

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Konstrukce mikropočítačem řízeného elektronického wattmetru  
- realizace laboratorní úlohy  
Construction of a microcomputer controlled electronic power meter  
- the realization of laboratory task

2013

Jakub Tarábek

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jakub Tarábek**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601R004 Měřicí a řídicí technika

Téma: **Konstrukce mikropočítačem řízeného elektronického wattmetru - realizace laboratorní úlohy**  
**Construction of a Microcomputer Controlled Electronic Power Meter - the Realization of Laboratory Task**

Zásady pro vypracování.

Cílem bakalářské práce je vytvoření sylabu s popisem architektury mikropočítače řady MSP430 firmy Texas Instruments pro podporu výuky v laboratoři, tvorba měřicí aplikace a její vyzkoušení při praktickém měření v laboratoři.

Zásady pro vypracování.

- 1 Architektura MCU-430F5438A, vypracování popisu architektury MCU ve formě jednoduchého sylabu pro použití ve výuce.
2. Tvorba mikropočítačové aplikace pro měření elektrického výkonu pomocí převodníků výkonu.
- 3 Kompletace měřicího systému a jeho odzkoušení při praktickém měření v laboratorní úloze.
4. Zhodnocení výsledků měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KOVAL, Ludvík. *Elektrický výkon a jeho měření*. Ostrava, 2012. Sylaby do předmětu Elektrická měření. 12 s.
- [2] MATOUŠEK, David a Bohumil BRTNIK. *Programování mikrokontrolérů s jádrem 8051 v jazyce C názorné příklady a funkční programy pro AT89S52*. Praha. BEN - technická literatura, 2010 151 s. ISBN 978-80-7300-284-8.
- [3] TEXAS INSTRUMENTS. *MIXED SIGNAL MICROCONTROLLER, MSP430F543xA, MSP430F541xA*. [s.l.] Texas Instruments Incorporated, August 2010
- [4] TEXAS INSTRUMENTS. *MSP430x5xx and MSP430x6xx Family, User's Guide*. [s.l.]. Texas Instruments Incorporated, August 2012.
- [5] TEXAS INSTRUMENTS. *MCU-430F5438A-MVK MAVRK Module, Technical Reference Manual*. [s.l.] Texas Instruments Incorporated, October 2011 Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/slau379/slau379.pdf>.
- [6] Literatura dle doporučení vedoucího BP

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Ludvík Koval, Ph.D.**

Datum zadání. 16.11.2012

Datum odevzdání. 07.05.2013



---

doc. Ing. Jiří Koztorek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

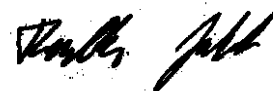


---

prof. RNDr Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Koval', written above a horizontal line.

Podpis

## **Poděkování**

Touto formou bych rád poděkoval vedoucímu předkládané práce docentovi Ludvíku Kovalovi za věnovaný čas, cenné rady a připomínky.

## **Abstrakt**

V této práci je popsána architektura mikropočítače řady MSP430 firmy Texas Instruments pro podporu výuky v laboratoři, tvorba měřicí aplikace a její vyzkoušení při praktickém měření. A tvorba měřicí aplikace pomocí architektury AVR.

## **Abstract**

This work describes the architecture of the MSP430 microcontroller series from Texas Instruments to support teaching in the laboratory, creating measurement and its application in the practical test measurements. A production test applications using the AVR architecture.

## **Klíčová slova**

Měření výkonu, mikrokontroler, kalibrace, AD převodník, činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, přesnost, převodník výkonu.

## **Keywords**

Power measurement, microcontroller, calibration, AD convertor, real power, reactive power, complex power, accuracy, power transducer.

## Obsah

Úvod.....	7
1. MSP430.....	7
1.1. Architektura MSP430.....	8
Vlastnosti .....	9
2. Měření výkonů střídavého proudu .....	10
2.1. Měření třífázového činného výkonu .....	11
2.2. Měření jalového výkonu .....	13
2.3. Měření výkonu v reálném čase .....	14
3. Měřicí systém pro tvorbu měřicí aplikace.....	16
3.1. Měření činného a jalového výkonu pomocí převodníků výkonu .....	16
3.2. Číselný výsledek měření .....	17
3.3. Přípravek pro měření a zobrazení výstupu převodníku.....	18
3.3.1. Mikropočítače Atmel AVR.....	18
3.3.2. Architektura mikropočítače Atmel AVR .....	18
3.3.3. Programování AVR.....	20
3.3.4. AD převodník mikrokontroleru ATmega8.....	20
3.3.5. Výpočet citlivosti a výstupní digitální hodnoty ADC .....	21
3.3.6. Napěťová reference TL431 .....	21
3.3.7. Napěťový sledovač.....	22
3.4. Měřicí obvod .....	22
3.5. Kód.....	24
3.6. Přesnost měřicího systému.....	25
4. Odzkoušení při praktické úloze.....	26
4.1. Seznam přístrojů pro kalibraci .....	26
4.2. Měření činného výkonu.....	26
4.3. Měření jalového výkonu .....	29
4.4. Přesnost kalibračního obvodu .....	31
Závěr .....	31
Literární prameny.....	32
Seznam příloh .....	32

## Úvod

Tato práce se věnuje měření výkonu a představení mikropočítače firmy Texas Instrument řady MSP430, konkrétně MSP430f5438a. Tyto texty obsahují hrubé vlastnosti a výhody tohoto mikropočítače. Více je popsáno v příloze Architektura MSP430. Příloha popisuje periferie a architekturu mikropočítače. Obsahuje také popis důležitých registrů a případné kódy.

Tento text dále popisuje způsoby měření výkonu, základní principy, a je zaměřen na měření výkonu střídavého proudu.

Dále jsou obsaženy funkce a popis převodníků výkonu pro převod jalového a činného výkonu na stejnosměrný proud. Měřicí systém měří proud jako úbytek napětí na přesném odporu. Součástí měřicího systému je modul, který převádí výstup převodníku a zobrazuje na displeji. Jádro tohoto modulu je mikrokontroler technologie AVR. Celý modul a jeho návrh je v této práci obsažen se stručným popisem prvků v něm obsažených plus kód implementovaný do AVR.

Následuje odzkoušení měřicího systému při praktickém měření, kdy bylo provedeno první testovací měření, kalibrace a druhé ověřovací měření zvlášť pro činný a zvlášť pro jalový výkon.

Závěr obsahuje zhodnocení měření a určení přesnosti měřicího systému.

## 1. MSP430

MCU MSP430 z firmy Texas Instruments jsou 16-bitové RISC procesory navrženy pro velmi nízkou spotřebu energie. Nízkou spotřebu zaručuje flexibilní hodinový systém, několik low-powered módů (LPM), impulzní probuzení z LPM a paměť FRAM.

**Flexibilní hodinový systém** má schopnost přepínat mezi několika takty a oscilátory, takže vstupuje do několika LPM.

**Hlavní hodiny (MCLK)** je hlavním zdrojem CPU, který může být digitálně řízen oscilátorem DCO (až 25MHz) nebo vnějším krystalem.

**Pomocné hodiny (ACLK)** jsou zdrojem pro periferie, řízené nízkospotřebným oscilátorem, nebo vnějším krystalem.

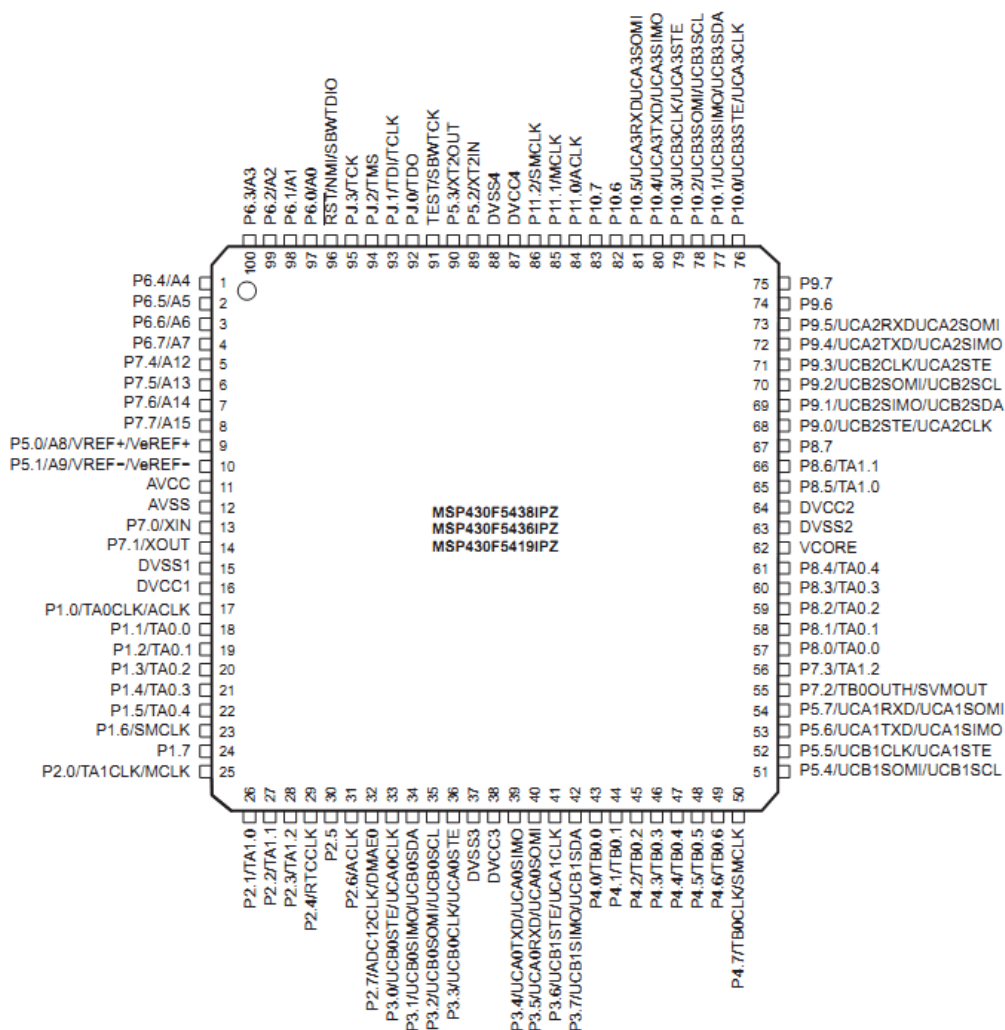
Periferie, které vyžadují rychlejší takty, používají hodiny **SMCLK**, které mohou být řízeny pomocí DCO (Digitally Controlled Oscillator) nebo externím krystalem.

**Impulzní probuzení z LPM** – MSP430 se může probudit z LPM okamžitě. Tato funkce je povolena jen u digitálního řízení taktu DCO do 25MHz a zůstat aktivní 1 $\mu$ s. Mikrokontroler je tedy naplno využit jen v těchto dávkách a dovolí mu déle setrvávat v LPM.





## Mikrokontroler MSP430f5438a



Obrázek 3 MCU MSP430 (2)

## Vlastnosti

- Napájecí napětí 2,2-3,6V
- Tři režimy nastavení spotřeby
  - Aktivní režim (AM)
  - Pohotovostní režim (LPM3)
  - Offrežim (LPM4)
- 12-ti bitový AD převodník
- 12-ti bitový DA převodník
- Komunikace UART, USART
- Integrované časovače
- USCI
- Flexibilní nastavení spotřeby

Více v „Architektura MSP430“

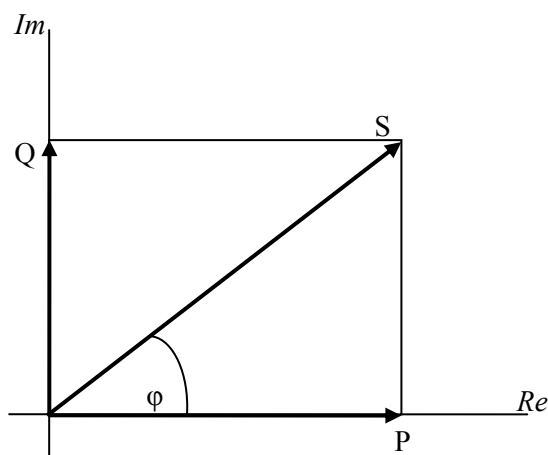
## 2. Měření výkonů střídavého proudu

Měření jakéhokoliv výkonu se dá zjistit součinem proudu a napětí v čase  $t$ .

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

Jelikož jsou signály v čase proměnné, je definován zdánlivý, jalový a činný výkon.

$$\hat{S} = \hat{P} + \hat{Q}$$



Obrázek 4 Zdánlivý (komplexní) výkon

### Činný jednofázový výkon

Výkon závisí na fázovém posunu  $\varphi$ , čím větší je fázový posun, tím menší je činný výkon střídavého proudu. Činný výkon odpovídá jen té části, která přeměňuje elektrickou energii na práci nebo teplo.  $\cos \varphi$  je účinník, udává míru přenosu energie ze zdroje střídavého proudu ke spotřebiči.

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, [P] = W$$

Činný výkon je střední hodnota okamžitého výkonu.

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

### Jalový jednofázový výkon

Jalový výkon je veličina, která se vyskytuje pouze u střídavého proudu. Jalový výkon způsobuje vytváření a zánik magnetického a elektrického pole. K měření jalového výkonu se používají také wattmetry, avšak v jiném zapojení než pro měření výkonu činného. Wattmetr musí být zapojený tak, aby byla otočena fáze o  $90^\circ$ .

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi, [Q] = \text{var}$$

### Zdánlivý jednofázový výkon

Zdánlivý výkon se skládá z jalového a činného výkonu (Obrázek 4). Měření zdánlivého výkonu lze provést jako měření proudu a napětí u obvodů stejnosměrného proudu.

$$S = U \cdot I, [S] = \text{VA}$$

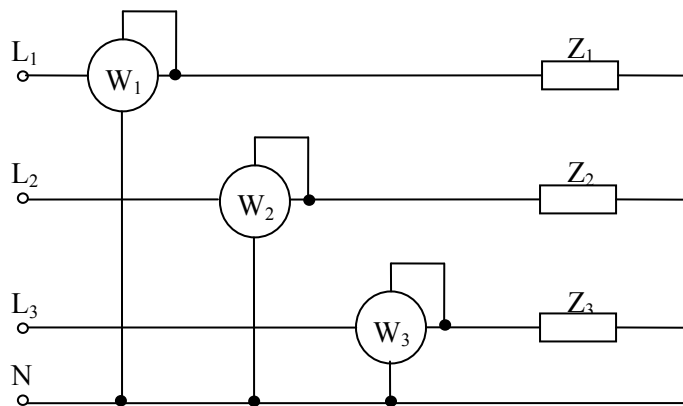
## 2.1. Měření třífázového činného výkonu

Činný výkon v třífázové soustavě je dán součtem výkonů v jednotlivých fázích.

Blondelův teorém říká, že n-vodičovou soustavu je potřeba (n-1) wattmetrů.

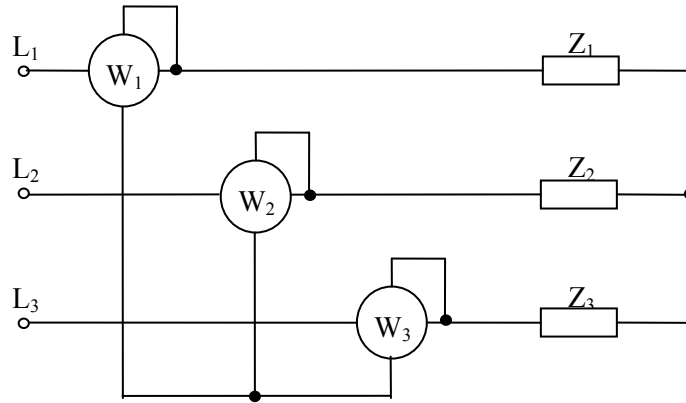
V n-vodičové soustavě nemůžeme správně změřit činný výkon zátěže nejméně (n-1) wattmetry. Měření je správné při obecné soustavě napětí i nesymetrické zátěži a i při nesinusovém průběhu proudu. Je zatíženo chybou metody způsobenou vlastní spotřebou měřicích systémů a chybou danou přesností přístrojů. (3)

### Obecná soustava napětí, obecná zátěž, čtyřvodičová síť



Obrázek 5 Měření činného výkonu čtyřvodičové sítě

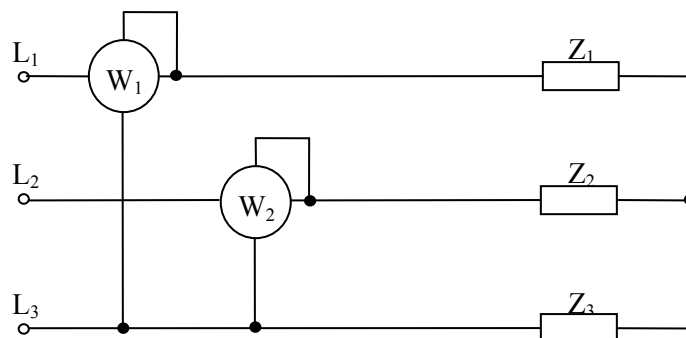
Napěťové cívky wattmetrů musí být zapojeny na fázové napětí. Dle Blondelova teorému musí být použito nejméně tři wattmetrů. Údaj každého wattmetru je roven výkonu v dané fázi a součet údajů dává celkový třífázový výkon. (3)

**Obecná soustava napětí, obecná zátěž, třívodičová síť**

Obrázek 6 Měření činného výkonu třívodičové sítě

Napěťové cívky wattmetrů musí být zapojeny na fázové napětí. To není k dispozici. Pokud chceme použít tři wattmetry, musí se vytvořit tzv. umělá nula. Tu tvoří spojené konce napěťových cívek tří wattmetrů. Pokud vnitřní odpory wattmetrů nejsou shodné, pak údaje wattmetrů neodpovídají výkonům v jednotlivých fázích, ale součet údajů dává celkový třífázový výkon. (3)

Podle Blondelova teorému stačí pro měření dva wattmetry. Tomuto zapojení se říká Aronovo a lze jej použít pro souměrnou i nesouměrnou (obecnou) soustavu napětí, souměrnou i nesouměrnou (obecnou) zátěž, vždy však třívodičovou síť. (3)

**Souměrná soustava napětí, souměrná zátěž, třívodičová síť**

Obrázek 7 Aronovo zapojení pro měření činného výkonu

Pro souměrnost napájení i zátěže jsou výkony ve všech fázích stejné. Stačil by tedy jeden wattmetr. Kvůli vytvoření umělé nuly však potřebujeme ještě dva odpory o velikosti rovné

odporu napěťové cívky použitého wattmetru. Údaj wattmetru se vynásobí třemi. Běžnější je použití Aronova zapojení. (3)

Aronovo zapojení

$$P = P_{w1} + P_{w2} + P_{w3} = \frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt$$

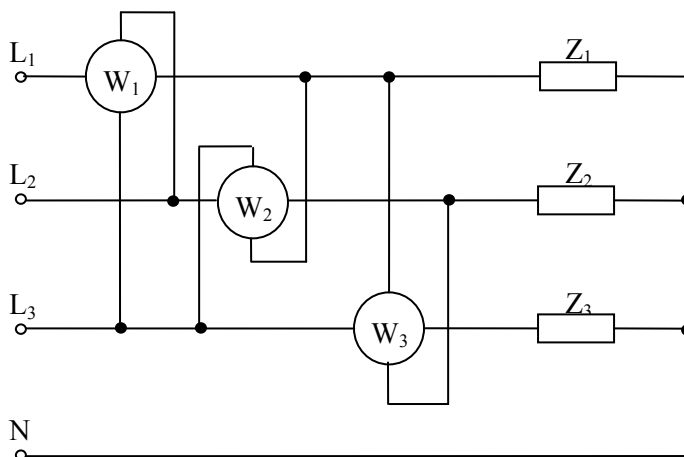
Platí  $i_1 + i_2 + i_3 = 0 \Rightarrow i_3 = -(i_1 + i_2)$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 - u_3 (i_1 + i_2)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [(u_1 - u_3) i_1 + (u_2 - u_3) i_2] dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T (u_{13} i_1 + u_{23} i_2) dt = P_{w1} + P_{w2} \end{aligned}$$

Zde bylo dokázáno, že třífázový výkon jde měřit i dvěma wattmetry. Pro souměrný zdroj a zátěž lze Aronovo zapojení použít pro měření jalového výkonu.

## 2.2. Měření jalového výkonu

Obvyklé zapojení pro měření jalového výkonu v třífázové síti vychází z úvahy uvedené pro jednofázové měření. V případě souměrného zdroje a obecné zátěže se použijí tři wattmetry. Údaje wattmetrů podělené  $\sqrt{3}$  odpovídají výkonům v jednotlivých fázích a součet údajů podělený  $\sqrt{3}$  dává celkový třífázový výkon. (3)

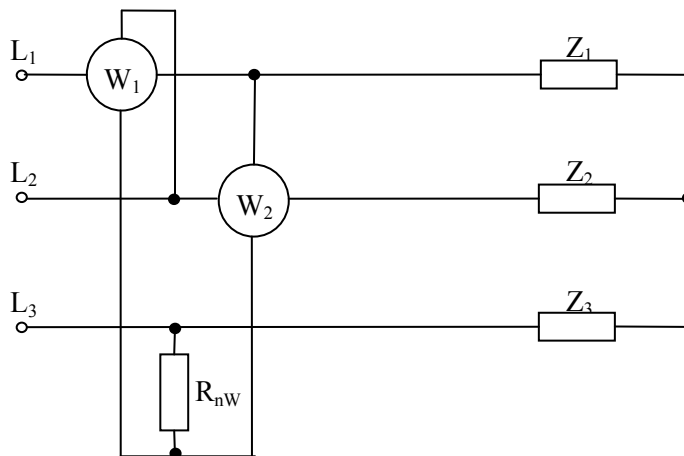


Obrázek 8 Měření jalového výkonu čtyřvodičové sítě

V případě obecného zdroje a obecné zátěže je třeba pro natočení napětí o  $90^\circ$  použít blok posuvu o všechny wattmetry. V případě souměrného zdroje a souměrné zátěže lze použít Aronova zapojení i pro měření jalového výkonu. (3)

Ve všech měřeních je potřeba znát sled fází a správně zapojit vstupní a výstupní svorky proudových a napěťových vstupů. Celková chyba změření jalového výkonu je dána součtem

absolutních chyb jednotlivých přístrojů. Při měření jalového výkonu podle obrázku číslo 8 se tento součet dělí  $\sqrt{3}$ , u Aronova zapojení se násobí  $\sqrt{3}$ . Více systémové varmetry analogové nebo elektronické mají uvedenu jednu celkovou chybu. (3)



Obrázek 9 Aronovo zapojení pro měření jalového výkonu

Pro souměrný zdroj a nesouměrnou zátěž existuje modifikované Aronovo zapojení (někdy se označuje jako zapojení s umělým zapojením napět'ových cívek) pro měření jalového výkonu. Úprava vychází opět z úvahy, že napětí na cívce wattmetru je třeba posunout o  $90^\circ$  (v Aronově zapojení). Tzv. napět'ová cívka prvního wattmetru se musí přepojit ze sdruženého napětí  $u_{13}$  na fázové napětí  $u_2$ , napět'ová cívka druhého wattmetru se musí přepojit ze sdruženého napětí  $u_{23}$  na fázové napětí  $u_1$ . Protože není k dispozici nulový vodič, je třeba vytvořit umělou nulu vložení odporu o stejné velikosti, jako jsou odpory napět'ových cívek použitých wattmetrů ( $R_{nw}$ ). (3)

### 2.3. Měření výkonu v reálném čase

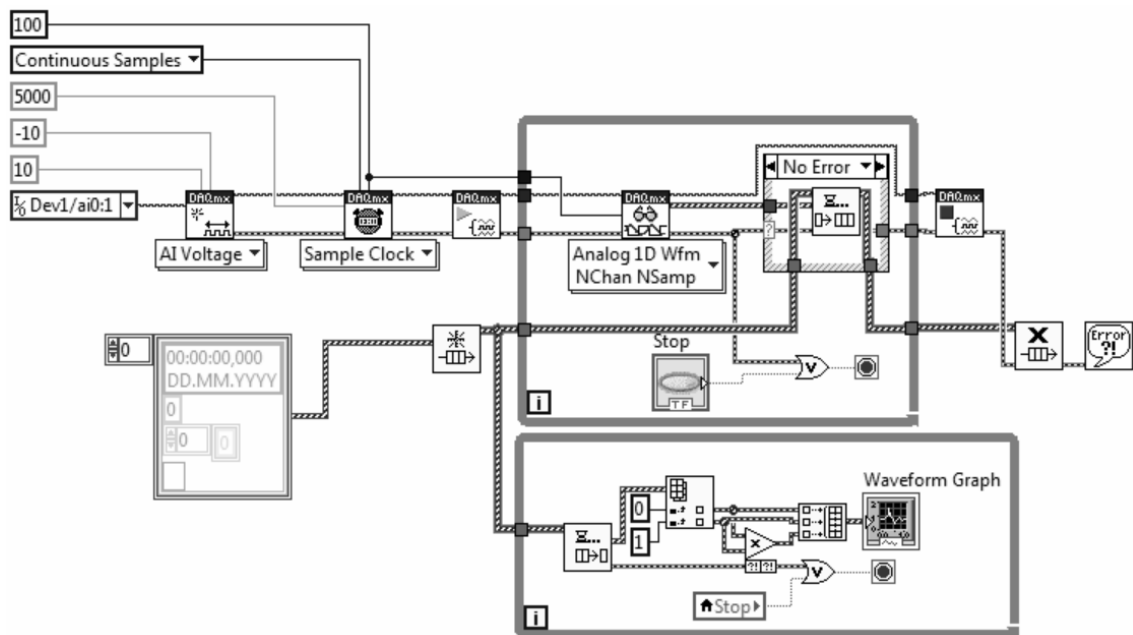
Pokud chceme opravdu přesně měřit výkon, vyplatí se použít měřicí karty. Karty National Instrument mají vzorkovací frekvenci stovky kS/s i více a 16-ti bitové rozlišení.

Levnější karty obsahují pouze jeden AD převodník (Analogově-číslicový převodník), který postupně čte úroveň napětí ze všech analogových vstupů. Uživatel musí mít na paměti, že pokud měří střídavý výkon, tak okamžitou hodnotu proudu a napětí nepřečte ve stejném čase. Prodleva mezi přepnutím mezi kanály bývá několik mikrosekund, takže vzniká malý fázový posun, který je při vysokých frekvencích znatelný. Tento problém se dá softwarově vyřešit. Karty, které měří simultánně, tento problém nemají, ale jsou dražší.

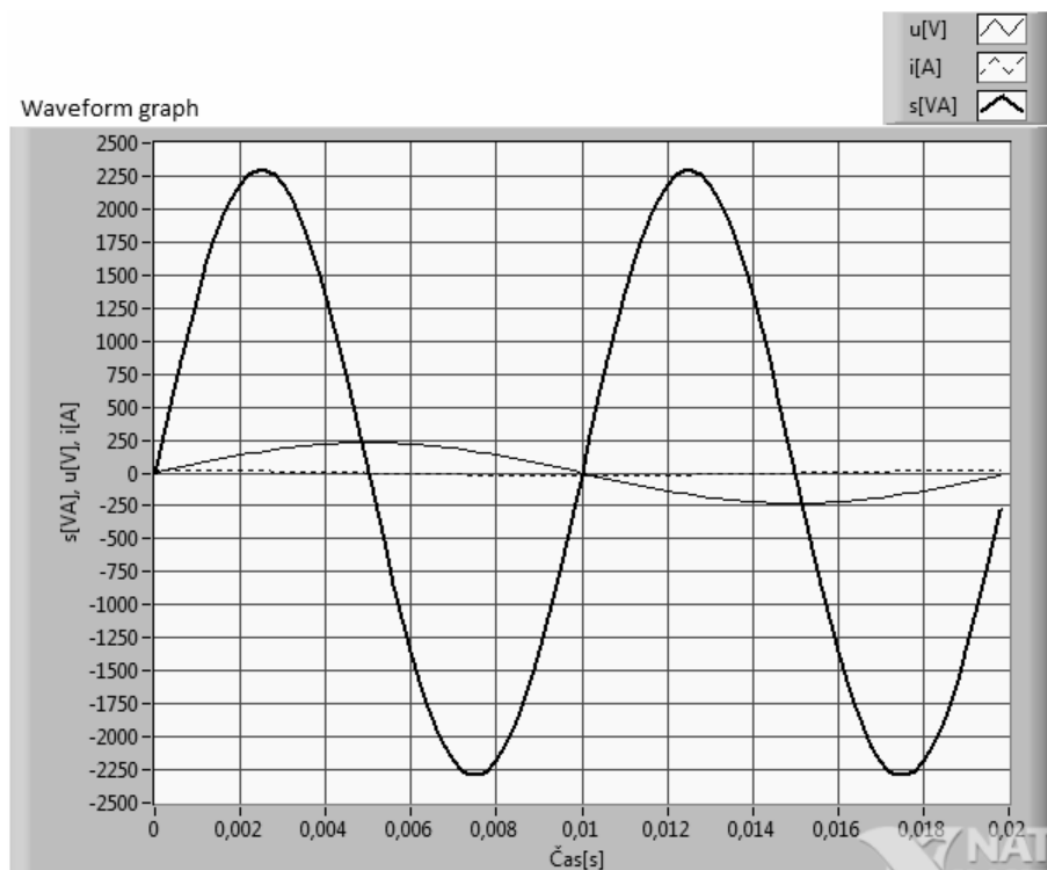
$$p(t) \neq u(t) \cdot i(t + k)$$

,kde  $k$  je perioda vzorkování.

Labview je software pro čtení a práci s daty. Je to grafické programovací prostředí.

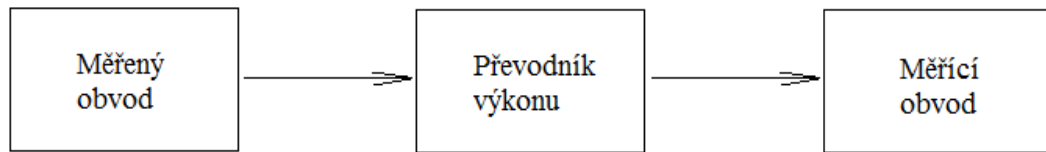


Obrázek 10 Programování Labview



Obrázek 11 Nasimulované signály v Labview

### 3. Měřicí systém pro tvorbu měřicí aplikace



Obrázek 12 Schéma měřicího obvod

V měřicím obvodě je obsažený mikrokontroler, který má AD převodník. Ale samotným mikrokontrolerem jdou měřit stejnosměrné veličiny. Z jednoho kanálu AD převodníku můžeme měřit stejnosměrné napětí a z druhého stejnosměrný proud. Pokud chceme měřit střídavý výkon, měl by se signál nejprve navzorkovat a z polí výsledků převodů vypočítat výkon. Tento způsob vyžaduje náročnější a dražší mikropočítačový systém, má problém se simultánním vzorkováním, výsledná přesnost porovnatelná s analogovou cestou. Výhodou je, že mnoho jiných parametrů není problém DSP (Digital Signal Processing) metodami dopočítat. Další způsob měření střídavého výkonu je pomocí převodníku výkonu. Ten umí převést určitý rozsah střídavého výkonu na analogový výstupní signál. Jednoduchý systém, který s kalibrací poskytuje dostatečnou přesnost plně srovnatelnou s vzorkovacím principem, nízká cena, snadné použití při praktickém měření.

Měřicí obvod byl řešen mikrokontrolérem ATmega8.

#### 3.1. Měření činného a jalového výkonu pomocí převodníků výkonu

Pro svou práci mám k dispozici převodník činného výkonu VUW WEIGEL a jalového výkonu VUB WEIGEL. Tyto převodníky převádí měřený střídavý výkon v rozsahu 0-3594W na stejnosměrný proud v rozsahu 0-20mA.

Vstupní parametry

- Jmenovité napětí 519V
- Jmenovitý proud 5A
- Provozní frekvence 48-62Hz

Proudový výstup

- Proudový výstup 0-20A

Popis funkce

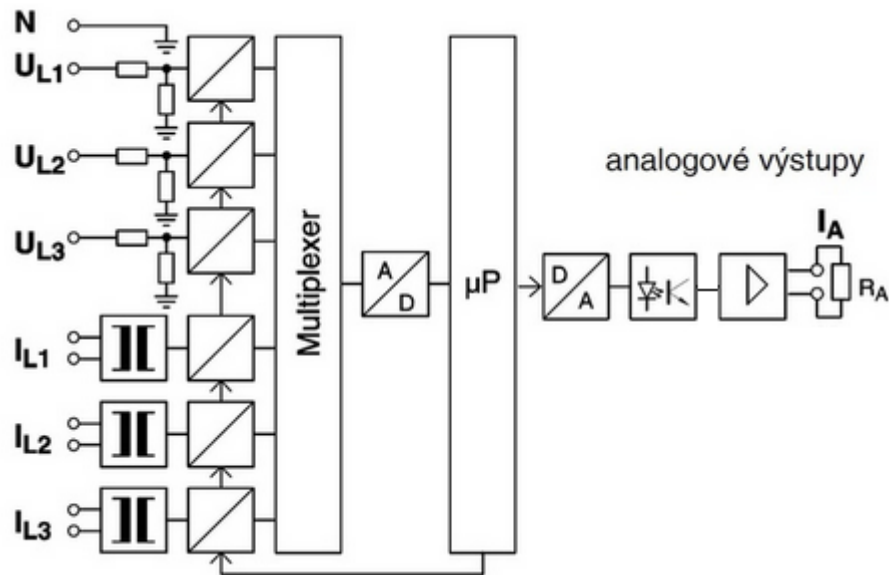
Měniče proudových obvodů a děliče napěťových větví snímají vstupní signály. Tyto signály jsou přivedeny přes multiplexer do AD převodníku, který je převádí na digitální. (4)

Použitý způsob třífázového měření proudu a napětí dává podle dané třídy přesnosti při všech provozních režimech vždy správné měřicí výsledky. Mikroprocesor zpracovává digitalizované signály v reálném čase. Podle druhu sítě je vypočítána výstupní hodnota výkonu a úměrně této



hodnotě je generován pulzně modulovaný obdélníkový signál. Galvanické oddělení se provádí optickým členem. (4)

Koncové zesilovače dávají k dispozici unifikovaný vnučený stejnosměrný proud a vnučené stejnosměrné napětí. (4)



Obrázek 13 Funkční schéma (4)

Přesnost při jmenovitých podmínkách je  $\pm 0,5\%$  z rozsahu. Třída  $tp = 0,5$ .

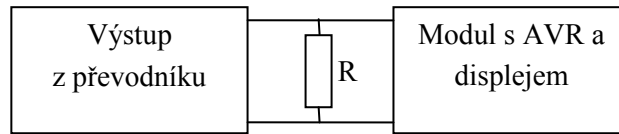
### 3.2. Číselný výsledek měření

Napětí měřené na mikrokontroleru se vypočte takto:

$$U = \frac{ADC \cdot U_{ref}}{2^n}$$

Kde ADC je bitový výsledek z převodu,  $U_{ref}$  je maximální napětí měřené v obvodě a  $n$  udává rozlišení AD převodníku (8-bitové, 10-bitové).

Převodník výkonu má na výstupu proudové výstupy, čili měřící obvod bude měřit napětí na bočníku. Odpor bočníku byl zvolen  $100\Omega$  s přesností  $0,1\%$ . Jeho zapojení je na obrázku 14. Převodník měří rozsah  $0-3594W$  (nebo varů u jalových vstupů) a převede tento výkon úměrně na proud v rozsahu  $0-20mA$ . Z toho vyplývá, že konstanta převodu je  $179,7W/mA$ .



Obrázek 14 Zapojení bočnicku do měřícího obvodu

Výkon bude vypadat takto:

$$P = \frac{ADC \cdot U_{ref} \cdot 179,7}{R \cdot 2^n \cdot 1000}$$

### 3.3. Přípravek pro měření a zobrazení výstupu převodníku

Původní koncepce byla s využitím mikropočítače MSP430F5438A. Naneštěstí kvůli technické nevhodě byla zvolena jiná architektura z finančních a časových důvodů. Zadání to neodporuje.

Jádrem modulu je mikrokontroler technologie AVR od firmy Atmel. Obsahuje 10-bitový AD převodník obsahující dostatečnou přesnost pro převodník výkonu. Pro zobrazování výsledků jsem zvolil 2x16 LCD displej od firmy Winstar. Dále podpůrné obvody jako jsou filtry, napěťová reference a bočník.

#### 3.3.1. Mikropočítače Atmel AVR

Jsou 8-bitové až 32-bitové mikrokontrolery. Oproti předešlému jádru 8051 nastalo několik změn. Mikropočítač Atmel AVR začal využívat architekturu RISC (Reduced Instruction Set Computing), což přineslo značné zvýšení výkonu. Taktéž oproti mikroprocesorům 8051 nastalo zvětšení šířky instrukčního slova na 16, 32 bitů. To umožnilo zrychlení načítání instrukcí, kde až na několik výjimek dochází k jejich načítání v průběhu jednoho strojového cyklu. Mikropočítač AVR je optimalizovaný pro programování v jazyku C.

#### 3.3.2. Architektura mikropočítače Atmel AVR

V tomto mikropočítači se nacházejí tři druhy pamětí:

- Paměť Flash – má šířku 16 bitů a využívá se na uložení programu, dá se smazat a opětovně zapsat, při tom výrobce garantuje až 10 000 cyklů přepisování. Dá se programovat sériově, což zjednodušilo nahrávání programu z PC do mikropočítače.
- Paměť RAM – má šířku 8 bitů, je rychlá a slouží na dočasné ukládání výsledků a dat. Po odpojení napětí se smaže.
- Paměť EEPROM – slouží na ukládání dat, které se uchovávají i po odpojení napájecího napětí.

Mikropočítače AVR taktéž nabízí bohatou výbavu co se periférií týká, jsou to například:

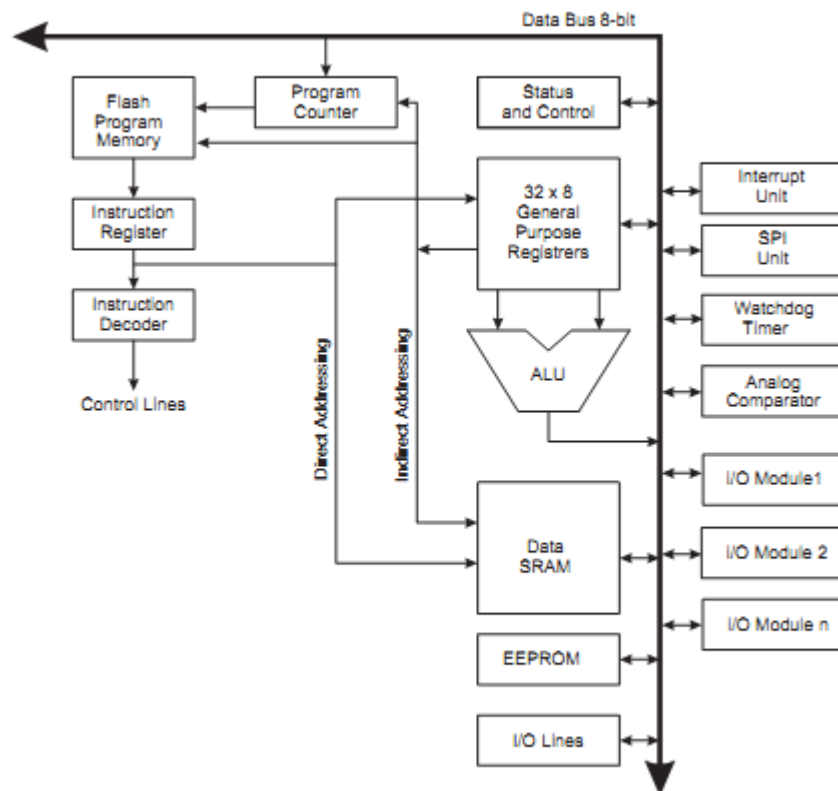
- Čítač/časovač s možností PWM modulace (Pulzně šířková Modulace)
- AD převodník

- SPI (Seriál Peripheral Interface), TWI (Two Wire Interface), USART (Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter)
- Watchdog

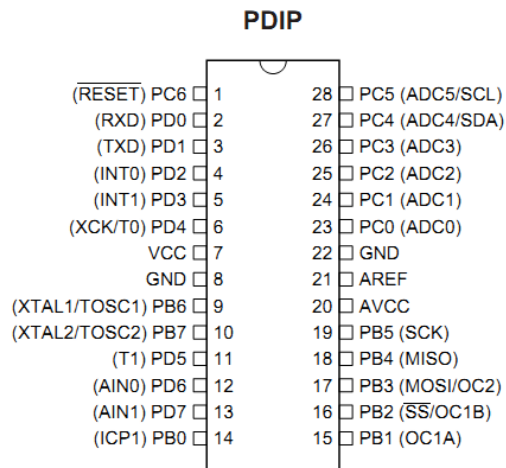
Mikro počítač podporuje taktěž více zdrojů hodinového signálu:

- externí krystal / rezonátor
- externí nízkofrekvenční krystal (32,768 kHz)
- externí RC oscilátor
- interní kalibrovaný RC oscilátor

Více v datasheetu (5).



Obrázek 15 Architektura ATmega8 (5)



Obrázek 16 ATmega 8 verze švábu (5)

### 3.3.3. Programování AVR

Pokud je k dispozici celý vývojový kit nebo originální programátor, vyplatí se program vyvíjet pomocí programu AVR Studio. Jiným řešením jsou programovací prostředí Eclipse s nadstavbou pro AVR nebo jiná IDE (vývojové prostředí) včetně AVR Burn. Pro implementaci programu byl použit programátor třetí strany a program jsem vytvářel v IDE Eclipse.

AVR Studio lze stáhnout na stránkách výrobce, je ovšem nutná registrace. Nicméně nabízí nejpohodlnější programování. Je velice přehledný a nabízí funkce pro obsluhu kódu, podporu knihoven a to nejen pro mikrokontrolery AVR ale i knihoven pro podporu displejů, senzorů a dalších periférií.

Ovladače neoriginálního programátoru nepodporuje AVR Studio, takže jsem program vyvíjel v IDE Eclipse s pluginem pro AVR a AVRdude, což je program, který podporuje můj programátor <http://www.fischl.de/usbaspl/>.

### 3.3.4. AD převodník mikrokontroleru ATmega8

#### Základní vlastnosti:

- 10-bitové rozlišení (8-bitové na ADC4 a ADC5)
- Čas převodu 65 – 260us
- 8 vstupních kanálů
- 0 až  $V_{cc}$  vstupní rozsah
- Volitelné 2,56V interního referenčního napětí
- Opakovací nebo jednorázový režim
- Přerušování po ukončení převodu
- Sleep režim, funkce potlačení šumu

### 3.3.5. Výpočet citlivosti a výstupní digitální hodnoty ADC

Citlivost AD převodníku LSB (Least Significant Bit) se vypočte jako podíl referenčního napětí  $V_{ref}$  a maximálního rozlišení.

$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^n}$$

Citlivost ATMegy8 pro maximální referenční napětí bude:

$$LSB = \frac{5}{2^{10}} = 4,88mV/bit$$

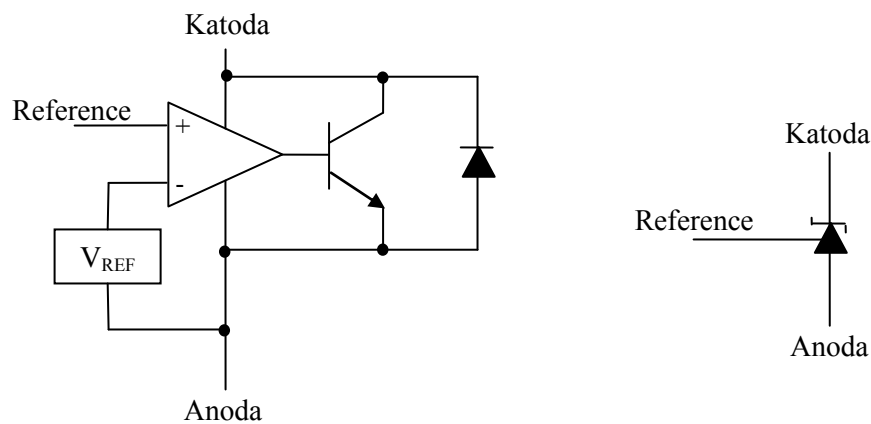
A pro nastavitelnou externí referenci:

$$LSB = \frac{2,5}{2^{10}} = 2,5mV/bit$$

Hodnota digitálního výsledku ADC je podíl referenčního a napájecího napětí vynásobený s rozsahem.

$$ADC = \frac{V_{cc}}{V_{ref}} 2^n$$

### 3.3.6. Napěťová reference TL431

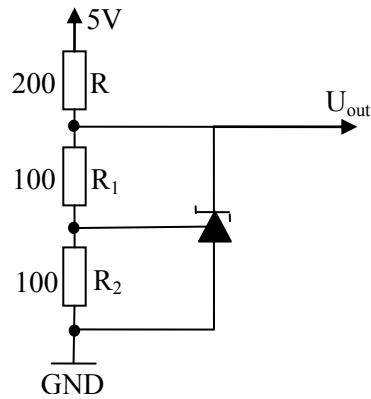


Obrázek 17 Funkční blok TL431

Principiálně se chová jako zpětnovazební regulátor s vnější napěťovou zpětnou vazbou a s vnitřní referencí 2,5V. Výstupní napětí této "řiditelné" zenerovy diody se nastaví dvěma rezistory v rozsahu 2,5V až 36V, celé základní zapojení pak potřebuje ještě sériový srážecí rezistor. Obvod je použit jako přesná reference pro zdroje napětí.

$$U_{out} = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) U_{ref}$$

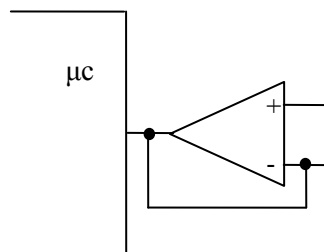
Protože budu měřit proud 0-20mA na bočníku 100Ω. Mikrokontroler bude tedy měřit napětí do 2 voltů. Proto jsem zvolil referenci napětí 2,5V kvůli tomu, že ten převodník nám trochu dovolí překročit maximální rozsahy.



Obrázek 18

### 3.3.7. Napět'ový sledovač

I s velkou předděličkou A/D převodníku hodnota jednoho kanálu ovlivňovala druhý kanál, proto byl přidán operační zesilovač, zapojený jako sledovač. Sledovač má malou výstupní impedanci a to pomáhá rychlejšímu ustalování napětí na kanálech.



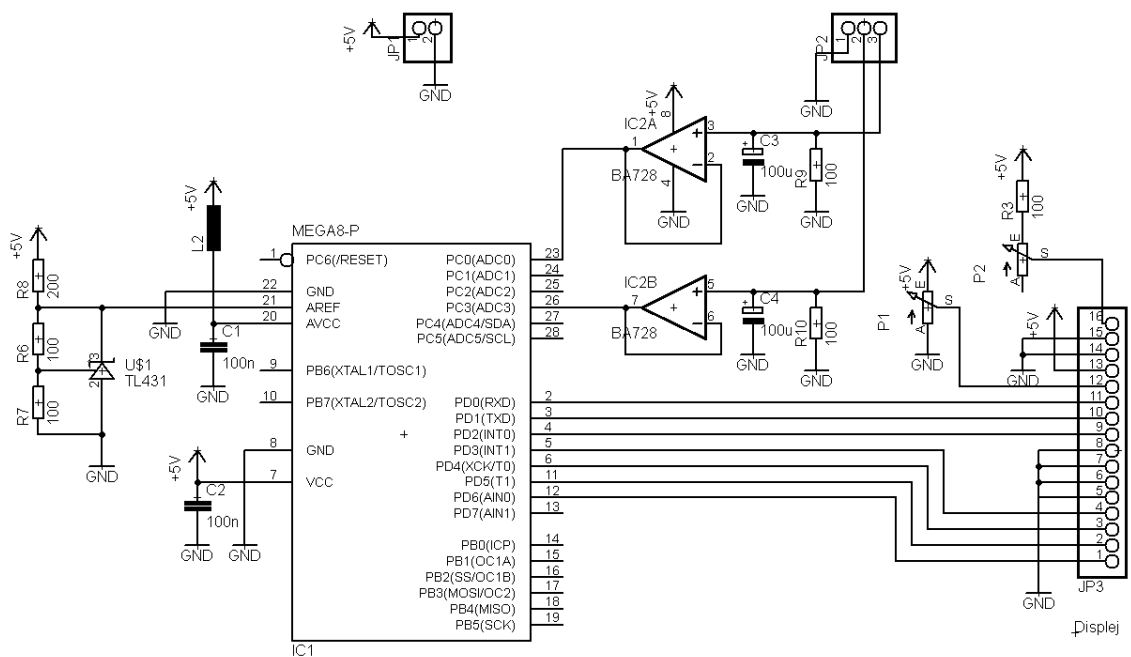
Obrázek 19

## 3.4. Měřicí obvod

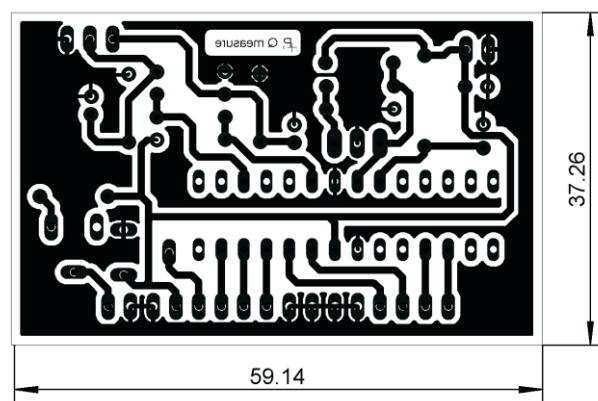
Obvod obsahuje mikrokontroler ATmega8, LCD displej 2x16 s řadičem a podpůrné součástky a patici s třemi piny. Na prvním pinu chci měřit napětí, které je úměrné činnému výkonu z převodníku výkonu, na druhém pinu jalový výkon.

R6, R7, R9, R10	100Ω, přesnost 0,1
R8	200Ω
C1, C2	100nF

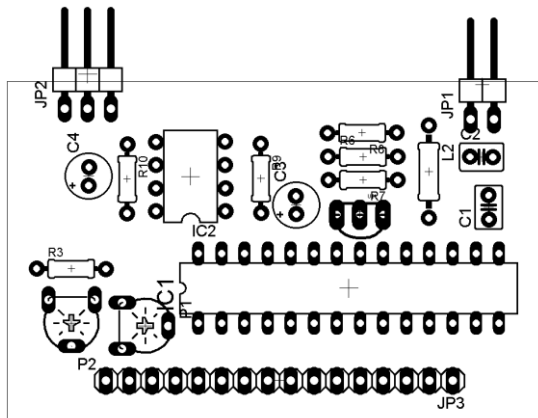
- C3, C4 100 $\mu$ F, 10V elektrolyt
- L2 10 $\mu$ H
- IC1 Atmega8
- IC2 OZ, 2 OZ v jednom pouzdru Rail-to-rail
- R3 100 $\Omega$
- R1,R2 potenciometry pro nastavení displeje



Obrázek 20 Zapojení ATmega8 pro měření výkonu



Obrázek 21 Návrh plošného spoje



Obrázek 22 Osazení desky

### 3.5. Kód

```

#include<avr/io.h>
#include<C:/Users/Kuba/workspace/PowerM/src/lcd.h>
#include<util/delay.h>
#include<avr/interrupt.h>
#include<stdlib.h>
#include<stdio.h>

uint16_t ReadADCFrom(uint8_t port) {
    ADCSRA &= ~(1<<ADSC);           zastavení převodu
    ADMUX &= 0xF0;                  ADMUX je registr na nastavení aktivního pinu a zarovnání
    ADMUX |= port;                  nastavení portu
    ADCSRA |= (1 <<ADSC);           spuštění převodu
    while (!(ADCSRA & (1<<ADIF)));   počkej na konec převodu
                                    ADIF je interrupt flag "1" = konec převodu
    return ADC;                     ADC je 16-bitový registr, kde se zapisuje výsledek převodu
}

int main(void) {
    uint16_t hodnota1, hodnota2;

    long P, Q;
    char text1[16];
    char text2[16];

    ADMUX |= (0<<REFS0) | (0<<REFS1);   nastavení externího referenčního napětí
    ADCSRA |= (1<<ADEN) | (1 <<ADIF) | (1<<ADPS2) | (1<<ADPS1) | (1<<ADPS0);
                                    ADEN je povolení činnosti ADC a ADPSX je nastavená frekvence
                                    Frekvence AD = frekvence jádra / ADPSx

    lcd_init(LCD_DISP_ON);
    while(1)
    {
        lcd_clrscr();

        hodnota1=ReadADCFrom(0);
        hodnota2=ReadADCFrom(3);
    }
}

```



```

P=(long) hodnota1*25*1797/10240);           před kalibrací
Q=(long) hodnota2*25*1797/10240);           před kalibrací

po kalibraci P=((long)hodnota1*25*1849/10240);
po kalibraci Q=((long)hodnota2*25*1838/10240);

sprintf(text1,"%ldW",P);
sprintf(text2,"%ldvar",Q);

lcd_gotoxy (0,0);
lcd_puts(text1);

lcd_gotoxy (0,1);
lcd_puts(text2);

_delay_ms(500);
}
}

```

### 3.6. Přesnost měřícího systému

Celková přesnost systému se skládá z přesnosti AD převodníku měřícího modulu, snímacího odporu a převodníku výkonu. Přesnost převodníku je dána třídou 0,5, což je  $\pm 0,5\%$  z rozsahu hodnoty. Přesnost snímacího odporu je 0,1%. Přesnost modulu závisí na rozlišení AD převodníku.

Jeden bit modulu odpovídá podílu maximálního rozsahu ku rozlišení AD převodníku mikropočítače.

$$LSB = \frac{U_{ref}}{2^{10}} = 2,4414mV/bit$$

Chyba AD převodníku je polovina LSB.

$$\Delta_{AD} = \pm 1,2207mV$$

Výsledná přesnost AD převodníku

$$\delta_{AD} = \frac{LSB}{U_{ref}} 100 = 0,01\%$$

Výsledná přesnost celého měřícího systému je

$$\delta = \delta_{AD} + \delta_R + \delta_P = 0,01 + 0,1 + 0,5 = 0,61\%$$

, kde  $\delta$  je přesnost celého modulu,

$\delta_R$  je přesnost odporu,

$\delta_{AD}$  je přesnost AD převodníku na mikropočítači,

$\delta_p$  je přesnost převodníku výkonu.

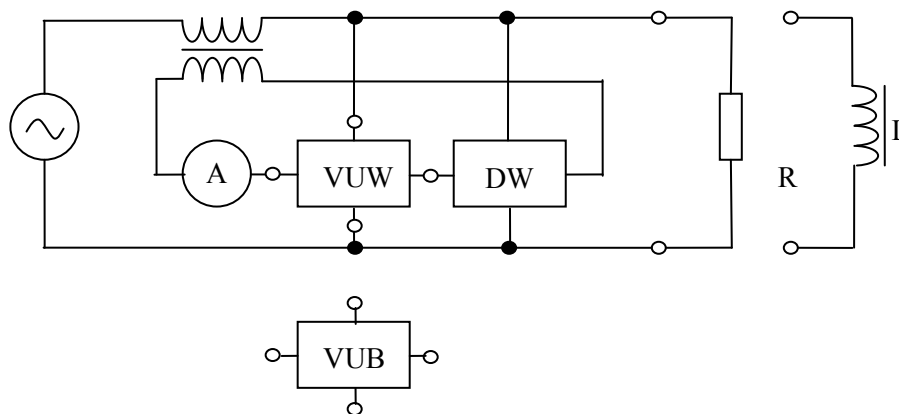
#### 4. Odzkoušení při praktické úloze

Funkčnost a přesnost jsem ověřil na regulovatelném třífázovém zdroji. Nejprve pro činný výkon s převodníkem výkonu VUW Weigel, potom jalový výkon s VUB.

Měřicí obvod obsahuje vytvořený měřicí systém, převodník výkonu s čtecím modulem, velmi přesný měřicí přístroj podle kterého se systém kalibruje, informativní měřidla proudu a napětí. Měřicí transformátor slouží k zmenšení rozsahu proudu.

Jako zátěž posloužil proměnný odpor a induktor.

Aby se změřil celý rozsah, tak se nastavovala hodnota výstupního proudu převodníku po jednom mA z maximálního rozsahu.



Obrázek 23 Schéma zapojení měření výkonu

##### 4.1. Seznam přístrojů pro kalibraci

Měřicí trafo proudu MPT TL20, Metra Blansko, 100, 50, 20, 10, 5, 2, 1, 0,5/ 5A,  $t_p = 0,05$   
 Digitální jednofázový měřič výkonů Yokogawa WT 210,  $t_{pU}=0,1, t_{pI}=0,1$ ,  $U_{max}=600$  V,  $I_{max}=20$ A  
 Proměnný odpor 200 $\Omega$ , 1.1 A  
 Multimetr Agilent AG 1253B  
 Multimetr Metrix MX53

##### 4.2. Měření činného výkonu

Činný výkon je měřen na jedné fázi. Kvůli nutnosti zapojení všech fází, tak na digitálním wattmetru Yokogawa je naměřen třetinový výkon, který se pak musí zpátky přenásobit třemi.

U[V]	I[A]	P/3[W]	P[W]	P <sub>d</sub> [W]	Δ[W]	δ[%]
238,50	5,08	1210,00	3630,00	3518	111,74	3,24
236,60	5,04	1196,00	3588,00	3474	114,16	3,31
232,30	4,96	1150,80	3452,40	3356	96,63	2,80
226,80	4,83	1097,00	3291,00	3193	97,72	2,83
220,40	4,70	1032,70	3098,10	3021	76,66	2,22
215,20	4,58	985,40	2956,20	2874	82,05	2,38
208,90	4,45	932,50	2797,50	2712	85,84	2,49
201,60	4,29	865,00	2595,00	2509	85,58	2,48
195,10	4,18	809,40	2428,20	2352	76,60	2,22
188,00	4,00	752,00	2256,00	2180	76,24	2,21
180,40	3,83	691,50	2074,50	2013	61,91	1,79
173,30	3,78	639,00	1917,00	1855	62,22	1,80
165,23	3,51	580,70	1742,10	1692	49,81	1,44
156,30	3,32	520,30	1560,90	1510	50,98	1,48
148,00	3,15	466,20	1398,60	1347	51,17	1,48
138,60	2,94	407,50	1222,50	1180	42,24	1,22
128,50	2,72	349,60	1048,80	1013	35,70	1,03
117,40	2,49	292,10	876,30	851	25,69	0,74
105,20	2,23	235,30	705,90	688	17,78	0,52
91,80	1,95	178,80	536,40	520	16,62	0,48
75,40	1,60	119,60	358,80	353	6,19	0,18
54,43	1,15	63,00	189,00	185	3,55	0,10

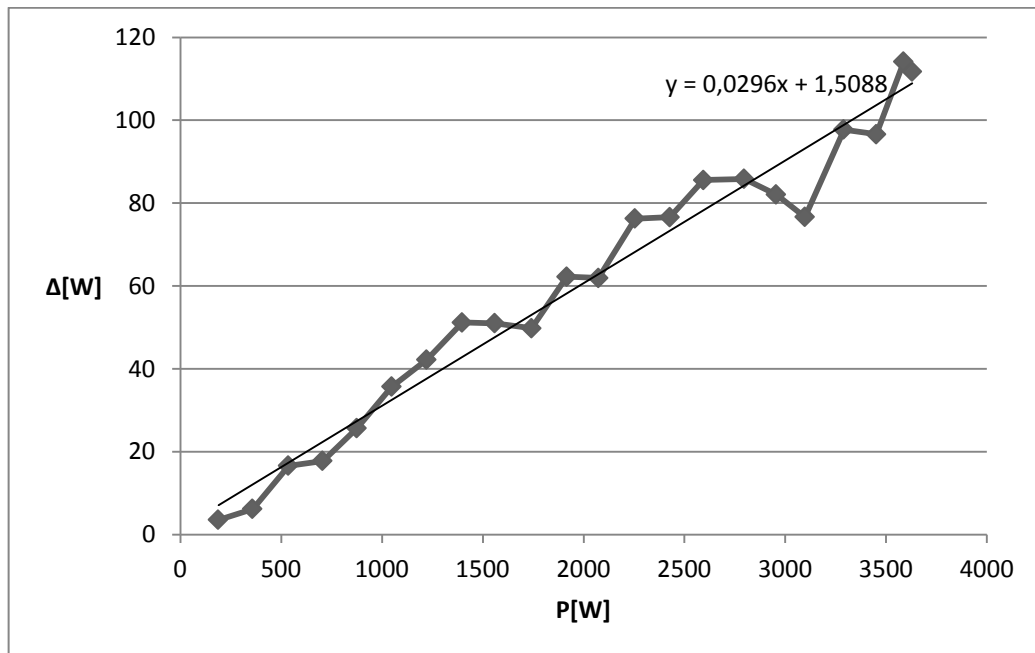
Tabulka 1 První měření činného výkonu

, kde P je přesný výkon naměřený na digitálním wattmetru Yokogawa a P<sub>d</sub> je výkon naměřený moulem.

$$\Delta = |P - P_d|$$

$$\delta = \frac{\Delta}{\text{rozsah}} 100$$

Tři procentní chyba je pro měřící obvod nedostačující. Proto se musí provést kalibrace. Kalibrace probíhá tak, že jsem si vykreslil graf zobrazení výkonu odměřeného na přesném digitálním wattmetru na x-ové ose a absolutní chybě na y-ové ose. Excel vykreslil lineární spojnicí trendu. Byla zvolena lineární, protože přesnější polynomičkou nebo exponenciální by 8-bitový mikropočítač nezvládl.



Graf 1 Kalibrační křivka a rovnice trendu

Z rovnice trendu v grafu 1 byly vyčteny konstanty  $k$  a  $q$ , které byly pak použity pro kalibraci systému. Čili původní vzorec pro výsledný výkon byl vynásoben konstantou  $k$  a přičtena posun  $q$ .

$$P = (1 + k) \frac{ADC \cdot U_{ref} \cdot 179,7}{R \cdot 2^n \cdot 1000} + q$$

$$P = 1,029 \frac{ADC \cdot U_{ref} \cdot 179,7}{R \cdot 2^n \cdot 1000} + 1,508$$

Tento vzorec byl znovu implementován do mikropočítače. Pro ověření a získání přesnosti bylo totéž změřeno znovu (Tabulka 2).

U[V]	I[A]	P/3[W]	P[W]	P <sub>d</sub> [W]	Δ[W]	δ[%]
240,10	5,08	1210,40	3631,20	3622	9,2	0,266667
236,50	5,05	1195,20	3585,60	3577	8,6	0,25
231,40	4,96	1148,80	3446,40	3455	8,6	0,25
226,10	4,84	1095,30	3285,90	3287	1,1	0,03
220,60	4,72	1034,00	3102,00	3111	9	0,26
215,80	4,58	986,60	2959,80	2958	1,8	0,05
209,30	4,44	931,20	2793,60	2792	1,6	0,05
201,80	4,31	864,50	2593,50	2583	10,5	0,30
194,30	4,18	809,00	2427,00	2422	5	0,14

187,60	4,02	750,10	2250,30	2245	5,3	0,15	
179,60	3,84	693,50	2080,50	2072	8,5	0,25	
172,90	3,77	638,90	1916,70	1911	5,7	0,17	
165,13	3,51	581,90	1745,70	1743	2,7	0,08	
156,80	3,31	521,00	1563,00	1555	8	0,23	
147,50	3,15	464,20	1392,60	1387	5,6	0,16	
139,30	2,93	407,40	1222,20	1216	6,2	0,18	
129,00	2,72	348,50	1045,50	1045	0,5	0,01	
117,20	2,50	290,10	870,30	877	6,7	0,19	
105,40	2,22	234,10	702,30	709	6,7	0,19	
90,90	1,94	180,00	540,00	537	3	0,09	
74,70	1,61	121,50	364,50	365	0,5	0,01	
53,73	1,16	61,60	184,80	192	7,2	0,21	
						$\delta_{\max}[\%]$	0,30

Tabulka 2 Ověření přesnosti po kalibraci

Přesnost kolem desetiny procenta je již vyhovující.

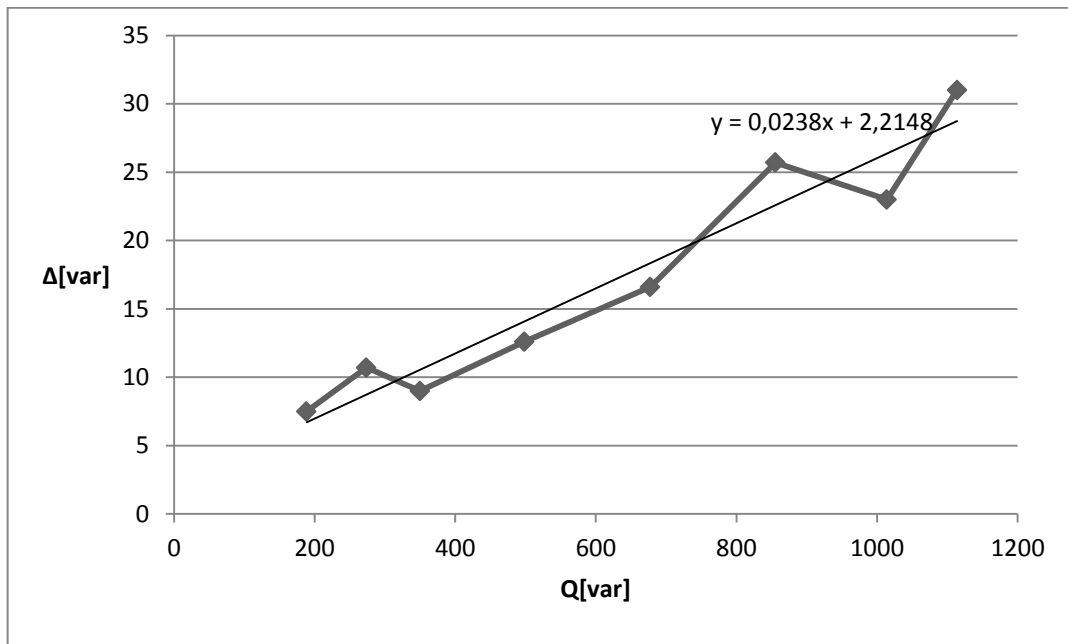
### 4.3. Měření jalového výkonu

Měření probíhá obdobně jako u měření činného výkonu. Jen k převodníku musí být zapojeny všechny tři fáze a jako zátěž sloužila tlumivka. Kvůli vysokému proudu, byl celkový měřený obsah omezen do pěti ampér. Každý řádek tabulky odpovídá polovině mA, aby byla zachycena kalibrační křivka i na malém rozsahu.

U[V]	I[A]	Q[var]	Q <sub>d</sub> [var]	$\Delta$ [var]	$\delta$ [%]
229,70	4,86	1114,00	1083	31,00	0,90
219,80	4,64	1014,00	991	23,00	0,67
202,20	4,25	855,70	830	25,70	0,74
180,43	3,78	677,60	661	16,60	0,48
154,90	3,23	498,60	486	12,60	0,37
130,00	2,70	350,00	341	9,00	0,26
115,00	2,39	273,70	263	10,70	0,31
95,30	1,99	188,50	181	7,50	0,22

Tabulka 3 První měření jalového výkonu

Přesnost, která se blíží jednomu procentu, je na tak malém rozsahu nepřijatelná. Následuje kalibrace.



Graf 2 Kalibrační křivka, rovnice trendu

Z rovnice trendu v grafu 2 jsem vyčetl konstanty  $k$  a  $q$ , které slouží pro kalibraci systému. Čili původní vzorec pro výsledný výkon byl vynásoben konstantou  $k$  a přičten posun  $q$ .

$$P = (1 + k) \frac{ADC \cdot U_{ref} \cdot 179,7}{R \cdot 2^n \cdot 1000} + q$$

$$P = 1,023 \frac{ADC \cdot U_{ref} \cdot 179,7}{R \cdot 2^n \cdot 1000} + 2,214$$

Tento vzorec byl znovu implementován do mikropočítače pro ověření.

U[V]	I[A]	Q[var]	Q <sub>d</sub> [var]	Δ[var]	δ[%]
229,1	4,78	1114,4	1111	3,4	0,098551
218,9	4,51	1012,1	1017	4,9	0,142029
201,5	4,28	854,8	852	2,8	0,081159
180,63	3,84	675,8	679	3,2	0,092754
156,4	3,09	497,8	500	2,2	0,063768
129	2,85	350,5	351	0,5	0,014493
116,2	2,53	275,5	272	3,5	0,101449
95,6	1,87	187,9	188	0,1	0,002899

Tabulka 4 Ověření přesnosti po kalibraci

Přesnost kolem desetiny procenta je již vyhovující.

#### 4.4. Přesnost kalibračního obvodu

Přesnost kalibračního obvodu je dána přesností měřícího přístroje, ke kterému se vztahuje kalibrace. Tímto měřícím přístrojem je velmi přesný digitální wattmetr WT210 Yokogawa. Tento wattmetr nabízí přesnost 0,1%, která je garantovaná do 25 A. Zobrazuje výkon, napětí, proud s obnovovací frekvencí 10 S/s.

### Závěr

Přínos této bakalářské práce je v seznámení architektury MSP430 od Texas Instrument. To je provedeno v příloze Architektura MSP430. Nabízí přehled vlastností, která slouží k objasnění technologie, hrubému popisu periférií a vlastností.

Další přínos je zhotovení měřícího systému, který obsahuje převodník výkonu s modulem pro čtení a zobrazení výstupu převodníků výkonu. Tento modul řízený mikropočítačem byl navržen a sestaven. Schéma zapojení jednotlivých prvků, návrh plošného spoje a kód nahráný v mikropočítači je také obsažen v obsahu. Tento měřicí systém je otestovaný a kalibrovaný na přijatelnou přesnost. Přínos kalibrace výsledky měření výkonů značně zpřesní, dokonce pod hodnotu třídy převodníku výkonů ( $t_p = 0.5$ ). Při ověřovacím měření se výsledná chyba měření pohybovala okolo 0.2%. To je pro použití mikropočítačového systému s převodníkem výkonu oproti klasickému měření jen pomocí převodníku výkonu velká výhoda.

Rozšiřitelnost nebo další návaznost tohoto projektu by spočívala v komunikaci s PC. Další možností je nahrazení 8-bitové architektury mikropočítače 32-bitovou pro přesnější kalibraci, protože vyšší architektury dovolují složitější matematické úpravy a práci s plovoucí čárkou.

Doplněním detailnějšího popisu architektury MSP430 by spočívala návaznost na přílohu Architektura MSP430.

## Literární prameny

1. **Texas Instruments.** *MSP430 Ultra-Low-Power Microcontrolers.* [pdf] Dallas : Texas Instruments, 2012.
2. —. *MSP430F543x-datasheet.* [pdf] Dallas : Texas Instruments, 2012.
3. **Bičovská, Blanka.** *Elektrická měření.* Ostrava : VŠB - Technická universita ostrava, 2006. 978-80-248-1480-3.
4. **GHW Traing, spol. s.r.o.** ghwtrading.cz. *GHW Trading.* [Online] 10 2012. [Citace: 19. 1 2013.] <http://www.ghvtrading.cz/rozvadecove-pristroje/prevodniky/vykonu/vuw-b22.html>.
5. **Atmel Corporation.** *8-bit AVR with 8K Bytes In-System Programmable Flashe ATmega8.* [pdf] San Jose : Atmel Corporation, 2003.
6. —. *atmel.com. Atmel.* [Online] Atmel Corporation, 2013. [Citace: 19. 1 2013.]

## Seznam příloh

- I. Architektura MCU-430F5438A - Brožura pro použití v laboratorní úloze mikropočítače MSP430
- II. PowerM - Projekt napsaný v jazyce c, obsahující zdrojové kódy implementované v Atmega8