

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analýza tahu modelářských raketových motorů

Fišera Jakub

Bakalářská práce
2012

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Fišera**
Osobní číslo: **I09012**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Analýza tahu modelářských raketových motorů**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Úkolem práce je vytvořit prototyp zařízení schopného měřit a zaznamenávat průběh statického tahu modelářského motoru.

Teoretická část bude obsahovat popis možností měření síly, a teoretický rozbor problému, zpracování a záznam dat.

Praktická část bude obsahovat návrh konstrukci stand alone zařízení schopného měřit a zaznamenávat data nezávisle na PC a ukázková data z měření.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184-4

Stanislav Ď.; Marcel K. Senzory a měřicí obvody; Praha : Vydavatelství ČVUT, 1999 ISBN 80-01-02057-6

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Rozsival
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11. května 2012**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 30. března 2012

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 24. 8. 2012

Jakub Fišera

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mojí rodině a přítelkyni, která mě během celého studia finančně a morálně podporovala. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Rozsivalovi za rady a pomoc při výrobě desky plošného spoje.

Anotace

Úkolem této bakalářské práce je zkonstruovat zařízení k měření a záznamu dat tahu modelářského raketového motoru. V teoretické části se zabývám možnostmi měření síly, řešením daného problému a možnostem zpracování a záznamu dat. Praktická část obsahuje návrh konstrukce zařízení umožňujícího měřit a zaznamenávat data tahu modelářského motoru.

Klíčová slova

tah, raketa, tenzometr, mikrokontroler, A/D převodník, FRAM paměť

Title

Analysis of rocket engine thrust

Annotation

The task of this bachelor thesis is construct a device to measure and record data rocket engine thrust. The theoretical part deals with the possibilities of force measurement, the solution of the problem and the possibilities of processing and recording data. The practical part includes a facility enabling the design to measure and record data rocket engine thrust.

Keywords

thrust, rocket, strain gauge, microcontroller, A/D convertor, FRAM memory

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
1 Úvod	10
2 Raketové motory	11
2.1 Fyzikální princip raketového motoru.....	11
2.2 Tah raketového motoru.....	11
2.3 Celkový a specifický impulz	11
2.4 Typy a označení modelářských raketových motorů	12
2.5 Fáze činnosti raketového motoru na TPH	13
3 Možnosti měření síly	15
3.1 Mechanické snímače sil.....	15
3.2 Hydraulické snímače sil.....	15
3.3 Elektrické snímače sil.....	16
3.3.1 Tenzometrické snímače.....	16
3.3.2 Převod deformace na polohu.....	21
3.3.3 Piezoelektrické snímače síly	22
3.3.4 Kapacitní snímače síly	23
3.3.5 Magnetoelastické a Magnetoanizotropní snímače síly	23
3.3.6 Snímače na bázi vodivého elastomeru	23
4 Použitý hardware	25
4.1 Návrh měřícího zařízení	25
4.1 Mikroprocesor	28
4.2 Napájení.....	30
4.3 Přístrojový zesilovač.....	31
4.4 A/D převodník	32
4.5 Paměť.....	33
4.6 Rozhraní USART	34
4.7 Rozhraní JTAG.....	35
4.8 Stavba desky plošného spoje	35
5 Softwarové řešení	37
5.1 Možnosti programování.....	37
5.2 Popis softwaru	37
6 Naměřené výsledky	39

7 Závěr	40
Literatura	41
Příloha A – Obrázek osazené desky plošného se snímačem	42
Příloha B – Zdrojový kód souboru bakalarka.c	44

Seznam zkratek

TPH	Tuhá pohonná hmota
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
PWM	Pulse Width Modulation
RISC	Reduced Instruction Set Computer
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM	Static Random Access Memory
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
CPU	Central Processing Unit
FRAM	Ferroelectric Random Access Memory
ROM	Read-Only Memory
RAM	Read-Write Memory
TWI	Two Wire Interface
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data Line
WP	Write Protect
R/W	Read/Write
LSB	Least Significant bit
MSB	Most Significant bit
PC	Personal Computer
GCC	GNU Compiler Collection
SMD	Surface Mount Device

Seznam obrázků

Obrázek 1- Zákon o zachování hybnosti [1]	10
Obrázek 2 - Křivka tahu typického RM	11
Obrázek 3 – Motor s TPH z lisovaného černého prachu. (1 – papírová trubka, 2 – lisovaná keramická tryska, 3 – TPH s kuželovou zápalnou dutinou, 4 – zpoždovací slož, 5 – výmetná náplň, 6 – krytka) [1].....	12
Obrázek 4 – Fáze činnosti raketového motoru [2]	13
Obrázek 5 - Pružinový snímač síly.....	14
Obrázek 6 - Hydraulický snímač síly	15
Obrázek 7 - Rozdělení tenzometrů.....	16
Obrázek 8 - Různá provedení tenzometrů - a) Drátkový tenzometr, b) Fóliový tenzometr, c) Polovodičový tenzometr.....	17
Obrázek 9 – Zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku (celý můstek).....	19
Obrázek 10 – Pružný člen ve tvaru vetknutého nosníku [3]	20
Obrázek 11 - Prstencový pružný člen se senzorem LVDT [3].....	21
Obrázek 12 – Piezoelektrický senzor síly [3].....	22
Obrázek 13 – Snímač síly na bázi elastomeru.....	23
Obrázek 14 – Schéma zařízení na měření tahu modelářského raketového motoru.....	27
Obrázek 15 – Blokový diagram architektury AVR [4]	29
Obrázek 16 – Základní zapojení konvertoru záporného napětí [5].....	30
Obrázek 17 – Zapojení stabilizátoru 78L05	31
Obrázek 18 - Komunikace s MCP3202 [7].....	32
Obrázek 19 – Zapojení A/D převodníku MCP3202.....	33
Obrázek 20 – Adresace zařízení [8]	34
Obrázek 21 – Možnosti formátu datového rámce [4]	35
Obrázek 22 – Deska plošného spoje.....	36
Obrázek 23 – Křivka kalibrace zařízení	39

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a zkonstruovat zařízení schopné měřit tah modelářského raketového motoru. V druhé kapitole je vysvětlen princip činnosti raketového motoru, dále jsou zde uvedeny základní parametry udávající výkonnost raketového motoru, fáze činnosti a základní dělení a označení současně dostupných modelářských raketových motorů.

Třetí kapitola se zabývá možnostmi měření síly. Od nejjednodušších snímačů, jako jsou například mechanické až po složitější elektrické snímače. V současnosti se pro měření síly nejčastěji používají deformační členy s tenzometry. Tento snímač je použit i v konstruovaném zařízení.

Čtvrtá kapitola je věnována návrhu a konstrukci samotného zařízení. Jsou zde popsány jednotlivé komponenty použité při tvorbě měřicího zařízení. Dále kapitola obsahuje návrh schématu a desky plošného spoje.

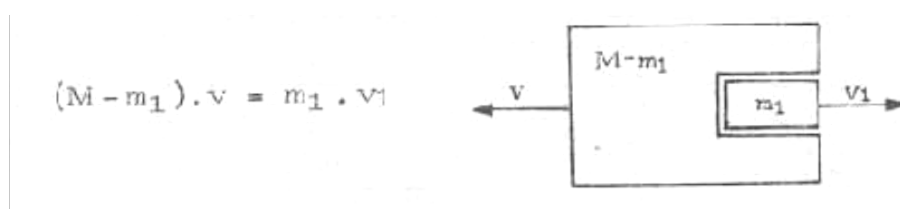
Pátá kapitola je zaměřená na softwarové řešení. Zde jsou stručně popsány možnosti programování mikrokontroleru a je zde uveden postup tvorby programu na ovládání mikrokontroleru.

Poslední šestá kapitola se věnuje kalibraci přístroje a výpočtu rozlišení snímače.

2 Raketové motory

2.1 Fyzikální princip raketového motoru

Základní princip činnosti raketového motoru vyplývá z Newtonových zákonů. Přesněji ze zákona z nich vyplývajícího, zákona o zachování hybnosti. Ten říká: “Je-li z nějakého hmotného tělesa o původní hmotnosti M odhazována jeho část m_1 rychlostí v_1 , dá se toto těleso (o nynější hmotnosti $M - m_1$) do pohybu opačným směrem rychlostí v .” Důležité je dodat, že zákon o zachování hybnosti platí pouze v izolované soustavě. To je taková soustava, na kterou nepůsobí vnější síly.



Obrázek 1- Zákon o zachování hybnosti [1]

To, že se raketa začne pohybovat rovnoměrně se zvyšující rychlostí, je způsobeno trvalou reaktivní silou, která vzniká neustálým odvrhováním molekul zplodin hořících velikou rychlostí. Zjednodušeně zde platí 3. Newtonův zákon akce a reakce.

Zdrojem energie raketového motoru je chemická energie pohonné hmoty, která se při chemických reakcích mění na energii tepelnou. Tato tepelná energie spalin se při výtoku plynů z trysky mění na energii mechanickou.[1]

2.2 Tah raketového motoru

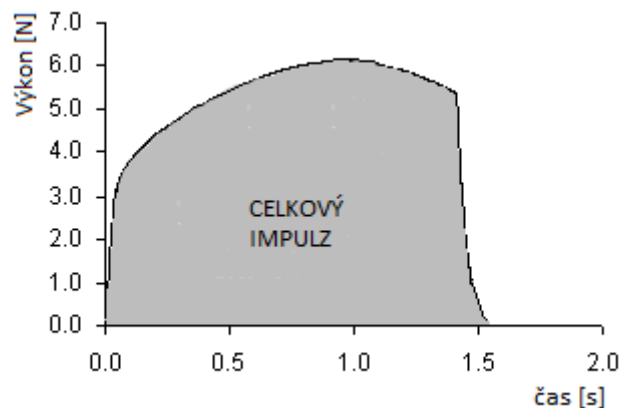
Tah motoru je nejzákladnějším měřítkem k určení výkonnosti raketového motoru. Je to síla motoru, která raketu žene vzhůru k nebesům. Proto není pochyb, že určit jaký má daný motor tah je pro amatérské modeláře jedním ze základních požadavků. Fyzikálně je tah popsán jako celková reaktivní síla, kterou raketový motor vyvine. Je dán závislostí hmotnostního průtokového množství spalin m a efektivní rychlosti výtoku spalin z trysky W_{ef} .

$$F = m \cdot W_{ef} [N] \quad (1.1)$$

2.3 Celkový a specifický impulz

Přestože je tah velice důležitým měřítkem pro výkonnost raketového motoru, neudává žádnou představu o tom, jakou sílu motor raketě dodá. Celková síla, kterou motor během hoření vyvine, se nazývá celkový impulz I_c . Vztah pro celkový impulz je definován jako integrál tahu přes provozní dobu motoru. Vyjádřen je v Newtonech za sekundu [N.s].

$$I_c = \int_0^{t_s} F \cdot dt \quad (1.2)$$



Obrázek 2 - Křivka tahu typického RM

Dalším velice důležitým parametrem raketového motoru charakterizujícím výkonnost je specifický impulz I_{sp} . Specifický impulz je dán vlastnostmi použitých pohonných hmot. Dále závisí na konstrukci motoru. Typicky dosahuje hodnot $500 - 3000 \text{ms}^{-1}$ v závislosti na typu motoru. Teoreticky lze dosáhnout až 4000ms^{-1} . Motor s vyšší hodnotou specifického impulzu je účinnější, protože produkuje vyšší tah při použití stejného množství pohonných látek. Specifický impulz je vyjádřen jako poměr celkového impulzu a hmotnosti pohonné hmoty.[1]

$$I_{sp} = \frac{I_c}{M_{PH}} [m \cdot s^{-1}] \quad (1.3)$$

2.4 Typy a označení modelářských raketových motorů

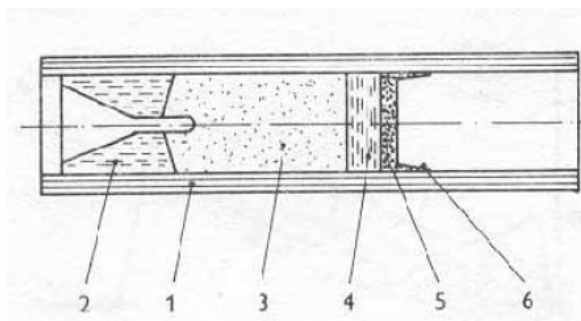
Raketové modelářské motory se podle fyzikálního skupenství rozdělují na dvě základní skupiny. První skupinu tvoří motory na tuhé pohonné hmoty a druhou motory na kapalně pohonné hmoty. Mnohem častěji se však používají motory na TPH. Tyto motory skýtají oproti kapalným mnoho výhod. Jsou daleko jednodušší, levnější a v provozu spolehlivější než motory kapalinové. Nejstarší složenou TPH je černý prach, který se však stále využívá. V současné době jsou však nejužívanější TPH na bázi kaučuku, nebo syntetických pryskyřic. Tyto hmoty dosahují vysokých výtokových rychlostí (až 2500m/s).

Motory na TPH se rozdělují do dvou základních skupin. První skupinu tvoří motory s čelním odhoříváním jádra. Tento typ motoru je nejjednodušší. TPH kompletně vyplňuje spalovací prostor, vpředu je jádro zajištěno zátkou, vzadu je zalisovaná nebo jinak upravená tryska. Po zažehnutí jádro rovnoměrně odhořívá odzadu dopředu. Pro tento typ motorů je potřeba rychle hořící TPH, jinak vyjde tryska příliš malá a nízký tah raketu neutáhne. Příkladem tohoto typu

motorů byly dříve běžně prodávány motory Adast, vyráběné v ZVS Dubnica nad Váhom, poháněné lisovaným černým prachem.

Druhou skupinu tvoří motory s ohříváním jádra z centrálního kanálku. Princip těchto motorů spočívá v tom, že je v jádře vytvarován jeden nebo několik podélných kanálků. Následně jádro odhořívá ze stěn kanálku do stran. U těchto motorů je plocha odhořívání výrazně větší než u motorů s čelním odhoříváním. Úměrně tomu musí být větší průměr trysky nebo musí být použita pomalejší TPH.

V současné době se na trhu vyskytuje dvojí značení modelářských raketových motorů. Americké a evropské. Americké motory se označují velkým písmenem, které udává celkový impulz. Od písmene A (2,5 Ns) do G (160 Ns). Dále jsou v označení dvě čísla. První udává hodnotu středního tahu $P_{STŘ}$ (N), druhé udává dobu hoření zpoždovací složky. Stejným značením jsou označovány dříve nejvíce používané motory od výrobce ZVS Dubnica nad Váhom. Pouze s tím rozdílem, že poslední číslo udává celkovou dobu hoření od zážehu po výmet. Evropské motory se označují trojčísly, kde první číslo udává celkový impulz (Ns), druhé číslo hodnotu maximálního tahu (kp) a třetí číslo celkovou dobu od zážehu po výmet.[1]

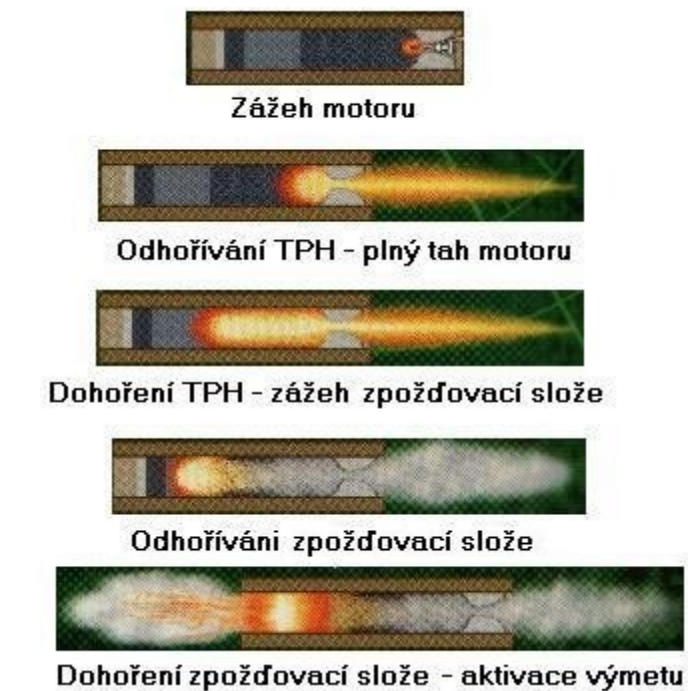


Obrázek 3 – motor s TPH z lisovaného černého prachu. (1 – papírová trubka, 2 – lisovaná keramická tryska, 3 – TPH s kuželovou zápalnou dutinou, 4 – zpoždovací složka, 5 – výmetná náplň, 6 – krytka) [1]

2.5 Fáze činnosti raketového motoru na TPH

Průběh činnosti raketového motoru se rozděluje do několika základních fází. Tyto fáze jsou znázorněny na obrázku 4. Při první fázi dochází k zážehu motoru. V tomto okamžiku začíná hořet TPH a raketa začíná nabírat rychlost. Po zážehu TPH postupně odhořívá. V tomto okamžiku má motor maximální tah. Rychlost hoření TPH závisí na fyzikálně chemickém složení TPH, na počáteční teplotě a na tlaku v komoře. Tlak v komoře je závislý na konstrukci motoru, zejména na tzv. zahrazení. Zahrazení je poměr plochy, na které TPH odhořívá, k/ke poměru průřezu trysky v jejím nejužším místě. Každá TPH má jinou ideální hodnotu zahrazení. Čím je TPH “rychlejší”, tím nižší zahrazení a opačně. Při příliš nízkém zahrazení je ve spalovací komoře nízký tlak a to způsobí nižší rychlost odhořívání. To má za následek nízkou termodynamickou účinnost motoru a tudíž i nízký tah. V opačném případě při příliš vysokém zahrazení je tlak nebezpečně vysoký. TPH rychleji hoří, ale konstrukce motoru nemusí takové namáhání vydržet. Jádro následně může popraskat nebo v krajním případě i explodovat. Po dohoření TPH následuje zážeh zpoždovací složky. Zpoždovací složka se využívá

k opožděnému zážehu jednoho nebo více motorů. Například když chceme pomocí dvou motorů prodloužit dobu tahu. Když dohoří zpoždovací slož, aktivuje se výmet a tím je činnost raketového motoru ukončena.[2]



Obrázek 4 – fáze činnosti raketového motoru [2]

3 Možnosti měření síly

Základním principem pro měření síly je využití fyzikálních účinků síly podle Newtonova zákona. Hmotnost m a zrychlení a vyvolává sílu F , která se mění v čase. Jedná se o skalární fyzikální veličinu. Jednotkou síly je Newton.

$$F(t) = m \cdot a \text{ [N]} \quad (2.)$$

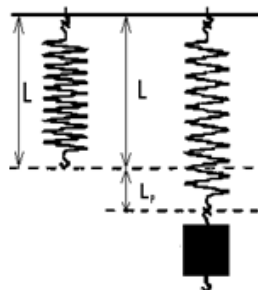
V dnešní době se v převážné většině případů využívá deformačních účinků na vhodný objekt. Jinak řečeno, princip drtivé většiny dnešních snímačů síly spočívá v převodu síla – deformace. Nejčastěji se pro převod deformací na elektrický signál využívá odporových tenzometrů.

3.1 Mechanické snímače sil

Jedná se o nejjednodušší možnost měření síly. Patří sem snímače pákové a pružinové. Pružinový snímač se skládá z pružiny, která je jedním koncem pevně uchycena a na druhý konec působí síla. Závaží má za následek protažení nebo stlačení pružiny, které je přímo úměrné síle.

L - délka nezatížené pružiny

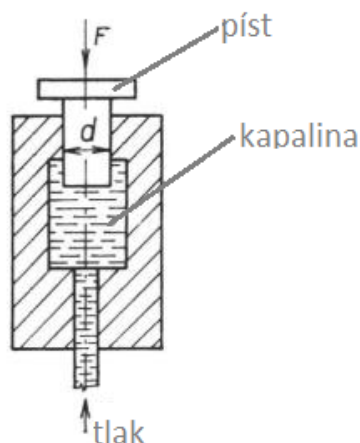
L_p - protažení pružiny se závažím



Obrázek 5 - Pružinový snímač síly

3.2 Hydraulické snímače sil

U těchto snímačů působí síla na píst, který následně stlačuje kapalinu a tím se mění tlak. Tlak se měří a je úměrný síle působící na píst.



Obrázek 6 - Hydraulický snímač síly

3.3 Elektrické snímače sil

3.3.1 Tenzometrické snímače

Tyto snímače patří mezi pružné (deformační) členy. Funkce pružných členů spočívá v tom, že síla způsobí deformaci pružného členu, který má tvar vetknutého nosníku, válce nebo pružného rámu. Měří se pak tah, smyk, ohyb, tlak nebo krut. Pružné členy musí být z materiálu, který má minimální teplotní roztažnost, dobrou teplotní vodivost, minimální hysterezi, malé účinky tečení, dostatečnou pevnost a velkou odolnost vůči korozi. Nejčastěji se používá kvalitní antikorozi ocel. Deformace se pak snímá tenzometry, které se lepí na vhodné místo pružného členu.

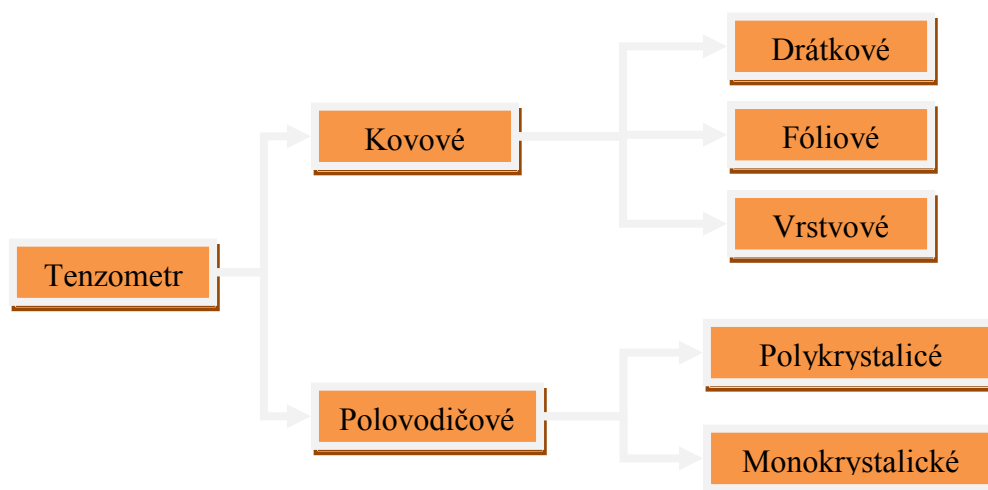
Tenzometr je pasivní součástka, jejíž odpor závisí na změnách způsobených deformací tenzometru (změny geometrických rozměrů, nebo krystalografické orientace tenzometru). Deformace je způsobená tahem nebo tlakem. Využívá se zde Hookův zákon pružné deformace

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (3.1)$$

kde σ - mechanické napětí

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ - relativní prodloužení

E - modul pružnosti v tahu, tzv. Youngův modul



Obrázek 7 - Rozdělení tenzometrů

Tenzometry můžeme rozdělit podle materiálu, z kterých jsou vyrobeny na kovové nebo polovodičové. Kovové dále rozdělujeme na drátkové, fóliové a vrstevné. Drátkové tenzometry jsou složeny z meandru z drátku o průměru 0,01 až 0,03mm. Drátek nebo fólie je připevněna k tenké podložce. Takovýto tenzometr se přilepí na měřené místo.

Polovodičové tenzometry se dělí na polykrystalické (naprašované) a monokrystalické, které se dále dělí na lepené a difundované do Si substrátu. Polovodičové tenzometry se nejčastěji vyrábějí z konstantanu, díky jeho malé citlivosti na teplotu.

Kovové tenzometry se využívají v aplikacích, kde vyžadujeme přesné měření deformací, sil, tlaků a momentů. Oproti polovodičovým tenzometrům mají výbornou linearitu a přesnost. Na druhou stranu polovodičové tenzometry mají mnohonásobně vyšší citlivost (cca 60x). Velká citlivost je výhodou, protože daleko jednodušeji zkonstruuujeme vstupní obvody (zesilovače, A/D obvody).

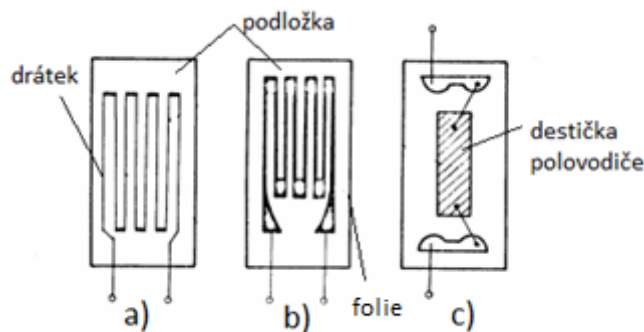
Odporové tenzometry jsou teplotně závislé. To znamená, že vlivem teploty dochází k roztažení materiálu bez vlivu vnější síly. Proto je nutné nějakým způsobem vliv teploty kompenzovat. Kompenzace se provádí použitím samokompenzačního tenzometru. Takovýto tenzometr má na stejné podložce v sérii zapojené měřicí vinutí s vinutím, které je zapojeno s opačnou teplotní charakteristikou. V praxi se však nejčastěji pro kompenzaci teploty používá zapojení tenzometrů v můstku.[3]

Vlastnosti kovových tenzometrů jsou:

- lineární závislost deformace na změnu odporu,
- mechanická odolnost,
- malý vliv změn teploty,
- odpor tenzometru 120, 350, 700 a 1000Ω,
- životnost až 10 miliónů cyklů,
- teplotní rozsah -200°C – 250°C,
- rozměry jednotky až stovky nm.

Vlastnosti polovodičových tenzometrů jsou:

- vysoká citlivost
- malé rozměry
- vynikající korozní odolnost
- nelinearita a teplotní závislost.



Obrázek 8 - Různá provedení tenzometrů - a) Drátkový tenzometr, b) Fóliový tenzometr, c) Polovodičový tenzometr

Nyní si odvodíme rovnici pro tenzometrický jev.

U kovových drátkových tenzometrů se k měření relativního prodloužení využívá deformace povrchu, která následně způsobí změnu odporu drátku. Odpor je přímo úměrný změně délky vodiče a průřezu vodiče. Pro odpor R tedy platí:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (3.2)$$

kde ρ - měrný odpor vodiče ($\Omega \cdot m$)

l - délka vodiče (mm)

S - plocha průřezu vodiče (mm^2)

Dále pro poměrnou změnu odporu platí:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{\rho \cdot \frac{l}{S}} \left[\Delta l \frac{\rho}{S} - \rho l \frac{\Delta S}{S^2} + \frac{l}{S} \Delta \rho \right] = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3.3)$$

kde $\frac{\Delta S}{S} = -2\mu \frac{\Delta l}{l}$

μ - Poissonova konstanta

Po dosazení do rovnice poměrné změny odporu dostaneme:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} + 2\mu \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta l}{l} \left(1 + 2\mu + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}} \right) \quad (3.4)$$

Výraz, který nám vyšel v závorce, se nazývá součinitel deformační citlivosti a označuje se K_p . Dostáváme výsledný vztah pro poměrnou změnu odporu kovového tenzometru:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} \cdot K_p = \varepsilon \cdot K_p \quad (3.5)$$

Velikost K_p je závislá na materiálu, z kterého je tenzometr vyroben. Pro drátkové tenzometry se používá rozmezí 1,6 – 3,5. Pro polovodičové tenzometry je K_p 75 – 180. To způsobuje větší nelinearitu a teplotní závislost. Pro vyšší deformace musíme použít speciálně linearizované tenzometry.

Pro polovodičové tenzometry platí stejný vztah poměrné změny odporu jako u kovových tenzometrů. Součinitel deformační citlivosti K_p je však vyjádřen vztahem:

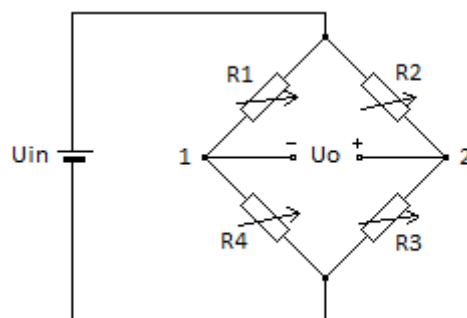
$$K_p = 1 + 2\mu + \pi_i E_d \quad (3.6)$$

kde π_i – podélný piezoelektrický součinitel

E_d - modul pružnosti materiálu

Změna odporu se pohybuje při běžném měření kovovými tenzometry pouze v řádech $\mu\Omega$. Takto malou změnu odporu vůči jmenovité hodnotě je obtížné měřit. Proto tenzometry zapojujeme do tzv. Wheatstonova můstku.

Díky tomuto zapojení můžeme měřit změnu odporu jako velikost výstupního napětí můstku. Zapojení Wheatstonova můstku je znázorněno na obrázku 7. Můstek je tvořen ze dvou větví. První větev se skládá z odporu R_1 a R_4 , druhá z odporů R_2 a R_3 . Tyto větve se chovají jako dělič napětí. Výstupní napětí U_o je rovno rozdílu výstupních napětí jednotlivých větví. Z toho vyplývá, že pokud velikost napětí na jednotlivých větvích budou stejná, výstupní napětí U_o bude nulové. V takovémto stavu je můstek vyvážený. Změna kteréhokoliv ze čtyř odporů vyvolá změnu výstupního napětí. Tato změna je pak úměrná změně odporu. Z této vlastnosti vyplývá, že čím více tenzometrů v můstku použijeme, tím lepší dostaneme citlivost. Pokud osadíme můstek dvěma tenzometry, dostaneme 2x lepší citlivost než zapojením s jediným tenzometrem. Zapojením plného můstku dostaneme 4x lepší citlivost. Další výhody plného zapojení můstku jsou nulová chyba vlivem teploty (pokud jsou tenzometry identické) a zanedbatelná chyba vlivem odporu přívodů (pokud lze vytvořit můstek přímo na pružném členu).



Obrázek 9 – zapojení tenzometrů do Wheatstonova můstku (celý můstek)

V můstkovém zapojení se nevyhodnocuje celkový odpor, ale pouze jeho změna. Pokud mají všechny tenzometry stejný odpor a u všech dochází alespoň k malé změně odporu, potom platí pro výstupní napětí U_o plného můstku vztah:

$$\Delta U_o = \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \cdot U_{in} \quad (3.7)$$

Kde U_{in} - napájecí napětí můstku

ΔR - změna odporu vlivem deformace

R - odpor bez působení síly

Pokud použijeme vztah 3.5, dostaneme upravený vztah pro výstupní napětí můstku s tenzometry:

$$\Delta U_o = \frac{K_p}{4} \cdot [\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4] \cdot U_{in} \quad (3.8)$$

kde ε_i - je prodloužení tenzometru R_i na obrázku 9.

Hlavní částí tenzometrického snímače je deformační člen, který převádí účinky měřené síly na deformaci. Vlastnosti deformačního členu zásadně ovlivní výsledky celého měření, protože chyby, které vzniknou při výrobě deformačního členu, jdou velice těžko odstranit.[3]

Geometrie pružného členu musí splňovat tyto zásady:

- směrovost, tj. co největší poměr poddajnosti ve směru měřené síly k poddajnosti ve směru rušivých sil,
- převod měřené síly na deformace opačných znamének tak, aby bylo možné použít čtyři aktivní tenzometry,
- transformace měřené deformace na hodnoty v rozsahu linearit použitých tenzometrů a ochrana proti přetížení, nejvyšší hodnota deformace by neměla přesahovat 10 až 30% meze pružnosti materiálu.

Pro nejmenší síly (do desítek kN) se používá deformační člen typu vetknutý nosník. Snímač funguje tak, že síla F působící ve vzdálenosti l od středu nalepeného tenzometru vyvolává deformaci ε , která je určena ohybovým momentem M_0 a průřezovým modulem v ohybu W_0 . Tenzometr R_1 a R_4 jsou přilepeny na horní straně nosníku a odpory R_2 a R_3 jsou umístěny na spodní straně. Jestliže na nosník působí síla podle obrázku 10, jsou vrchní tenzometry namáhány tahem a spodní tlakem. Deformaci určuje vztah:[3]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_0}{W_0 E} = \frac{F \cdot l}{W_0 E} \quad (3.9)$$

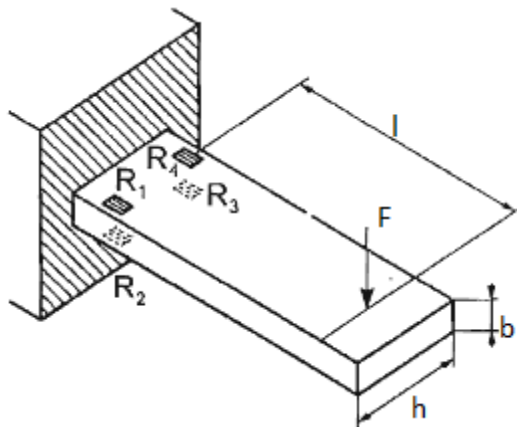
kde $W_0 = \frac{h \cdot b^2}{6}$ – modul v ohybu

ε – deformace

σ – mechanické napětí

E – Youngův modul pružnosti

M_0 – ohybový moment



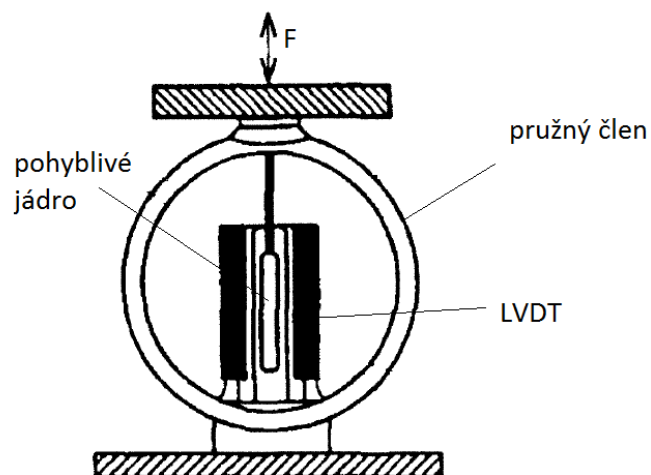
Obrázek 10 – Pružný člen ve tvaru vetknutého nosníku [3]

Dalším velice rozšířeným typem pružného členu je pružný člen typu S. Tenzometry jsou umístěny v hermeticky uzavřeném prostoru, kde nejsou vystaveny okolním rušivým vlivům. Tlaková nebo tahová síla je pak měřena ve středu vnějších ramen.

Existují i další typy pružných členů. Například nosník ve tvaru I, se dvěma otvory, člen se smykovým namáháním a mnoho dalších. Všechny tyto typy však musí splňovat požadavek, aby poměr síly a výsledného protažení materiálu byl lineární. To znamená, aby síla a protažení bylo ve stejném poměru v celém rozsahu měření. Hodnota nelinearity zpravidla nepřesahuje 0,1%. [3]

3.3.2 Převod deformace na polohu

Základním principem těchto snímačů je změna polohy některého význačného bodu vlivem deformace. Poloha je pak snímána kapacitními, induktačními nebo optoelektronickými snímači. Jako deformační členy se nejčastěji používají členy ve tvaru šroubovice nebo prstencového pružného členu. [3]



Obrázek 11 - Prstencový pružný člen se senzorem LVDT [3]

3.3.3 Piezoelektrické snímače síly

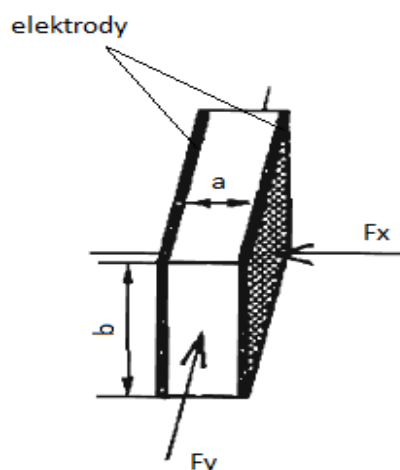
U těchto snímačů se působením síly přímo mění parametr měřícího členu. Jak už název napovídá, základní princip spočívá ve využití piezoelektrického jevu. Při tomto jevu dochází vlivem deformace krystalu některých dielektrických látek (nejčastěji křemen) k polarizaci krystalu. Síla, která působí na destičku z vhodného materiálu vyříznutou pod vhodným úhlem, způsobí elektrickou polarizaci. Přiložením elektrod k povrchu krystalu následně vznikají na elektrodách volné náboje.[3]

$$Q = d \cdot F_x \quad (3.10)$$

kde Q – náboj na elektrodách

d – piezoelektrická konstanta

F_x – síla působící na krystal



Obrázek 12 – Piezoelektrický senzor síly [3]

3.3.4 Kapacitní snímače síly

Kapacitní snímače využívají změny kapacity způsobenou změnou vzdálenosti elektrod. Jako deformační člen je zde většinou použita deska, která je zároveň aktivní elektrodou kondenzátoru. Když potom působí síla na desku kondenzátoru, dochází ke změně vzdálenosti mezi elektrodami a tudíž i ke změně kapacity. [3]

3.3.5 Magnetoelastické a Magnetoanizotropní snímače síly

K měření síly se u těchto snímačů využívá magnetických vlastností feromagnetik. Jednou z využívaných vlastností je magnetoelasticitata. To je takový fyzikální jev, při kterém se vlivem mechanického napětí ve feromagnetickém materiálu mění jeho permeabilita.

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{2\lambda_s\mu^2\sigma}{B_{2s}} = K \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (3.10)$$

kde λ_s – činitel magnetostrikce při nasycení

B_s – magnetická indukce při nasycení

$\mu = \mu_0\mu_r$ – permeabilita

σ – mechanické napětí

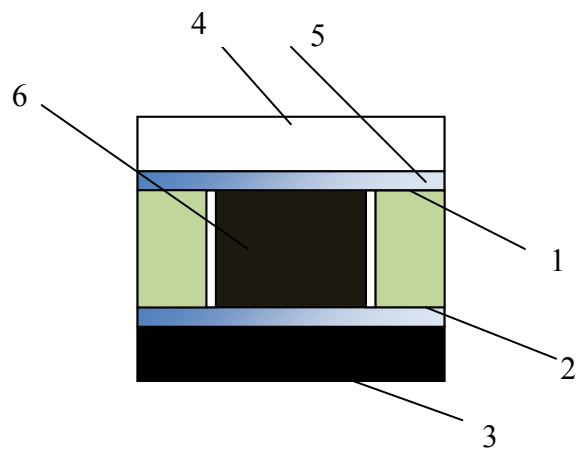
K – konstanta

Další využívanou vlastností feromagnetických materiálů je magnetoanizotropie. To je taková vlastnost, při které dochází při deformaci feromagnetika k deformaci magnetického pole. V tělese z feromagnetického materiálu jsou čtyři otvory. Těmito otvory je vedeno primární a sekundární vinutí. Když na snímač nepůsobí žádná síla, v sekundárním vinutí se neindukuje žádné napětí. Vlivem působení síly dochází k tomu, že část magnetického toku primárního vinutí zasáhne sekundární vinutí. To způsobí, že se v sekundárním vinutí indukují napětí, jehož velikost je úměrná působící síle.[3]

3.3.6 Snímače na bázi vodivého elastomeru

Princip těchto snímačů spočívá ve změně odporu vodivého elastomeru vlivem působící síly. Elastomer je takový materiál, který se již při malém působení síly deformuje a za relativně krátkou dobu se vrátí do původního stavu. Nejčastěji se používá silikonová pryž sycená grafitem nebo železným prachem. Na následující obrázku je uvedeno provedení elastomeru.

Vodivý elastomer 6 je stlačován dvojicí elektrod 1 a 2, které snímají změnu odporu elastomeru. Základní deska 3 je pevná, vrchní deska 5 musí být elastická. Elastická nevodivá vrstva 4 slouží k nastavení citlivosti senzoru.[3]



Obrázek 13 – Snímač síly na bázi elastomeru

4 Použitý hardware

4.1 Návrh měřicího zařízení

Při tvorbě měřicího zařízení nejsme nikterak omezeni rozměry, protože výsledný měřicí přístroj není součástí samotného raketového modelu. Bude upevněn ke startovací rampě. Samozřejmě čím menší bude výsledný tištěný spoj, tím nižší budou náklady na výrobu a v neposlední řadě i menší parazitní vlastnosti. Jelikož je měřicí přístroj napájen baterií, budeme preferovat součástky s nízkým odběrem.

Řídící jednotkou celého přístroje je mikroprocesor ATmega32 od firmy Atmel. Jedná se o 8 bitový mikroprocesor, který využívá architekturu RISC. Ve schématu mikroprocesor obstarává hodnoty z A/D převodníku, které následně ukládá do paměti. Dále obstarává komunikaci s připojeným počítačem. Komunikace s počítačem probíhá pomocí rozhraní USART. S A/D převodníkem komunikace probíhá přes sběrnici SPI, s pamětí pomocí sběrnice I²C. Dále je v zapojení využito rozhraní JTAG, které umožňuje ladění přímo na čipu. K programování AVR procesorů od firmy Atmel je k dispozici volně dostupný program Atmel studio6, popřípadě starší verze programu AVR studio. Jedná se o integrované vývojové prostředí pro vývoj a ladění procesorů AVR. Tento program podporuje jak programovací jazyky C/C++, tak i assembler kód. K naprogramování zařízení na měření tahu modelářského raketového motoru je použit právě program Atmel studio 6. Samotný firmware je napsán v jazyku C.

Jako snímač síly je použit deformační člen se čtyřmi tenzometry. Tenzometry jsou zapojeny do Wheatsonova můstku. Dva tenzometry jsou aktivní, které měří napětí a dva pasivní, které slouží jako vyvážení můstku. Při použití čtyř tenzometrů je dosaženo výborné citlivosti a nízké chybě způsobené změnou teploty. Jelikož výstupní napětí tenzometrů je velice malé (řády mV) a takto malé napětí by A/D převodník nebyl schopen zpracovat, je nutné použít zesilovač. Z toho vyplývá hlavní požadavek, který se od zesilovače vyžaduje a to velké napětěvé zesílení. To splňuje zesilovač AD627N od firmy Analog Devices s napětěvým zesílením až 1000. Navíc se jedná o nízkopříkonový zesilovač s maximálním odběrem pouhých 85μA, takže je vhodný i do bateriemi napájených aplikací.

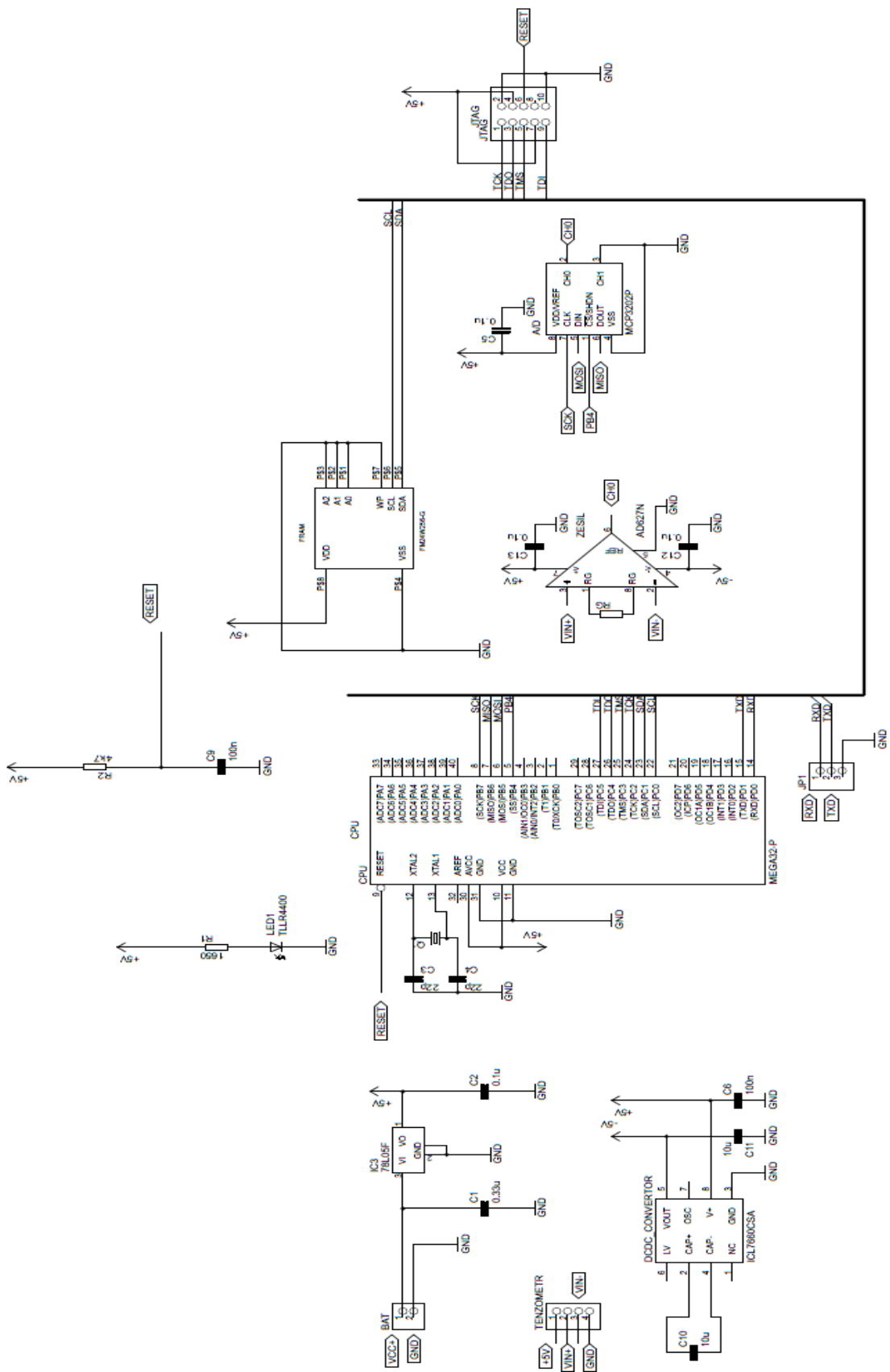
Dále je zapotřebí signál převést ze spojitého na digitální. K tomu slouží A/D převodník. Na vhodné volbě A/D převodníku závisí úspěch celého měření. Na trhu je nespočet A/D převodníků lišících se druhem převodu, počtem bitů, rychlostí a dalšími vlastnostmi. Jelikož samotná doba tahu motoru je pouhých několik sekund je zapotřebí odebrat co nejvíce vzorků, aby výsledná křivka tahu co nejvíce odpovídala skutečnému průběhu. Dále je nutné zvolit dostatečné rozlišení. Bohatě stačí 12 bitů. To znamená 4096 hladin, při referenčním napětí 5V vychází LSB 1,22mV. Požadovaným vlastnostem odpovídá například převodník MCP3202 od firmy Microchip. Tento převodník dokáže převádět rychlostí až 100ksps. Dále se vyznačuje malým proudovým odběrem, což je velice důležité pro delší životnost baterie.

Důležité je naměřené údaje někam uložit. K tomu slouží paměť. V aplikaci je použita paměť typu FRAM FM24W256 od firmy Ramtron. Paměti typu FRAM mají oproti paměti EEPROM několik výborných vlastností. Velikou výhodou je životnost paměti. Výrobce udává až 10^{14} čtení/zápisů. Tyto paměti jsou také velmi rychlé a při odpojení napájení neztrácí svůj obsah. Uspořádání paměti je 32,768 x 8 bitů. To je jediná nevýhoda. V aplikaci je využit 12 bitový A/D převodník, proto je nutno ukládat jeden odebraný vzorek do dvou paměťových buněk. To vede ke ztrátě 4 bitů. Do paměti se následně vejde pouze 16 384 vzorků. Při vzorkování 10ms se za sekundu odebere 100 vzorků. To znamená cca 160s záznamu, což není mnoho, ale při předpokládané vytíženosti několika měření bez nutnosti smazání výsledků to bohatě stačí.

K napájení celého zařízení je využita 9V baterie. Tato baterie byla zvolena s ohledem na to, že pro napájení obvodu využíváme napětí $\pm 5V$. Jelikož od zařízení není očekáván nepřetržitý provoz, ale pouze několik měření do roka, vyžadujeme také dlouhou životnost baterie. K zjištění životnosti je potřeba znát celkový odběr zařízení. Už samotný návrh zařízení byl zaměřen na výběr součástek s nízkým odběrem. Ve výsledku maximální odebíraný proud přístroje nepřekročí 10mA. Při použití klasické 9V 200mAh baterie se dostaneme na cca 20 hodin nepřetržitého provozu.

Stabilizaci napětí z 9 na +5V zajišťuje stabilizátor 78L05F. Jedná se o integrovaný třísvorkový stabilizátor s výstupním proudem až 100mA. Napětí -5 V zajišťuje napěťový konvertor ICL7660 od firmy Maxim. Tento konvertor dokáže z kladného napětí v rozsahu 1,5 - 10V vytvořit napětí záporné. Výstupní záporné napětí je použito k napájení zesilovače.

Pro kreslení schématu a následné desky plošného spoje byl zvolen program Eagle, Tento program jsem zvolil, protože jsem se s ním setkal už během studia a free verze tohoto programu poskytuje dostatečné množství funkcí k realizaci zadaného projektu. Alternativou může být například program OrCAD.



Obrázek 14 - Schéma zařízení na měření tahu modelářského raketového motoru

4.1 Mikroprocesor

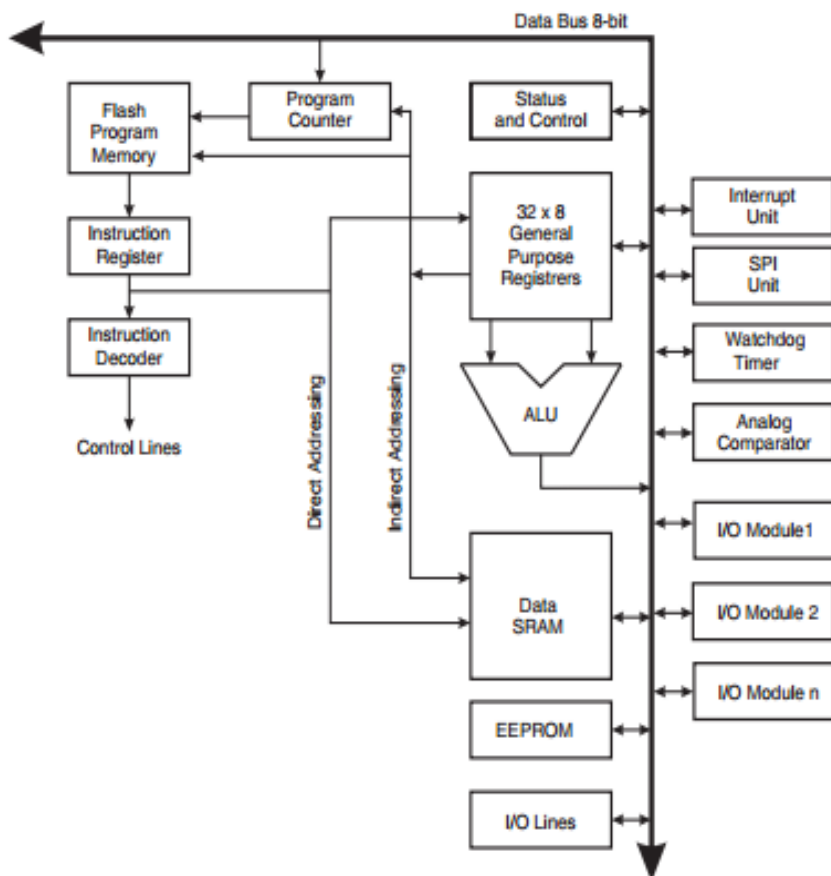
Řídící jednotkou zařízení na analýzu tahu raketového motoru je mikroprocesor. Mikroprocesor řídí celý systém, obstarává hodnoty z A/D převodníku a následně je ukládá do paměti. Dále obstarává komunikaci s PC. Pro aplikaci jsem zvolil 8bitový mikroprocesor od firmy Atmel ATmega32. Hodinový kmitočet je řízen krystalem HC49U o kmitočtu 16Mhz. Tento procesor jsem zvolil, protože plně splňuje požadavky kladené aplikací a je velice dostupný. Hlavní parametry jsou:

- Napájení 2,7V až 5,5V
- Frekvence oscilátoru 0-16Mhz
- RISC architektura
 - 131 instrukcí
 - 32x8 registrů
- Nonvolativní programová a datová paměť
 - 32kB Flash paměť programu (10 000 cyklů)
 - 1024 B EEPROM (100 000 cyklů)
 - 2 kB SRAM
- JTAG rozhraní
- Periferní funkce
 - 2 x 8bitový čítač/časovač s předděličkou frekvence
 - 16bitový čítač/časovač s předděličkou frekvence
 - časovač reálného času se samostatným oscilátorem
 - PWM kanály
 - dvouvodičové sériové rozhraní (I²C)
 - 8kanálový, 10bitový A/D převodník
 - sériový programovatelný USART
 - Master/Slave SPI sériové rozhraní
 - programovatelný Watchdog časovač s odděleným integrovaným oscilátorem
 - integrovaný analogový komparátor

- Speciální funkce mikrokontroleru
 - Brown-out detection- obvod hlídající podpětí
 - vnější a vnitřní zdroje přerušení
 - interní kalibrovaný RC oscilátor
 - 6 úsporných režimů [4]

Mikrokontroler AT Mega32 využívá architekturu RISC. Principem této architektury je realizace složitých matematických operací softwarově pomocí jednoduchých instrukcí. Instrukční sada je tvořena pouze malým počtem jednoduchých instrukcí. To má za následek zjednodušení řídicích obvodů CPU a zkrácení doby potřebné k zpracování instrukcí.

Architektura procesorů AVR je znázorněna na obrázku 12. Hlavní koncepce využívá 32 rychle přístupových registrových polí o délce 8 bitů. Přístup do registrového pole se provádí v jednom strojovém cyklu. V jediném strojovém cyklu jsou načteny oba operandy aritmetické-logické instrukce z registrového pole, provedeny logické operace a výsledky uloženy do registrového pole. Díky této technice procesory ATmega disponují velkým výpočetním výkonem.

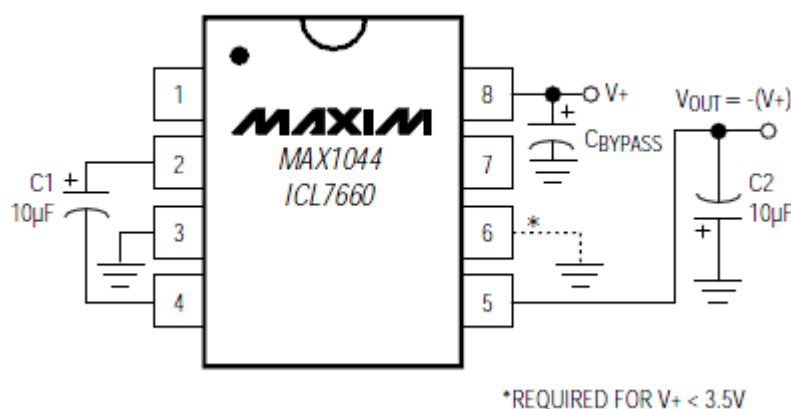


Obrázek 15 – Blokový diagram architektury AVR [4]

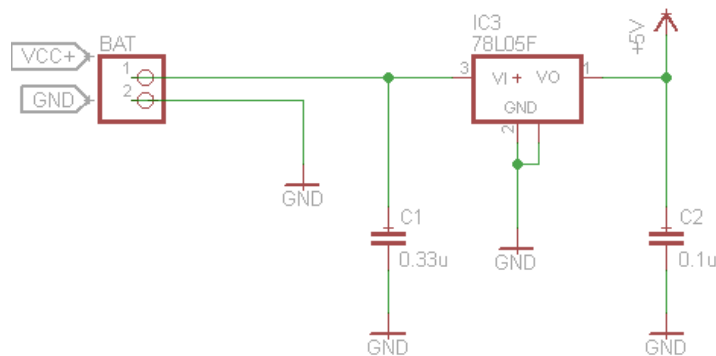
4.2 Napájení

Jako zdroj napětí je použita jedna 9V baterie. Stabilizaci napětí na hodnotu potřebnou k napájení jak analogové tak digitální části obvodu obstarává stabilizátor 78L05F. 78L05F je integrovaný třívorkový stabilizátor s pevným výstupním napětím +5V a proudem až 100mA. Stabilizátor má integrovanou proudovou, tepelnou a výkonovou ochranu. Proud vlastní spotřeby se pohybuje v jednotkách mA. Přístrojový zesilovač je však napájen symetrickým napětím $\pm 5V$. Proto bylo nutno vyřešit ještě zdroj záporného napětí -5V. Možností jak vytvořit záporné napětí je hned několik. Například použít záporný stabilizátor napětí 79L05. Tento způsob se však moc nevyužívá, protože vyžaduje použití další baterie. Nejčastěji se používá napěťových konvertorů. V našem obvodu je použit napěťový konvertor ICL7660 od firmy Maxim. Tento konvertor dokáže generovat z kladného napětí, napětí záporné. Dále umožňuje napětí zdvojit, násobit nebo dělit. Vyznačuje se vysokou účinností a nízkým klidovým proudem. Základní parametry ICL 7660:

- miniaturní μ MAX pouzdro,
- invertuje, zdvojuje, násobí nebo dělí vstupní napětí,
- 1,5 – 10V vstupní napěťový rozsah,
- typická účinnost 98%,
- klidový proud při napájení 5V: $200\mu A$. [5]



Obrázek 16 – Základní zapojení konvertoru záporného napětí [5]



Obrázek 17 – Zapojení stabilizátoru 78L05Z

4.3 Přístrojový zesilovač

Pro další zpracování je nutné výstupní signál z Wheatstonova můstku zesílit. Existuje mnoho typů zapojení sloužících k zesílení vstupního signálu. Abychom použili ten nejideálnější, musíme si nejprve ujasnit, jaké parametry od zesilovače vyžadujeme. Výstupní napětí z tenzometrického můstku je pouze v řádech mV. Tudíž hlavním kritériem pro výběr zesilovače je veliké napěťové zesílení. Dále požadujeme nízkou spotřebu, vysokou přesnost a nízký šum. Všechny požadavky splňuje zesilovač AD627N od firmy Analog Devices. Jedná se o integrovaný zesilovač s maximálním odběrem pouhých 85μA. Díky nízké spotřebě se tento typ hodí do obvodu napájeného baterií. Zesilovač může být napájen jak v režimu dual supply tak i v režimu single supply a to v širokém rozsahu vstupního napájecího napětí 2,2V až ±18V. Zesílení se nastavuje externím odporem R_G . Bez zapojeného rezistoru je zesilovač nakonfigurován na zesílení 5. S použitím rezistoru se dá nastavit zesílení až 1000. Výrobce pro výpočet napěťového zesílení G udává vztah:

$$G = +5 + \frac{200k\Omega}{R_G} \quad (4.1)$$

Nyní můžeme přejít k výpočtu hodnoty odporu R_G pro naši aplikaci. Součinitel deformační citlivosti K_p je 2,06 a ϵ je 1243μstrain. Po dosazení do vzorce 3.8 dostáváme vztah výstupního napětí můstku:

$$\Delta U_o = \frac{2,06}{4} \cdot [1243 - 0 + 1243 - 0.5] = 6,401mV = 6,401 \cdot 10^{-3}V$$

Zisk zesilovače G následně spočítáme jako:

$$G = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_o} = \frac{5}{6,401 \cdot 10^{-3}} = 781 \quad (4.2)$$

kde ΔU_{out} - rozdíl vstupního napětí a země

ΔU_o - rozdíl napětí mezi invertujícím a neinvertujícím vstupem zesilovače

po úpravě vzorce 4.1 se odpor R_G vyjádří jako:

$$R_G = \frac{200k\Omega}{G - 5} = \frac{200000}{781 - 5} = 257,1\Omega \quad (4.3)$$

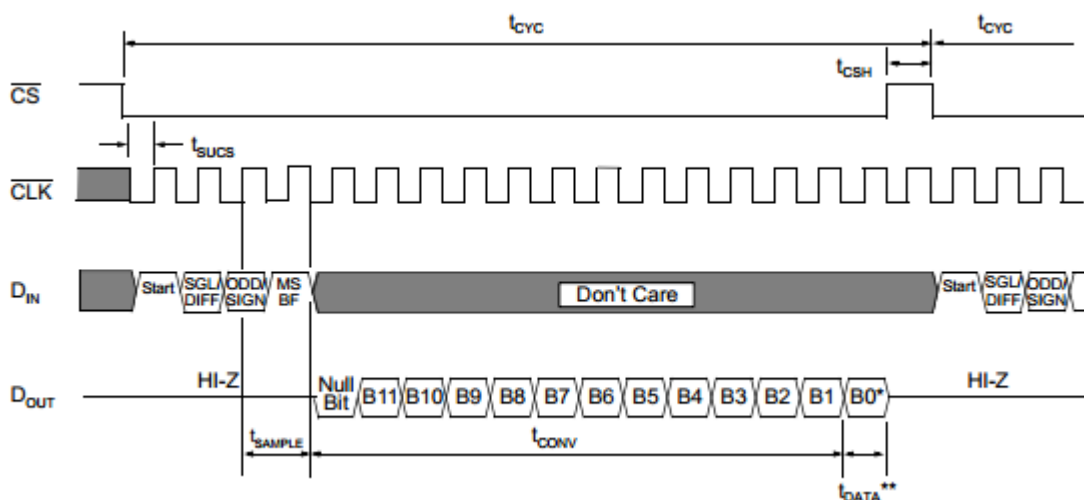
[6]

4.4 A/D převodník

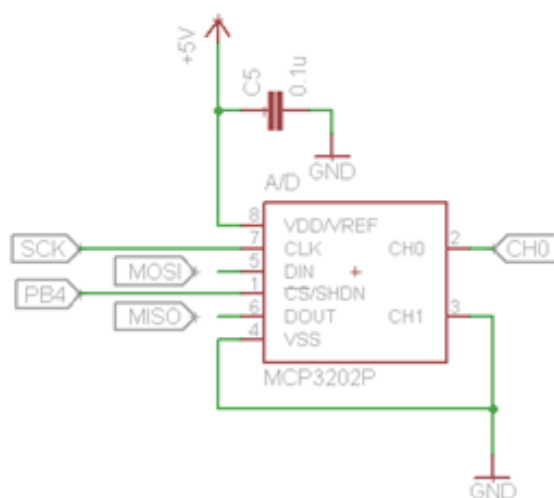
Analogový zesílený signál z operačního zesilovače musí být pro další zpracování převeden do číslicové podoby. To je zajištěno Analogově-digitálním převodníkem. Na volbě správného A/D převodníku závisí přesnost celého měření. V současné době je na trhu nepřeberné množství A/D převodníků s rozlišením až 31bitů.

Pro aplikaci byl zvolen A/D převodník MCP3202 od firmy Microchip. Jedná se o 12 bitový dvoukanálový převodník s postupnou aproximací. 12 bitům odpovídá 4096 napětíových úrovní. Při referenčním napětí 5V je maximální změřitelná hodnota napětí 1,22mV. Komunikace probíhá pomocí sběrnice SPI. Rychlost převodu je až 100 kbps při napájení 5V. Výrobce udává přesnost ± 1 LSB. Rozsah napájecího napětí je 2,7 – 5,5V. Proud v pohotovostním režimu je pouhých 500nA, v aktivním režimu 375 μ A. Proto je ideální pro aplikace napájené baterií. Jako referenční napětí se u tohoto typu převodníku používá napětí napájecí. Pokud je využíván pouze jeden kanál, druhý se musí uzemnit.

Piny CH1 a CH0 jsou analogové vstupy pro kanály 0 a 1. Mohou se naprogramovat jako dva nezávislé vstupy, nebo jako jeden pseudo-diferenciální vstup, kde jeden kanál je IN+ a druhý je IN-. Pin CS slouží k navázání komunikace s přístrojem. Po dobu převodu je tento pin v nízké úrovni. Když převod skončí, pin se přepne do vysoké úrovně. Mezi převody musí mít vysokou úroveň. Pin D_{IN} slouží ke konfiguraci vstupního kanálu. Na pinu D_{OUT} je výsledná binární hodnota.[7]



Obrázek 18 - Komunikace s MCP3202 [7]



Obrázek 19 – Zapojení A/D převodníku MCP3202

4.5 Paměť

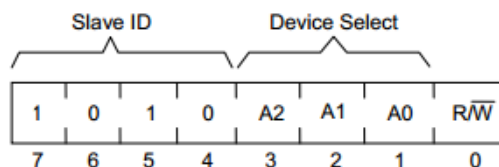
Výsledná data z měření se potřebují někam ukládat. K tomu slouží paměť FM24W256 od firmy Ramtron. Jedná se o 256Kb nonvolatilní paměť typu FRAM. FM24W256 je paměť s dvouvodičovým sériovým rozhraním. Uspořádání paměti je 32,768 x 8 bitů. Vyznačuje se vysokou životností až 10^{14} čtení/zápisů a až 38 roků uchování dat. Dále vyniká nízkou provozní spotřebou 100µA aktivní proud a 15µA pohotovostní proud. Napájecí napětí je 2,7V – 5,5V.

Technologie FRAM paměti je založena na využití feroelektrických krystalů, přesněji jejich zbytkové polarizace. Tato technologie nabízí stejné vlastnosti jako paměti typu RAM (tzn. rychlý zápis, čtení, nízká spotřeba) a přitom je permanentní jako paměť ROM. Jedná se tedy o stálou RAM paměť. Hlavní výhodou oproti paměti EEPROM je vysoká rychlost a častější zápis do paměti. Další podstatnou výhodou je, že FRAM dokáže vykonávat funkce ROM, RAM a EEPROM dohromady, tudíž šetří místo, energii a v neposlední řadě i náklady. Díky všem těmto vlastnostem nachází paměti FRAM využití v široké škále aplikací.

Jak už je zmíněno výše, paměť komunikuje s mikroprocesorem pomocí sběrnice TWI. Tato sběrnice je realizována dvěma vodiči SCL a SDA. Vodič SCL obstarává hodinový signál. Vodič SDA obstarává obousměrný přenos dat. Další piny jsou A0, A1, A2, WP, VCC a GND. Piny A0 až A2 slouží k výběru 1 z 8 zařízení na sběrnici. Chceme-li vybrat požadované zařízení, musí se hodnota na pinech A0 až A3 shodovat s odpovídajícími bity v adrese slavu. Pokud je na sběrnici pouze jedno zařízení, piny se připojí na zem. Pin WP slouží k ochraně proti zápisu. Když je pin WP připojen na napájení, je paměť chráněna proti zápisu. Připojením pinu na zem je paměť uvolněna pro zápis.

Datový přenos začíná vždy Start bitem. Následuje 7 bitová adresa zařízení, s kterým chceme komunikovat. První 4 bity jsou pevné. Dalšími 3 bity se vybere 1 z maximálně 8 zařízení, které jsou připojeny ke sběrnici. Poslední bit určuje, zda se bude ze zařízení číst nebo do něj

zapisovat. V případě nastavení bitu R/W do stavu log. 1, bude se z paměti číst. Jestliže bude bit nastaven do log. 0, bude se do paměti zapisovat.[8]



Obrázek 20 - Adresace zařízení [8]

4.6 Rozhraní USART

USART neboli Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter je vysoce flexibilní sériové komunikační zařízení, umožňující oboustrannou komunikaci mikrokontroléru se svým okolím. Komunikace může být jak synchronní tak asynchronní. Mezi další vlastnosti patří například vysoká přenosová rychlost, podpora přenosového rámce s 1 startbitem, 5 – 9 datovými bity a 1-2 stopbity, detekce chyby rámce, výběr a kontrola paritního bitu, možnost multiprocesorové komunikace a mnoho dalších.

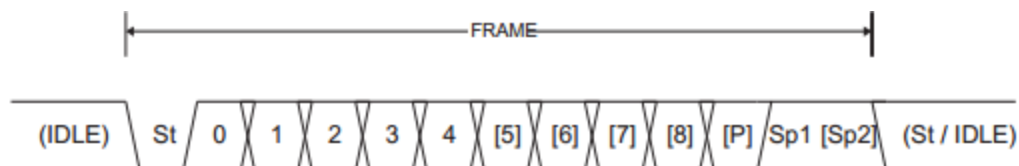
Blokové schéma jednotky USART se skládá ze tří hlavních částí. Generátoru hodin, vysílače a přijímače. Tyto části jsou propojeny datovou sběrnicí. Generátor hodin obsahuje synchronizační logiku, která generuje synchronizační impulzy. Vysílač se skládá ze zapisovací vyrovnávací paměti, sériového posuvného registru, generátoru parity a logiky pro obsluhu různých datových rámců. Zapisovací vyrovnávací paměť zajišťuje, aby nedocházelo ke zpoždění přenosu dat mezi rámci. Poslední částí je přijímač. Přijímač je nejsložitější částí modulu USART, protože obsahuje bloky pro obnovu hodin a dat, které se využívají pro příjem asynchronních dat. Přijímač musí podporovat stejné formáty rámce jako vysílač. Dále přijímač obsahuje posuvný registr, dvouúrovňovou přijímací vyrovnávací paměť a bloky na detekci chyby rámce, ztrátu znaku, kontrolu parity a chybu parity.

Jednotka USART může komunikovat ve čtyřech základních režimech:

- asynchronní režim,
- asynchronní režim s dvojnásobnou rychlostí,
- synchronní – master,
- synchronní – slave.

Synchronní nebo asynchronní režim se volí bitem UMSEL z registru UCSRC. Pro synchronní režim se bit nastavuje do log 1, pro asynchronní režim se bit nastavuje do log 0. U asynchronního režimu je možnost nastavení dvojnásobné rychlosti. To se provádí bitem U2X z registru UCSRA.

U asynchronního režimu jsou ke komunikaci použity dva vodiče RXD a TXD, které obstarávají vysílání a příjem dat. Hodinový signál se na rozdíl od synchronního přenosu nevysílá. Data mohou být posílána v libovolném okamžiku pomocí přesně dané rámcové struktury. Přenos je zahájen startbitem (log 0), následuje 5 až 9 datových bitů. Počínaje LSB a končící MSB. Dále může následovat volitelný sudý nebo lichý paritní bit, kterým se zajišťuje ochrana dat. Celý rámec končí 1 až 2 stopbity (log 1). Po odvysílání celého datového rámce může hned začít přenos dalšího rámce. Sudý paritní bit se vypočte tak, že se provede exkluzivní součet (EXOR) datových bitů. Při liché paritě se výsledek zneguje.[9]



Obrázek 21 – možnosti formátu datového rámce [4]

Aby komunikace mezi vysílačem a přijímačem proběhla v pořádku, musí být jak na vysílací, tak na přijímací straně nastaven shodný typ datového rámce. Dále se musí zajistit shodná přenosová rychlost jak vysílače, tak i přijímače. Přenosové rychlosti se nastavují v pevně daných hodnotách typicky od 2400 do 250 kbps. Pro nastavení slouží registry UBRRH a UBBRL. Hodnota registrů pro požadovanou přenosovou rychlost se vypočítá pomocí vzorce udávaného výrobcem, popřípadě hodnotu zjistíme z tabulek uvedených v dokumentaci mikroprocesoru. Hodnota UBRR může být v rozsahu hodnot od 0 do 4095. Pro asynchronní režim s dvojnásobnou rychlostí platí následující vzorec:

$$UBRR = \frac{f_{osc}}{8 \cdot f_{br}} - 1 \text{ [Baud]}$$

4.7 Rozhraní JTAG

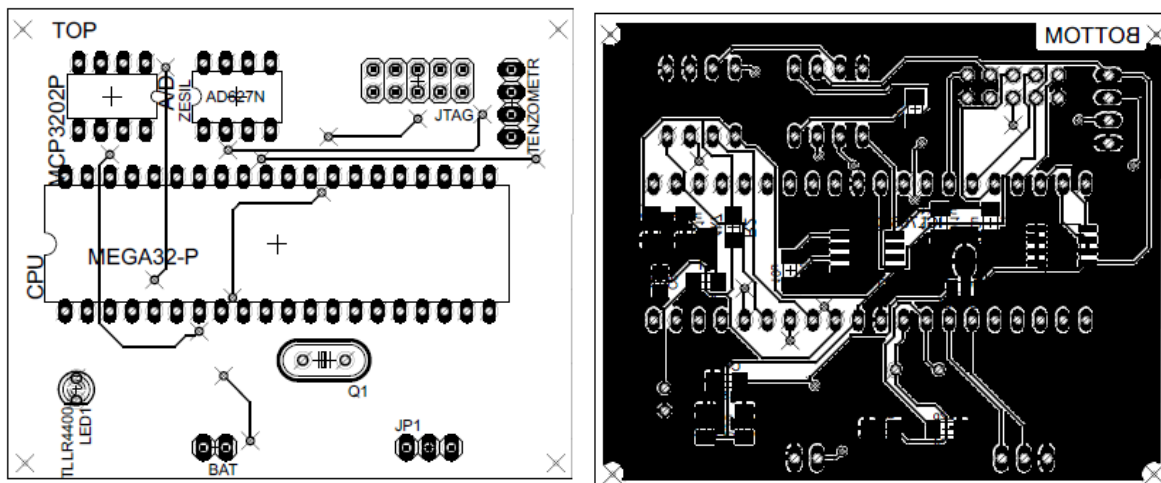
Mikrokontroléry ATmega obsahují rozhraní JTAG, které odpovídá standardu IEEE 1149.1. Hlavními vlastnostmi tohoto rozhraní jsou programování Flash, EEPROM, propojek a zámků přes JTAG rozhraní, ladění přímo na čipu podporované prostředím AVR Studio, boundary-scan, dále zajištění přístupu pro debugger a to pro všechny periferní jednotky, vnitřní a vnější RAM, registrové pole, programový čítač, Flash a EEPROM.

Technikou Boundary-scan je možné sledovat nebo nastavovat logické úrovně na digitálních vstupech nebo výstupech součástky. Z toho vyplývá možnost testovat program hardwarově bez nutnosti speciálních periférií. K testování stačí pouze ladící prostředí.[9]

4.8 Stavba desky plošného spoje

Při návrhu plošného spoje jsme se nemuseli omezovat žádnými rozměry, protože měřicí zařízení není součástí modelu rakety. Při měření je pevně upevněno k startovací plošině. Samozřejmě výroba menší desky je levnější a také se zde méně projevují parazitní vlastnosti. Jelikož navrhované schéma není příliš složité, je plošný spoj navrhnout jako jednovrstvý

s využitím několika prokovek. To také značně sníží celkové náklady na výrobu. V zapojení jsou využity jak SMD, tak i klasické součástky.



Obrázek 22 - Deska plošného spoje

5 Softwarové řešení

5.1 Možnosti programování

Použitý mikrokontroler ATmega32 umožňuje několik způsobů programování. První možností je paralelní programování. Tento způsob je však komplikovaný, protože se musí mikrokontroler programovat v programátoru. Další možností je sériový download pomocí SPI sběrnice. Výhodou tohoto programování je snadná ovladatelnost, dále umožňuje programovat mikrokontroler přímo v aplikaci. Poslední možností je programování přes rozhraní JTAG. Toto rozhraní poskytuje programátorovi možnost ladit aplikaci přímo na desce. Pro aplikaci byl zvolen právě tento typ programování.

K vývoji firmware pro mikrokontroler bylo použito vývojového prostředí Atmel studio 6. Tento software byl vyvinut firmou Atmel a slouží k programování procesorů AVR. Nabízí možnost vývoje aplikace v kódu C/C++, nebo v assembler kódu. Program pro mikrokontroler je napsán v jazyce C. Jedná se o nízkoúrovňový jazyk překlada kódu z jazyka C je potřeba použít některý z kompilátorů. V aplikaci je k překladač použít kompilátor GCC, který již je součástí Atmel studia 6.

5.2 Popis softwaru

Data z přístrojového zesilovače jsou v analogové podobě, proto je nutnost je nejdříve poslat na A/D převodník, který signál převede do digitální podoby. Následně data, které mikrokontroler získá od A/D převodníku, ukládá do externí paměti typu FRAM. Po připojení k PC se data z FRAM paměti odesílají přes rozhraní USART do PC.

A/D převodník komunikuje s mikrokontrolerem pomocí sběrnice SPI. Nejdříve se musí SPI sběrnice nastavit. Registr DDRB obsahuje volbu vstupních a výstupních pinů. Dále se přes registr SPCR, bit SPE aktivuje SPI kanál a přes bit MSTR se konfiguruje mikrokontroler jako master. Pomocí registru SPCR se nastavuje také přenosová rychlost. Pro A/D převodník MCP3202-CI/P udává výrobce maximální frekvenci sběrnice 1,8MHz, takže v aplikaci je kmitočet dělen 16, což zajišťuje dostatečnou frekvenci 1MHz. Následně je vytvořena funkce na vysílání dat po sběrnici. Data se zapisují do datového registru SPDR. Zápis probíhá do té doby, než se nastaví příznak konce přenosu (bit SPIF v registru SPSR).

Data z A/D převodníku se přes sběrnici TWI ukládají do externí paměti typu FRAM. Všechny potřebné funkce pro komunikaci po sběrnici TWI jsou v samostatném souboru twitwi.c. Zde je funkce pro inicializaci, zjištění jestli je jednotka zaneprázdněna, zápis a čtení ze sběrnice.

Záznam měření začíná po připojení napájení, nebo rozepnutím kontaktu reset. Celý program běží v nekonečné smyčce, kde se vyhodnocuje podmínka vzorkování. Doba vzorkování byla zvolena 10ms. Aby se dosáhlo požadovaného vzorkování, je v čítači nastavena spodní hranice, od které po požadovaných 10ms čítač indukuje přetečení, které následně spustí A/D převod a opět nastaví do čítače spodní hranici. Při splnění této podmínky se pošle START bit, kterým spustíme generování dat na výstupu A/D převodníku. Dále je vytvořen zásobník, do kterého se ukládají data, které se mají zaslat (popřípadě číst) do (z) externí paměti FRAM. Při zápisu se vloží do prvních dvou adres a do dalších zasílaná data z A/D převodníku. Při čtení z paměti se nejprve musí provést zápis adresy a až potom samotné čtení. Komunikace

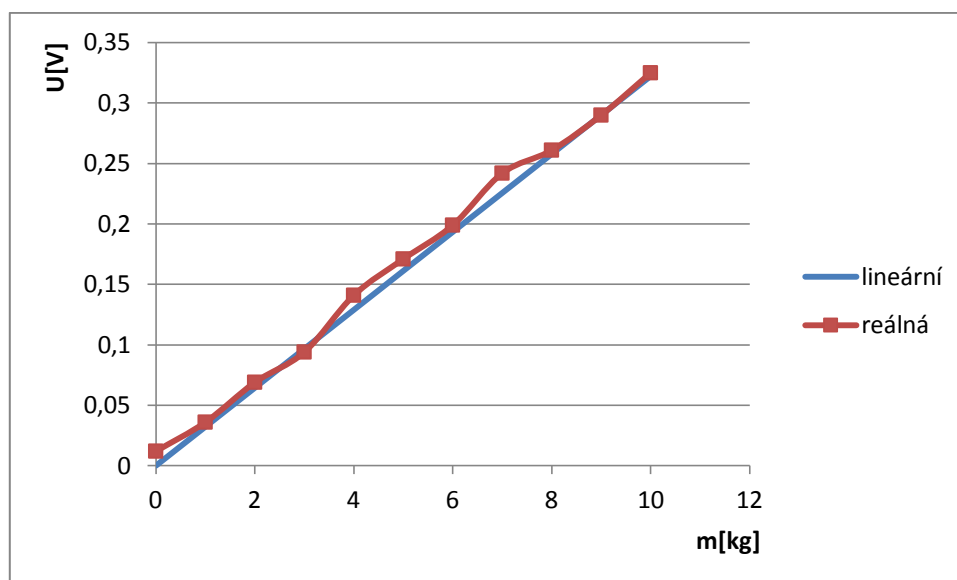
s paměti začíná vygenerováním START bitu. Dále následuje kontrolní byte, který má výrobcem dané první čtyři bity (1010). Další tři bity slouží k výběru až ze 128 slave jednotek. Jelikož v aplikaci je na TWI sběrnici pouze jediná jednotka, budou tyto bity 000. Poslední bit určuje, jestli se bude z paměti číst nebo se na ni zapisovat. Po přenosu 8 bitů vyše paměť ACK bit, který informuje o úspěšném přenosu. V dalších dvou bytech je uvedena adresa v paměti. Poslední dva byty obsahují data z A/D převodníku. V programu jsou tyto 4 byty řešeny pomocí zásobníku, do kterého se ukládají data, které se mají zaslat (popřípadě číst) do (z) externí paměti FRAM. Při zápisu se vloží do prvních dvou adresa a do dalších dvou zasílaná data z A/D převodníku. Při čtení z paměti se nejprve musí provést zápis adresy a až potom samotné čtení. Konec ukládání nastane STOP bitem.

V poslední části programu je řešena komunikace s PC pomocí jednoty USART. Před samotným vysláním musí být jednotka USART inicializována. Proces inicializace spočívá v nastavení přenosové rychlosti, formátu rámce a povolení vysílače a přijímače. Komunikace probíhá přenosovou rychlostí 19200 baudů. Vysílač se povoluje nastavením bitu TXEN v registru UCSRB. Přenos dat je zahájen vložením vysílaných dat do vysílacího zásobníku. Operace je provedena zápisem do registru UDR. Přijímač se povoluje nastavením bitu RXEN z registru UCSRB. Před příjmem dat musí být nastavena přenosová rychlost, režim provozu a formát rámce.

V mainu se vyhodnocují znaky přijaté jednotkou USART a pomocí příkazu switch se provádí jednotlivé operace. Na výběr je ze třech možností. Data můžeme přijmout, můžeme vymazat paměť anebo můžeme zapnout (vypnout) záznam. Tato možnost je pro měření tahu zbytečná a v praxi nemá žádný význam, je v programu pouze jako zpestření.

6 Naměřené výsledky

K tomu abychom zjistili, jaká změna napětí odpovídá změně působící síly (například o 1N) se provádí kalibrace. Protože jsem byl omezen domácími podmínkami, byla kalibrace provedena jednoduchým, ale ne moc přesným způsobem. Na deformační člen se umístilo rameno, na které se postupně přidávalo závaží. Výsledky jsou uvedeny na obrázku 23. Přepočítání na sílu je velice jednoduché. Uvažujeme – li průměrné gravitační zrychlení na povrchu Země $9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, stačí násobit hmotnost tímto gravitačním zrychlením a dostaneme působící sílu. Hmotnost 10kg odpovídá síle 98N. Z toho vyplývá, že změně síly o 1N, odpovídá změna napětí o 3,32mV. Při 12 bitovém A/D převodníku odpovídá jedna hladina 1,22mV. Z toho vyplývá, že zařízení dokáže zaznamenat změnu tahu o 0,37N. Proto se zařízení příliš nehodí pro měření slabších motorů s maximálním tahem desítek N.



Obrázek 23 – Křivka kalibrace zařízení

7 Závěr

Podářilo se zkonstruovat zařizení schopné měřit tah modelářského raketového motoru. Bohužel se nepodařilo zařizení vyzkoušet v praxi, protože v dnešní době jsou motoroky nedostatkovým zbožím a míst, kde motor kontrolovaně vyzkoušet je málo.

Během tvorby zařizení jsem narazil hned na několik problémů, které bych již řešil jinak. Největší nedostatky vidím při návrhu desky plošného spoje, kde jsem zvolil nevhodné umístění blokovacích kondenzátorů a musel jsem je předělat. Dále jsem musel přidat pull up rezistory. Špatným rozmístěním součástek jsem také vedl zbytečně dlouhé analogové spoje, čímž se značně zvyšuje riziko rušení.

Nevýhodou zařizení je, že je použitelné pouze se snímačem, pro který bylo zařizení navrhováno. Kdybychom chtěli zařizení použít i pro jiný snímač, muselo by se provést nové nastavení zesílení zesilovače a to výměnou rezistoru R_G .

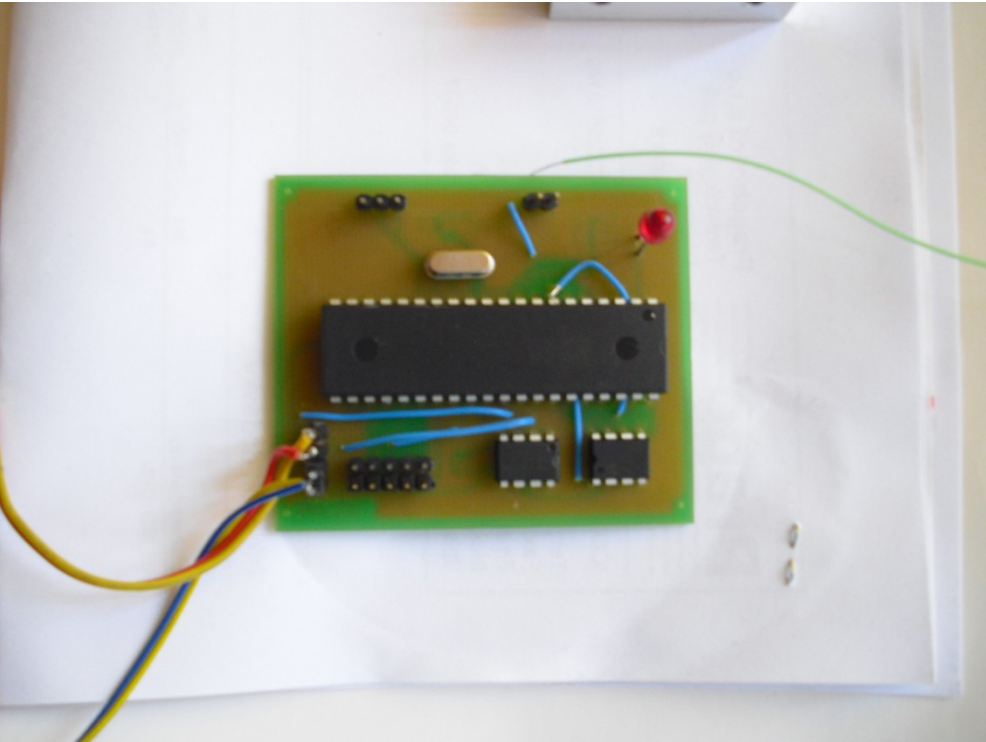
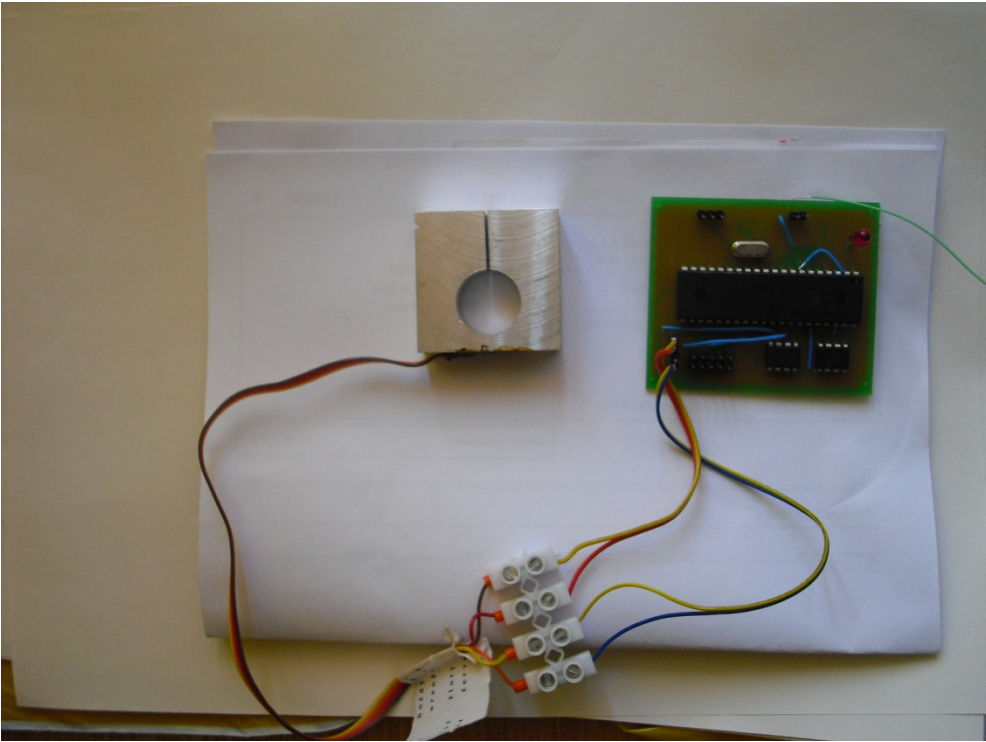
Dále by šlo ještě lépe vyřešit spouštění a ukončení záznamu dat. Například by se mohla vyhodnocovat změna dvou po sobě jdoucích vzorků o hodnotu x , která by byla definovaná jako konstanta. Změna by musela být v několika měřeních za sebou, aby nedošlo k spuštění záznamu rušivými vlivy. Konec záznamu by mohl například nastat při poklesu na klidovou hodnotu zaznamenanou při začátku záznamu.

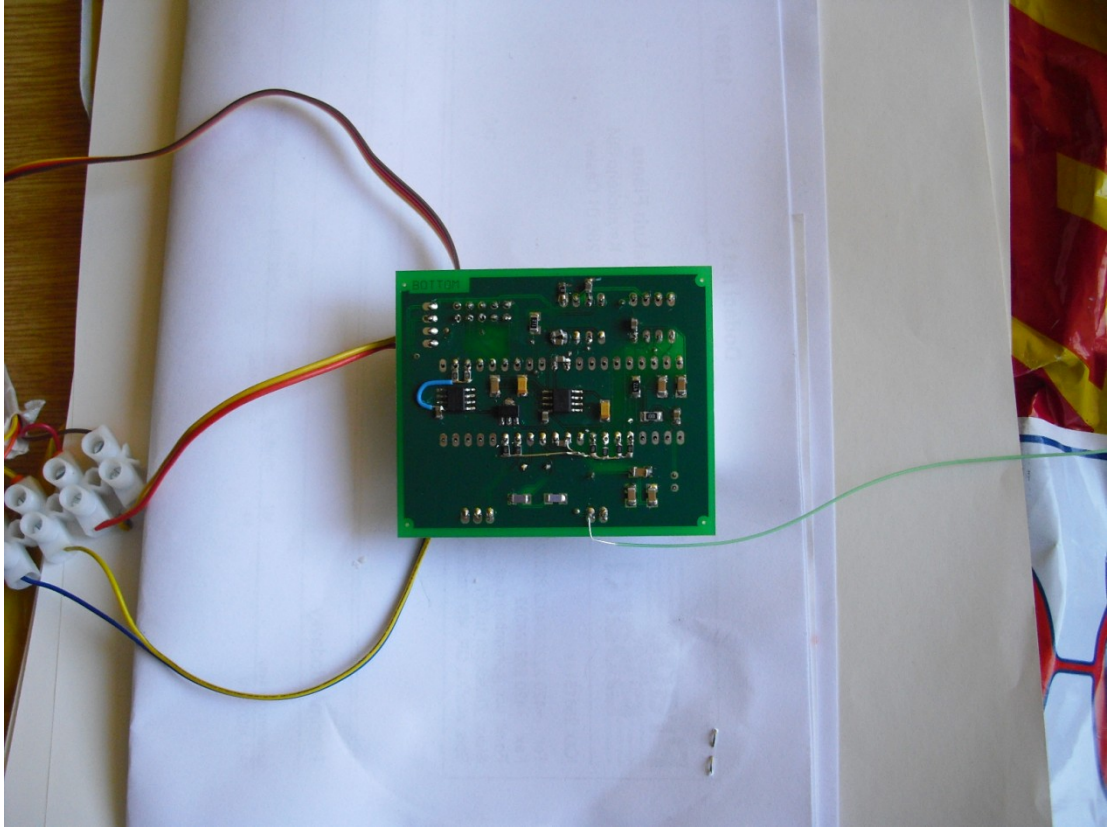
I přes veškeré popsané problémy naměřené výsledky kalibrace vycházejí podle předpokladů, takže i samotné měření by mělo proběhnout bez problémů.

Literatura

- [1] **Raketové motory.** Praha 5 - Smíchov, Holečkova 5: Modela, 1985.
- [2] **Raketove_modely.** *Raketove_modely* [online]. 2.09.2011 [cit. 2012-06-11]. Dostupné z: <http://raketove.modely.sweb.cz/>
- [3] **JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF.** *Technická měření.* Vyd. 1. Praha: ČVUT, Strojní fakulta, 2000, 212 s. ISBN 80-010-2138-6.
- [4] **ATMEL.** *Datasheet AVR ATmega32* [online]. 2011 [cit. 2012-07-03]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2503.pdf>
- [5] **MAXIM.** *Datasheet Maxim ICL 7660* [online]. 1994 [cit. 2012-07-11]. Dostupné z: <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/ICL7660-MAX1044.pdf>
- [6] **ANALOG DEVICES.** *Datasheet AD627* [online]. 2007 [cit. 2012-07-12]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD627.pdf
- [7] **MICROCHIP.** *Datasheet MCP3202* [online]. 2006 [cit. 2012-07-12]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21034D.pdf>
- [8] **RAMTRON.** *Datasheet FM24W256* [online]. 2012 [cit. 2012-07-13]. Dostupné z: http://www.ramtron.com/files/datasheets/FM24W256_ds.pdf
- [9] **MATOUŠEK, David.** *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR: [měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků].* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 319 s. ISBN 80-730-0174-8.

Příloha A – Obrázek osazené desky plošného se snímačem





Příloha B – Zdrojový kód souboru bakalarka.c

```
// cpu: ATmega32
// crystal: 16 mhz

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <util/twi.h>
#include "twitwi.h"
#include <util/delay.h>

#define Adres_RAM 0b10100000 //Nastavuje se na obvodě připojením pinů A0,A1 a A2
#define TWI_FREQ 100000 //frekvence sběrnice TWI
#define LENFRAM 32768 //velikost FRAM v bytech
#define MOSI PB5
#define MISO PB6
#define SCK PB7
#define SS PB4

typedef unsigned char Bool;
#define FALSE 0
#define TRUE 1

//*****
// *** Globální proměnné ***
//*****
volatile uint8_t adcStart;

// -----
// --- SPI ---
// -----
unsigned char SPI_write(unsigned char data)
{
    SPDR = data; //pošli data
    while(!(SPSR & (1<<SPIF))); //počkej dokud se neodešlou
    data = SPDR; // a poté nači přijatá
    return(data);
}

//*****
// *** Timer0 ***
//*****
void Timer0_Init(void)
{
    // Timer0 settings: ~f=15625Hz => 1 tick(64us) 157 ticks (10048 us / 10,048 ms /
    0,01048sec)
    TCCR0 = (1<<CS02) | (1<<CS00); // CLK/1024, nastavení předdelický CLK
    TIMSK = (1 << TOIE0); // Timer/Counter0 Overflow Interrupt Enable
    TCNT0 = 100; //256-157+1, nastavení spodní hranice v citaci => citac indikuje
    preruseni po 10ms(vola fci ISR) => spusti se cteni z A/D
}

ISR (TIMER0_OVF_vect)
{
    TCNT0 = 100; //pri preruseni se vlozi do TCNT0 = 100
    adcStart = TRUE;
}

//*****
// *** USART0 ***
```

```

//*****

void USART0_Transmit(unsigned char data)
{
    while (!(UCSRA & (1<<UDRE))) ;           //čkej, dokud se neuvolní UART
    UDR = data;                               //pošli data
}

unsigned char USART0_Receive(void)//vysilani
{
    while (!(UCSRA & (1<<RXC))) ;           //čkej, dokud se neuvolní UART
    return UDR;                               //přečti data
}

void USART0_Init(void)//inicializace
{
    // USART0 settings: 19200 baud 8-n-1
    // WARNING: real baud = 19230,7: err = 0,156249999999991%
    UBRRH = 0;
    UBRL = 103;
    //UCSRA = (1<<U2X);
    UCSRB = (1<<RXEN) | (1<<TXEN); //povoleni prijmaci a vysilace
    //UCSRC = (1<<URSEL) | (1<<UCSZ1) | (1<<UCSZ0);
}

//*****
// ***      Main      ***
//*****
int main (void)
{
    uint8_t SPI_BUFF[TWI_BUFFER_SIZE];      // Buffer pro výměnu dat v TWI
    uint16_t AdresInFRAM = 0;               // posice v paměti
    uint8_t pom, Sav;

    adcStart = FALSE;

    // nastavení SPI
    //F_SPI max = 1,8MHz
    DDRB |= _BV(MOSI) | _BV(SCK) | _BV(SS); // MOSI=out, SCK=out, SS=out
    DDRB &= ~_BV(MISO);                     // MISO=in
    SPCR = _BV(SPE) | _BV(MSTR) | _BV(SPR0); // speed = F_CPU/16
    SPSR = 0;

    // Inicializace TWI
    init_twi(((F_CPU / TWI_FREQ) - 16) / 2);

    // Inicializace UARTu
    USART0_Init();

    // Inicializace Timeru0
    Timer0_Init();

    while (1)
    {
        if (adcStart) //Uplynulo 10ms?
        {
            adcStart = FALSE;
            SPI_write(0b00000001);           //send START
            SPI_BUFF[2] = SPI_write(0b10100000); // send SGL, ODD, MSBF, read b11:b8
            SPI_BUFF[3] = SPI_write(0);      // read b7:0
        }
    }
}

```

```

if (AdresInFRAM >= (LENFRAM-1)) continue; //FRAM je plná
// Zápis do FRAM

//Nastavení zprávy odcházející do FRAM
SPI_BUFF[1] = (AdresInFRAM >> 8); // na posici
SPI_BUFF[0] = AdresInFRAM;
//Posice 3 a 4 již obsazena z AD převodníku

twi_start_wr(Adres_RAM, &SPI_BUFF[0], 4); // Zaslat
AdresInFRAM +=2;
}

if (UCSRA & _BV(RXC)) // Příjem z UARTU?
switch (USART0_Receive())
{
case 'R': // Byl přijat znak "R"?
//Nastavení zprávy odcházející do FRAM
Sav = TCCR0;
TCCR0 = 0; // Vypnout timer0
SPI_BUFF[1] = (AdresInFRAM >> 8); // na posici
SPI_BUFF[0] = AdresInFRAM;
twi_start_wr(Adres_RAM, &SPI_BUFF[0], 2); // Nastavíme posici ve
FRAM na 0
for (pom = 0; pom < AdresInFRAM; pom+=16)// odešle vše, co doposud nače-
tl
{
twi_start_rd(Adres_RAM, &SPI_BUFF[0], 16);//Načítáme po 16bytových
blocích
while (twi_busy()); //čekať dokud neskončí příjem
for (unsigned char a=0; a<16; a++)
USART0_Transmit(SPI_BUFF[a]); //Odeslání UARTEM
}
SPI_BUFF[1] = (AdresInFRAM >> 8); // na posici
SPI_BUFF[0] = AdresInFRAM;
twi_start_wr(Adres_RAM, &SPI_BUFF[0], 2); // Vrať se na původní
posici
TCCR0 = Sav; // Obnov funkci Timeru0
break;
case 'T': // Byl přijat znak "T"?
if (TCCR0 == 0) Timer0_Init(); // Zapni/Vypni Timer0
else TCCR0 = 0; // a tím i záznam hodnot z ADC
USART0_Transmit(TCCR0); // a ohlaš jeho stav
break;
case 'S': // Byl přijat znak "S"?
AdresInFRAM = 0; // Vynulování adresy ve FRAM
for (pom = 0; pom < (LENFRAM-1); pom+=16)
{
SPI_BUFF[0] = (pom >> 8); // na posici
SPI_BUFF[1] = pom;
for (unsigned char a=2; a<16; a++) SPI_BUFF[a] = 0; //vymazat buffer
twi_start_wr(Adres_RAM, &SPI_BUFF[0], 16);//Vymazat FRAM
}
SPI_BUFF[0] = (AdresInFRAM >> 8); // Nastav 0 (po vymazání)
SPI_BUFF[1] = AdresInFRAM;
twi_start_wr(Adres_RAM, &SPI_BUFF[0], 2);
break;
}
}
}

```