desky s obvodem ADE7758, pro 3f měření

Nakonec jsem ještě realizoval desky s měřicími transformátory, které mají funkci jako senzory napětí a proudu. Schéma zapojení a desky plošných spojů jsou uvedeny v přílohách C a D. Následující obrázky obr.3.5 a obr.3.6 ukazují již zhotovené desky. Kde vstupní napětí u měřicího transformátoru napětí může být až 1000V podle velikosti předřadného odporu a vstupní proud měřicího transformátoru proudu je až 5A.

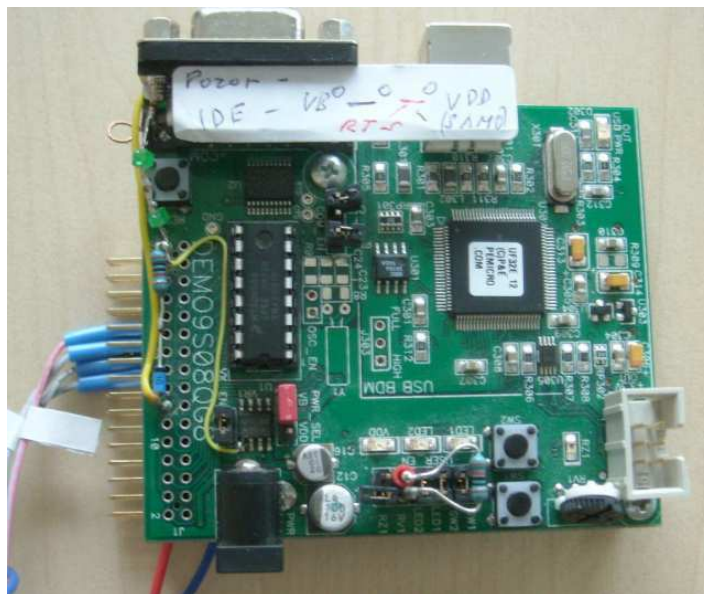


Obr.3.5 Fotografie osazené desky měřicími transformátory určené pro desku s obvodem ADE7753, pro 1f měření



Obr.3.6 Fotografie osazené desky měřícími transformátory určené pro desku s obvodem ADE7758, pro 3f měření

3.1 Komunikace s MCU



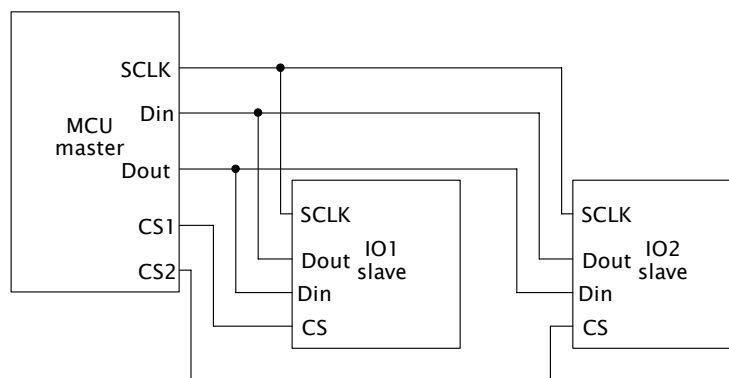
Obr.3.7 Fotografie řídicí desky s mikroprocesorem

Na obr.3.7 je názorná ukázka řídicí desky s mikroprocesorem s označením MC9S08Q8CPB, kterou je ovládán systém pro měření výkonu (energie). Posílání a přijímání dat je zprostředkováno komunikačním rozhraním SPI viz. níže v textu.

3.2 SPI (Serial Peripheral Interface)

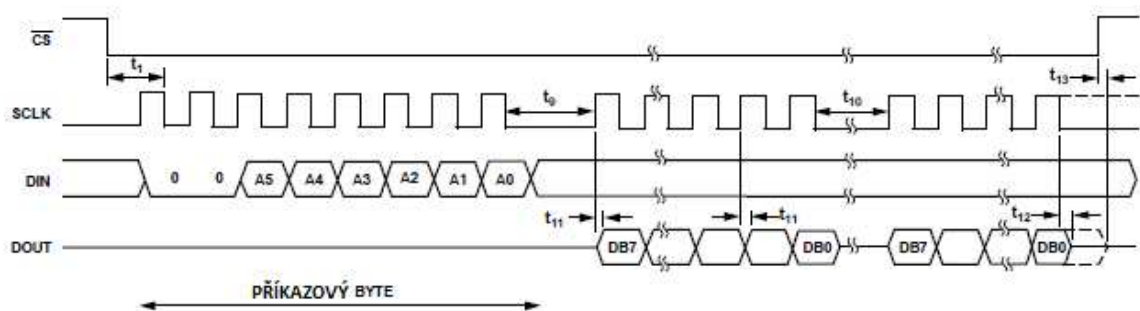
SPI je sériové periferní rozhraní, používané ke komunikaci mezi řídicími obvody (typu master), většinou mikroprocesory a různými integrovanými obvody (typu slave) v našem případě tedy obvodu pro měření el. energie. Tato komunikace je realizována čtyř vodičovou společnou sběrnicí. Ke sběrnicí je připojen mikroprocesor (master) a integrované obvody (slave) názorně zobrazeno na obr.3.8 . Signály na sběrnicí jsou:

- SCLK - hodinový signál
- MISO – vstup obvodu typu master, výstup obvodu typu slave
- MOSI- výstup obvodu typu master, vstup obvodu typu slave
- CS – chip select



Obr.3.8 Obecné zapojení sběrnic SPI, pro dvě periferie

Signálem CS zvolíme obvod se kterým chceme komunikovat, kde komunikace nastává pouze s hodinovými impulsy. Na obr.3.9 je názorná ukázka průběhů signálů při použití SPI komunikace.

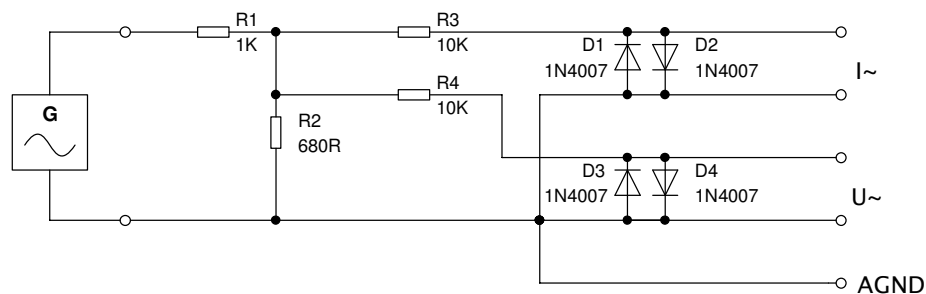


Obr.3.9 Ukázka čtení dat z ADE7753 připojeného přes SPI[1]

Z obr.3. je zřejmé, že komunikace je aktivní pokud je CS v log. 0. Dále musí být aktivní hodinové pulsy, až poté je možné zapisovat nebo číst data. Na obr.3.9 příkazovým bytem na vstup obvodu ADE7753 aktivujeme čtení, a poté z výstupu téhož obvodu můžeme číst potřebná data.

3.3 Testování

Pro testování bylo provedeno zapojení měřicího systému dle obr.1.8. Kde jednoduchý obvod pro snímání U a I jsem sestrojil podle schématu na obr.3.10, a to z důvodu obavy o zařízení před poškozením. Jedná se o odporový dělič napětí, kde na odporu R2 snímáme přímo napětí a nepřímo proud. Na každý kanál je jako ochrana připojeno antiparalelní zapojení diod.



Obr.3.10 Schéma zapojení obvodu pro snímání U a I

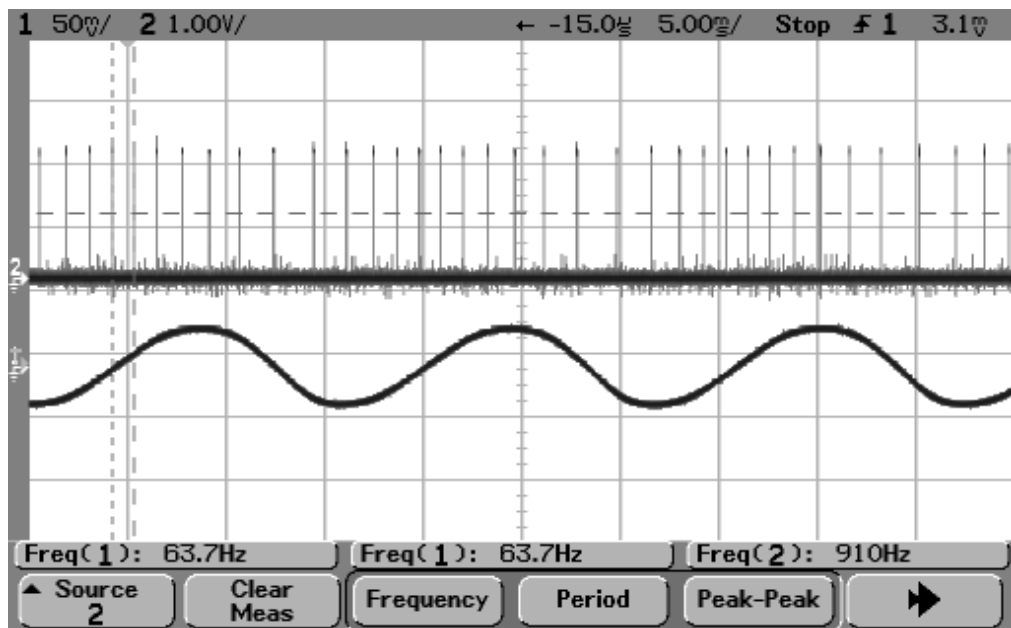
K tomuto zapojení byla připojena měřicí deska s obvodem ADE7753 na obr.3.2, dále pak výstupy z měřicí desky byly připojeny k řídicí desce s mikroprocesorem, která byla připojena k nadřazenému počítači, pomocí kterého se procesor programoval, a také sloužil jako kontrola běhu měřicího systému tzn. např. měnící se obsah registrů.

S programováním řídicí desky mi pomohl vedoucí práce Prof. Ing. Milan Štork, CSc. Na obrázcích: obr.3.11, obr.3.12 a obr.3.13 jsou ukázky z vývojového prostředí pro MCU. Po správném zapojení všech částí 1f měřicího systému bylo třeba vyzkoušet jeho správnou funkčnost. Takže jsme na vstup z generátoru přivedli sinusový signál o frekvenci přibližně 60 Hz a osciloskopem změřily průběh na výstupu zapojení obr.3.10, kde při amplitudě špička-špička větší než 1,2V se sinusový průběh „ořezával“, to byla známka toho, že diodové ochrany fungovaly správně. Po připojení zbytku měřicího systému tzn. měřicího a řídicího obvodu jsme testovali pulzní výstup (obr.3.14 horní polovina), kde jsme naměřily signál pulzního charakteru o frekvenci 910Hz.

Bean Parameters				Register Details			
Device	SPI	SPI	...	Name	Address	Init. value	Register Map
Settings				SPIC1	0x0028	54	H
Clock settings				SPIC2	0x0029	00	H
Baud Rate Prescaler Divisor	2			SPIBR	0x002A	14	H
Baud Rate Divisor	32			SPIB	0x002B	20	H
Frequency	130.8 kHz			SPIB	0x002D	00	H
Mode Select	Master						
Clock Polarity	active-high						
Clock Phase	Second edge						
Data shift order	MSB first						
Bidirectional mode	Disabled						
Output enable in Bidirect.	no						
Stop in Wait Mode	Disabled						
Pins							
SCK pin	PTB2_KBIP6_SPSCCK_ADP6	PTB2_KBIP6_SPSCCK_					
MISO pin allocation	Enabled						
MISO pin	PTB4_MISO	PTB4_MISO					
MOSI pin allocation	Enabled						
MOSI pin	PTB3_KBIP7_MOSI_ADP7	PTB3_KBIP7_MOSI_AI					
SS pin allocation	Disabled						
Interrupts							
Interrupt	Vspi	Vspi					
Receive and fault interrupt	Disabled						
Transmit interrupt	Disabled						
ISR name	isrVspi						
Initialization							
Enable SPI system	yes						

Register Map Legend:
 ● 1 ○ 0 ● undefined, reserved, read-only

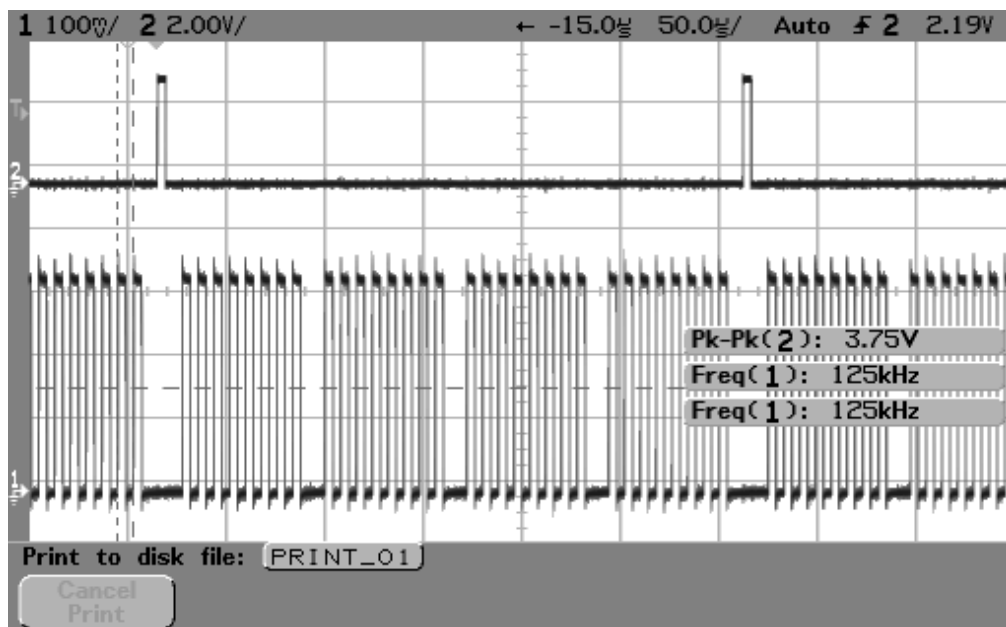
Obr.3.13 Zobrazení registrů MCU ve vývojovém prostředí



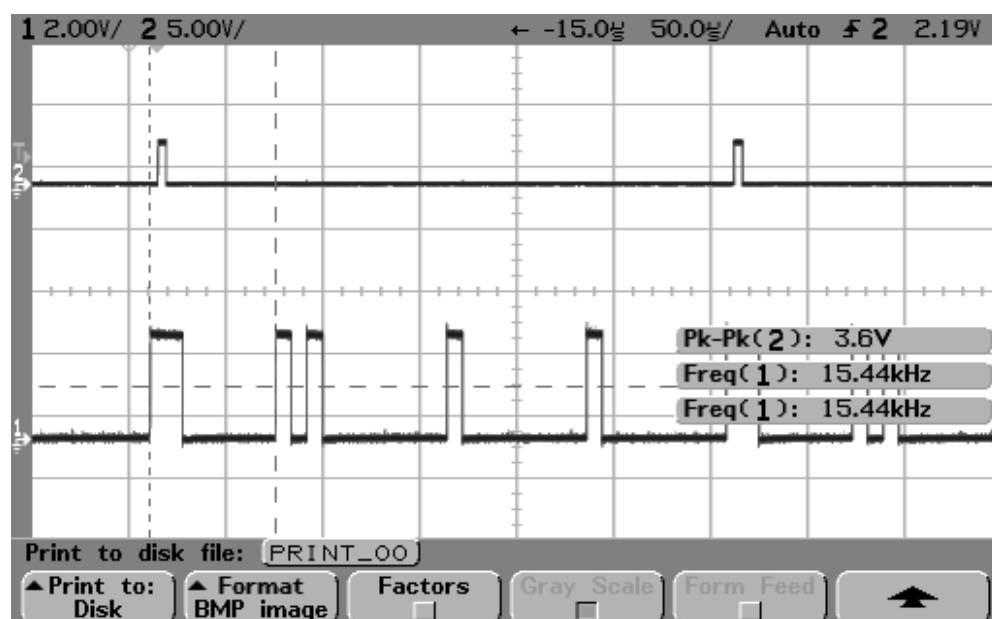
Obr.3.14 Ukázka z osciloskopu, porovnání signálů z pulzního výstupu a z generátoru, kde pulzní výstup je nahoře

Dále jsme testovali signály Chip select (CS) a sériový hodinový signál (SCLK) na obr.3.15. Jak je vidět na obrázku, pokud je CS v log. 0 je signál SCLK aktivní, v tomto případě je první byte určen jako příkazový a další tři jsou pro čtení dat z registru AENERGY.

Na obr. 3.16 je ukázka porovnání signálů CS a výstup z ADE7753 (DOUT), kde se signál výstupu DOUT měnil, to je způsobeno akumulací energie do vnitřního registru.

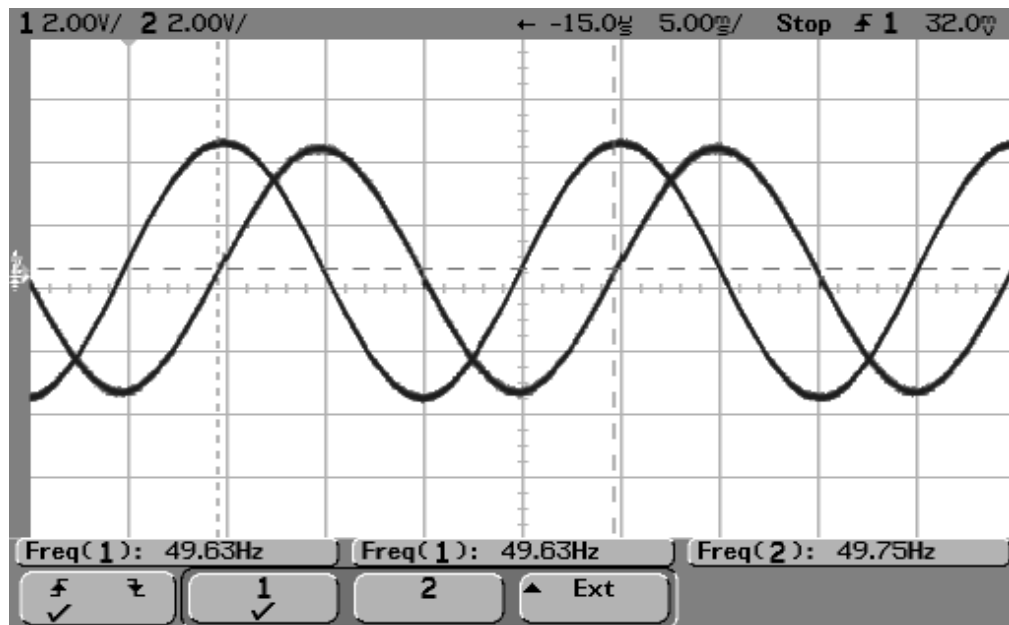


Obr.3.15 Ukázka z osciloskopu porovnání signálů CS a SCLK, kde CS je nahoře



Obr.3.16 Ukázka z osciloskopu, porovnání signálů CS a DOUT, kde CS je nahoře

Nakonec jsme testovali generátor s možností fázového posunu signálů kanálů, který by byl vhodný pro další testování měřicího systému. Na obr.3.17 jsou vidět signály z obou kanálů generátoru vzájemně fázově posunuté. Pomocí tohoto generátoru jsme ověřily, že pokud signály fázově posuneme bude se měnit činný výkon, a to tak že při nulovém posunu byl činný výkon maximální (jalový je teoreticky nulový) a při fázovém posunu 90° byl činný výkon nulový (jalový je teoreticky maximální).



Obr.3.17 Ukázka z osciloskopu, porovnání signálů generátoru se dvěma kanály a možnosti měnit fázový posuv mezi nimi

3.4 Kalibrace měřicího systému

Kalibrace činné energie (výkonu):

Pro kalibraci činné energie bude zapotřebí přesného wattmetru nejlépe se jmenovitou hodnotou účinníku $\cos\varphi=1$. Wattmetr bude zapojen k měřenému spotřebiči (zátěži).

$$W_h = A_{ENERGY} * W_h/LSB \text{ [Wh]} \quad (3.1)$$

$$W_h/LSB = (W * Accumulation \ time) / (LA_{ENERGY} * 3600) \quad (3.2)$$

$$Accumulation \ time = (LINE_{CYC} * Line \ period)/2 \text{ [s]} \quad (3.3)$$

$$Line \ period = PERIOD * (8/CLKIN) \text{ [s]} \quad (3.4)$$

W_h – činná energie (active energy)

W_h/LSB – kalibrační konstanta

A_{ENERGY} , LA_{ENERGY} , $LINE_{CYC}$, $PERIOD$ – hodnoty v daných registrech

Accumulation time – akumulční doba

Line period - perioda

CLKIN =3,79545MHz - vstupní hodiny

Kde měřená činná energie vychází ze vztahu (3.1), který využívá kalibrační konstanty určenou ve vztahu (3.2), ve kterém za W dosadíme hodnotu odečtenou z wattmetru. Akumulační dobu vyjadřuje vztah (3.3) a Line period je dán rovnicí (3.4). Činný výkon je pak dán podílem $P=Wh/3600$ [W].

Kalibrace zdánlivé energie (výkonu):

Pro kalibraci zdánlivé energie bude zapotřebí přesného voltmetru a ampérmetru, které se připojí k měřenému spotřebiči (zátěži).

$$VAh = VAENERGY * VAh/LSB [VAh] \quad (3.5)$$

$$VAh/LSB = (VA * Accumulation time) / (LVAENERGY * 3600) \quad (3.6)$$

VAh – zdánlivá energie (apparent energy)

VAh/LSB – kalibrační konstanta

VAENERGY, LVAENERGY – hodnoty v daných registrech

Kde měřenou zdánlivou energii vyjadřuje vztah (3.5), který využívá kalibrační konstanty danou rovnicí (3.6), ve kterém za VA dosadíme součin hodnot odečtených z voltmetru a ampérmetru. Zdánlivý výkon je pak dán podílem $S=VAh/3600$ [VA].

Kalibrace jalové energie (výkonu):

Pro vyjádření jalové energie lze využít vztahu odvozeného z trojúhelníku výkonů vyjadřující rovnice (3.7).

$$VARh = VAh * \sin(\cos^{-1}(Wh/VAh)) \quad (3.7)$$

VARh – jalová energie (reactive energy)

Více podrobněji je kalibrace pak popsána v datasheetu [1].

Závěr

Na závěr bych zhodnotil výsledky dosažené v této práci, kde úkolem práce bylo realizovat měřič el. výkonu (energie) na bázi IO.

Pro splnění bylo potřeba seznámit se s teorií (kapitola 1) nezbytnou pro realizaci systému, kde jsem uvedl několik způsobů měření el. energie (výkonu) a dále pak detailněji popsal použitý princip měření el. energie (výkonu). Následně bylo v kapitole 2 popsán princip funkce IO určené k měření el. energie. Po seznámení se s těmito teoretickými poznatky bylo možné realizovat systém pro měření resp. měřič el. energie.

Realizace měřící části systému byla popsána v kapitole 3, kde popisují schéma zapojení, desku plošných spojů a oživení. Realizovány byly měřící desky jak pro 1f měření, tak pro 3f měření nicméně z důvodu časové tísně byla úspěšně testována pouze měřící deska pro 1f měření. Hned poté následuje popis principu komunikace mezi měřící deskou a deskou řídicí tzn. hlavně popis použitého rozhraní (SPI).

V další části práce je popsáno testování měřícího systému a ověření funkčnosti, kde jsou výsledky většinou zobrazeny pomocí obrázků s následným komentářem ze kterých plyne, že měřič el. energie byl funkční.

V poslední části práce jsou stručně popsána kalibrace vyvinutého měřiče. V našem případě jsme již bohužel nestihli kalibrovat měřič el. energie (výkonu), ale postupovalo by se podle již výše zmíněné kapitoly 3.4.





Použitá literatura

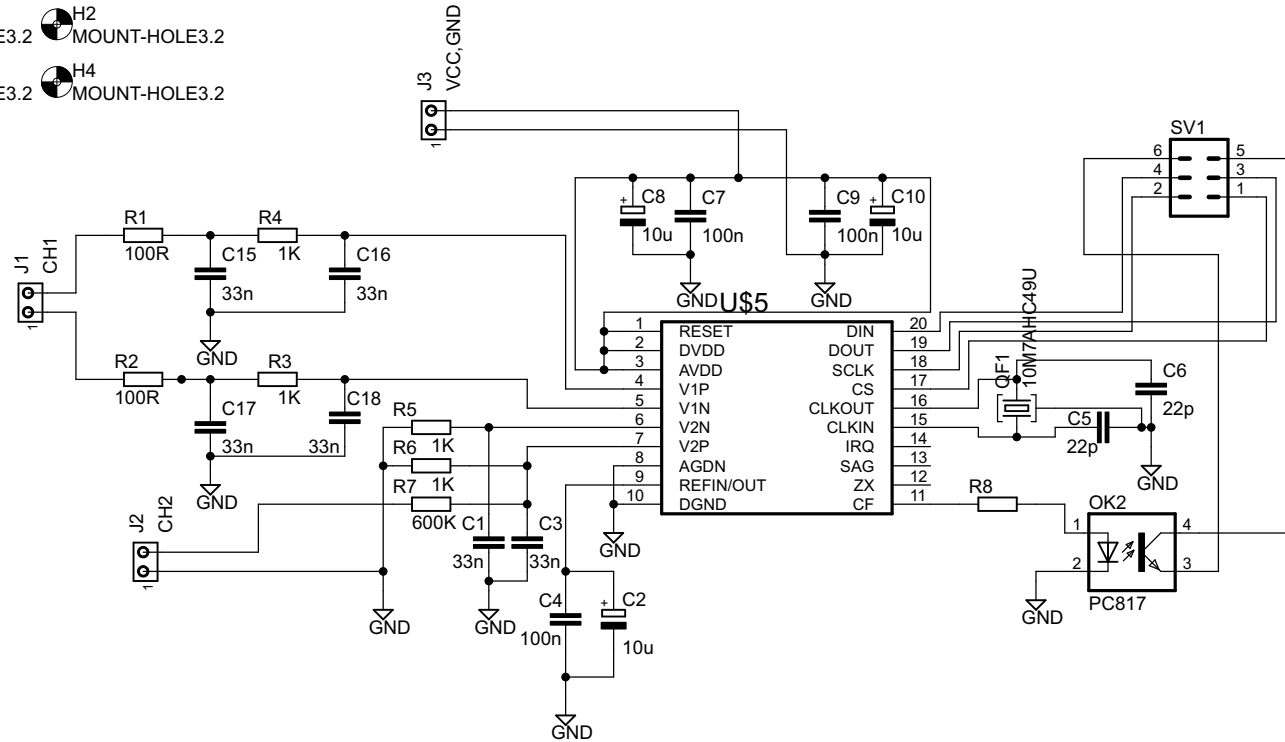
- [1] Datasheet ADE7753 - Single-Phase Multifunction Metering IC with di/dt Sensor Interface, Analog Devices, Inc. 2010
- [2] Datasheet ADE7758 – Poly Phase Multifunction Energy Metering IC with Per Phase Information, Analog Devices, Inc. 2011
- [3] V. Haasz; M. Sedláček.: Elektrická Měření. Přístroje a metody, Praha 2005
- [4] V. Fajt a kolektiv.: Elektrická měření, Praha 1987
- [5] http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/299295143ADE7753_calibration.pdf
- [6] <http://www.fit.vutbr.cz/study/DP/rpfile.php?id=9611>
- [7] http://cs.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface

Přílohy

Příloha A

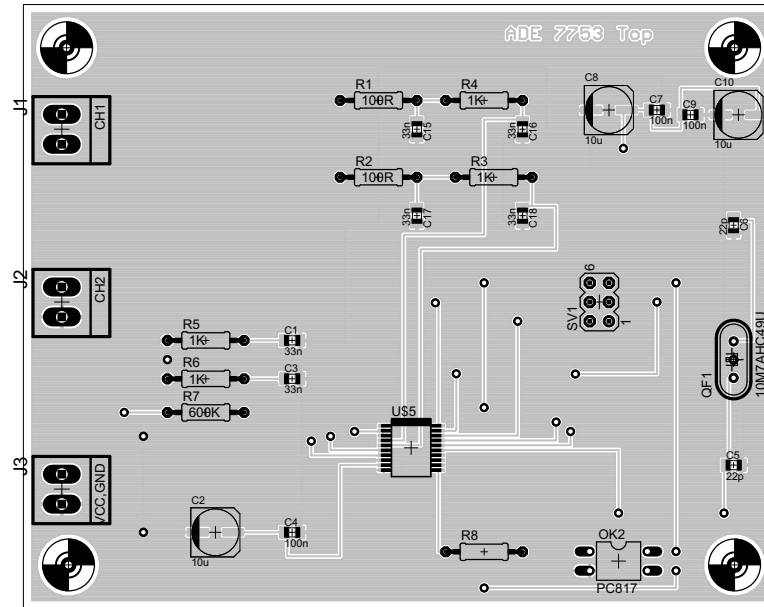
– Schéma zapojení s IO ADE7753, Deska plošných spojů, Seznam součástek

-  H1 MOUNT-HOLE3.2
-  H2 MOUNT-HOLE3.2
-  H3 MOUNT-HOLE3.2
-  H4 MOUNT-HOLE3.2



Jan Hucek	
ADE7753	
14.3.2012 12:00:19	
Sheet: 1/1	

ADE 7753 silk Top
ADE 7753 silk Bot



Partlist

Exported from ADE7753.brd at 14.3.2012 15:32:38

EAGLE Version 6.1.0 Copyright (c) 1988-2012 CadSoft

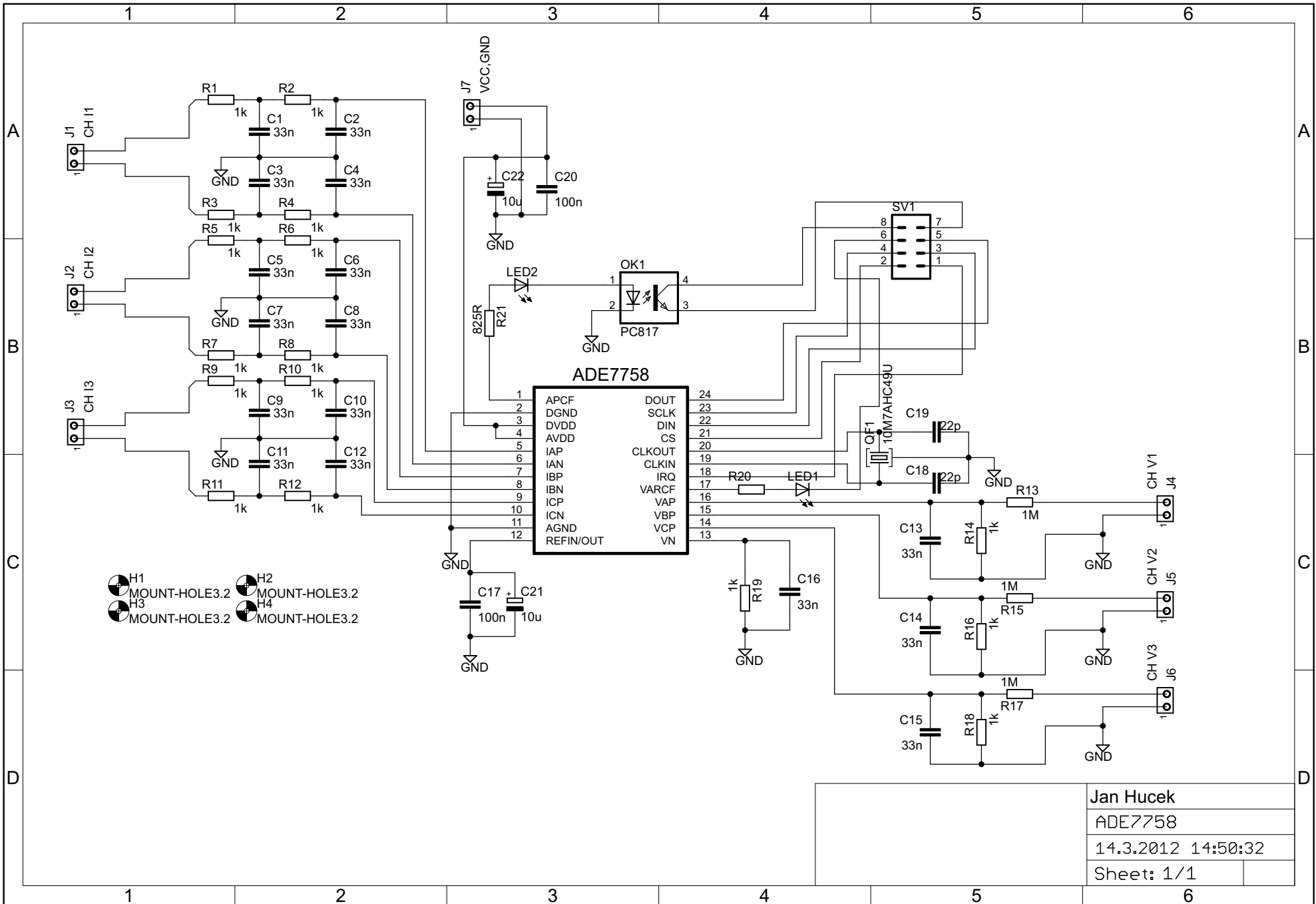
Assembly variant:

Part (mil)	Value Orientation	Package	Library	Position
C1 1400)	33n R0	C0805K	rcl	(1400
C2 R0	10u	UD-6, 3X5, 8_NICHICON	rcl	(1000 400)
C3 1200)	33n R0	C0805K	rcl	(1400
C4 R0	100n	C0805K	rcl	(1400 400)
C5 R0	22p	C0805K	rcl	(3700 750)
C6 2000)	22p R270	C0805K	rcl	(3700
C7 2600)	100n R0	C0805K	rcl	(3300
C8 2600)	10u R0	UD-6, 3X5, 8_NICHICON	rcl	(3050
C9 2575)	100n R0	C0805K	rcl	(3475
C10 2575)	10u R0	UD-6, 3X5, 8_NICHICON	rcl	(3725
C15 2500)	33n R270	C0805K	rcl	(2050
C16 2500)	33n R270	C0805K	rcl	(2600
C17 2050)	33n R270	C0805K	rcl	(2050
C18 2050)	33n R270	C0805K	rcl	(2600
J1 R270	CH1	1X2MTA	con-amp	(200 2500)
J2 R270	CH2	1X2MTA	con-amp	(200 1600)
J3 R270	VCC, GND	1X2MTA	con-amp	(200 625)
OK2 R270	PC817	DIL04	optocoupler	(3100 250)
QF1 1300)	10M7AHC49U R90	HC49U	crystal	(3700
R1 2650)	100R R0	0207/10	rcl	(1850
R2 2250)	100R R0	0207/10	rcl	(1850
R3 2250)	1K R0	0207/10	rcl	(2450
R4 2650)	1K R0	0207/10	rcl	(2400

R5	1K		0207/10	rcl	(950 1400)
R0					
R6	1K		0207/10	rcl	(950 1200)
R0					
R7	600K		0207/10	rcl	(950 1025)
R0					
R8			0207/10	rcl	(2400
298.4252)		R0			
SV1			MA03-2	con-1stb	(3000
1600)		R90			
U\$5			SSOP20	microchip-update-2	(2020 840)
R0					

Příloha B

– Schéma zapojení s IO ADE7758, Deska plošných spojů, Seznam součástek



Jan Hucek	
ADE7758	
14.3.2012 14:50:32	
Sheet: 1/1	

Partlist

Exported from ADE7758.brd at 14.3.2012 15:32:02

EAGLE Version 6.1.0 Copyright (c) 1988-2012 CadSoft

Assembly variant:

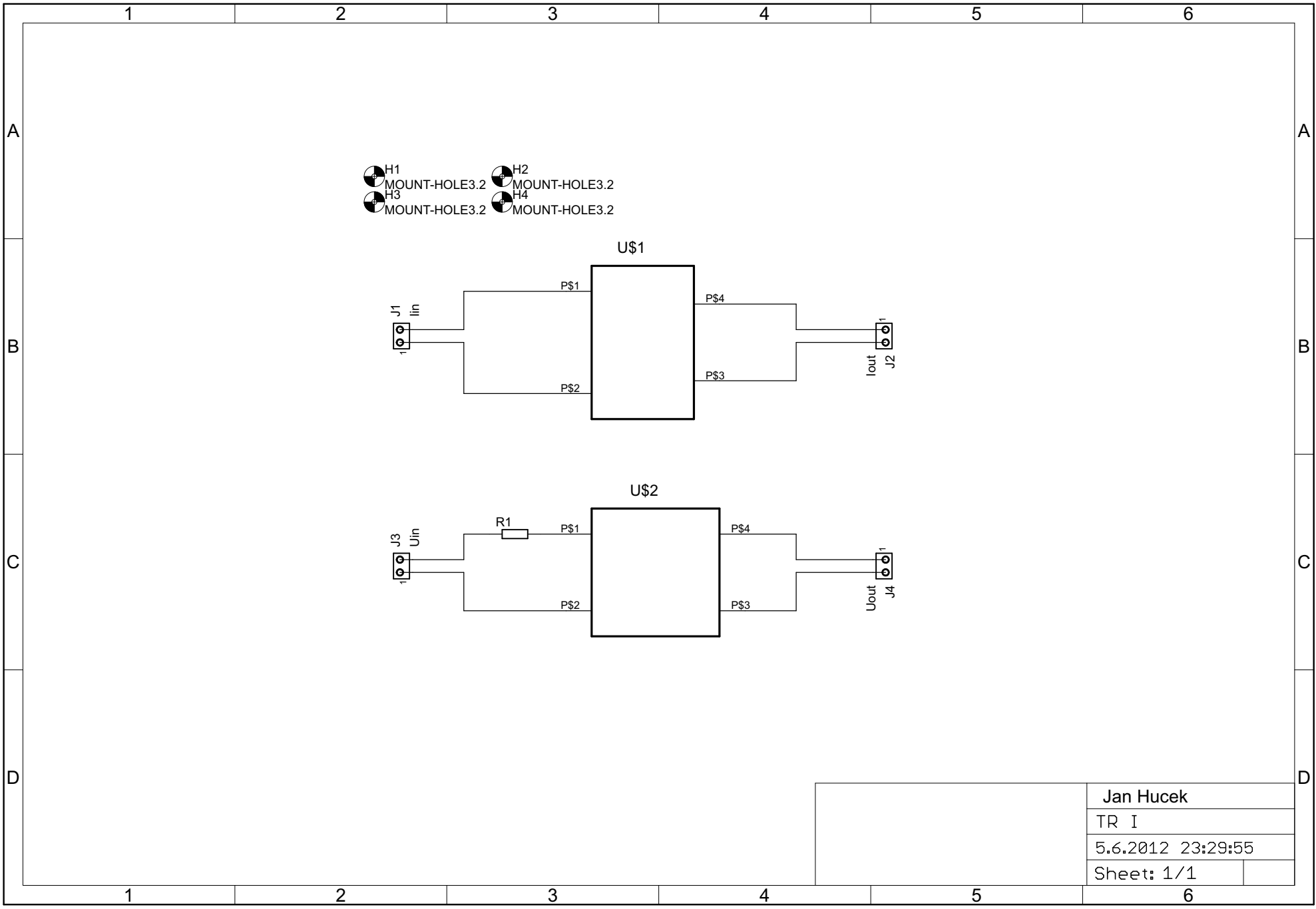
Part	Value	Package	Library	Position (mil)
ADE7758		SOIC-28	vs10xx	(2590 2125)
R0				
C1	33n	C0805K	rcl	(1339.29134 3395)
R270				
C2	33n	C0805K	rcl	(1734.29134 3390)
R270				
C3	33n	C0805K	rcl	(1344.29134 2980)
R90				
C4	33n	C0805K	rcl	(1744.29134 2980)
R90				
C5	33n	C0805K	rcl	(1349.29134 2290)
R270				
C6	33n	C0805K	rcl	(1749.29134 2290)
R270				
C7	33n	C0805K	rcl	(1339.29134 1885)
R90				
C8	33n	C0805K	rcl	(1749.29134 1885)
R90				
C9	33n	C0805K	rcl	(1339.29134 1170)
R270				
C10	33n	C0805K	rcl	(1739.29134 1175)
R270				
C11	33n	C0805K	rcl	(1339.29134 750)
R90				
C12	33n	C0805K	rcl	(1739.29134 750)
R90				
C13	33n	C0805K	rcl	(3414.29134 1775)
R270				
C14	33n	C0805K	rcl	(3414.29134 1215)
R270				
C15	33n	C0805K	rcl	(3414.29134 680)
R270				
C16	33n	C0805K	rcl	(3119.29134 680)
R270				
C17	100n	C0805K	rcl	(2554.29134 1145)
R90				
C18	22p	C0805K	rcl	(3884.29134 2460)
R0				
C19	22p	C0805K	rcl	(3884.29134 2640)
R0				
C20	100n	C0805K	rcl	(2544.29134 2965)
R180				
C21	10u	UD-6, 3X5, 8_NICHICON	rcl	(2254.29134 1160)
R270				
C22	10u	UD-6, 3X5, 8_NICHICON	rcl	(2494.29134 2755)
R0				

J1	CH I1	1X2MTA	con-amp	(271.29921
2852.00787)	R270			
J2	CH I2	1X2MTA	con-amp	(271.29921
2487.00787)	R270			
J3	CH I3	1X2MTA	con-amp	(271.29921
2120.31496)	R270			
J4	CH V1	1X2MTA	con-amp	(4614.29134
1706.06299)	R90			
J5	CH V2	1X2MTA	con-amp	(4614.29134 1340)
R90				
J6	CH V3	1X2MTA	con-amp	(4614.29134 980)
R90				
J7	VCC,GND	1X2MTA	con-amp	(2196.29921
4380.43307)	R180			
LED1		LED3MM	led	(4064.29134 2090)
R90				
LED2		LED3MM	led	(2069.29134 3725)
R0				
OK1	PC817	DIL04	optocoupler	(2644.29134 3670)
R270				
QF1	10M7AHC49U	HC49U	crystal	(3604.29134 2550)
R90				
R1	1k	0207/10	rcl	(989.29134 3610)
R0				
R2	1k	0207/10	rcl	(1539.29134 3610)
R0				
R3	1k	0207/10	rcl	(984.29134 3210)
R0				
R4	1k	0207/10	rcl	(1544.29134 3210)
R0				
R5	1k	0207/10	rcl	(979.29134 2470)
R0				
R6	1k	0207/10	rcl	(1549.29134 2470)
R0				
R7	1k	0207/10	rcl	(979.29134 2070)
R0				
R8	1k	0207/10	rcl	(1549.29134 2070)
R0				
R9	1k	0207/10	rcl	(984.29134 1340)
R0				
R10	1k	0207/10	rcl	(1539.29134 1340)
R0				
R11	1k	0207/10	rcl	(979.29134 940)
R0				
R12	1k	0207/10	rcl	(1539.29134 940)
R0				
R13	1M	0207/10	rcl	(4009.29134 1800)
R180				
R14	1k	0207/10	rcl	(3619.29134 1620)
R270				
R15	1M	0207/10	rcl	(4014.29134 1255)
R0				
R16	1k	0207/10	rcl	(3619.29134 1055)
R270				
R17	1M	0207/10	rcl	(4019.29134 720)
R0				
R18	1k	0207/10	rcl	(3624.29134 520)
R270				

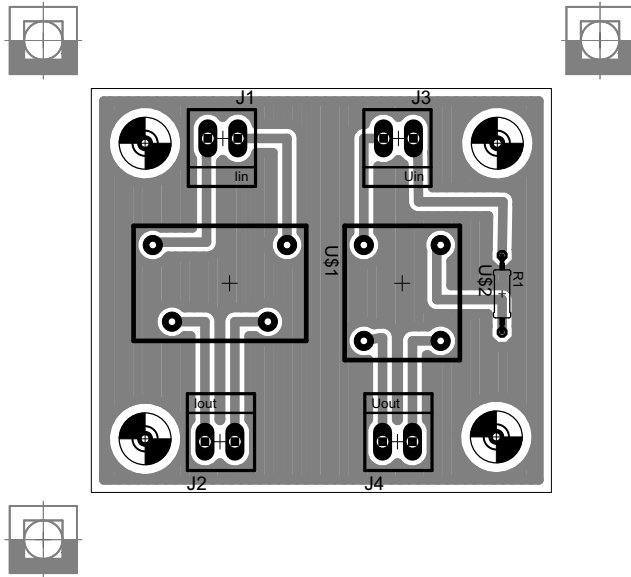
R19	1k	0207/10	rcl	(2904.29134 520)
R270				
R20		0207/10	rcl	(3504.29134 2040)
R180				
R21	825R	0207/10	rcl	(2019.29134 3135)
R270				
SV1		MA04-2	con-lstb	(3818.14961
3666.25984)	R90			

Příloha C

– Schéma zapojení měřících transformátorů pro 1f měření, Deska plošných spojů



Jan Hucek	
TR I	
5.6.2012 23:29:55	
Sheet: 1/1	

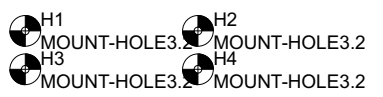


Příloha D

– Schéma zapojení měřících transformátorů pro 3f měření, Deska plošných spojů

1 2 3 4 5 6

A



A

B

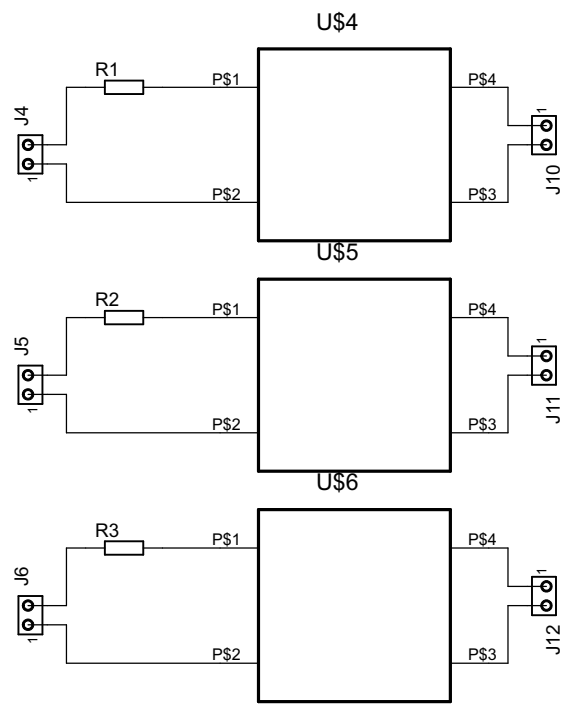
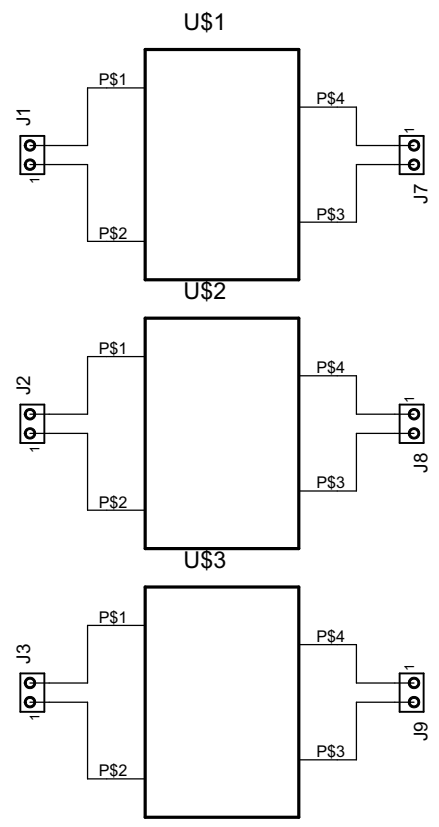
B

C

C

D

D



Jan Hucek	
TR II	
5.6.2012 23:40:06	
Sheet: 1/1	

1 2 3 4 5 6

