

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

TENZOMETRICKÝ MĚŘICÍ SYSTÉM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

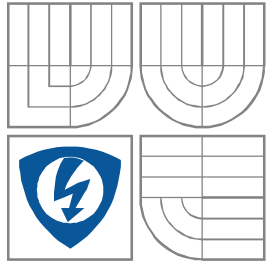
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN NOVOTNÝ

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

TENZOMETRICKÝ MĚŘICÍ SYSTÉM

STRAIN MEASUREMENT SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

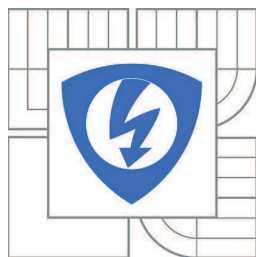
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Milan Štohanzl

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jan Novotný

ID: 134575

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Tenzometrický měřicí systém

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem převodníků mechanického napětí na elektrický odpor, měřících můstků, stejnosměrných zesilovačů a analogově-digitálního převodu. Zvolte vhodné zapojení měřícího systému včetně mikrokontroleru, pomocí kterého bude možné systém kalibrovat. Měřená hodnota bude zobrazena na LCD a zasílána do PC prostřednictvím sběrnice UART.

Realizujte navržené zapojení, vytvořte obslužný program pro mikrokontroler a sestavte podrobnou zprávu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BRTLÍK, B. Elektrická měření pro bakaláře. Praha: BEN – technická literatura, 2011.

[2] DEMLER, M. High-Speed Analog-to-Digital Conversion. London: Academic Press, Inc., 1991.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Milan Štohanzl

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na konstrukci tenzometrického měřicího systému s použitím odporových deformačních členů. Získané analogové veličiny jsou převedeny do digitální podoby a pomocí mikrokontroléru vyhodnoceny a zobrazeny. V první, teoretické části se práce zabývá vznikem různých druhů mechanického napětí, principem odporových deformačních členů, měřicími můstky, teorií analogově – digitálního převodu a stručným popisem použitého mikrokontroléru a LCD displeje. V druhé části je navrženo samotné zapojení systému včetně desek plošných spojů, který je mimo jiné možno kalibrovat a jehož výstupní data lze zasílat do PC pomocí sériové sběrnice. Následně je toto zapojení zrealizováno, je odzkoušena jeho funkčnost, ověřeny jeho vlastnosti, stručně popsáno ovládání systému a analyzovány další možnosti, jak zlepšit vlastnosti zapojení pro případné nasazení systému do praxe.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tenzometr, měření mechanického napětí, MSP430G2553, analogově-digitální převod, měřicí můstek, LCD EA DOGM162.

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the design of strain measurement system using a metal resistance strain gages. Measured analog quantity is converted to digital form and sent to microcontroller, where the quantity is adapted and then display. The first part of project looks into genesis of different types of mechanical stresses, principles of resistance strain gages, the types of measurement bridges, theory of analog-to-digital conversion and short description of used microcontroller and liquid-crystal display. There are wiring diagram of the system and printed circuit boards designed in the second part of project. System can be also calibrated and driven by PC using Universal Asynchronous Communication Interface. System is physical realized, its functions are checked and there is subscribed driving of the system. Finally other alternatives of improving properties of the system are analyzed due to possibility of using of the system in practical applications.

KEYWORDS

Strain gage, mechanical stress measurement, MSP430G2553, analog-to-digital conversion, measurement bridge, LCD EA DOGM162.

NOVOTNÝ, J. *Tenzometrický měřicí systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 59 s., 12 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Milan Štohanzl.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Tenzometrický měřicí systém jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 31. května 2013

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanu Štohanzlovi za účinnou metodickou a odbornou pomoc a především za cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 31. května 2013

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	VIII
Seznam tabulek	X
Úvod	1
1 Princip odporových tenzometrů, vznik mechanického napětí	2
1.1 Geometrická deformace vodiče	2
1.2 Vlastnosti a druhy odporových tenzometrů	3
1.3 Vznik mechanického napětí	4
1.4 Druhy deformací	5
1.4.1 Ohybové deformace	5
1.4.2 Torzní a smykové deformace	7
1.5 Měřicí můstky	9
1.5.1 Thompsonův můstek	9
1.5.2 Wheatstoneův můstek	10
1.6 Možnosti připojení odporových tenzometrických snímačů do měřicího můstku 13	
1.6.1 Systém s jedním snímačem	13
1.6.2 Systém se dvěma snímači	13
1.6.3 Systém se čtyřmi snímači	14
1.7 Analogově – digitální převod, A/D převodníky	15
1.7.1 Komparační převodníky	16
1.7.2 Kompenzační převodníky	17
1.7.3 Integrovní převodníky	19
1.7.4 Převzorkování	21
1.8 Stručný popis použitého mikrokontroléru	22
1.9 Popis použitého LCD displeje	24
2 Popis vlastní navržené konstrukce měřicího systému	27
2.1 Blokové schéma měřicího systému	27
2.2 Popis obvodového schématu měřicího systému	28
2.3 Napájení měřicího systému	29

3	Popis dosažených výsledků	36
3.1	Napájecí zdroj	36
3.2	Měřicí systém.....	37
3.2.1	Program pro mikrokontrolér	38
3.2.2	Obsluha měřicího systému.....	41
3.2.3	Stručné shrnutí vlastností systému.....	43
4	Závěr	45
	Literatura	46
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	48
	Seznam příloh	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1.1	Princip geometrické deformace vodiče (převzato z [3]).....	2
Obr. 1.2	Mechanické provedení tenzometrických snímačů: a) drátkový, b) fóliový, c) naprašovaný (obrázek převzat z [2]).....	3
Obr. 1.3	Měření ohybu jednosnímačovým systémem (obrázek převzat z [4]).	7
Obr. 1.4	Měření ohybu dvousnímačovým systémem (obrázek převzat z [4]).	7
Obr. 1.5	Vliv smykového mechanického napětí na mikroskopickou část povrchu objektu (obrázek převzat z [4]).	7
Obr. 1.6	Vznik smykového mechanického napětí γ (obrázek převzat z [4]).	8
Obr. 1.7	Měření smykového mechanického napětí (obrázek převzat z [4]).	9
Obr. 1.8	Thompsonův můstek pro měření malých odporů (obrázek převzat z [2])...	10
Obr. 1.9	Wheatstoneův můstek (obrázek převzat z [2]).....	10
Obr. 1.10	Nevyvážený Wheatstoneův můstek pro vyhodnocení změn odporu odporových snímačů (obrázek převzat z [2]).....	12
Obr. 1.11	Linearizace Wheatstoneova můstku pomocí operačního zesilovače (obrázek převzat z [1]).	12
Obr. 1.12	Způsoby připojení jednoho snímače k měřicímu můstku – a) dvěma vodiči, b) třemi vodiči (obrázek převzat z [3]).	13
Obr. 1.13	Možná provedení měřicího můstku se dvěma snímači – a) konfigurace aktivní – kompenzační snímač, b) konfigurace aktivní – aktivní snímač (obrázek převzat z [3]).	14
Obr. 1.14	Plný tenzometrický můstek (obrázek převzat z [3]).	14
Obr. 1.15	Princip kvantování v úrovních (obrázek převzat z [1]).	15
Obr. 1.16	Osmibitový A/D převodník s paralelní komparací (obrázek převzat z [1]).	16
Obr. 1.17	Blokové schéma 8-bitového A/D převodníku s postupnou komparací (obrázek převzat z [1]).	17
Obr. 1.18	Základní princip kompenzačního čítecího A/D převodníku (obrázek převzat z [1]).	17
Obr. 1.19	Princip A/D převodníku s postupnou aproximací (obrázek převzat z [1]).	18
Obr. 1.20	Výstup interního D/A převodníku při $U_{vst.} = 6,92 \text{ V}$ a $U_{REF} = 10 \text{ V}$ (obrázek převzat z [7]).	18
Obr. 1.21	Integrační A/D převodník s mezipřevodem na kmitočet (obrázek převzat z [1]).	19
Obr. 1.22	Integrační A/D převodník s dvoutaktní integrací (obrázek převzat z [1])...	20

Obr. 1.23	Průběh napětí na integrátoru A/D převodníku s dvoutaktní integrací pro dvě různá měřená napětí ($u_{i2} < u'_{i2}$) (obrázek převzat z [1]).	20
Obr. 1.24	Blokové schéma sigma – delta převodníku (obrázek převzat z [1]).	21
Obr. 1.25	Pouzdro mikrokontroléru MSP430G2553 s popisem funkcí jednotlivých vývodů (obrázek převzat z [9]).	23
Obr. 1.26	Funkční blokové schéma mikrokontroléru MSP430G2553 (obrázek převzat z [9]). Poznámka: port P3 je dostupný jen u pouzder s 28 nebo 32 piny.	24
Obr. 1.27	LCD displej Electronic Assembly EA DOGM162L-A (obrázek převzat z [11]).	24
Obr. 1.28	Zapojení displeje pro napájecí napětí 3,3 V a komunikaci pomocí rozhraní SPI (obrázek převzat z [11]).	25
Obr. 1.29	Ukázka časového diagramu SPI komunikace-impulzy SAMPLE udávají okamžik vzorkování datových signálů, v tomto okamžiku musí být data ustálena (obrázek převzat z [12]).	26
Obr. 2.1	Blokové schéma tenzometrického měřicího systému.	27
Obr. 2.2	Zapojení integrovaného obvodu MAX3232 (obrázek převzat z [13]).	29
Obr. 2.3	Blokové schéma zapojení napájecího zdroje pro tenzometrický měřicí systém.	30
Obr. 2.4	Pouzdro TO-220-5 pro stabilizátor TL2575HV s označením funkce vývodů (obrázek převzat z [14]).	30
Obr. 2.5	Typické zapojení spínaného stabilizátoru TL2575HV-12 (obrázek převzat z [14]).	30
Obr. 2.6	Graf pro výběr indukčnosti cívky (převzato ze [14]).	31
Obr. 2.7	Typické zapojení spínaného stabilizátoru TL2594N-3.3 (obrázek převzat z [15]).	33
Obr. 2.8	Zapojení Čukova měniče pro vytvoření záporného napájecího napětí.	33
Obr. 2.9	Zapojení invertujícího měniče s integrovaným obvodem MC34063 (obrázek převzat z [18]).	34
Obr. 3.1	Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér.	38
Obr. 3.2	Průběhy signálů na výstupu inkrementálního spínače.	40
Obr. 3.3	Pořadí přepínání jednotlivých menu.	41
Obr. 3.4	Inkrementální spínač.	41
Obr. 3.5	Závislost výstupního napětí analogové části měřicího systému na změně odporu snímače.	44
Obr. 3.6	Závislost zobrazovaného kroutícího momentu na změně odporu snímače.	45

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1	Mechanické vlastnosti hlavních průmyslových materiálů (převzato z [4])... 4
Tab. 1.2	Typické rovnice získaného kroutícího momentu (převzato z [4])..... 5
Tab. 1.3	Typické rovnice sekčního modulu (převzato z [4]). 6
Tab. 3.1	Ovládací příkazy měřicího systému..... 42
Tab. 3.2	Tabulka závislosti výstupního napětí analogové části měřicího systému a zobrazovaného kroutícího momentu na změně odporu snímače. 44
Tab. 3.3	Zjištěné vlastnosti systému a veličiny měřené v některých jeho částech. ... 44

ÚVOD

Tenzometry jsou senzory sloužící k nepřímému měření mechanického napětí s využitím jeho závislosti na deformaci.

Tenzometrické snímače mohou být, podobně jako mnoho jiných snímačů fyzikálních veličin, založeny na různých fyzikálních principech. Nejčastěji se můžeme v praxi setkat s těmito druhy tenzometrů [5]:

- A) Kapacitní tenzometry – založeny na změně šířky vzduchové mezery mezi dvěma elektrodami kapacitního snímače vlivem prodlužování (zkracování) objektu. Mohou pracovat v širokém teplotním rozsahu od kryogenních až po vysoké teploty do 800 °C. Správná funkce však záleží na kompenzaci chyb vznikajících teplotní dilatací.
- B) Rezonanční (strunové) tenzometry – základem je závislost vlastní frekvence struny na síle napínající strunu určité délky ve směru její osy. Struna se rozkmitává pomocí budicí cívky, ve snímací cívce se vlivem kmitů struny indukuje napětí, které je zesíleno a přivedeno na budicí cívku. Vzniká elektromechanický oscilátor kmitající na rezonanční frekvenci určené měřeným mechanickým napětím. Výhodou je snadný převod výstupní veličiny – frekvence – do číslicové podoby čítačem. Tyto tenzometry se používají pro měření mechanického napětí velkých objektů, např. přehradních zdí a mostů.
- C) Senzory s metastabilními magnetickými slitinami – některé slitiny ocele mění vlivem mechanického napětí svou krystalickou strukturu na kubickou a stávají se tak feromagnetickými. Tyto změny jsou nevratné, takže tyto senzory se používají jako jakési paměti maximální hodnoty mechanického napětí v kritickém místě konstrukce. Vyhodnocení se provádí pomocí budicího permanentního magnetu a Hallovy sondy.
- D) Odporové tenzometry – založeny na geometrických deformacích vodiče, které mění jeho délku a plochu průřezu, a tudíž i jeho odpor. Tato práce se nadále zabývá pouze tímto typem senzorů.

1 PRINCIP ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ, VZNIK MECHANICKÉHO NAPĚTÍ

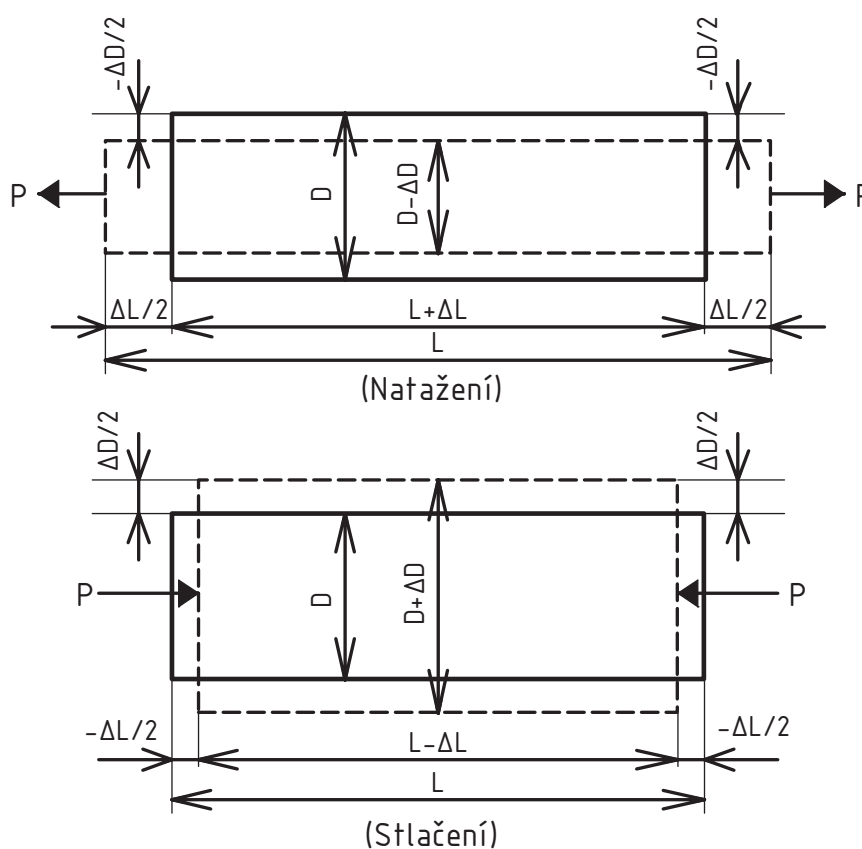
V následující kapitole je popsán princip změny odporu tenzometru vlivem deformací, vznik mechanického napětí v objektech a jeho druhy a též možnosti připojení samotného tenzometru do měřicích obvodu a vyhodnocení změn jeho odporu.

1.1 Geometrická deformace vodiče

Princip geometrické deformace vodiče je na obrázku 1.1 a spočívá v tom, že vlivem tlakové (tahové) síly ve směru osy vodiče se délka vodiče l zmenší (zvětší) o rozdíl Δl , zatímco průměr vodiče D se zvětší (zmenší) o hodnotu ΔD . Tím se změní i odpor vodiče, který je dán vztahem:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad [\Omega; \Omega \cdot \text{m}, \text{m}, \text{m}^2] \quad (1.1)$$

Mění se tedy délka vodiče l a průřez vodiče S .



Obr. 1.1.1 Princip geometrické deformace vodiče (převzato z [3]).

1.2 Vlastnosti a druhy odporových tenzometrů

Důležitým parametrem odporových tenzometrů je tenzometrická konstanta K , která je dána poměrem relativní změny odporu snímače k relativní změně délky [3]:

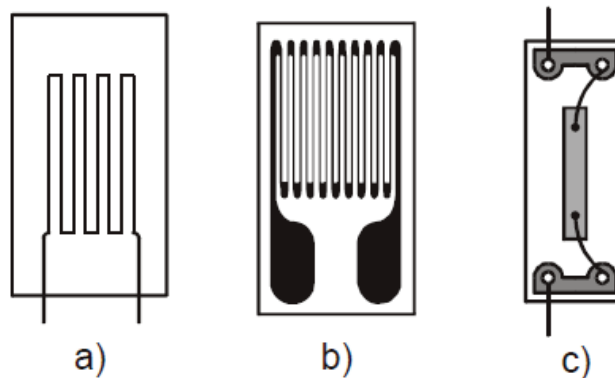
$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad [-] \quad (1.2)$$

Tenzometrická konstanta se liší podle materiálu. U kovových tenzometrů je kladen důraz na minimální mikrostrukturální změny a minimální teplotní závislost. Tyto tenzometry se vyrábějí z konstantanu ($K = 2,05$), karmy ($K = 2,1$) nebo platiny a wolframu ($K = 4$). Vedle kovových tenzometrů existují i polovodičové, které mají vyšší tenzometrickou konstantu K (125 pro křemík typu P), ale také větší teplotní závislost [1].

Co se týče provedení kovových odporových tenzometrických snímačů, existují tři základní uspořádání:

- drátkové
- fóliové
- naprašované

Všechny zmíněné typy jsou ukázány na obrázku 1.2. Vždy se jedná o destičku, na které je různým způsobem provedena odporová cesta. Nejčastěji se používají fóliové tenzometry vyráběné z fólií tloušťky řádově mikrometrů umístěných na pružných izolačních podložkách. K nalepení na deformovaný objekt slouží speciální lepidla zaručující přenos deformací z měřeného objektu na tenzometr. Maximální možná měřená deformace je do 0,5 %, protože za touto mezí může dojít ve struktuře odporového materiálu snímače k nevratným změnám, které změní parametry tohoto snímače. Typický základní odpor kovových tenzometrů je 120 Ω , 350 Ω nebo 1000 Ω [1], [3], [5].



Obr. 1.2 Mechanické provedení tenzometrických snímačů: a) drátkový, b) fóliový, c) naprašovaný (obrázek převzat z [2]).

1.3 Vznik mechanického napětí

Deformace pevného tělesa ε je výsledkem působení mechanického napětí σ , což je síla působící na jednotkovou plochu tělesa. Vztah mezi mechanickým napětím a deformací se řídí Hookovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{Pa}; \text{Pa}, -] \quad (1.3)$$

kde σ je mechanické napětí, ε je deformace tělesa a E je Youngův modul pružnosti materiálu, což je materiálová konstanta, jejíž typické hodnoty pro hlavní průmyslové materiály můžeme vidět v tabulce 1 [3].

Pokud je tedy materiál podroben tažné (tlačné) síle, prodlouží se (zkrátí se) v podélném směru a v příčném se smrští (roztáhne).

Poměr mezi relativním prodloužením (zkrácením) v podélném směru a relativním zkrácením (prodloužením) v příčném směru se nazývá **Poissonův poměr** a je vyjádřen takto [3], [4]:

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right| \quad [-] \quad (1.4)$$

kde $\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L}$ nebo $-\frac{\Delta L}{L}$ a $\varepsilon_2 = -\frac{\Delta D}{D}$ nebo $\frac{\Delta D}{D}$.

Tab. 1.1 Mechanické vlastnosti hlavních průmyslových materiálů (převzato z [4]).

Materiál	Youngův modul E [GPa]	Smykový modul G [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Poissonův poměr ν
Uhlíková ocel (C 0,1÷0,25%)	205	78	363-441	0,28-0,3
Uhlíková ocel (C >0,25%)	206	79	417-569	0,28-0,3
Pružná ocel	206-211	79-81	588-1667	0,28-0,3
Niklová ocel	205	78	549-665	0,28-0,3
Litina	98	40	118-235	0,2-0,29
Mosaz (litá)	78	29	147	0,34
Fosforová bronz	118	43	431	0,38
Hliník	73	27	186-500	0,34
Beton	20-29	9-13	-	0,1

Vztah mezi Youngovým a smykovým modulem popisuje následující vztah:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad [\text{Pa}; \text{Pa}, -] \quad (1.5)$$

1.4 Druhy deformací

Existují 3 možnosti, jak může působící síla deformovat měřený objekt. Tomu pak odpovídají i způsoby měření a především vztahy pro výpočet potřebných veličin. Tyto tři druhy deformací jsou [3]:

- ohybová deformace
- smyková deformace
- torzní deformace

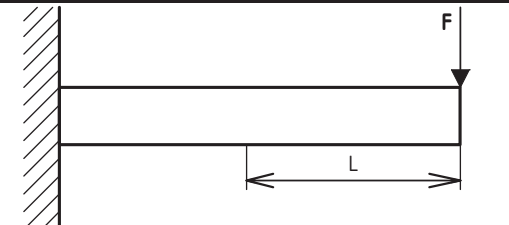
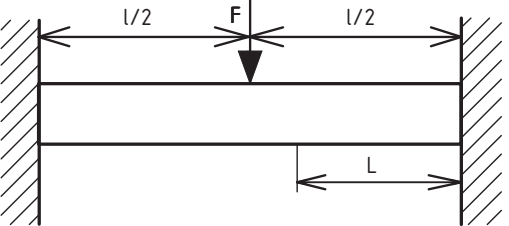
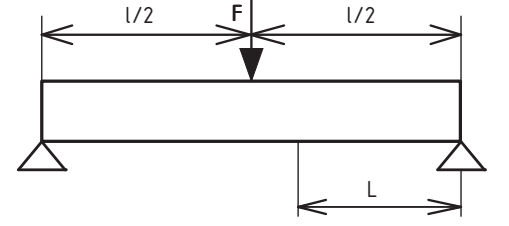
1.4.1 Ohybové deformace

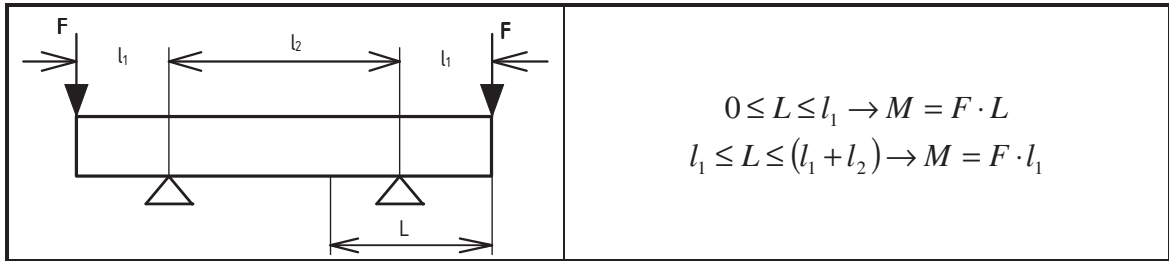
Pro výpočet mechanického napětí ohýbaného objektu je nutné správně určit velikost deformace ε v rovnici (1.3). Tato veličina závisí na tvaru průřezu měřeného objektu, na jeho délce, materiálu, způsobu upevnění a poloze místa, kde působí deformační síla. Označuje se jako ε_0 a obecně pro ni platí vztah:

$$\varepsilon_0 = \frac{M}{Z \cdot E} \quad [-; \text{N} \cdot \text{m}, \text{m}^3, \text{Pa}] \quad (1.6)$$

kde M je kroutící moment, Z je sekční modul a E je Youngův modul. Velikost Youngova modulu lze najít v tabulce 1.1, typické rovnice pro kroutící moment a sekční modul pak v tabulkách 1.2 a 1.3 [4].

Tab. 1.2 Typické rovnice získaného kroutícího momentu (převzato z [4]).

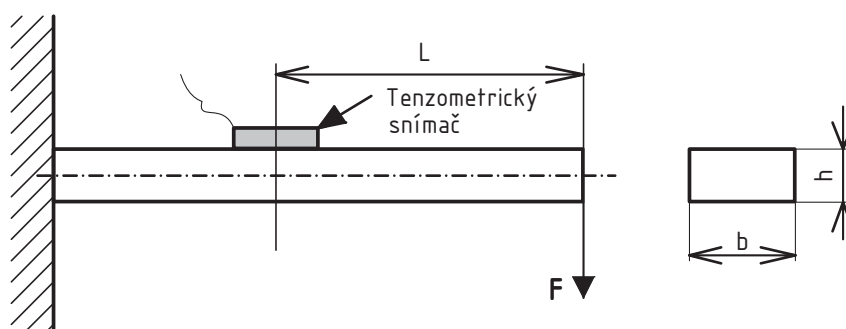
Tvar nosníku	Kroutící moment M
	$M = F \cdot L$
	$0 \leq L \leq \frac{l}{2} \rightarrow M = \frac{F \cdot l}{2} \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{L}{l} \right)$ $L = 0, L = \frac{l}{2} \rightarrow M = \pm \frac{F \cdot l}{8}$ $\frac{l}{2} \leq L \leq l \rightarrow M = \frac{F \cdot l}{2} \cdot \left(\frac{L}{l} - \frac{3}{4} \right)$
	$0 \leq L \leq \frac{l}{2} \rightarrow M = \frac{F \cdot L}{2}$ $L = \frac{l}{2} \rightarrow M = -\frac{F \cdot l}{4}$ $\frac{l}{2} \leq L \leq l \rightarrow M = \frac{F \cdot (l - L)}{2}$



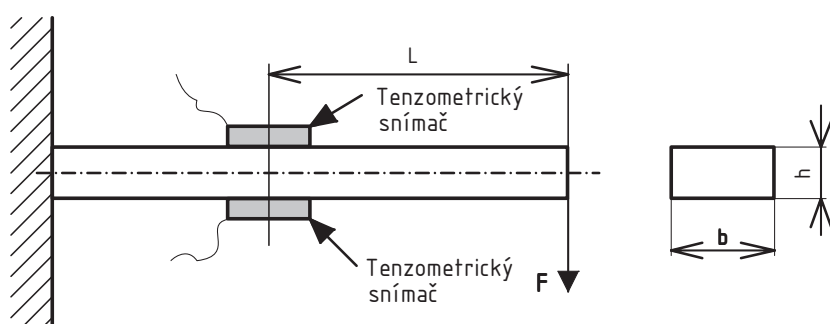
Tab. 1.3 Typické rovnice sekčního modulu (převzato z [4]).

Tvar průřezu nosníku	Sekční modul Z
	$\frac{1}{6} \cdot b \cdot H^2$
	$\frac{1}{6} \cdot \frac{b \cdot (H^3 - h^3)}{H}$
	$\frac{\pi}{32} \cdot d^3$
	$\frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D}$

Pro samotné měření se pak používá konfigurace s jedním nebo dvěma snímači (viz. obrázky 1.3 a 1.4).



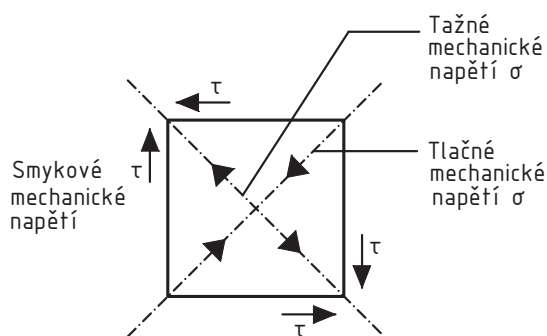
Obr. 1.3 Měření ohybu jednosnímačovým systémem (obrázek převzat z [4]).



Obr. 1.4 Měření ohybu dvousnímačovým systémem (obrázek převzat z [4]).

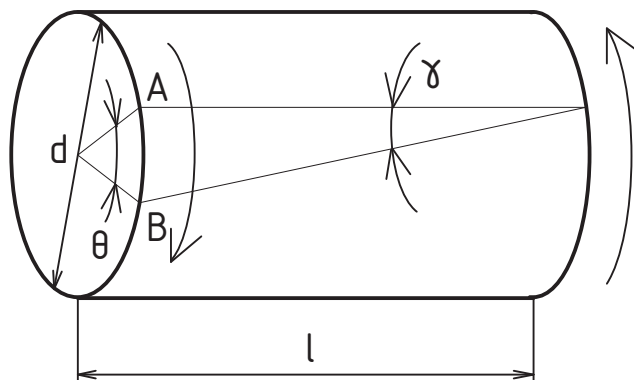
1.4.2 Torzní a smykové deformace

Jestliže vyvoláme krut (torzi) v objektu o libovolném průřezu, vzniká v něm smykové mechanické napětí τ , se kterým je ve směrech odkloněných od axiální osy o 45° spjata tažné a tlačné mechanické napětí σ o stejné velikosti jako má smykové mechanické napětí. Smykové mechanické napětí se tedy neměří přímo, ale právě pomocí těchto tažných a tlačných mechanických napětí vzniklých na povrchu objektu. Situaci objasňuje obrázek 1.5 [4].



Obr. 1.5 Vliv smykového mechanického napětí na mikroskopickou část povrchu objektu (obrázek převzat z [4]).

Na obrázku 1.6 pak lze vidět vliv torze na válcové těleso, např. hřídel.



Obr. 1.6 Vznik smykového mechanického napětí γ (obrázek převzat z [4]).

Celkové smykové mechanické napětí γ souvisí s elementárním napětím τ vztahem:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad [-; \text{Pa}, \text{Pa}] \quad (1.7)$$

kde G je smykový modul (viz. tabulka 1.1).

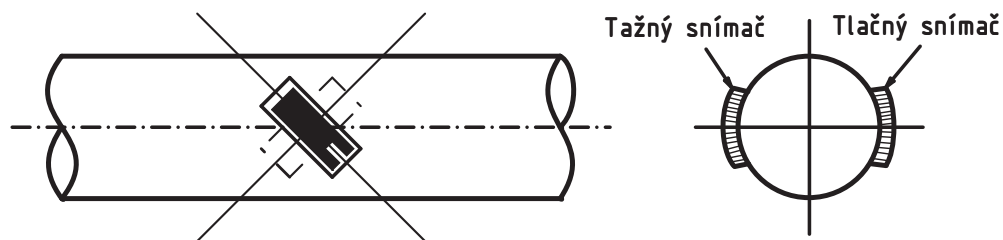
Vlivem zkroucením hřídele podle podélné osy se tedy bod A pootočí do bodu B o úhel θ , pro který platí závislost na hodnotě γ dle vztahu [4]:

$$\theta = \frac{2 \cdot l \cdot \gamma}{d} \quad [\text{rad}; \text{m}, -, \text{m}] \quad (1.8)$$

Pro měření lze použít systém s jedním, dvěma nebo čtyřmi snímači (tyto systémy budou popsány později). Ve všech provedeních se změří povrchové mechanické napětí σ , které je ale zároveň rovno τ . Výpočetní vztah je:

$$\sigma = \tau = \frac{\varepsilon_0 \cdot E}{1 + \nu} \quad [\text{Pa}; -, \text{Pa}, -] \quad (1.9)$$

kde ν je Poissonův poměr, ε_0 je indikovaná deformace a E je Youngův modul (viz. tabulka 1.1). Pokud je použit systém se dvěma nebo čtyřmi snímači, je nutné získanou hodnotu dělit dvěma, resp. čtyřmi. Způsob umístění snímačů na hřídel při měření smykového mechanického napětí je na obrázku 1.7. Úhel mezi osou snímače a podélnou osou hřídele má být 45° [4].



Obr. 1.7 Měření smykového mechanického napětí (obrázek převzat z [4]).

1.5 Měřicí můstky

Protože změny odporu tenzometrického odporového snímače vyvolané v důsledku jeho deformace jsou velmi malé (řádově $m\Omega$), je nutné tyto snímače zapojovat do měřicích můstků. Metoda vyhodnocení velikosti odporu pomocí měřicího můstku patří do tzv. nulových metod měření při kterých měřicí přístroj má funkci nulového indikátoru [1].

Existují 2 nejčastější typy měřicích můstků vhodných pro měření odporů:

- *Thompsonův můstek* – vhodný pro měření odporů malých hodnot
- *Wheatstoneův můstek* – vhodný pro měření odporů středních hodnot

1.5.1 Thompsonův můstek

Tímto typem můstku lze měřit malé odpory v rozmezí 10^{-6} - $10^0 \Omega$ s přesností do 1 %. Schéma Thompsonova můstku je na obrázku 1.8 a pro vyvážený můstek platí [1]:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} + K, \text{ kde} \quad [\Omega; \Omega] \quad (1.10)$$

$$K = \frac{R_4' \cdot R_5}{R_3' + R_4' + R_5} \cdot \left(\frac{R_3}{R_4} - \frac{R_3'}{R_4'} \right) \quad [\Omega; \Omega] \quad (1.11)$$

Odtud plynou dvě podmínky rovnováhy. První podmínka je:

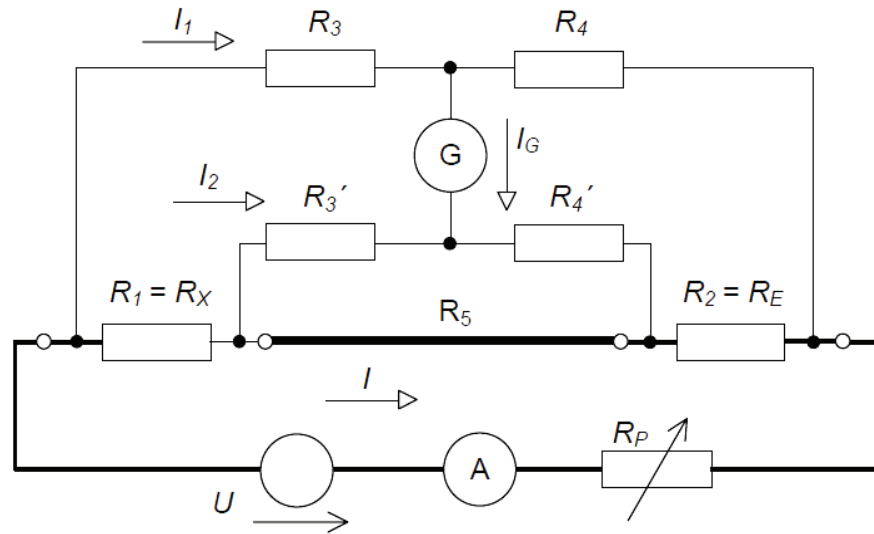
$$R_x = R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad [\Omega; \Omega] \quad (1.12)$$

Tato podmínka platí, pokud platí i druhá (vedlejší) podmínka:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_3'}{R_4'} \quad [-; \Omega] \quad (1.13)$$

Tato podmínka je ale obtížně splnitelná, protože nelze dosáhnout dvou přesně stejných

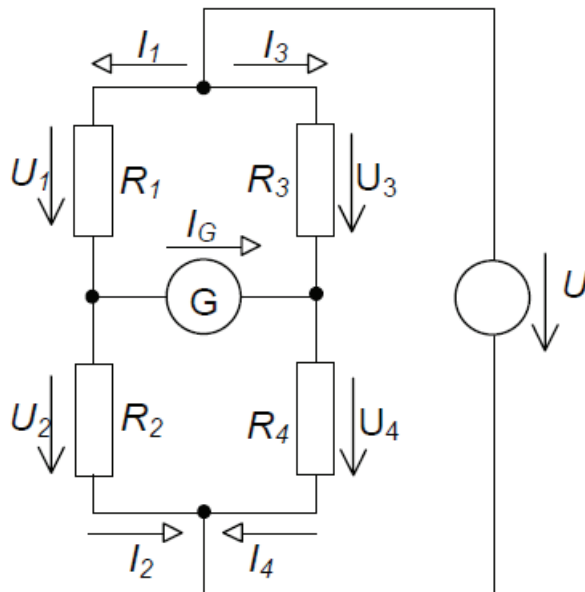
odporů. Chyba je ale minimální, pokud R_5 je blízký nule. Pak také $K \rightarrow 0$.



Obr. 1.8 Thompsonův můstek pro měření malých odporů (obrázek převzat z [2]).

1.5.2 Wheatstoneův můstek

Jedná se o nejznámější můstek používaný k měření odporů. Je vhodný k měření odporů středních hodnot (10^{-1} - $10^6 \Omega$). Je tvořen čtyřmi odpory a nulovým indikátorem. Napájen může být zdrojem napětí nebo proudu. Dosahuje přesnosti až 0,01 % pro laboratorní můstek a až 1 % pro můstek technický. Schéma Wheatstoneova můstku je na obrázku 1.9 [1].



Obr. 1.9 Wheatstoneův můstek (obrázek převzat z [2]).

Pro rovnováhu Wheatstoneova můstku (tedy stav, kdy $I_G = 0$ a $U_G = 0$) lze vyjádřit podmínku:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad [\Omega^2; \Omega] \quad (1.14)$$

Rezistor R_1 obvykle nahrazujeme měřeným rezistorem R_X , jehož velikost lze vypočítat ze vztahu:

$$R_X = R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad [\Omega; \Omega] \quad (1.15)$$

Toto všechno však platí pro vyvážený můstek. Pro vyhodnocení změn odporových snímačů se ale využívá nevyvážený Wheatstoneův můstek, který je nakreslen na obrázku 1,16. Pro zjednodušení výpočetních vztahů se předpokládá, že $R_1=R_2=R_3=R_4=R$. Pokud je můstek napájen ze zdroje napětí, napětí mezi body 1 a 2 v měřicí diagonále lze vyjádřit vztahem:

$$U_{12} = U \cdot \left(\frac{R + \Delta_R}{2R + \Delta_R} - \frac{R}{2R} \right) = \frac{U}{4R} \cdot \frac{\Delta_R}{1 + \frac{\Delta_R}{2R}} \quad [V; V, \Omega] \quad (1.16)$$

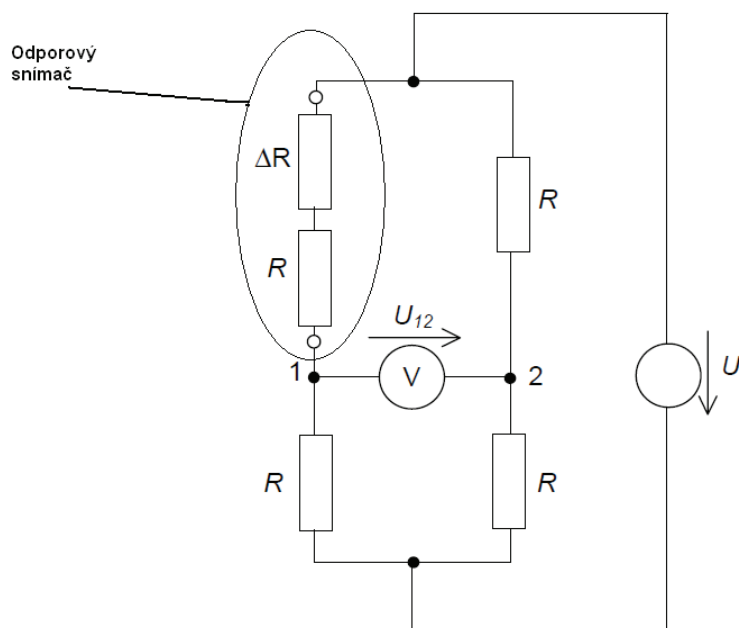
kde R je hodnota rezistorů nevyváženého můstku, Δ_R je změna měřeného odporu a U je napětí zdroje [1].

Je vidět, že závislost výstupního napětí na změně měřeného odporu je silně nelineární. Bude-li ale změna odporu Δ_R malá oproti hodnotě odporu R , lze závislost považovat za lineární a vztah (1.16) se zjednoduší na tvar:

$$U_{12} \cong \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta_R}{R} \cdot U \quad [V; \Omega, V] \quad (1.17)$$

Vezmeme-li pak pro konkrétní případ odporového tenzometru v úvahu vztahy (1.2) a částečně také (1.4), dostaneme:

$$U_{12} \cong \frac{1}{4} \cdot K \cdot \varepsilon \cdot U \quad [V; -, -, V] \quad (1.18)$$

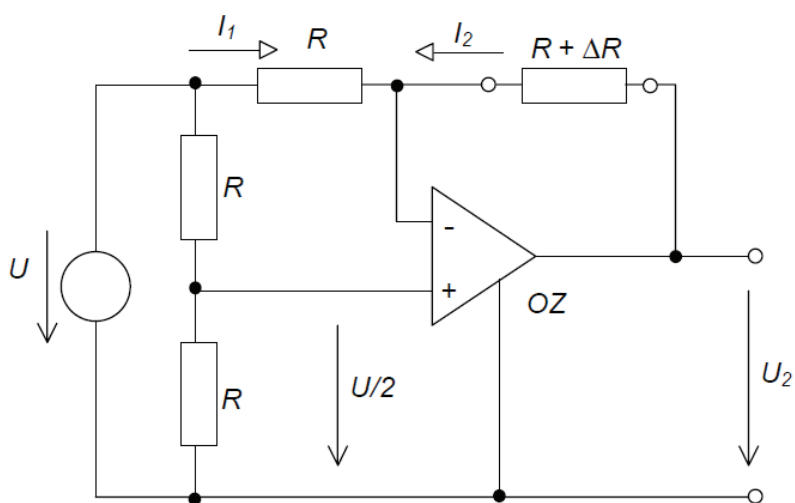


Obr. 1.10 Nevyvážený Wheatstoneův můstek pro vyhodnocení změn odporu odporových snímačů (obrázek převzat z [2]).

Jinou možností linearizace závislosti výstupního napětí můstku na změně měřeného odporu je zapojení Wheatstoneova můstku s operačním zesilovačem, jak naznačuje obrázek 1.11. Pro toto zapojení platí rovnost [1]:

$$U_2 = \frac{-U}{2R} \cdot \Delta R \quad [V; V, \Omega] \quad (1.19)$$

Z této rovnice je patrné, že výstupní napětí je přímo úměrné změně odporu ΔR .



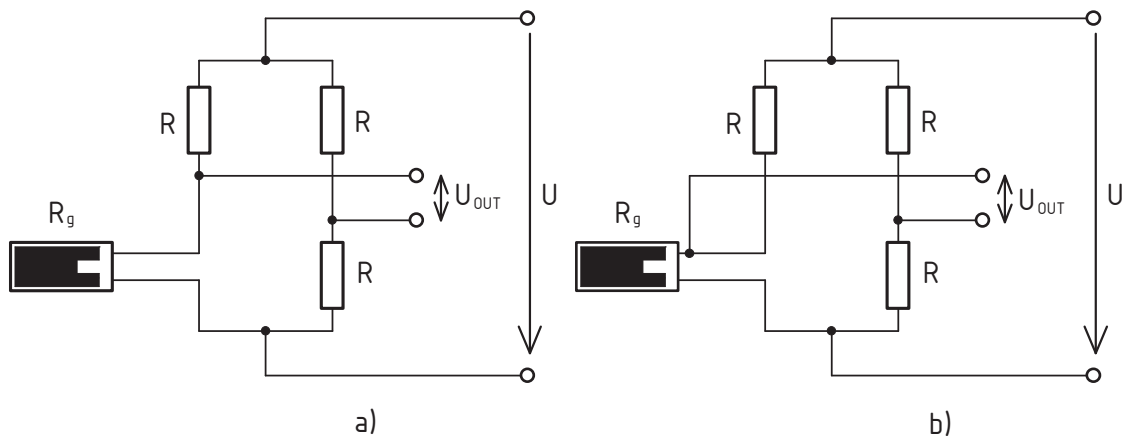
Obr. 1.11 Linearizace Wheatstoneova můstku pomocí operačního zesilovače (obrázek převzat z [1]).

1.6 Možnosti připojení odporových tenzometrických snímačů do měřicího můstku

K vyhodnocování změn odporu odporového tenzometrického snímače bohatě postačí Wheatstoneův můstek, protože základní odpor snímače je 10^2 - $10^3 \Omega$. Uspořádání můstku může být s jedním, dvěma nebo čtyřmi snímači.

1.6.1 Systém s jedním snímačem

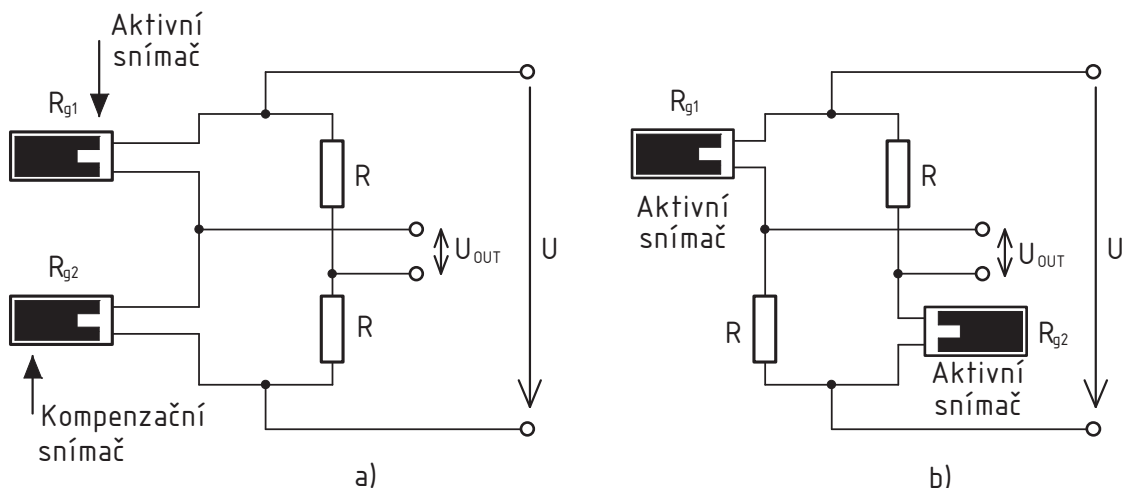
U systému s jedním snímačem je snímač připojen v jedné větvi můstku, v ostatních třech jsou fixní rezistory R . Tento systém je hojně využíván pro všeobecná měření. Snímač lze připojit k můstku buď dvěma nebo třemi vodiči. Systém s dvou vodičovým připojením snímače (obrázek 1.12 a)) je mnohem více ovlivněn vlastnostmi (zejména odporem) vedení. Z tohoto důvodu je nutné, v případě, že je vedení dlouhé nebo vystavené velkým teplotním změnám, připojit snímač třívodičově (obrázek 1.12 b)) [3].



Obr. 1.12 Způsoby připojení jednoho snímače k měřicímu můstku – a) dvěma vodiči, b) třemi vodiči (obrázek převzat z [3]).

1.6.2 Systém se dvěma snímači

U tohoto zapojení jsou použity 2 snímače, které lze zapojit ve dvou konfiguracích, a to buď v konfiguraci aktivní – kompenzační snímač (obrázek 1.13 a)), nebo v konfiguraci aktivní – aktivní snímač (obrázek 1.13 a)) [3].

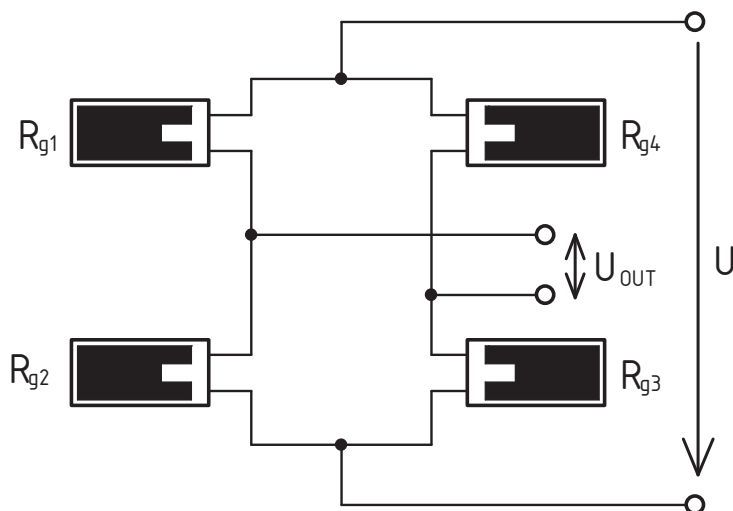


Obr. 1.13 Možná provedení měřicího můstku se dvěma snímači – a) konfigurace aktivní – kompenzační snímač, b) konfigurace aktivní – aktivní snímač (obrázek převzat z [3]).

U způsobu na obrázku 1.13 a) slouží aktivní snímač k vlastnímu měření, zatímco kompenzační snímač slouží k teplotní kompenzaci systému. Způsob na obrázku 1.13 b) není teplotně kompenzován, poskytuje však dvojnásobnou citlivost [3].

1.6.3 Systém se čtyřmi snímači

Jedná se o velmi praktické zapojení nazývané též plný tenzometrický můstek. V tomto zapojení jsou 4 tenzometry ve všech větvích Wheatstoneova odporového můstku, přičemž protilehlé snímače jsou podrobeny deformaci stejného znaménka a sousedící opačného znaménka. Tím se odstraní vliv nelinearity a citlivost celého můstku bude čtyřnásobná. Budou-li navíc všechny čtyři snímače blízko sebe, bude chyba vlivem změny teploty zanedbatelná a pokud budou navíc všechny snímače pospojovány přímo na pružném členu, lze zanedbat i odpor přívodních vodičů. Zapojení je zobrazeno na obrázku 1.14 [3].

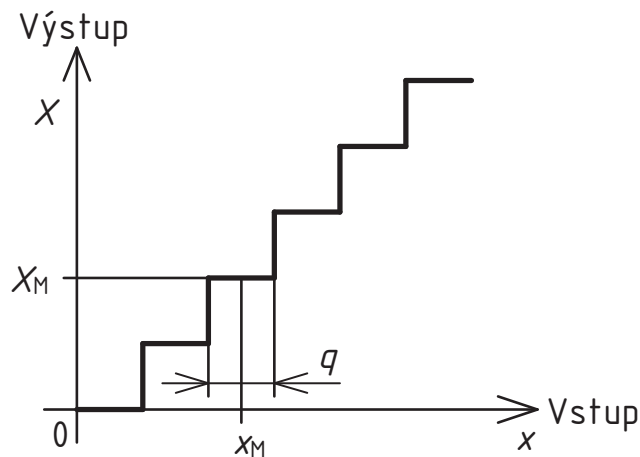


Obr. 1.14 Plný tenzometrický můstek (obrázek převzat z [3]).

1.7 Analogově – digitální převod, A/D převodníky

Analogově–digitální převod je postup, při kterém je analogová vstupní veličina převedena do číslicové podoby. Proces probíhá ve třech krocích [1]:

- *vzorkování* – spojitý signál se diskretizuje v čase; získané hodnoty se nazývají vzorky.
- *kvantování* – diskretizace hodnot vzorků; spočívá v zaokrouhlení spojitě hodnoty vzorku x_M na nejbližší kvantovací hladinu s číselnou hodnotou X_M . Vzdálenost dvou po sobě jdoucích kvantovacích se nazývá kvantizační krok q a číselně odpovídá nejméně významnému bitu. Princip kvantování je naznačen na obrázku 1.15.
- *kódování* – převedení číselné hodnoty získané kvantováním na některý z používaných kódů (nejčastěji binární).



Obr. 1.15 Princip kvantování v úrovních (obrázek převzat z [1]).

Obvody, které v sobě zahrnují často všechny tři zmíněné funkce, se nazývají analogově - digitální převodníky (zkráceně A/D převodníky). A/D převodníky lze dělit podle různých kritérií [1]:

A) podle rozsahu akceptovaných vstupních napětí na:

- *unipolární*; rozsah 0 až U_R
- *bipolární*; rozsah $-U_R$ až U_R

B) podle způsobu převodu na:

- *komparační a kompenzační*; převádějí na číslo okamžitou hodnotu napětí v době převodu, jsou rychlé, vyžadují na vstupu vzorkovač.
- *integrační*; převádějí na číslo průměrnou hodnotu napětí za určitý časový interval, jsou pomalejší, jejich výhodou je schopnost potlačit některé rušivé signály, používají se v číslicových měřicích přístrojích.

C) podle počtu bitů

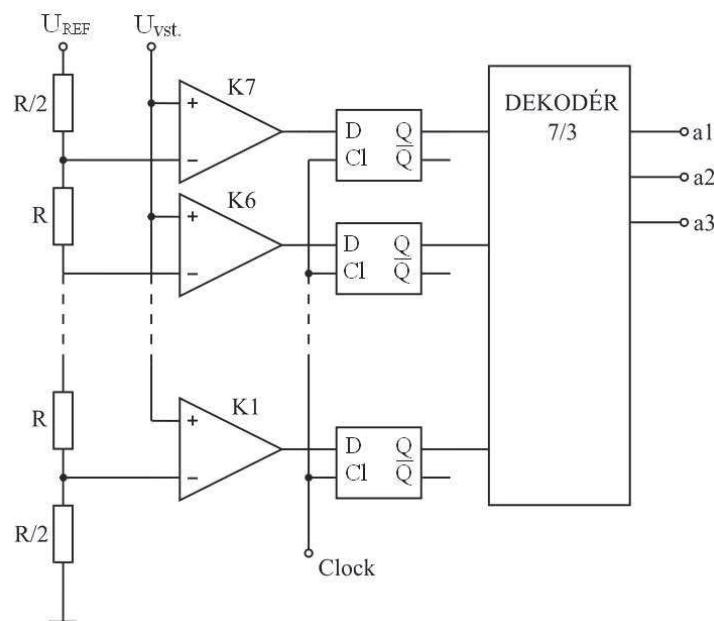
Protože žádný převodník není ideální, mají A/D převodníky chyby, které se dělí na statické a dynamické. Statické chyby jsou [1]:

- *chyba zesílení*; odchylka sklonu skutečné převodní charakteristiky od ideální.
- *chyba nuly*; dána posunem charakteristiky ve směru dané osy.
- *chyba linearity převodu*

1.7.1 Komparační převodníky

Srovnávají hodnotu vstupního napětí s kvantovaným referenčním napětím. Komparace může proběhnout buď naráz nebo postupně. Existují 2 druhy komparačních převodníků – paralelní komparační převodník a převodník postupnou komparací [1].

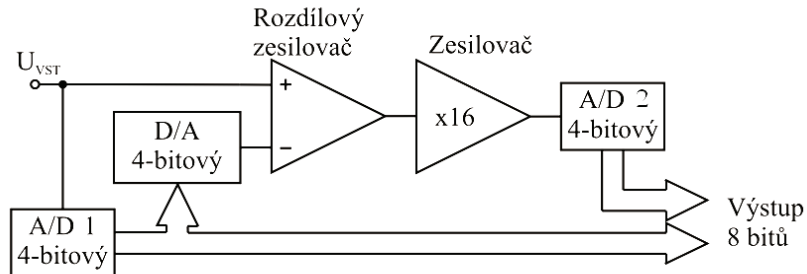
Blokové schéma paralelního komparačního převodníku je zobrazeno na obrázku 1.16. Vstupní napětí je porovnáno všemi komparátory současně. Referenční napětí U_{REF} je rozděleno ekvidistantně odporovým děličem. Počet komparátorů je roven počtu kvantovacích hladin. Převod probíhá naráz, převodník je rychlý, ale drahý. Navíc je v integrované podobě obtížné zaručit, aby všechny odpory v děliči byly přesně stejné [1].



Obr. 1.16 Osmibitový A/D převodník s paralelní komparací (obrázek převzat z [1]).

Jako výsledek snahy zjednodušit paralelní komparační převodník vznikl převodník postupnou komparací, jehož blokové schéma je na obrázku 1.17. Jedná se o 8-bitový převodník. První převodník A/D 1 (15 komparátorů) vytvoří 4 nejvyšší bity výstupního slova. Ty se jednak pošlou na výstup a jednak se převedou pomocí D/A převodníku zpět na napětí, které je odečteno od U_{vst} v rozdílovém zesilovači. Tento rozdíl je 16x zesílen a převeden pomocí druhého převodníku A/D 2 (opět 15 komparátorů) na nižší 4 bity výstupního slova. Výhodou je snížení počtu komparátorů pro 8-bitový převodník z 255

u paralelního převodníku na 30. Rychlost převodu se však o jeden nebo dva řády sníží [1].

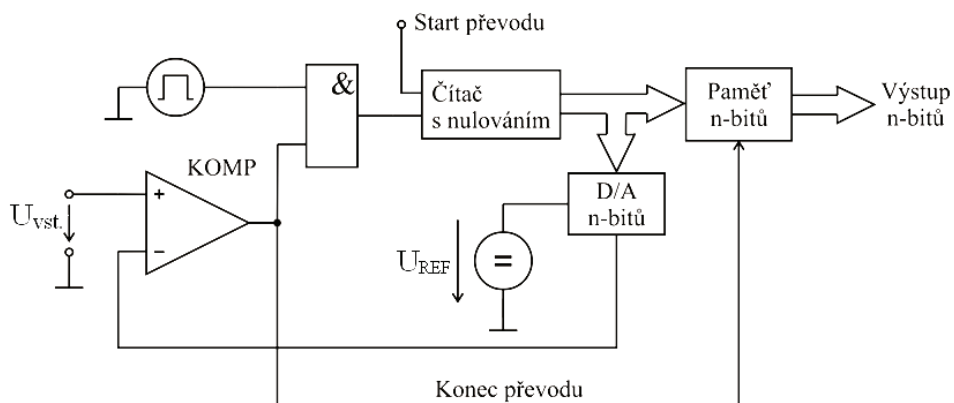


Obr. 1.17 Blokové schéma 8-bitového A/D převodníku s postupnou komparací (obrázek převzat z [1]).

1.7.2 Kompenzační převodníky

Tyto převodníky porovnávají vstupní hodnotu napětí U_{vst} s hodnotou zpětnovazebního napětí u_k získaného pomocí D/A převodníku z výstupního číslicového slova. Tento výstup se mění tak dlouho, dokud rozdíl obou napětí není minimální, a pak se převod ukončí. Do skupiny kompenzačních převodníků patří převodník čítač a sledovací a převodník s postupnou aproximací [1].

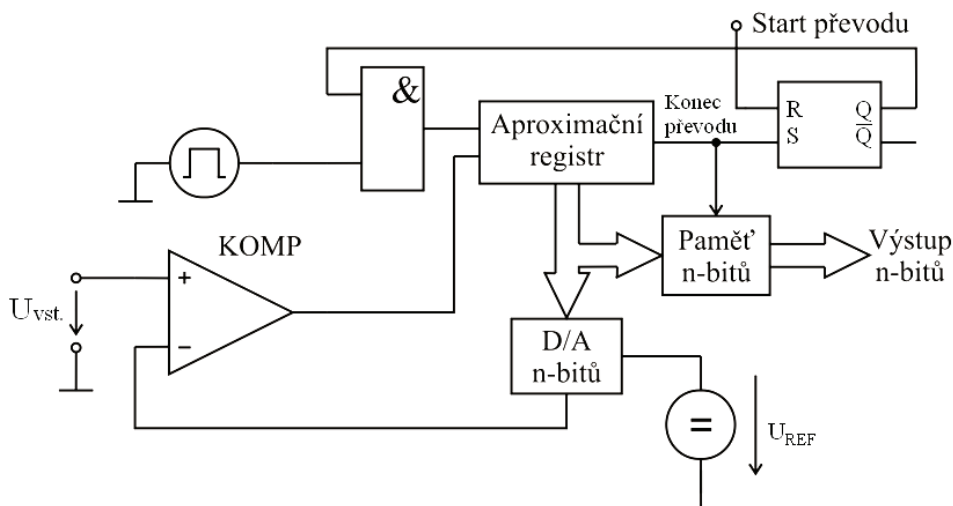
Blokové schéma čítačícího A/D převodníku je na obrázku 1.18. Jeho princip spočívá v tom, že po startu převodu přichází do čítače impulsy z generátoru přes hradlo AND. Výstup čítače je tedy inkrementován a převáděn pomocí D/A převodníku zpět na napětí, které je porovnáváno se vstupním napětím. V momentě, kdy se obě napětí vyrovnají, se výstup komparátoru přeploží do logické 0, hradlo se uzavře, hodnota výstupu čítače se přepíše do záchytného registru, kde je výstupní číslicové slovo připraveno k dalšímu zpracování. Sledovací převodník má výhodu v tom, že čítač je obousměrný, takže stav komparátoru řídí směr čítání a převodník může sledovat změny vstupního napětí [1].



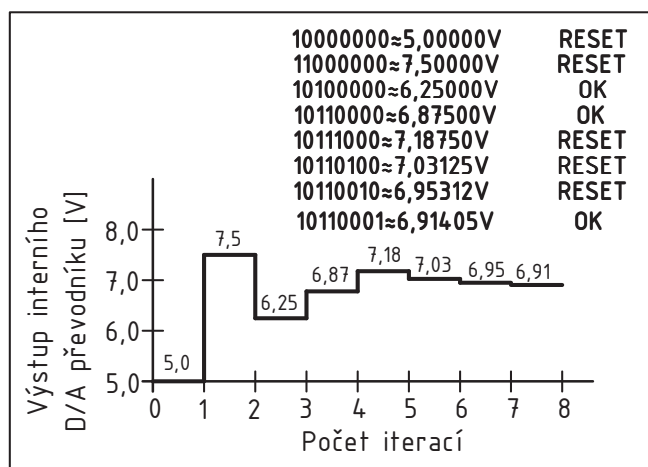
Obr. 1.18 Základní princip kompenzačního čítačícího A/D převodníku (obrázek převzat z [1]).

Snad nejrozšířenějším typem převodníku je převodník s postupnou aproximací, jehož blokové schéma je nakresleno na obrázku 1.19. U tohoto převodníku jde o postupnou aproximaci výstupního slova „bit po bitu“ a v podstatě se zkusmo nastavují váhové bity tak dlouho, dokud rozdíl vstupního napětí zpětnovazebního napětí z D/A převodníku není minimální [1].

Na začátku převodu se nastaví nejvýznamnější bit aproximačního registru (to je zároveň výstup převodníku) do logické 1 ($\approx U_{REF}/2$). Výstupní slovo je převedeno A/D převodníkem na napětí porovnáno se vstupním napětím. Pokud je U_{vst} větší než $U_{REF}/2$, zůstane nejvyšší bit v logické 1, jinak je vrácen do logické 0. Tím je nejvyšší bit vyřešen a pokračuje se druhým nejvyšším bitem. Opět se porovná U_{vst} s výstupem D/A převodníku a aktuální bit se ponechá v logické 1, nebo se vrátí do logické 0. Takto se postupuje až k nejméně významnému bitu. Výstupní slovo se získá v N iteracích, kde N je počet bitů převodníku. Princip je dobře patrný z obrázku 1.20 [1].



Obr. 1.19 Princip A/D převodníku s postupnou aproximací (obrázek převzat z [1]).



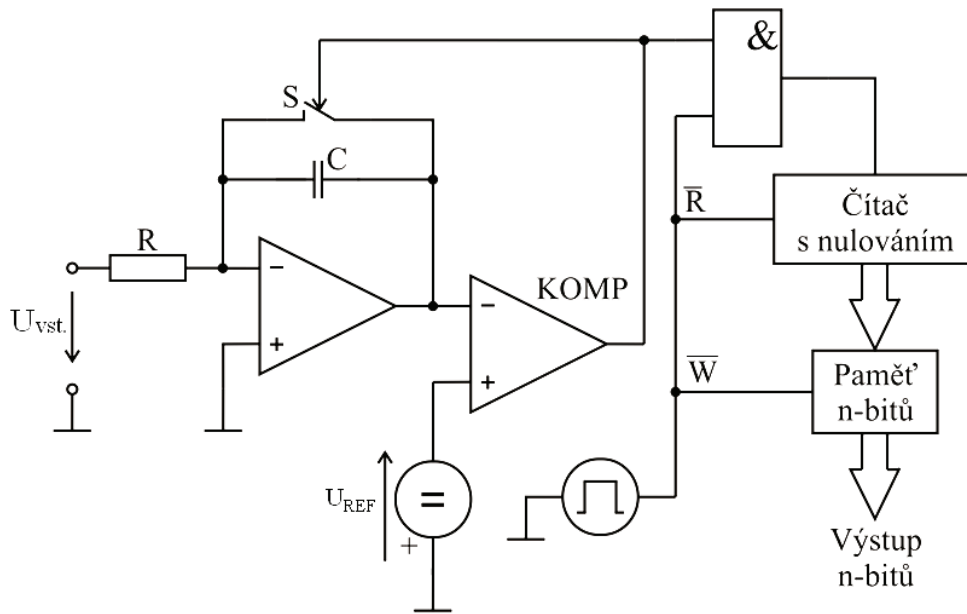
Obr. 1.20 Výstup interního D/A převodníku při $U_{vst} = 6,92 V$ a $U_{REF} = 10 V$ (obrázek převzat z [7]).

1.7.3 Integrační převodníky

Výstupem integračních převodníků je číslo odpovídající průměrné hodnotě vstupního napětí za určitou dobu. Díky tomu není na vstupu nutný vzorkovač a použití integrátoru potlačuje rušivá napětí vyšších kmitočtů superponovaná na měřené napětí [1].

Existují 2 základní typy integračních A/D převodníků, a to integrační převodník s mezipřevodem na kmitočet integrační převodník s dvoutaktní integrací.

Zjednodušené schéma integračního převodníku s mezipřevodem na kmitočet je na obrázku 1.21.



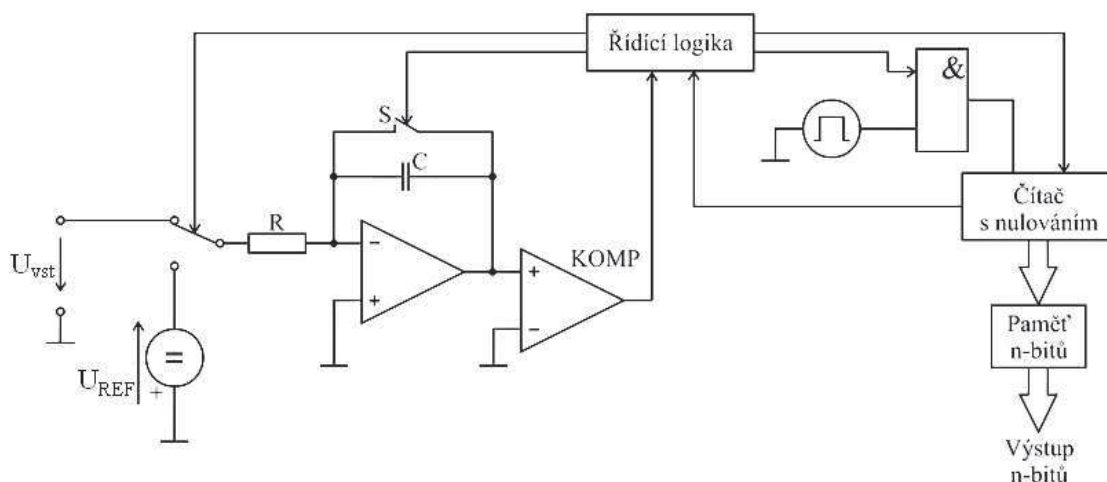
Obr. 1.21 Integrační A/D převodník s mezipřevodem na kmitočet (obrázek převzat z [1]).

Předpokládá se, že kondenzátor C je na začátku měření vybit. Po přivedení měřeného nenulového napětí lineárně klesá výstupní napětí integrátoru až na hodnotu $-U_{REF}$. Pak se překlopí komparátor, který sepne spínač S , kondenzátor se prudce vybije a celý děj se opakuje. Na výstupu tedy vzniká sled pilovitých pulsů, jejichž počet je měřen čítačem. Doba, po kterou se pulsy počítají, je určena periodou generátoru. Lze odvodit, že kmitočet pulsů se řídí vztahem:

$$f = \frac{U_{vst.}}{R \cdot C \cdot U_{REF}} \quad [\text{Hz}; \text{V}, \Omega, \text{F}, \text{V}] \quad (1.20)$$

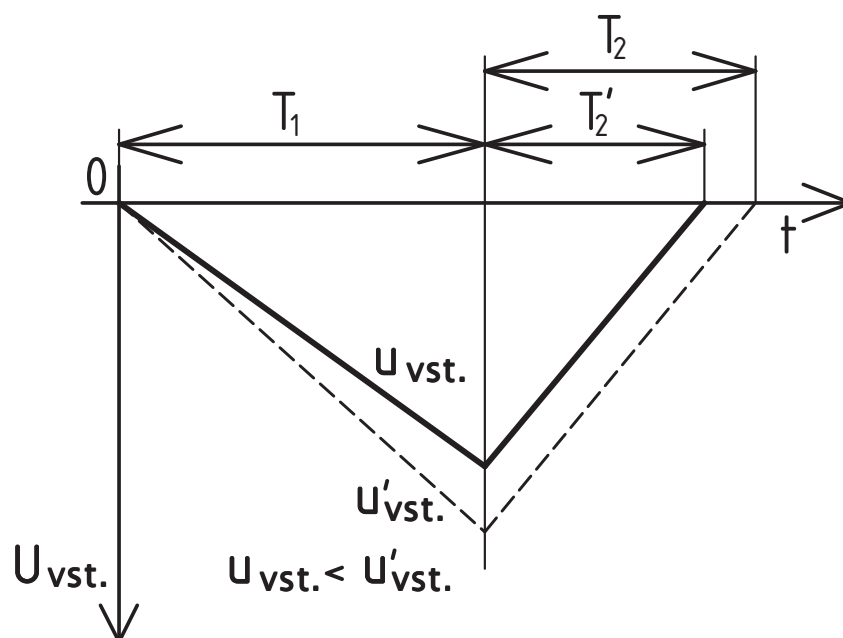
Z tohoto vztahu je vidět, že přesnost převodníku je závislá na časové stálosti rezistoru R a kondenzátoru C [1].

Tento nedostatek odstraňuje integrační převodník s dvojitou integrací, jehož principiální schéma je na obrázku 1.22.



Obr. 1.22 Integrovní A/D převodník s dvoutaktní integrací (obrázek převzat z [1]).

Převod probíhá ve dvou taktech. Nejprve se vybijí kondenzátor C a vynuluje čítač. Pak se na vstup integrátoru připojí měřené napětí, které zůstává připojeno tak dlouho, dokud nepřeteče čítač. Během této doby klesá lineárně výstupní napětí integrátoru až do určitého záporného napětí. Strmost klesání je tím větší, čím větší je měřené napětí. Po přetečení čítače je zahájen druhý takt, během kterého je na vstup integrátoru připojeno napětí U_{REF} opačného znaménka, než je napětí vstupní. Čítač zaznamenává impulsy, zatímco napětí na integrátoru lineárně roste a jakmile dosáhne nuly, je převod ukončen. Délka druhého taktu je zaznamenána konečným stavem čítače. Průběh napětí na integrátoru je na obrázku 1.23 [1].



Obr. 1.23 Průběh napětí na integrátoru A/D převodníku s dvoutaktní integrací pro dvě různá měřená napětí ($u_{i2} < u'_{i2}$) (obrázek převzat z [1]).

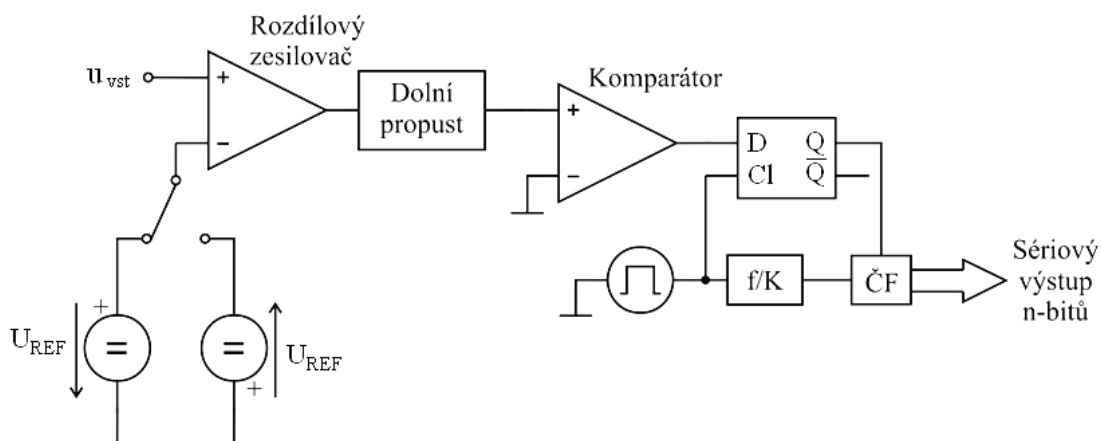
Lze ukázat, že stav čítače na konci převodu odpovídá měřenému napětí dle vztahu:

$$N = N_C \cdot \frac{U_{\text{vst.}}}{U_{\text{REF}}} \quad [-; -, V, V] \quad (1.21)$$

kde N_C je kapacita čítače.

Výhodou tohoto typu převodníku je jeho nezávislost na časové stálosti prvků R a C . Důležitá je jen stabilita a přesnost referenčního zdroje napětí U_{REF} . Další výhodou je, že pokud bude na měřené napětí superponováno rušivé střídavé napětí (např. síťový kmitočet), stačí, aby doba prvního taktu byla celočíselným násobkem jeho periody a rušení je účinně potlačeno [1].

Zvláštním případem integračního převodníku je sigma-delta převodník, jehož blokové schéma je na obrázku 1.24.



Obr. 1.24 Blokové schéma sigma – delta převodníku (obrázek převzat z [1]).

Sigma–delta modulátor se skládá z analogového filtru (v nejjednodušším případě integrátor), napěťového komparátoru, klopného obvodu D překlápaného signálem o kmitočtu f a zpětné vazby, ve které je jen přepínač („jednobitový A/D převodník“). Dvouhodnotový signál $\pm U_{\text{REF}}$ se odečítá od vstupního napětí a rozdíl je filtrován integrátorem. Číslicový filtr ČF průměruje výstupní sériovou posloupnost bitů a zároveň provádí decimaci vzorkovaného signálu, takže se zdá, že na jeho výstupu je signál s kmitočtem jen f/K , který musí vyhovovat vzorkovacímu teorému aplikovanému na vstupní signál převodníku. Tento typ převodníku se kvůli své výborné linearitě a vysokému odstupu signálu od šumu používá k digitalizaci audio signálů.[6]

1.7.4 Převzorkování

Převzorkování (oversampling) je postup, při kterém se vstupní napětí vzorkuje s frekvencí, která několikanásobně překračuje požadavek vzorkovacího teorému, který říká:

$$f_{vz} \geq 2 \cdot f_{Smax} \quad [\text{Hz}; \text{Hz}] \quad (1.22)$$

kde f_{vz} je vzorkovací frekvence a f_{Smax} je frekvence nejvyšší spektrální složky signálu.

Nejdůležitější důvody, proč používat metodu převzorkování jsou dva. Jednak je to podstatné snížení požadované strmosti vstupního analogového antialiasingového filtru (často stačí cca 1,5 násobek f_{Smax}), protože vzorkováním s frekvencí $n \cdot f_{vz}$, kde n je celé číslo nazývané též koeficient převzorkování, se dosáhne mnohem větší frekvenční vzdálenosti opakujících se spekter číslicového signálu [7]. Druhým důvodem je snížení hladiny kvantizačního šumu, který závisí na rozdílu mezi hodnotou analogového signálu a nejbližší kvantovací úrovni A/D převodníku. Jeho maximální hodnota je $\pm 0,5$ LSB. Odstup mezi signálem a kvantovacím šumem je dán vztahem:

$$SNR_{ADC} = 20 \cdot \log(2^N) = 6,02 \cdot N \quad [\text{dB}; -] \quad (1.23)$$

N je počet bitů A/D převodníku.

Spektrální hustota výkonu šumu (PSD) se rozprostře rovnoměrně do pásma 0Hz až vzorkovací frekvence. Při převzorkování se tedy kvantizační šum rozprostře do širšího pásma a požadované pásmo se následně vybere decimací (vypustí se každý n -tý vzorek; navenek to pak vypadá, že se pracuje na kmitočtu pouze f_{vz}). Ke zlepšení poměru výkonu signálu ku výkonu šumu dojde podle vztahu:

$$SNR_{Gain_ADC} = 10 \cdot \log\left(\frac{n \cdot f_{vz}}{f_{vz}}\right) \quad [\text{dB}; \text{Hz}] \quad (1.24)$$

Při čtyřnásobném převzorkování dostaneme hodnotu $SNR_{Gain_ADC} = 6,02$ dB, což znamená, že kvantovací šum se sníží stejně, jako kdybychom přidali jeden bit A/D převodníku.

Výsledná hodnota poměru signálu ku šumu po převzorkování SNR_{ADC_Ovs} je dána rozdílem (v logaritmické míře) [8]:

$$SNR_{ADC_Ovs} = SNR_{ADC} - SNR_{Gain_ADC} \quad [\text{dB}; \text{dB}] \quad (1.25).$$

1.8 Stručný popis použitého mikrokontroléru

V konstruovaném měřicím systému bude použit mikrokontrolér MSP430G2553IN20 od firmy Texas Instruments. Tento mikrokontrolér byl vybrán především kvůli ceně, která činí asi 0,90 \$ (přibližně 30 Kč), přičemž nabízí podobné funkce jako jiné, často dražší, mikrokontroléry, např. od firmy Atmel.

MSP430G2553IN20 je 16-bitový mikrokontrolér s architekturou RISC (omezená instrukční sada) v pouzdru PDIP-20 (označení IN20 v názvu, jedná se o pouzdro s 20 piny pro klasickou montáž).

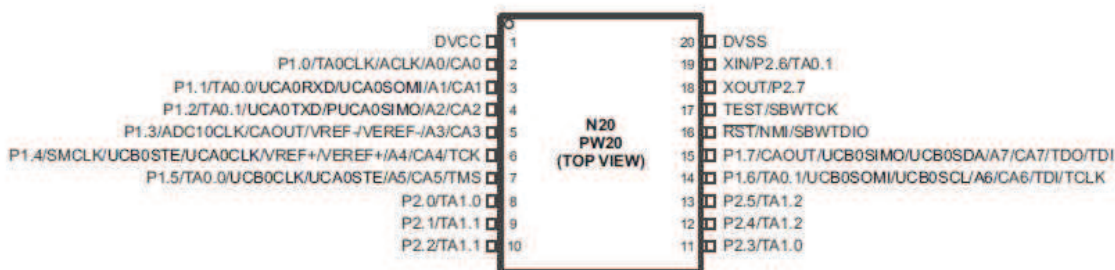
Mezi základní parametry tohoto mikrokontroléru patří:

- nízké napájecí napětí; 1,8 V-3,6 V
- velmi malý proudový odběr; až 0,1 μA v nejúspornějším režimu snížené spotřeby
- pět režimů snížené spotřeby + normální režim
- kmitočet vnitřního hodinového oscilátoru až 16 MHz
- programovou paměť Flash s kapacitou 16 kB
- RAM paměť 512 B

MSP430G2553 nabízí také řadu vestavěných funkcí jako jsou:

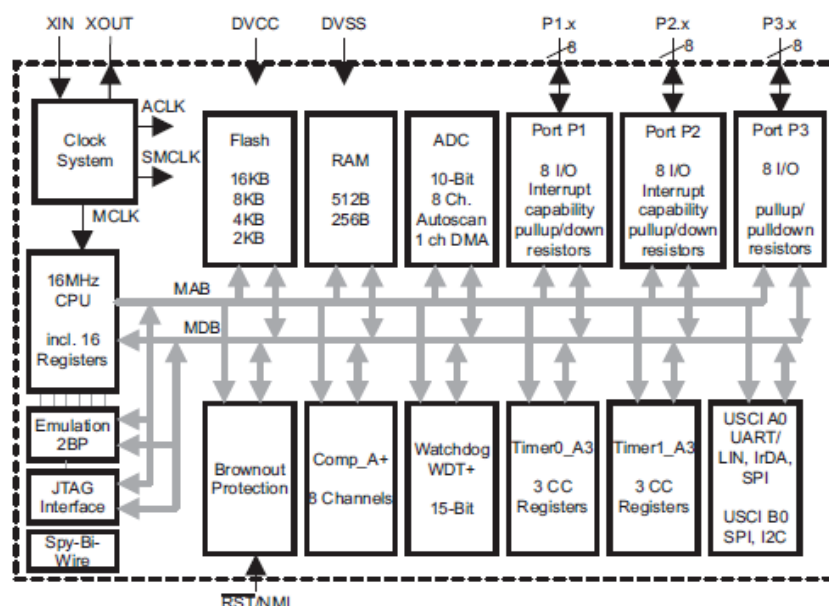
- 2 šestnáctibitové čítače/časovače
- osmikanálový analogový komparátor
- osmikanálový desetibitový A/D převodník pracující na principu postupné aproximace
- univerzální sériové rozhraní (USCI); lze nastavit na podporu protokolu UART, tří- nebo čtyřvodičové SPI, protokolu I²C nebo zpracování signálů IrDA

Pro připojení vnějších zařízení nabízí mikrokontrolér 16 vstupně-výstupních linek uspořádaných do dvou portů. Každá linka je připojena na jeden vývod mikrokontroléru, ale samozřejmě každý vývod má několik volitelných funkcí nastavovaných softwarově. Pouzdro mikrokontroléru s označením funkcí vývodů je nakresleno na obrázku 1.25 [9].



Obr. 1.25 Pouzdro mikrokontroléru MSP430G2553 s popisem funkcí jednotlivých vývodů (obrázek převzat z [9]).

Mikrokontrolér pracuje s omezenou instrukční sadou, která obsahuje 51 instrukcí, z nichž každá může mít 3 formáty a sedm adresních módů. Instrukce mohou využívat 12 ze 16 registrů označených R0 až R15 (instrukce mohou tedy používat jen registry R4 až R15). Zbývající čtyři registry jsou vyčleněny jako ukazatel zásobníku, čítač programu, generátor konstant a stavový registr. Funkční blokový diagram mikrokontroléru MSP430G2553 je pak na obrázku 1.26. Všechny ostatní informace k tomuto mikrokontroléru lze najít v literatuře [9] nebo [10].



Obr. 1.26 Funkční blokové schéma mikrokontroléru MSP430G2553 (obrázek převzat z [9]).
Poznámka: port P3 je dostupný jen u pouzder s 28 nebo 32 piny.

Výběrem tohoto mikrokontroléru však vzniká jeden problém, který tkví v tom, že vzhledem k jeho maximálnímu napájení 3,6 V není kompatibilní s logickými obvody s napájením 5 V. Tomuto faktu musel být přizpůsoben i výběr některých dalších součástek, především LCD displeje.

1.9 Popis použitého LCD displeje

Vzhledem k tomu, co bylo řečeno výše, tj. nekompatibilita součástek s napájením 5 V s použitým mikrokontrolérem, bylo nutné vybrat typ LCD displeje, který by také pracoval s napájecím napětím kolem 3,3 V. Proto byl vybrán LCD displej EA DOGM162L-A od firmy Electronic Assembly, jehož vzhled je na obrázku 1.27.



Obr. 1.27 LCD displej Electronic Assembly EA DOGM162L-A (obrázek převzat z [11]).

Jedná se o dvouřádkový znakový LCD displej řízený řadičem ST7036. Displej může být napájen buď napětím 5 V, nebo 3,3 V. V případě napájení napětím 3,3 V je třeba displej doplnit několika externími kondenzátory. Řadič displeje umožňuje řízení

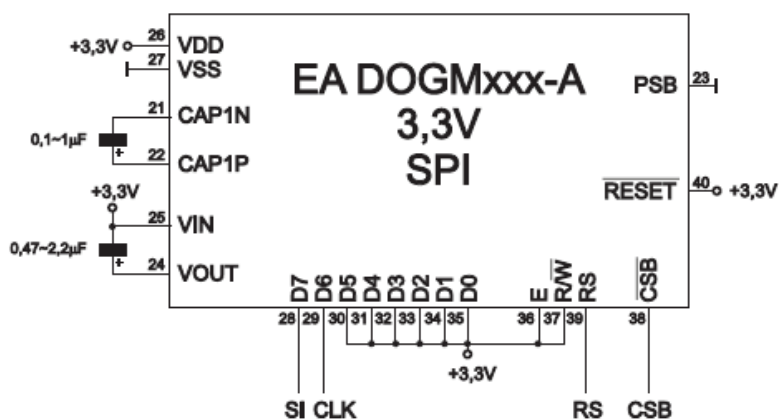
displeje pomocí paralelního 4-bitového nebo 8-bitového rozhraní (podobně jako u displejů s radičem Hitachi HD44780) nebo pomocí rozhraní SPI (Seriól Peripheral Interface) [11].

V konstrukci bude použito právě řízení pomocí SPI z důvodu úspory portů mikrokontroléru. Zapojení displeje pro napájecí napětí 3,3 V a řízení pomocí rozhraní SPI je na obrázku 1.28. SPI je sériové synchronní obousměrné rozhraní, které využívá čtyř vodičů: \overline{SCK} (hodinový signál), $MOSI$ (Master Out Slave In), $MISO$ (Master In Slave Out) a \overline{SS} (Slave Select). Jak je vidět, SPI pracuje na principu Master×Slave (nadrízený×podřízený), kdy zařízení Master vysílá hodinový signál a tím řídí celou komunikaci. Signál $MOSI$ slouží k posílání dat ze zařízení Master do Slave, $MISO$ zase obráceným směrem. Signál \overline{SS} slouží k výběru příslušného zařízení Slave, protože na jedné sběrnici může být připojeno více zařízení [12].

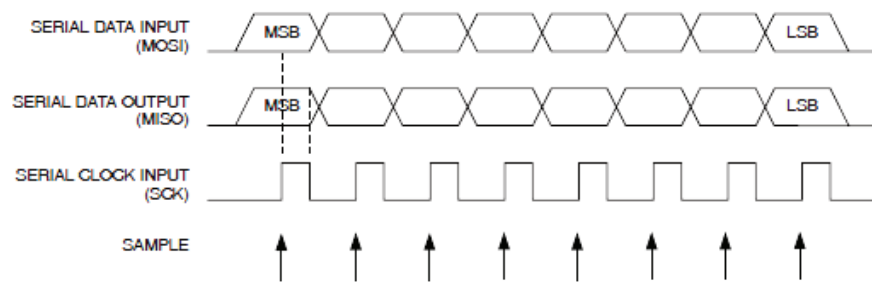
SPI komunikace probíhá v několika krocích:

- 1) zahájení komunikace tak, aby pro požadované Slave zařízení $\overline{SS} = 0$,
- 2) příprava dat k přenosu do posuvných registrů,
- 3) přenos je synchronizován hodinovým signálem SCK od zařízení Master,
- 4) přenos od Master ke Slave probíhá vždy po vodiči $MOSI$, přenos od Slave k Master vždy po vodiči $MISO$,
- 5) po odeslání bajtu je zastaven hodinový signál a může být generováno přerušení,
- 6) zařízení Slave je odpojeno tím, že $\overline{SS} = 1$.

Průběh signálů SCK , $MOSI$ a $MISO$ na sběrnici SPI ukazuje obrázek 1.29.



Obr. 1.28 Zapojení displeje pro napájecí napětí 3,3 V a komunikaci pomocí rozhraní SPI (obrázek převzat z [11]).



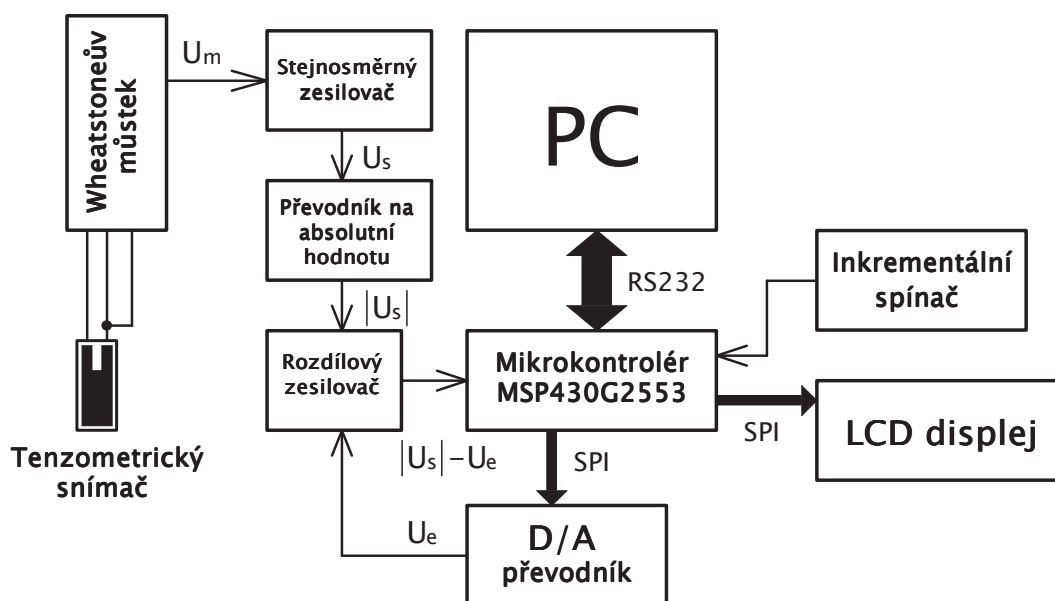
Obr. 1.29 Ukázka časového diagramu SPI komunikace-impulzy SAMPLE udávají okamžik vzorkování datových signálů, v tomto okamžiku musí být data ustálena (obrázek převzat z [12]).

2 POPIS VLASTNÍ NAVRŽENÉ KONSTRUKCE MĚŘICÍHO SYSTÉMU

V této kapitole je popsán vlastní návrh měřicího systému, popsáno navržené zapojení, a tedy položen základ pro fyzickou realizaci měřicího systému.

2.1 Blokové schéma měřicího systému

Blokové schéma navrženého tenzometrického měřicího systému je na obrázku 2.1. Samotný tenzometrický odporový snímač je zapojen do Wheatstoneova měřicího můstku, jehož výstupní diferenční napětí je zesíleno pomocí stejnosměrného zesilovače na hodnotu vhodnou pro zpracování interním A/D převodníkem mikrokontroléru. Převodník je však schopen zpracovávat pouze kladné hodnoty napětí, takže je nutné získat absolutní hodnotu výstupního napětí stejnosměrného zesilovače, od které se pak v diferenčním zesilovači odečte hodnota výstupního napětí D/A převodníku, jejímž účelem je korekce vlivu teploty na snímač a korekce vlivu odporu přírodního vedení snímače, což jsou jevy zkreslující výsledek měření. Toto řešení navíc zajistí, že A/D převodník pracuje vždy se svým plným rozsahem. Výstupní napětí z diferenčního zesilovače je přivedeno na jeden z kanálů interního A/D převodníku mikrokontroléru, kde je převedeno na číslo, mikrokontrolér provede výpočet a měřená veličina je zobrazena na LCD displeji a odeslána do osobního počítače pomocí sériového rozhraní RS-232. K ovládání systému bude sloužit buď uživatelské rozhraní v PC, nebo inkrementální otočný spínač sloužící k pohybu v menu na LCD displeji.



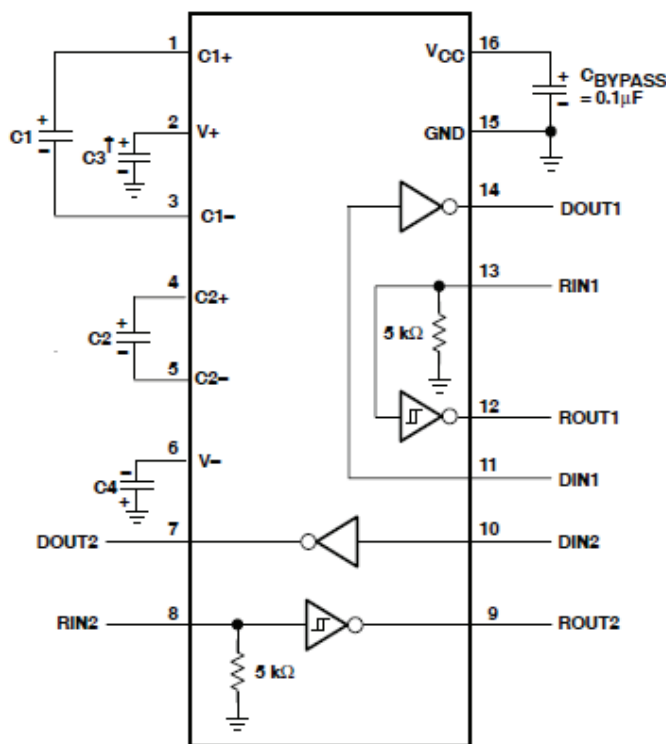
Obr. 2.1 Blokové schéma tenzometrického měřicího systému.

2.2 Popis obvodového schématu měřicího systému

Obvodové schéma navrženého měřicího systému zobrazeno v příloze A.1. Operační zesilovač IC2 je vlastně aktivní Wheatstoneův můstek (viz. kap.1.5.2). Byl použit operační zesilovač NE5534, který má nízkou vstupní napěťovou nesymetrii, která se dá ještě kompenzovat pomocí trimru R_{15} . Vlastní odporový tenzometrický snímač by měl být připojen ke konektoru X1 a to pomocí tří vodičů. Předpokládá se použití snímače s jmenovitým odporem 120Ω . Tento odpor je však pro zpětnou vazbu operačního zesilovače příliš nízký, proto bylo nutné zvolit odpory o hodnotě 270Ω a odpor snímače posunout na tuto hodnotu prostřednictvím odporu 150Ω , který bude pravděpodobně realizován jako trimr. Protože však není jasné, zda bude nějaký tenzometrický snímač vůbec k dispozici, supluje jeho přítomnost víceotáčkový trimr (popř. potenciometr) R_{19} . V tom případě se spojí svorky X1 a X5 pomocí tří dlouhých vodičů simulujících přítomnost přívodního vedení odporového snímače. Následuje obvod IC6 (INA2126), což je stejnosměrný zesilovač, který zesílí výstupní napětí můstku (desítky mV) na takovou hodnotu, aby mohl být plně využit rozsah interního A/D převodníku mikroprocesoru (0 V až zhruba 3 V). Jeho zesílení je nastavováno pomocí víceotáčkového trimru R_{16} , přičemž hodnota výstupního napětí se řídí vztahem:

$$A_U = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R_{16}} \quad [-; \text{k}\Omega] \quad (2.1)$$

Zapojení dvojitého operačního zesilovače IC1 tvoří operační usměrňovač, který slouží k získání absolutní hodnoty napětí z výstupu stejnosměrného zesilovače, protože A/D převodník mikrokontroléru neumí zpracovávat záporné hodnoty napětí. Použit je operační zesilovač NE5532, vybraný především z důvodu nízké vstupní napěťové nesymetrie. Za ním následuje operační zesilovač IC3 (opět typ NE5534 s kompenzací vstupní napěťové nesymetrie) v zapojení jako diferenční zesilovač s jednotkovým zesílením, na jehož invertující vstup je přivedeno výstupní napětí z D/A převodníku U1. Toto zpětnovazební napětí se odečítá od napětí přímé větve z toho důvodu, aby při nulové deformaci tenzometrického snímače bylo napětí na vstupu A/D převodníku nulové, což nemusí být splněno např. z důvodu změn odporu snímače vlivem teploty. Potřebná vstupní data pro D/A převodník se získají při kalibraci systému. Převodník je desetibitový ovládaný pomocí sběrnice SPI, jedná se o typ DAC101S101 od firmy Texas Instrument. Rozdílové napětí z výstupu IC3 je přivedeno na jeden z kanálů interního desetibitového A/D převodníku mikrokontroléru MSP430G2553 (ve schématu IC4), kde je převedeno na číslo, je proveden algoritmus výpočtu mechanického napětí σ , jehož hodnota je pak zobrazována na LCD displeji DISP1. O mikrokontroléru a displeji blíže pojednávají kapitoly 1.8 a 1.9, popř. literatura [9], [10] a [11], [12]. Data lze posílat také do PC a to pomocí sériové linky UART. Změnu napěťových úrovní linky tak, aby odpovídaly standardu RS-232 zajišťuje integrovaný obvod IC5 typu MAX3232, což je obdoba známého MAX232. Rozdíl spočívá v tom, že MAX3232 může pracovat s napájením 3 V (resp. $3,3 \text{ V} \pm 0,3 \text{ V}$) a tomu odpovídajícími logickými úrovněmi. Obvod obsahuje 2 přijímače (R-receiver) a dva vysílače (D-driver), jejichž zapojení v pouzdru je vidět na obrázku 2.2 [13].



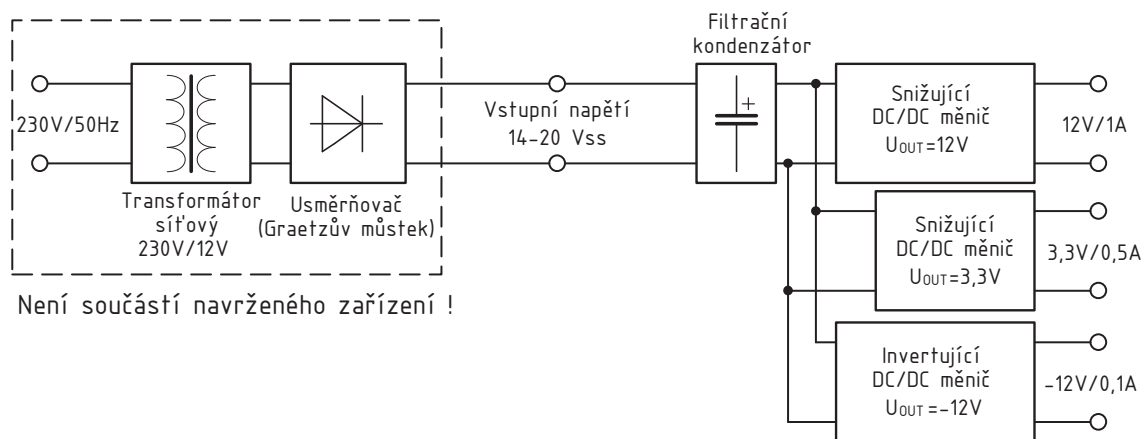
Obr. 2.2 Zapojení integrovaného obvodu MAX3232 (obrázek převzat z [13]).

Hodnoty kondenzátorů C1 až C4 se volí dle napájecího napětí z tabulky a pro napájení 3,3 V mají hodnotu shodně 0,1 μF . Připojení k PC je možné pomocí standardního devítipinového konektoru X4 typu CAN9Z. Přes toto spojení by mělo být možné také celý systém řídit a kalibrovat. Všechny funkce systému musí být samozřejmě možné řídit i bez použití PC. K tomu by měl sloužit inkrementální spínač SW1, kterým lze procházet menu zobrazované na LCD displeji.

2.3 Napájení měřicího systému

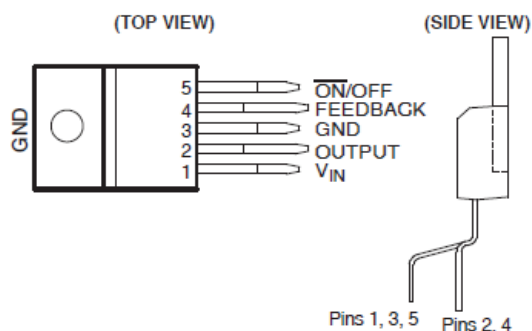
Nezbytnou částí elektronických zařízení je zdroj napájecího napětí. V tomto měřicím systému je nutno zajistit 3 hodnoty napájecího napětí: 12 V, -12 V a 3,3 V. Napětí ± 12 V slouží k napájení analogové části systému a napětí 3,3 V napájí digitální obvody systému.

Předpokládá se napájení ze sítě 230 V, zároveň je však třeba zajistit především napětí 12 V a 3,3 V dostatečně přesné a stabilní, což si vyžádalo použití spínaného stabilizátoru. Protože však návrh síťového spínaného zdroje je komplikovaná záležitost, byla zvolena koncepce se síťovým transformátorem, jehož výstupní napětí je dvoucestně usměrněno a vyfiltrováno kondenzátorem, čímž získáme už víceméně stejnosměrné napětí, které ale není stabilizované. Nicméně už je vhodné k přivedení na snižující DC/DC měnič. Transformátor s usměrňovačem a filtrem lze koupit jako hotový celek, který stačí zapojit do zásuvky, čehož lze s výhodou využít. Klíčovou záležitostí je tedy výběr vhodného DC/DC měniče a návrh jeho externích součástek. Blokové schéma napájení měřicího systému je na obrázku 2.3.

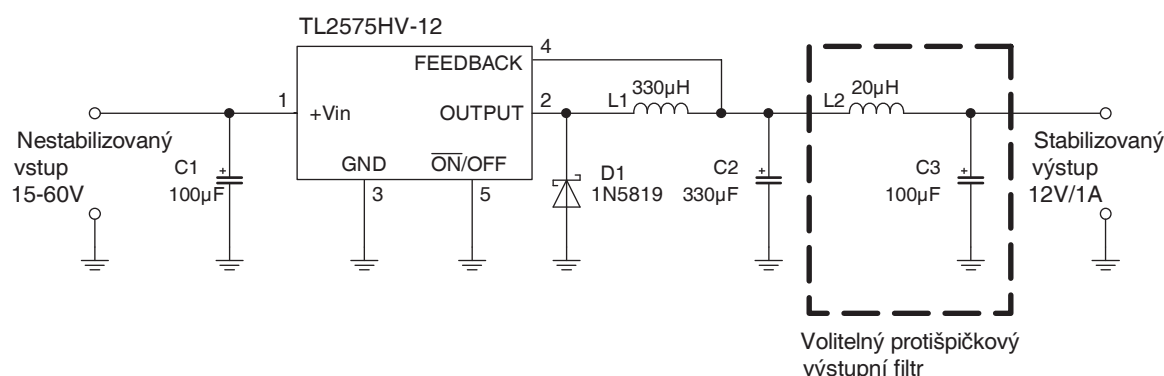


Obr. 2.3 Blokové schéma zapojení napájecího zdroje pro tenzometrický měřicí systém.

Jako DC/DC měnič s výstupem 12 V byl zvolen obvod TL2575HV-12IKV. Jedná se o měnič v pouzdru TO-220 s pěti vývody (viz. obrázek 2.4) s výstupním proudem je 1 A a vestavěným spínacím tranzistorem. Typické zapojení obvodu je na obrázku 2.5 [14].



Obr. 2.4 Pouzdro TO-220-5 pro stabilizátor TL2575HV s označením funkce vývodů (obrázek převzat z [14]).

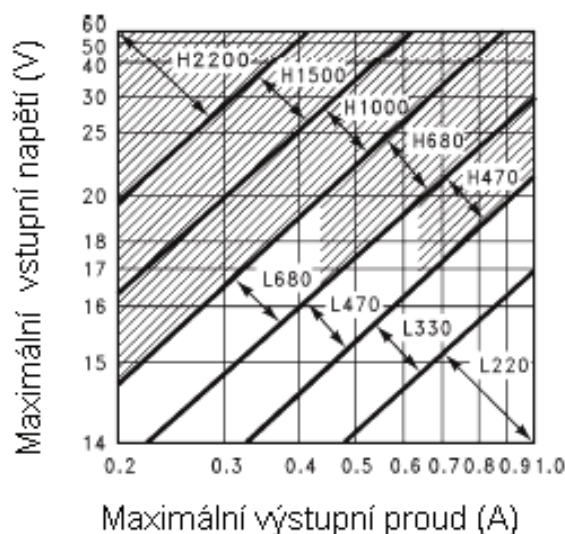


Obr. 2.5 Typické zapojení spínaného stabilizátoru TL2575HV-12 (obrázek převzat z [14]).

Návrh součástek pro spínaný stabilizátor probíhá v několika krocích [13]:

- 1) Výběr cívky a výpočet zvlnění proudu.
- 2) Výpočet, popř. volba výstupního kondenzátoru C2.
- 3) Výběr záchytné diody.
- 4) Výběr vstupního kondenzátoru C1.
- 5) Volitelně návrh výstupního filtru L2, C3.

ad 1) Hodnota indukčnosti cívky se vybírá z grafů na obrázku 2.6 na základě maximálního výstupního proudu $I_{LOAD(max)}$ a maximálního vstupního napětí $U_{IN(max)}$.



Obr. 2.6 Graf pro výběr indukčnosti cívky (převzato ze [14]).

Zvolí-li maximální výstupní proud 1 A a maximální vstupní napětí 15,5 V, dostane se bod v oblasti L220 což odpovídá cívce $L1 = 220 \mu\text{H}$. Hodnota vstupního napětí je volena z předpokladu, že sekundární napětí síťového transformátoru je 12 Vstř. Usměrněním s uvažováním úbytku na diodách asi 1,4 V a následným vyfiltrováním se získá právě tato hodnota vstupního napětí. Nyní je třeba vypočítat špičkový proud cívkou $I_{L1(pk)}$ dle vztahu:

$$I_{L1(pk)} = I_{LOAD(max)} + (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \cdot \frac{1}{f_{OSC}} \cdot \frac{1}{2 \cdot L1} =$$

[A; A, V, Hz, H] (2.2)

$$= 1 \text{ A} + (15,5 \text{ V} - 12 \text{ V}) \cdot \frac{12 \text{ V}}{15,5 \text{ V}} \cdot \frac{1}{52000 \text{ Hz}} \cdot \frac{1}{2 \cdot 220 \cdot 10^{-6} \text{ H}} = \underline{\underline{1,1184 \text{ A}}}$$

kde $f_{OSC} = 50 \text{ kHz}$ je frekvence spínání regulátoru.

ad 2) Výstupní kondenzátor by měl mít kapacitu v rozmezí $100 \mu\text{F}$ - $470 \mu\text{F}$, přičemž je třeba vybrat kondenzátor s malým ekvivalentním sériovým odporem (Low ESR), který však z důvodu udržení stability měniče nesmí klesnout pod $0,05 \Omega$. Napětí

kondenzátoru musí být alespoň 1,5 násobek U_{OUT} . Maximální hodnota ESR kondenzátoru musí vyhovět vztahu [14]:

$$ESR = \frac{U_{zvl.}}{I_{zvl.}} \quad [\Omega; V, A] \quad (2.3)$$

kde $U_{zvl.}$ je maximální požadované zvlnění výstupního napětí a $I_{zvl.}$ je zvlnění proudu cívkou L1. Zvlnění proudu je 0,1184 A a volbou zvlnění napětí 20 mV se získá požadavek, aby ESR bylo méně než 0,169 Ω . Z důvodu omezení parazitních jevů se požaduje, aby výstupní kondenzátor byl co nejbližší k výstupu měniče.

ad 3) Záchytná dioda by měla být Schottkyho dioda musí splňovat 2 podmínky. První podmínka je:

$$I_{D(max)} > 1,2 \cdot I_{LOAD(max)} = 1,2 \cdot 1 \text{ A} = 1,2 \text{ A} \quad [A] \quad (2.4)$$

kde $I_{D(max)}$ je maximální přípustný proud diodou a $I_{LOAD(max)}$ je maximální výstupní proud.

Druhá podmínka je:

$$U_R > 1,25 \cdot U_{IN(max)} = 1,25 \cdot 15,5 \text{ V} = 19,375 \text{ V} \quad [V] \quad (2.5)$$

kde U_R je napětí na diodě v závěrném směru.

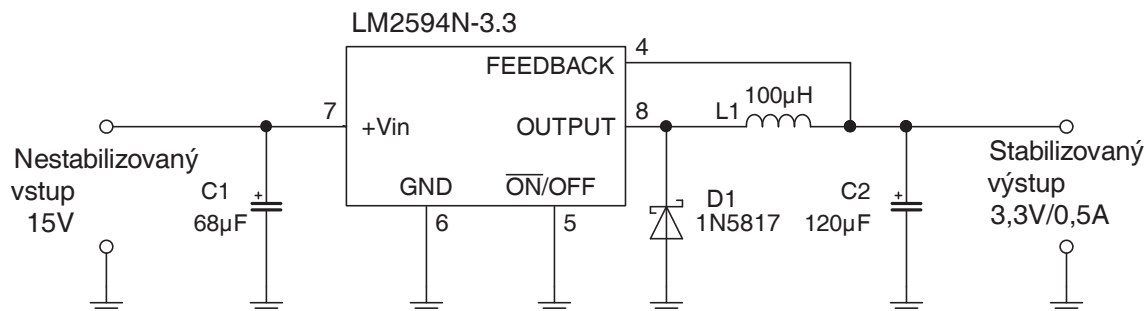
ad 4) Kapacita vstupního kondenzátoru má být větší než 47 μF , musí být typu Low ESR musí splňovat podmínku:

$$I_{C(RMS)} > 1,2 \cdot \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \cdot I_{LOAD(max)} = 1,2 \cdot \frac{12 \text{ V}}{15,5 \text{ V}} \cdot 1 \text{ A} = 0,929 \text{ A} \quad [A; V, A] \quad (2.6)$$

kde $I_{C(RMS)}$ je efektivní hodnota maximálního proudu, který může být z kondenzátoru odebírán.

ad 5) Ve vrcholech trojúhelníkovitě zvlněného výstupního napětí se někdy objevují vysoké a úzké napěťové špičky způsobené chováním parazitních vlastností především výstupního kondenzátoru na kmítočtu spínání. Ty lze omezit použitím LC filtru, přičemž C se volí cca 100 μF a L se volí cca 20 μH .

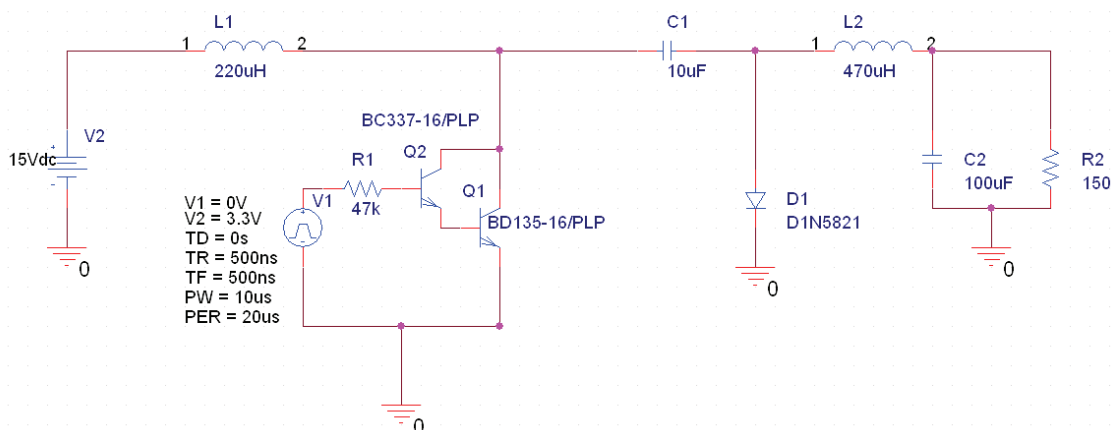
Jako zdroj napětí pro digitální část byl zvolen spínaný snižující regulátor LM2594N-3.3. Jedná se o obvod v pouzdru DIP-8 s osmi vývody a výstupním napětím 3,3 V. Jeho typické zapojení je na obrázku 2.7.



Obr. 2.7 Typické zapojení spínaného stabilizátoru TL2594N-3.3 (obrázek převzat z [15]).

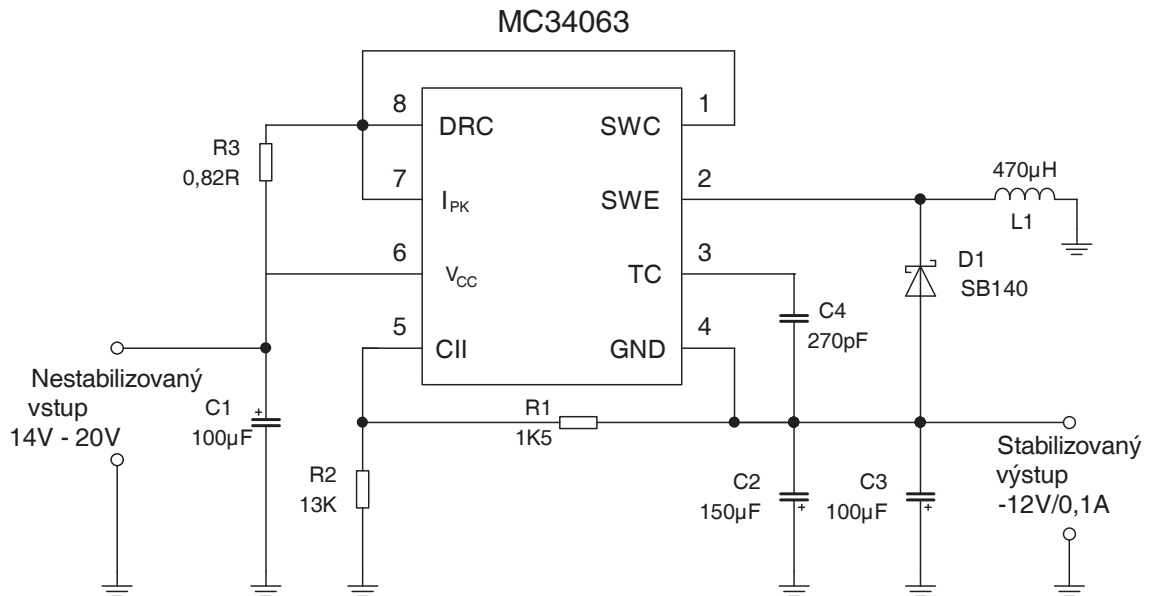
Maximální výstupní proud měniče je 0,5 A, jeho spínací frekvence je 150 kHz. Návrh součástek celého stabilizátoru je velmi podobný jako u předchozího stabilizátoru. Z grafu se určí velikost indukčnosti cívky, která pro výstupní proud 0,5 A a vstupní napětí 15 V vychází 100 μ H. Velikost výstupního kondenzátoru se volí z rozmezí 82 μ F-220 μ F, samozřejmě je, že kondenzátor by měl mít malý ekvivalentní sériový odpor ESR. Požadavkem na diodu je proud v propustném směru alespoň 1,3 \times větší než maximální proud zátěží a závěrné napětí alespoň 1,25 \times větší než maximální vstupní napětí navrhovaného stabilizátoru. Vstupní kondenzátor musí mít opět malý ekvivalentní sériový odpor ESR a musí být dimenzován na napětí nejméně 1,5 \times $U_{IN(max)}$. Oba kondenzátory musí být co nejbližší měniči a musejí mít co nejkratší příklady [15].

Posledním blokem napájecí části měřicího systému je zdroj napětí -12 V nutného pro symetrické napájení operačních zesilovačů. Tento zdroj nemusí být navržen na příliš velké proudové zatížení, zřejmě postačí 100 mA. Jako vstupní napětí je k dispozici nestabilizovaných zhruba 15-16 V, je třeba použít invertující měnič. Nejprve byla zvolena zvláštní koncepce, kdy není použit specializovaný řídicí obvod, ale spínací impulsy pro tranzistor jsou generovány mikrokontrolérem pomocí časovače v režimu PWM. Měnič byl simulován v programu OrCAD PSpice. Zapojení pro simulaci je na obrázku 2.8. Jedná se o zapojení Čukova měniče, který slouží ke generování záporného napětí přibližně -20 V z napětí nestabilizovaného vstupu 15 V celé napájecí části. Napětí výstupu měniče je pak stabilizováno lineárním integrovaným stabilizátorem 7912 na hodnotu -12 V [16].



Obr. 2.8 Zapojení Čukova měniče pro vytvoření záporného napájecího napětí.

Bohužel po vyrobení prototypu desky zdroje se koncepce invertujícího měniče ukázala jako zcela nevhodná z důvodu velkého proudového odběru, který se ani úpravami nepodařilo snížit. Proto byl nakonec použit invertující měnič s obvodem MC34063, jehož zapojení je na obrázku 2.9. Hodnoty součástek byly zvoleny podle výsledků výpočtu ve webovém kalkulátoru dostupném na internetové stránce uvedené v použité literatuře pod položkou [17].



Obr. 2.9 Zapojení invertujícího měniče s integrovaným obvodem MC34063 (obrázek převzat z [18]).

Hodnoty součástek byly zvoleny na základě vztahů získaných z datového listu obvodu MC34063 (viz. literatura [18]). Požaduje se vstupní napětí v rozsahu 14 V až 20 V, výstupní napětí -12 V s proudovou zatížitelností do 100 mA, minimální kmitočet spínání 50 kHz a zvlnění napětí špička-špička maximálně 20 mV. Výpočet začíná určením poměru doby sepnutí ku době vypnutí podle vztahu:

$$\frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} = \frac{|U_{\text{OUT}}| + U_{\text{F}}}{U_{\text{IN}} - U_{\text{sat}}} = \frac{12 \text{ V} + 0,4 \text{ V}}{14 \text{ V} - 0,7 \text{ V}} = 0,93233 \quad [-; \text{V}] \quad (2.7)$$

kde U_{OUT} je výstupní napětí, U_{F} je napětí na diodě v propustném směru (zvoleno přibližně s ohledem na použití Schottkyho diody), U_{IN} je vstupní napětí a U_{sat} je saturační napětí vnitřního spínacího prvku integrovaného obvodu.

Dále je třeba zjistit dobu t_{on} (s uvažováním výsledku z 2.7) vyjádřením z rovnice:

$$(t_{\text{on}} + t_{\text{off}})_{\text{max}} = \frac{1}{f_{\text{min}}} \quad [\text{s}; \text{Hz}] \quad (2.8)$$

Pak dostáváme:

$$t_{\text{on}} = \frac{t_{\text{on}} \cdot \frac{1}{f_{\text{min}}}}{1 + \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}}} = \frac{0,93233 \cdot \frac{1}{50000 \text{ Hz}}}{1,93233} = 9,6498 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 9,6498 \text{ } \mu\text{s} \quad [\text{s}; \text{Hz}] \quad (2.9)$$

kde f_{min} je minimální kmitočet spínání. Hodnota $t_{\text{on}}/t_{\text{off}}$ se získá z rovnice 2.7.

V dalším kroku se vypočte hodnota kondenzátoru C4, který určuje spínací kmitočet měniče. Použije se vztah:

$$\begin{aligned} C_T &= 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\text{on}} = 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 9,6498 \cdot 10^{-6} \text{ s} = \\ &= 434,2 \cdot 10^{-12} \text{ F} = \underline{\underline{434,2 \text{ pF}}} \quad [\text{F}; \text{C}, \text{s}] \quad (2.10) \end{aligned}$$

Poznámka: Jedná se zřejmě o empirický vzorec, takže jednotky nemusí dávat fyzikálně smysl. Jednotky v závorce jsou však určeny tak, aby vztah dával fyzikálně smysl.

Nyní je třeba vypočítat špičkový spínaný proud:

$$\begin{aligned} I_{\text{PK}(\text{switch})} &= 2 \cdot I_{\text{OUT}(\text{max})} \cdot \left[\frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} + 1 \right] = 2 \cdot 0,1 \text{ A} \cdot [0,93233 + 1] = \\ &= \underline{\underline{0,386 \text{ A}}} \quad [\text{A}; \text{A}, \text{s}] \quad (2.11) \end{aligned}$$

kde $I_{\text{OUT}(\text{max})}$ je maximální požadovaný výstupní proud měniče.

Následuje výpočet odporu omezujícího výstupní proud měniče:

$$R_{\text{SC}} = \frac{0,3}{I_{\text{PK}(\text{switch})}} = \frac{0,3}{0,386 \text{ A}} = \underline{\underline{0,777 \text{ } \Omega}} \quad [\Omega; \text{V}, \text{A}] \quad (2.12)$$

Dále je třeba vypočítat hodnotu výstupního kondenzátoru dle vztahu:

$$\begin{aligned} C_O &= \frac{I_{\text{OUT}} \cdot t_{\text{on}}}{U_{\text{ripple}(\text{p-p})}} = \frac{0,1 \text{ A} \cdot 9,6498 \cdot 10^{-6} \text{ s}}{0,02 \text{ V}} = 48,25 \cdot 10^{-6} \text{ F} = \\ &= \underline{\underline{48,25 \text{ } \mu\text{F}}} \quad [\text{F}; \text{A}, \text{s}, \text{V}] \quad (2.13) \end{aligned}$$

kde $U_{\text{ripple}(\text{p-p})}$ je zvlnění napětí špička-špička. Výstupní kondenzátor musí být typu Low ESR.

Jedním z posledních kroků je výpočet velikosti tlumivky podle vztahu:

$$\begin{aligned} L_{(\text{min})} &= \frac{U_{\text{IN}(\text{min})} - U_{\text{sat}}}{I_{\text{PK}(\text{switch})}} \cdot t_{\text{on}} = \frac{14 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{0,386 \text{ A}} \cdot 9,6498 \cdot 10^{-6} \text{ s} = \\ &= \underline{\underline{332,5 \cdot 10^{-6} \text{ H}}} = \underline{\underline{332,5 \text{ } \mu\text{H}}} \quad [\text{H}; \text{V}, \text{A}, \text{s}] \quad (2.14) \end{aligned}$$

Posledním krokem je určení velikostí rezistorů, které určují výstupní napětí. Pro toto napětí platí vztah:

$$|U_{\text{OUT}}| = 1,25\text{V} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad [\text{V}; \text{V}, \Omega] \quad (2.15)$$

Tyto rezistory je třeba zvolit zkusmo tak, aby byly dostupné v některé z řad a zároveň měly odpor řádově kiloohmy. Vyhoví hodnoty $R_2=13 \text{ k}\Omega$ a $R_1=1,5 \text{ k}\Omega$.

Hodnota vstupního kondenzátoru byla zvolena dle doporučení v datovém listu na $100 \mu\text{F}$.

Jednodušší variantou výpočtu hodnot součástek je použití webového kalkulátoru dostupného na internetové stránce uvedené v použité literatuře pod položkou [17].

Obvodové schéma celé napájecí části měřicího systému je uvedeno v příloze A.2.

3 POPIS DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

3.1 Napájecí zdroj

Ze tří použitých měničů se podařilo zpočátku oživit pouze dva, a to s výstupními napětími 12 V a 3,3 V. Jejich reálná výstupní napětí při zatížení samotným měřicím systémem jsou 11,98 V a 3,29 V. To je pro potřeby měřicího systému dostatečné, tudíž nebylo třeba se jimi dále zabývat.

Větší problémy však nastaly u měniče s výstupem -12 V. Jak už bylo řečeno, původní koncepce s Čukovým měničem spínaným impulsy z mikrokontroléru se ukázala jako zcela nevhodná, protože jeho odběr byl ve špičkách více než 2 A a výkon na spínacím tranzistoru se blížil ke 20 W. Toto řešení bylo tedy zavrženo a nahrazeno řešením s integrovaným invertujícím měničem MC34063.

Bohužel i tentokrát se vyskytly problémy, když i při polovičním zatížení, než na které byl měnič navržen (zatížení proudem cca 60 mA) bylo výstupní napětí cca 3 V, přičemž vstupní proud měniče byl 130 mA. Pokusně bylo zjištěno, že teprve při zatížení nízkými jednotkami miliampérů bylo na výstupu měniče dosaženo napětí okolo 12 V, přičemž ale po připojení vstupního napětí měniče byl odebíraný proud zmiňovaných 130 mA a na hodnotu odpovídající zátěži a vlastnímu odběru měniče klesl až po pár sekundách. Vzhledem k velmi jednoduchému zapojení měniče (viz. obrázek 2.9) byla vyloučena závada některé pasivní součástky, takže byl vyměněn integrovaný obvod, který byl sice nový a nepoužitý, přesto se ukázalo, že právě ten je příčinou obtíží. Po této úpravě funguje měnič bezproblémově a jeho výstupní napětí při zatížení měřicím systémem je -12,26 V.

Finální návrh desky plošných spojů pro zdroj, stejně jako jeho osazovací výkres, je uveden v příloze A.3. Zdrojové soubory programu EAGLE (přípony .sch a .brd) pak lze

nalézt na disku CD-ROM přiloženém k bakalářské práci. Jedná se o jednostrannou desku na které jsou umístěny všechny tři měniče. Mimo to je však uveden i návrh desky zvlášť pro invertující měnič s obvodem MC34063, který vznikl poté, co zklamala koncepce Čukova měniče.

3.2 Měřicí systém

Celé zapojení měřicího systému je umístěno na jedné jednostranné desce plošných spojů, jejíž finální verze včetně osazovacího výkresu je uvedena v příloze A.4. Předtím však vznikla ještě první verze desky, která odhalila několik nedostatků původně navrženého zapojení. Ve dvou případech se jednalo o chyby způsobené nepozorností při překreslování navrženého zapojení do programu EAGLE. Třetí závadou bylo, že resetovací pin (pin $\overline{\text{RESET}}$ číslo 40 – viz. obrázek 1.28) LCD displeje byl zapojen přímo na napájecí napětí 3,3 V (neaktivní stav). Výrobce totiž nikde v textu datového listu displeje neupozorňuje, že při inicializaci displeje pomocí sběrnice SPI je třeba stav na tomto pinu několikrát měnit, a tudíž musí být připojený k mikrokontroléru. Tuto drobnost lze matně pochopit po prostudování vzorového programu pro mikrokontroléry řady 51. Faktem je, že následně opravdu zůstává v neaktivním stavu, tedy připojený na 3,3 V. Všechny tři závady samozřejmě řeší finální verze desky. Po oživení první verze desky bylo také zjištěno, že na pozici trimru R15, který koriguje vstupní napěťovou nesymetrii operačního zesilovače IC2 (součást aktivního Wheatstoneova můstku), bude vhodnější trimr víceotáčkový místo původně osazeného obyčejného, kterým nelze dostatečně citlivě nesymetrii korigovat. Jinak analogová část funguje bez větších problémů. Výstupní napětí aktivního Wheatstoneova můstku je pro maximální dovolenou změnu odporu snímače 0,5 % (0,6 Ω při odporu snímače 120 Ω) 13,3 mV. Toto napětí je pak zesíleno stejnosměrným zesilovačem INA2126 na hodnotu 2,4 V. Pro případ, že by změna odporu byla opačná a napětí bylo záporné, je vřazen dvojitý operační zesilovač IC1 zapojený jako operační usměrňovač a sloužící jako převodník na absolutní hodnotu. Následuje už jen rozdílový zesilovač, který kompenzuje nenulové napětí vyvolané vlivem odporu přívodního vedení snímače popř. tepelné změny odporu snímače a přívodního vedení (druhý vstup rozdílového zesilovače je zapojen na výstup D/A převodníku). Napětí z výstupu rozdílového zesilovače je pak přivedeno na interní desetibitový A/D převodník mikrokontroléru. Další zpracování je už součástí programu mikrokontroléru, jemuž je věnována podkapitola 3.2.1.

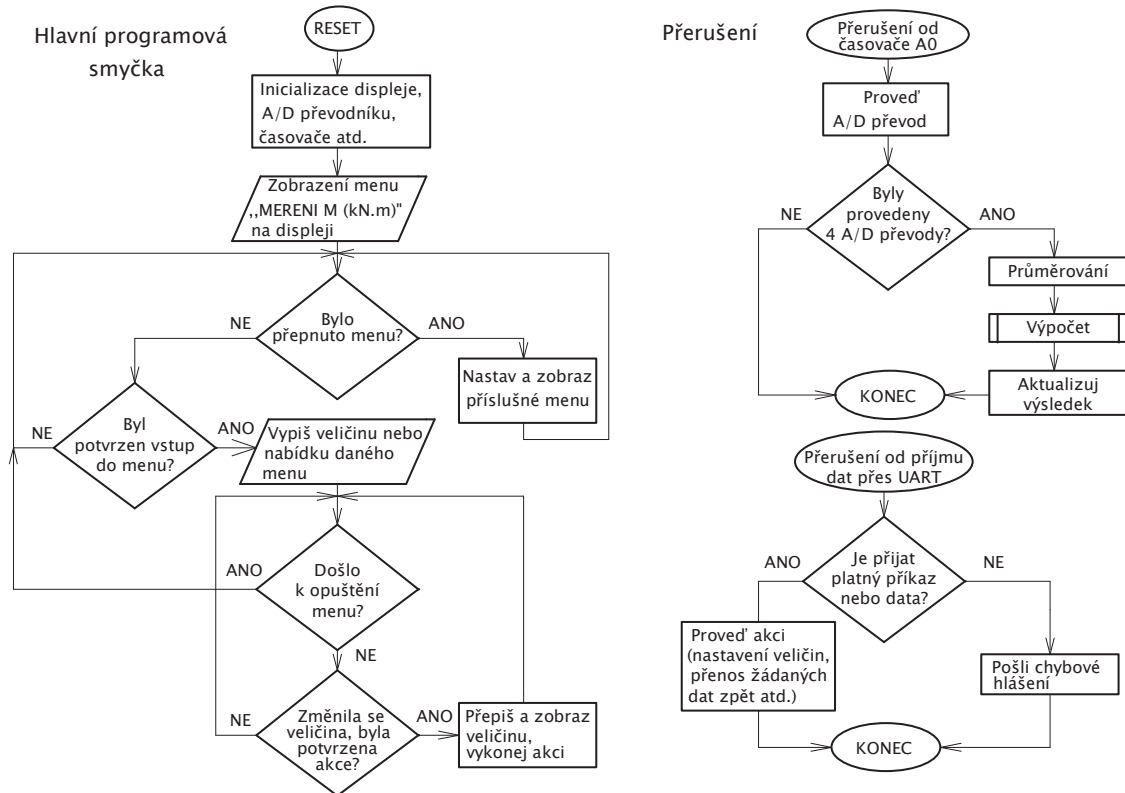
K fyzické realizaci zařízení je nutné uvést, že ani finální verzi desky plošných spojů se nevyhnuly potíže. Vodič spojující pin 4 mikrokontroléru s pinem 38 LCD displeje tvoří se substrátem desky natolik velkou kapacitu, že to znemožňuje fungování displeje. Tento problém byl vyřešen připojením odporu s hodnotou řádově stovek k Ω (konkrétně 390 k Ω) mezi tento vodič a zem. Desku plošných spojů jakožto i osazovací plánek lze nalézt v příloze A.3, soubory programu EAGLE pak na disku CD-ROM přiloženém k bakalářské práci.

Celé zařízení je umístěno do plastové krabice U-KP12. LCD displej, inkrementální spínač a resetovací tlačítko jsou umístěny v předním čele krabice. V zadním čele je umístěn napájecí konektor, vidlice CAN9 pro připojení tenzometrického snímače (zapojeny piny 1, 6, 9) a zásuvka CAN9 pro připojení zařízení k PC prostřednictvím sériové linky RS-232. Několik pohledů na výsledné zařízení lze najít v příloze B.1. Pro

případnou praktickou realizaci by bylo lépe umístit analogovou a digitální část systému na zvláštní desky plošných spojů, aby nedocházelo ke vzájemnému rušení a také odstínit tyto části od desek spínaných zdrojů, které také mohou být významným zdrojem rušivých signálů (spínací frekvence zdrojů).

3.2.1 Program pro mikrokontrolér

Vývojový diagram obslužného programu mikrokontroléru je na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 Vývojový diagram programu pro mikrokontrolér.

Celý program je psán v jazyce C v prostředí Code Composer™ Studio verze 4.2.4 od firmy Texas Instruments. V hlavní programové smyčce (funkce `main()`) se nejprve vypne watchdog, nastaví se a zkonfiguruje zdroj hodin pro mikrokontrolér, nastaví se všechny potřebné vstupně – výstupní vývody, ziniculuje se sběrnice SPI a UART, nastaví A/D převodník a časovač A0. V tomto místě je třeba upozornit na fakt, že vstup A/D převodníku je třeba nastavit jako vstupní s pull-down rezistorem, a to i přesto, že dle datového listu na nastavení nezáleží. Díky nedodržení této podmínky došlo totiž při testování k poškození zvoleného vstupu převodníku (vstup A0 na pinu 2), takže bylo nutné použít jiný vstup A/D převodníku (A3 na pinu 5) a signál RS pro LCD displej přesunout na pin 9 (bit 1 portu 2-P2.1). Toto bylo fyzicky provedeno vytvořením jakési křížené patice. V elektronické příloze uvedený program je přizpůsoben této úpravě a na řádcích programu, které by bylo třeba změnit je v komentáři uvedena poznámka a alternativní nastavení pro případ nepoškozeného mikrokontroléru. Následně program pomocí sběrnice SPI inicializuje LCD displej. Následně se ve smyčce testují různé příznaky, které udávají např. ve kterém menu se program nachází, je-li povolen přenos

dat do PC přes UART, proběhl-li nový A/D převod apod.

Následují funkce `menu_vstup()` a `prepis_velic()`. První z nich slouží ke vstupu do nastavení hodnot v příslušném menu, druhá slouží k přepsání čísel při změně hodnot vstupních veličin. Funkce `vysli_mereni()` slouží k zaslání vypočítané hodnoty kroutícího momentu do PC (je-li povoleno). Následuje řada funkcí pro obsluhu LCD displeje, které jsou převzaty z knihovny pro obsluhu LCD displejů, jejíž autory jsou Peter Fleury, doc. Ing. Tomáš Frýza PhD. a Thomas Breining. Tato knihovna je dostupná např. na stránkách docenta Frýzy (literatura [19]) – záložka Mikroprocesorová technika a embedded systémy→BMPT→Počítačová cvičení→Knihovna LCD. Pozměněny byly pouze funkce `lcd_write()` a `lcd_init()`, a to tak aby odpovídaly požadavkům displeje (komunikace SPI a tomu odpovídající inicializace). Další funkce `DAC_write()` odesílá data do D/A převodníku, následují funkce pro inicializaci sběrnice UART a zaslání znaku a textového řetězce přes UART. Následující funkce `ConfigClocks()` a `FaultRoutine()` nastavují časování mikrokontroléru a ošetřují možnost, že toto nastavení selže. Následuje funkce `vypocet()`, která na základě zadaných veličin a měřené hodnoty napětí vypočítá kroutící moment. Realizuje rovnici:

$$M = E \cdot Z \cdot \varepsilon \quad [\text{N}\cdot\text{m}; \text{Pa}, \text{m}^3, -] \quad (3.1)$$

kde (vyjádřením z rovnic 1.2 a 1.19)

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}}}{K} \quad [-; \text{V}, -] \quad (3.2)$$

kde ε je mechanické napětí, Z je sekční modul (viz tabulka 1.3), E je Youngův modul (viz tabulka 1.1), K je tenzometrická konstanta, U_{in} je vstupní napětí můstku a M je kroutící moment. Při výpočtech jsou všechny dílčí výsledky vhodně násobeny nebo děleny mocninami desítky tak, aby se dosáhlo co největší přesnosti výpočtů a aby byl co nejlépe využit rozsah čísel formátu unsigned long (0 – 2^{32}), ale aby tento rozsah nebyl překročen. Korekce na správnou velikost výsledku je provedena pouhým posuvem desetinné tečky (poř. čárky) při zobrazení na displeji. Důležité je dělit výsledek zesílením stejnosměrného zesilovače.

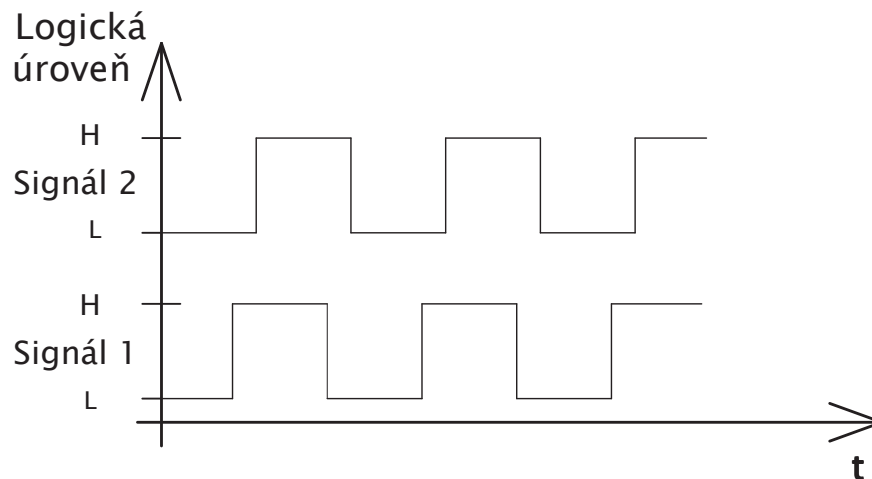
Funkce `bin_bcd()` a `bin_bcd2()` převádějí 16bitové (resp. 32 bitové) číslo na 5 (resp. 10) míst BCD kódu (číslíce 0-9 vyjádřené binárně), které pak mohou být zobrazeny na displeji. Předtím je však třeba ke každé číslici přičíst konstantu 48, aby se korigovalo, že číslice začínají v ASCII tabulce až na pozici 48.

Následuje funkce pro zobrazení názvu menu (`menu_all()`), funkce pro kalibraci (`kalibrace()`), která inkrementuje data pro D/A převodník tak dlouho, dokud výstupní napětí rozdílového zesilovače IC3 (a tedy i výstup A/D převodníku) není nulové (resp. uvnitř tolerance pevně stanovené v programu).

Následující funkce `menu_vstup()` slouží pro vstup do jednotlivých menu, kterých je sedm, popř. pokud už je program uvnitř některého menu, potvrzuje zadané hodnoty a přepíná pozici aktuálně nastavované číslice ve veličině.

Funkce `prep_menu()`, jak už z názvu vyplývá, přepíná jednotlivá menu, funkce `pridej_uber` slouží k inkrementaci nebo dekrementaci příslušného místa v nastavované veličině. Funkce `pretec_podtec()` kontroluje, zda na nastavovaném místě není číslo větší než 9 (zajistí přechod 9→0), popř. menší než 0 (zajistí přechod 0→9).

Dále následuje obsluha vnějšího přerušení od inkrementálního spínače. Tento spínač funguje tak, že při otáčení generuje 2 signály obdélníkového průběhu (viz. obr. 3.2), přičemž jeden je mírně zpožděný za druhým (to, který je zpožděný závisí na směru otáčení). Vyhodnocení je provedeno tak, že jeden ze signálů vyvolá přerušení (signál na pinu P2.3) a následně se kontroluje, je-li druhý signál (pin P2.4) v logické 1 nebo logické 0 a podle toho se zvolí směr otáčení. Volá se funkce `prep_menu()` nebo `pridej_uber()` podle toho, zda program je nebo není uvnitř některého menu. Přerušovací vektor je však společný pro celý port a může být vyvolán i stiskem osy snímače (vestavěné tlačítko). Je tedy nejprve třeba zjistit, který přerušovací příznak je nastaven. Při stisku tlačítka se volá funkce `enter_menu()`.



Obr. 3.2 Průběhy signálů na výstupu inkrementálního spínače.

Za touto obsluhou následuje funkce `uart_preloz()`, která rozpoznává příkazy zasílané měřicímu systému z PC prostřednictvím UART a podle nich nastavuje nebo posílá zpět hodnoty nastavovaných veličin, spouští kalibraci, zastavuje a spouští přenos měřených výsledků, volí formát dat (s desetinnou tečkou nebo čárkou).

Následuje přerušení od časovače A0, který spouští A/D převod a umožňuje změnou hodnoty změnou hodnoty komparačního registru zvolit periodu vzorkování vstupního napětí. V tomto přerušení je také implementován proces průměrování výstupní hodnoty A/D převodu, která se vytváří ze čtyř po sobě následujících výsledků A/D převodu, přičemž nejnovější hodnota se bere s váhou 1/2, další s váhou 1/4 a poslední dvě s váhou 1/8. Pak se teprve volá funkce pro výpočet kroutícího momentu.

Na konci celého obslužného programu se nachází obsluha přerušení od příjmu dat přes UART. Příchozí znaky jsou ukládány do bufferu, zakončeny znakem `\0` a následně je celý řetězec vyhodnocen zavoláním funkce `uart_preloz()`.

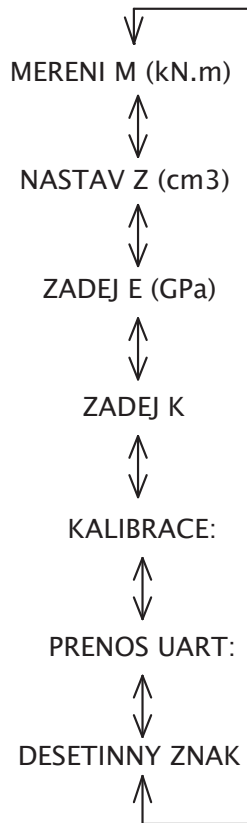
Celý program je uložen na příloženém disku CD-ROM umístěném na vnitřní straně zadních desek bakalářské práce. Celková velikost programu je 6218 bajtů programové

paměti a 562 bajtů datové paměti mikrokontroléru.

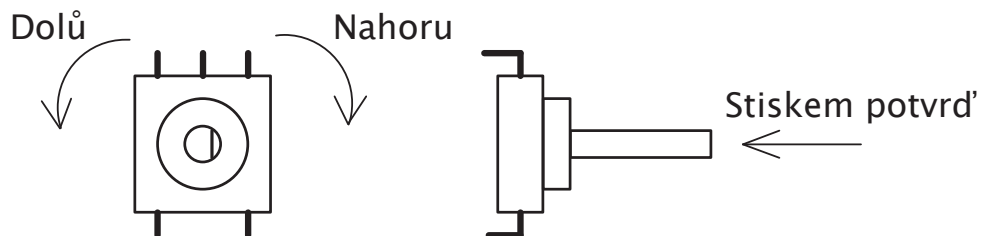
Pro uživatele je ovšem důležitější seznámit se s obsluhou měřicího systému, které je věnována následující podkapitola.

3.2.2 Obsluha měřicího systému

Po resetu (zapnutí) se systém nastaví do měřicího menu – na LCD displeji se objeví nápis „**MERENI M (kN.m)**“. Jednotlivá menu se přepínají otáčením inkrementálního spínače (obrázek 3.4) a podle toho se na displeji objevují nadpisy jednotlivých menu, jak naznačuje obrázek 3.3.



Obr. 3.3 Pořadí přepínání jednotlivých menu.



Obr. 3.4 Inkrementální spínač.

Stlačením spínače se na druhém řádku displeje objeví buď hodnota příslušné veličiny, nebo nápisy „**START STOP**“ (v případě menu „**PRENOS UART:**“), nebo

„**START KONEC**“ (v případě menu „**KALIBRACE:**“), nebo „**CARKA TECKA**“ (v případě menu „**DESETINNY ZNAK**“). Kurzor se nastaví na první pozici nápisu (tj. **S** u slova **START** nebo **C** ve slově **CARKA**). Pootočením spínače doprava se kurzor nastaví na první písmeno druhého slova (po tomto úkonu se lze pootočením doleva vrátit na pozici prvního písmena prvního slova). Stlačením spínače se pak provede příslušná akce, tj. spuštění (**START**) nebo zastavení (**STOP**) přenosu dat přes UART, spuštění kalibrace (**START**) nebo opuštění menu (**KONEC**), nastavení formátu dat s desetinnou tečkou (**TECKA**) nebo čárkou (**CARKA**). Po provedení těchto akcí se zobrazení vrátí do menu „**MERENI M (kN.m)**“.

V případě, že se zobrazení nachází v menu „**MERENI M (kN.m)**“ se po stisku spínače objeví na 2. řádku displeje hodnota kroutícího momentu ve formátu **YYYYX,XXX**, kde každé **X** a **Y** symbolizuje jednu číslici 0-9. V případě, že číslice na pozici **Y** je nula, pak se tato číslice nezobrazuje. Pokud je nastavena v menu „**DESETINNY ZNAK**“, objeví se místo desetinné čárky desetinná tečka. Kurzor je na nejvyšším místě čísla. Stlačením spínače se přesune na 11. pozici řádku displeje. Pak se otočením spínače přepne menu dle obrázku 3.3, případně se stlačením tlačítka kurzor vrací na pozici nejvyššího místa čísla.

V případě, že se zobrazení nachází v menu „**NASTAV Z (cm3)**“ nebo „**ZADEJ E (GPa)**“, se stlačením spínače objeví na druhém řádku displeje třímístné číslo a kurzor je na pozici stovek. Dalším stiskem spínače se kurzor přesune na pozici desítek, pak jednotek a následně se kurzor dostane za číslo. Otočením spínače se pak přepne menu, popř. se stiskem tlačítka kurzor vrátí na pozici stovek. Je-li kurzor na některé platné pozici, otáčením spínače se mění číslice na kurzorem označeném místě čísla.

V případě, že se zobrazení nachází v menu „**ZADEJ K**“, se stlačením spínače objeví na druhém řádku displeje data ve formátu **X,XX**. Opět platí, že desetinná místa jsou oddělena buď tečkou nebo čárkou podle nastavení v menu „**DESETINNY ZNAK**“. Nastavení jednotlivým míst je stejné jako v případě menu „**ZADEJ E (GPa)**“ a „**NASTAV Z (cm3)**“, pozice desetinné tečky (čárky) se samozřejmě při přepínání pozic vynechává.

Kromě ovládání a nastavování parametrů přímo lze většinu funkcí ovládat prostřednictvím jakýchsi AT příkazů prostřednictvím programu **Terminal.exe** [20] pomocí PC (vzhled uživatelského rozhraní tohoto programu je v příloze B.2). Každý příkaz je provázen vypsáním hlášení v programu Terminal. Soubor těchto příkazů spolu s příslušnými hlášeními ukazuje tabulka 3.1.

Tab. 3.1 Ovládací příkazy měřicího systému.

Příkaz	Funkce	Hlášení	Poznámka
K*x,xx	Nastaví hodnotu tenzometrické konstanty K	„K nastaveno“	x jsou číslice 0 až 9, místo des. čárky je akceptována i des. tečka
Z*xxx	Nastaví hodnotu sekčního modulu Z v cm^3	„Z nastaveno“	x jsou číslice 0 až 9

E*xxx	Nastaví hodnotu Youngova modulu v GPa	„E nastaveno“	x jsou číslice 0 až 9
K?	Vrátí aktuálně nastavenou hodnotu tenzometrické konstanty K	„K=x,xx“	x jsou číslice 0 až 9, místo des. čárky se může objevit des. tečka (je-li nastavena)
Z?	Vrátí aktuálně nastavenou hodnotu sekčního modulu Z v cm ³	„Z=xxx cm ³ “	x jsou číslice 0 až 9
E?	Vrátí aktuálně nastavenou hodnotu Youngova modulu E v GPa	„E=xxx GPa“	x jsou číslice 0 až 9
P+	Spustí přenos měřených hodnot krouťícího momentu M do PC	„Prenos spusten“	
P-	Zastaví přenos měřených hodnot krouťícího momentu M do PC	„Prenos zastaven“	
FC	Nastaví formát dat s desetinnou čárkou	„Data s desetinnou carkou“	
FT	Nastaví formát dat s desetinnou tečkou	„Data s desetinnou teckou“	
KAL	Spustí kalibraci	„Kalibrace dokoncena“	

V případě, že není v pořádku délka příkazu, čísla obsahují jiné znaky než číslice nebo se jedná o neznámý příkaz, vypíše se v programu Terminal některé z těchto chybových hlášení:

- a) „Neplatna delka prikazu“
- b) „Chybna data“
- c) „Neplatny prikaz“

3.2.3 Stručné shrnutí vlastností systému

Vlastnosti systému silně závisí na zvolených součástkách a také teplotě. V průběhu testování bylo zjištěno, že je důležité nechat systém po zapnutí několik minut zahřát, a dále, že přestože jako náhrada za snímač, který nebyl k dispozici, byl použit víceotáčkový trimr, bylo obtížné nastavit přesnou změnu odporu, takže výstupní napětí analogové části kolísalo. Lze však předpokládat, že při použití snímače, kdy i při velké deformaci je změna odporu malá, by se tento jev omezil. Ke kolísání navíc přispívá, že se u stejnosměrného zesilovače při větších hodnotách nastaveného zesílení zhoršuje stabilita. Závislost výstupního napětí analogové části systému a několik vlastností systému je uvedeno v tabulkách 3.2 a 3.3 a na obrázcích 3.5 a 3.6. Všechna měření byla provedena multimetrem METEX M-3890D.

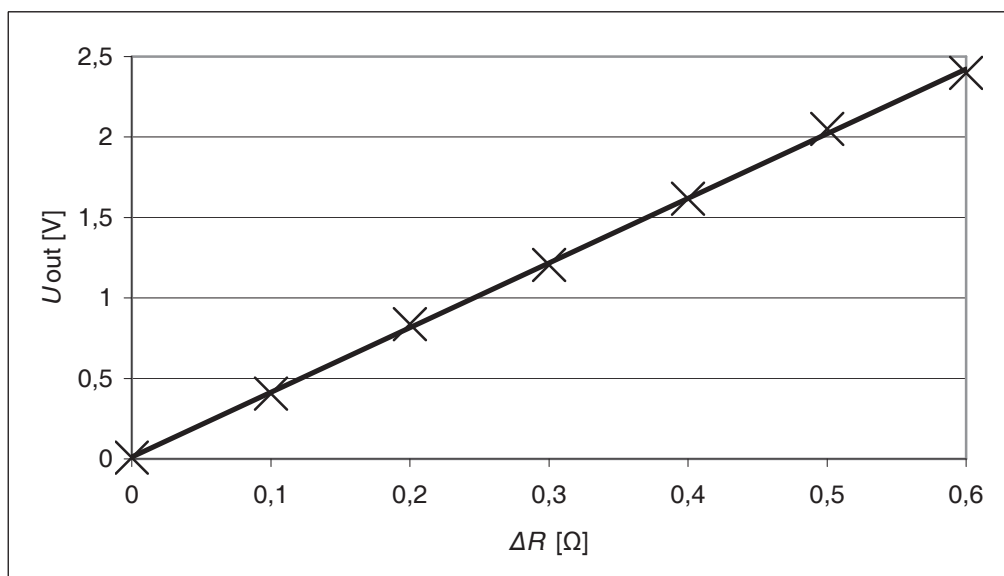
Tab. 3.2 Tabulka závislosti výstupního napětí analogové části měřicího systému a zobrazovaného kroutícího momentu na změně odporu snímače.

Změna odporu ΔR [Ω]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
U_{OUT} [V] - teorie	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4
U_{OUT} [V] - skutečnost	0,007	0,406	0,837	1,205	1,616	2,051	2,399
Odpovídající zobrazená hodnota M [kN·m] - skutečnost	0,200	8,900	17,600	26,700	35,200	44,600	53,200

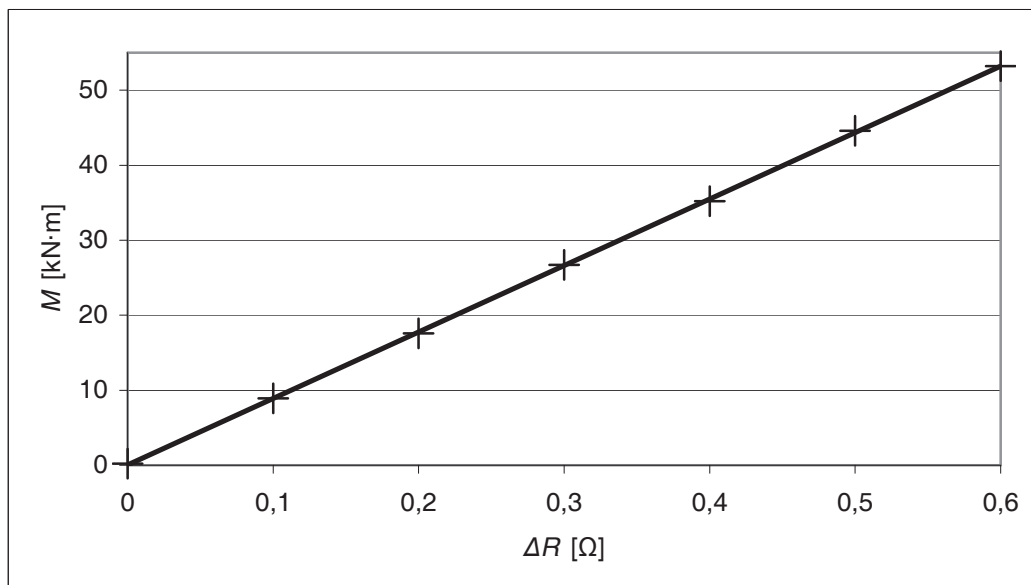
Pozn. : pro výpočet M bylo zadáno $E = 100 \text{ GPa}$, $Z = 100 \text{ cm}^3$, $K=2,00$.

Tab. 3.3 Zjištěné vlastnosti systému a veličiny měřené v některých jeho částech.

Parametr	Hodnota	Poznámka
Napětí na vývodu 6 operačního zesilovače IC2	13,3 mV	při $\Delta R=0,6 \Omega$, tj. 0,5 % z odporu snímače 120Ω
Maximální zobrazovaná hodnota M	55,300 kN·m	Platí-li, že výstupní napětí analog. části $U_{OUT} \geq 2,5 \text{ V}$, pro výpočet bylo zadáno $E = 100 \text{ GPa}$, $Z = 100 \text{ cm}^3$, $K = 2,00$.
Průměrná citlivost na výstupu analogové části systému	0,39988 V/0,1 Ω	
Proudový odběr	143,8 mA	Vstupní napájecí napětí 15,6 V
	131,0 mA	Vstupní napájecí napětí 16,5 V



Obr. 3.5 Závislost výstupního napětí analogové části měřicího systému na změně odporu snímače.



Obr. 3.6 Závislost zobrazovaného kroutícího momentu na změně odporu snímače.

4 ZÁVĚR

Cíle bakalářské práce se podařilo splnit, bylo navrženo obvodové zapojení tenzometrického měřicího systému, toto zapojení bylo zrealizováno a nyní umožňuje vypočítat a zobrazit na základě změřených a zadaných údajů kroutící moment. Tento údaj lze jednoduše zasílat do počítače prostřednictvím sériové linky. Stejně tak lze prostřednictvím počítače nastavovat i číst ostatní údaje pro výpočet. Jestliže by byla tato práce dále rozšiřována, bylo by vhodné zrealizovat desky celého systému v provedení se součástkami pro povrchovou montáž, umístit analogovou a digitální část systému na oddělené desky plošných spojů a odstínit je od desky zdrojů, aby nedocházelo k rušení spínacími frekvencemi zdrojů. Dále by bylo zajímavé alespoň část programu pro mikrokontrolér naprogramovat v assembleru a porovnat jeho rychlost a velikost s programem napsaným v jazyce C. Osobní přínos práce spočívá především ve zdokonalení schopnosti programování mikrokontrolérů. Nectností navrženého zařízení zůstává již zmíněné kolísání výstupní veličiny, což je zřejmě dáno nutností rozlišit velmi malé změny odporu a tím pádem i malé změny napětí, které se ale vlivem poměrně velkého zesílení stávají markantními.

LITERATURA

- [1] BARTUŠEK, K., GESCHEIDTOVÁ, E., KUBÁSEK, R., MIKULKA, J., REZ, J., STEINBAUER, M. *Měření v elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2010. 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [2] BEJČEK, L., ČEJKA, M., REZ, J., GESCHEIDTOVÁ, E., STEINBAUER, M. *Měření v elektrotechnice*. Elektronická skripta. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003.
- [3] KYOWA CO., LTD. *Strain gages*. [online]. 2012 – [cit. 8. listopadu 2012]. Dostupné z www: http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/support/technical/technical_info/strain_gages/gages.
- [4] KYOWA CO., LTD. *Examples of Measurement with Strain Gages*. [online]. 2012 – [cit. 8. listopadu 2012]. Dostupné z www: http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/support/technical/technical_notes.
- [5] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: ČVUT, 1999. 315 s. ISBN 80-01-02057-6.
- [6] DRŽÍNOVSKÝ, J. *A/D a D/A převodníky*. Elektronický text přednášky č.2 předmětu Radioelektronická měření. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.
- [7] KRATOCHVÍL, T. *A/D a D/A převodníky, metody zpracování číslicového signálu a DSP zpracování*. Elektronický text přednášky č.8 předmětu Nízkofrekvenční a audio elektronika. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.
- [8] HORLIN, F., BOURDOUX, A. *Digital Compensation for Analog Front-Ends*. A John Wiley & Sons, Ltd. Publications, 2008. strana 64-65. ISBN 978-0-470-51708-6 (HB).
- [9] Texas Instruments. *MSP430G2x53, MSP430G2x13 Mixed Signal Microcontroller (Rev. G)*. [online]. 2012. - [cit. 20. listopadu 2012]. Dostupné z www: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>.
- [10] Texas Instruments. *MSP430x2xx Family User's Guide (Rev. I)*. [online]. 2012. - [cit. 20. listopadu 2012]. Dostupné z www: <http://www.ti.com/lit/ug/slau144i/slau144i.pdf>.
- [11] ELECTRONIC ASSEMBLY. *DOG SERIES 3.3V*. [online]. 2012. - [cit. 28. listopadu 2012]. Dostupné z www: <http://www.lcd-module.de/datenblaetter.html>.
- [12] FRÝZA, T. *Řízení sériové komunikace*. Elektronický text přednášky č.7 předmětu Mikroprocesorová technika a embedded systémy. [online]. 2012. - [cit. 28. listopadu 2012]. Dostupné z www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza/>.
- [13] Texas Instruments. *MAX3232 3-V to 5.5-V MULTICHANNEL RS-232 LINE DRIVER/RECEIVER*. [online]. 2012. - [cit. 28. listopadu 2012]. Dostupné z www: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/max3232.pdf>.
- [14] Texas Instruments. *TL2575/TL2575HV 1-A SIMPLE STEP-DOWN SWITCHING VOLTAGE REGULATORS*. [online]. 2012. - [cit. 28. listopadu 2012]. Dostupné z www: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl2575-05.pdf>.
- [15] Texas Instruments. *LM2594/LM2594HV SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150kHz 0.5A Step-Down Voltage Regulators*. [online]. 2012. - [cit. 28. listopadu 2012]. Dostupné z www: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2594.pdf>.
- [16] KUBÍČEK, M. *DC/DC měniče bez transformátoru, Čukův měnič, Nábojová pumpa, Blokující měnič*. Elektronický text přednášky č.8 předmětu Napájení elektronických

- zařízení. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.
- [17] *MC34063 Calculator Online > Step-Down, Step-Up, Inverter*. [online]. 2013. – [cit. 26. března 2013]. Dostupné z www: <http://www.bobtech.ro/tutoriale/componente-electronice/43-calculator-online-mc34063a-mc34063-step-down-step-up-inverter>.
- [18] STMicroelectronics. *MC34063AB – MC34063AC, MC34063EB – MC34063EC DC/DC converter control circuit*. [online]. 2013. - [cit. 24. března 2013]. Dostupné z www: http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/2300/501448_DS.pdf.
- [19] FRÝZA, T. *Tomas Fryza Homepage*. [online]. 2013. – [cit. 15. května 2013]. Dostupné na www: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~fryza>.
- [20] HW server. *Program Terminal pro komunikaci přes RS-232*. [online]. 2013. - [cit. 15. května 2013]. Dostupné na www: <http://rs232.hw.cz/#Terminal>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

l	délka (vodiče)
Δl	změna délky
D (popř. H)	průměr (vodiče, deformovaného objektu)
ΔD	změna průměru
R	elektrický odpor
ρ	měrná rezistivita
S	průměr (vodiče)
ΔR	změna elektrického odporu
K	tenzometrická konstanta
ε	deformace tělesa
σ	mechanické napětí
E	Youngův modul pružnosti
ν	Poissonův poměr
ΔL	změna délky (deformovaného objektu)
L	délka (deformovaného objektu)
G	smykový modul
M	kroučící moment
Z	sekční modul
F	mechanická síla
d (popř. h)	vnitřní průměr
τ	elementární smykové mechanické napětí
γ	celkové smykové mechanické napětí
θ	úhel pootočení
U	elektrické napětí
I	elektrický proud
I_G	elektrický proud galvanometrem
U_G	elektrické napětí na galvanometru
U_{12} (popř. U_{OUT})	výstupní napětí měřicího můstku
R_g	odpor tenzometrického snímače
x_M	spojitá hodnota vzorku
X_M	diskrétní (číslíková) hodnota vzorku

q	kvantizační krok
U_R, U_{REF}	referenční napětí
$U_{vst.}$	vstupní napětí
u_K	zpětnovazební napětí
N	počet bitů převodníku, stav čítače
C	kondenzátor, kapacita
$u_{vst.}$	okamžitá hodnota vstupního napětí
T	perioda
N_C	kapacita čítače
f	kmitočet
f_{vz}	vzorkovací kmitočet
f_{Smax}	kmitočet nejvyšší spektrální složky signálu
n	koeficient převzorkování
SNR_{ADC}	Signal to Noise Ratio, poměr střední hodnoty výkonu signálu ke střední hodnotě výkonu šumu na výstupu A/D převodníku
PSD	Power Spectral Density, spektrální hustota výkonu
SNR_{Gain_ADC}	zlepšení poměru střední hodnoty výkonu signálu ke střední hodnotě výkonu šumu na výstupu A/D převodníku
SNR_{ADC_Ovs}	poměr střední hodnoty výkonu signálu ke střední hodnotě výkonu šumu na výstupu A/D převodníku po převzorkování
f_{osc}	kmitočet oscilátoru měniče
U_{ZVL}	zvlnění napětí
I_{ZVL}	zvlnění proudu
$I_{LOAD(max)}$	maximální zatěžovací proud
$I_{C(RMS)}$	efektivní hodnota proudu filtračním kondenzátorem
$I_{D(max)}$	maximální přípustná hodnota proudu diodou
U_R	napětí na diodě v závěrném směru
$U_{IN(max)}$	maximální vstupní napětí
U_{OUT}	výstupní napětí
$I_{L(pk)}$	špičková hodnota proudu cívkou
PC	Personal Computer, osobní počítač
LCD	Liquid Crystal Display, displej s tekutými krystaly
ESR	Equivalent Series Resistance, ekvivalentní sériový odpor
A/D	analogově – digitální

D/A	digitálně – analogový
KOMP	komparátor
S	spínač
ADC	Analog-to-Digital Converter, analogově – digitální převodník
RISC	Reduced Instruction Set Computer, počítač (mikrokontrolér) s omezenou instrukční sadou
UART	Universal Asynchronous Receiver - Transmitter, univerzální asynchronní přijímač – vysílač
USCI	Universal Serial Communication Interface, univerzální sériové rozhraní
SPI	Serial Peripheral Interface, sériového periferní rozhraní (komunikace)
RAM	Random Access Memory, paměť s náhodným přístupem
SCK	Serial Clock, hodinový signál v komunikaci SPI
MISO	Master In - Slave Out, signál přenášející data od podřízeného zařízení k nadřízenému
MOSI	Master Out - Slave In, signál přenášející data od nadřízeného zařízení k podřízenému
SS	Slave Select, signál aktivující podřízené zařízení
MSB	Most Significant Bit, nejvíce významný bit
LSB	Least Significant Bit, nejméně významný bit
R/\overline{W}	Read – Write, signál vybírající režim čtení nebo zápisu
CSB	Chip Select Bit, signál aktivující podřízené zařízení
IC	Integrated Circuit, integrovaný obvod
X	konektor
DC	Direct Current, stejnosměrná veličina

SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh zařízení	52
A.1	Obvodové schéma zapojení měřicího systému	52
A.2	Obvodové schéma napájecího zdroje měřicího systému	54
A.3	Desky plošných spojů	55
B	Pohledy na výsledné zařízení	58
B.1	Pohledy na výsledné zařízení.....	58
B.2	Screen shot rozhraní programu Terminal	60
C	Seznamy součástek	60
C.1	Seznam součástek pro hlavní desku měřicího systému.	60
C.2	Seznam součástek pro napájecí zdroj.	62
C.3	Seznam ostatních součástek a dílů.....	63

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

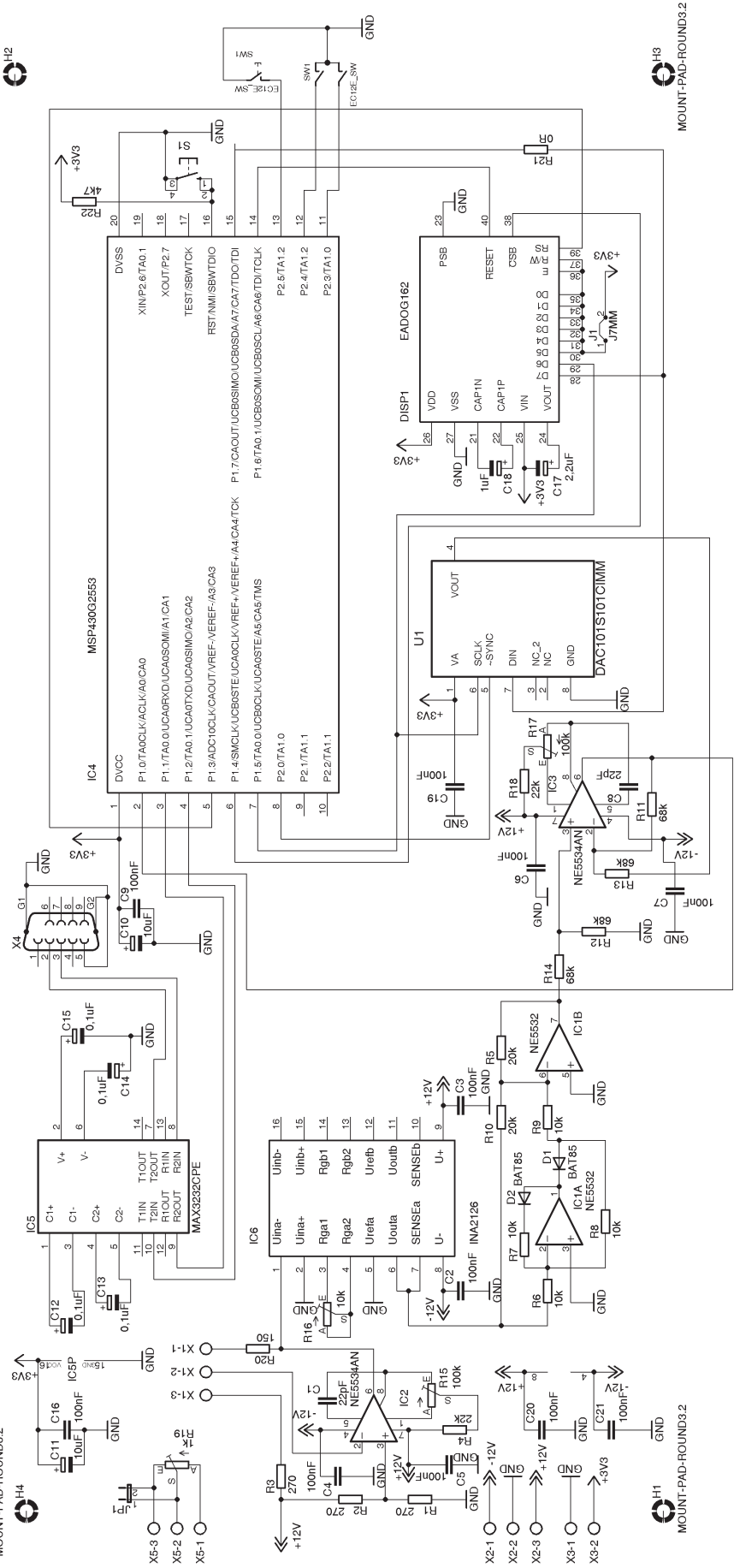
A.1 Obvodové schéma zapojení měřicího systému

Z důvodu zachování co největšího formátu schématu a jeho čitelnosti, je toto schéma uvedeno až na další stránce.

MOUNT-PAD-ROUND3.2



MOUNT-PAD-ROUND3.2



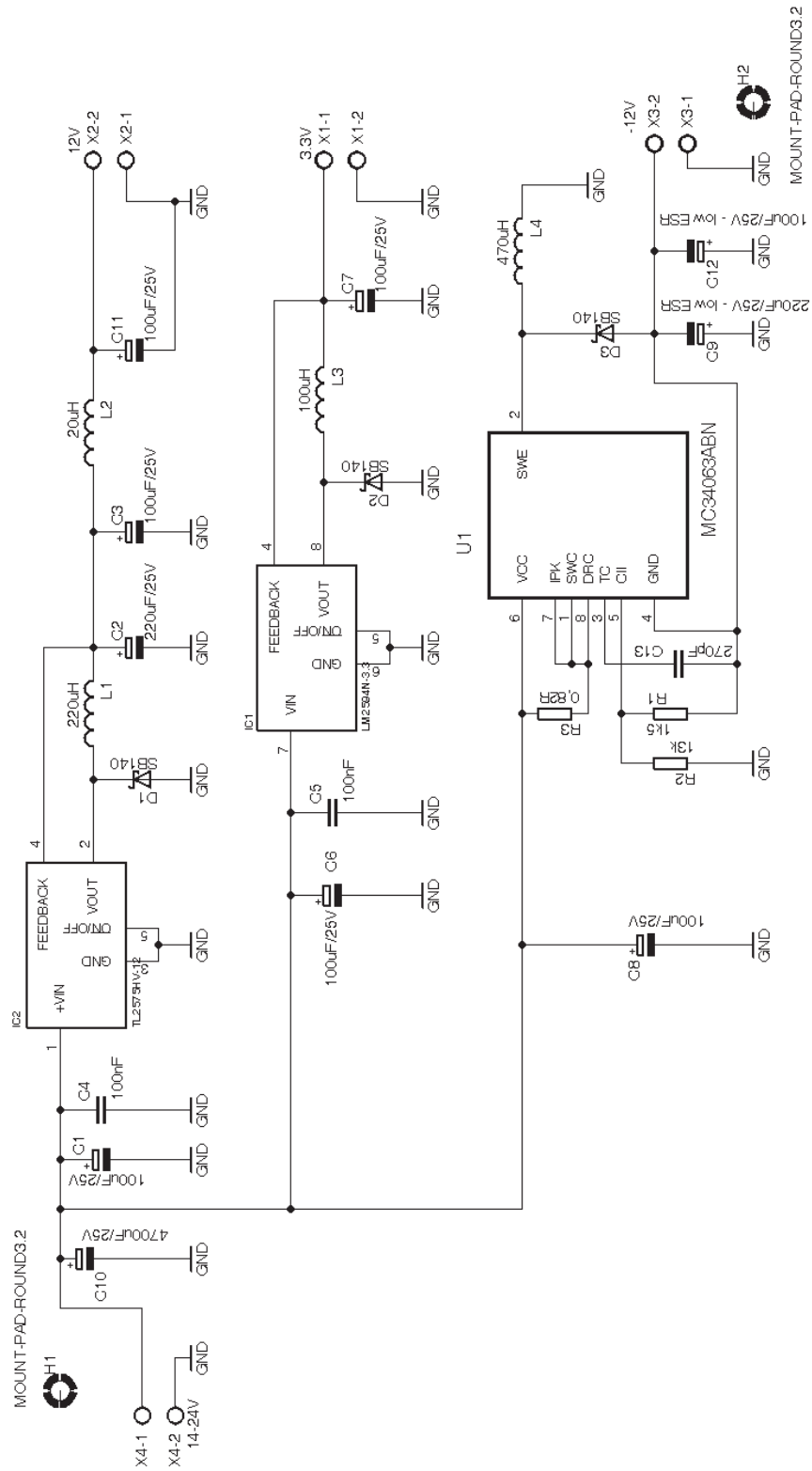
MOUNT-PAD-ROUND3.2



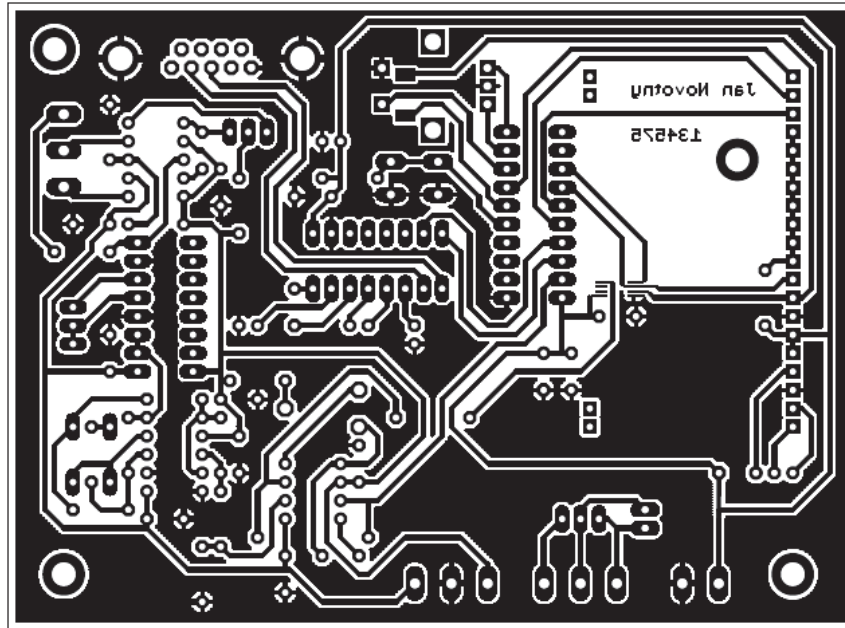
MOUNT-PAD-ROUND3.2



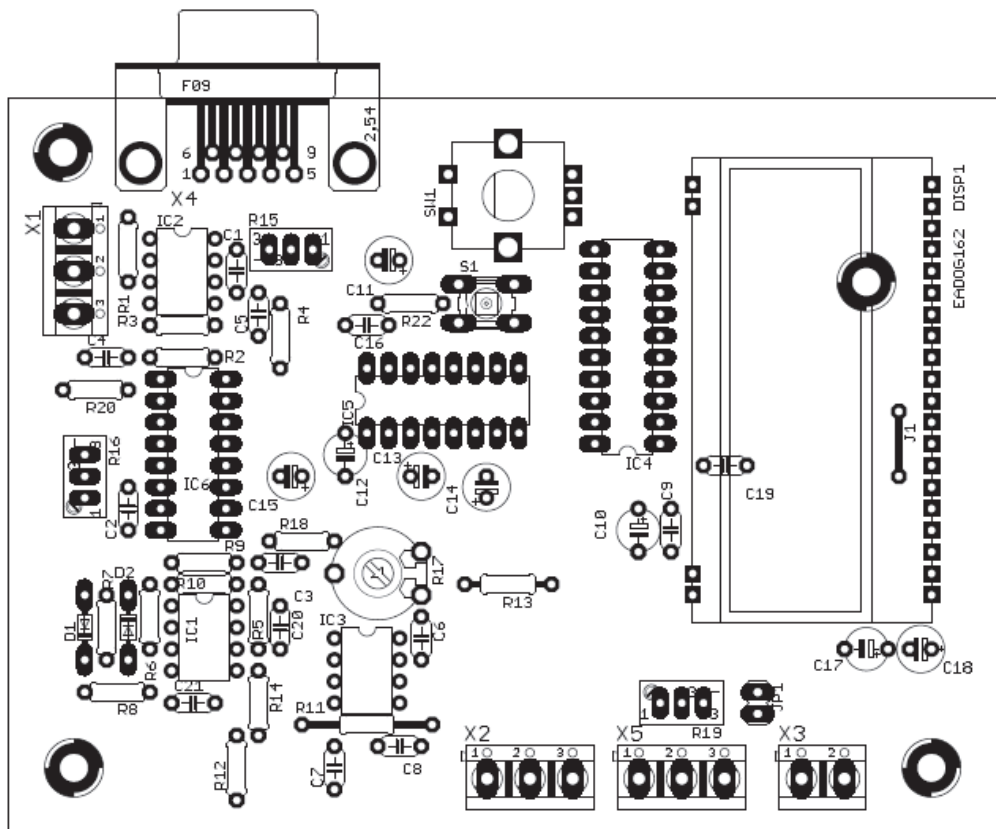
A.2 Obvodové schéma napájecího zdroje měřicího systému



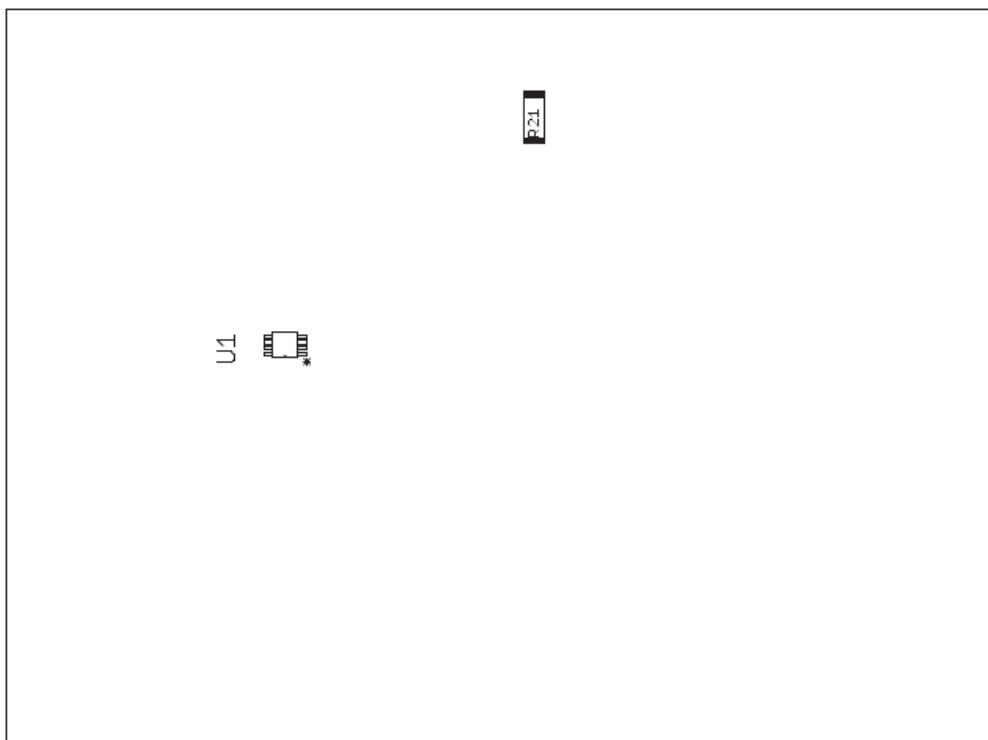
A.3 Desky plošných spojů



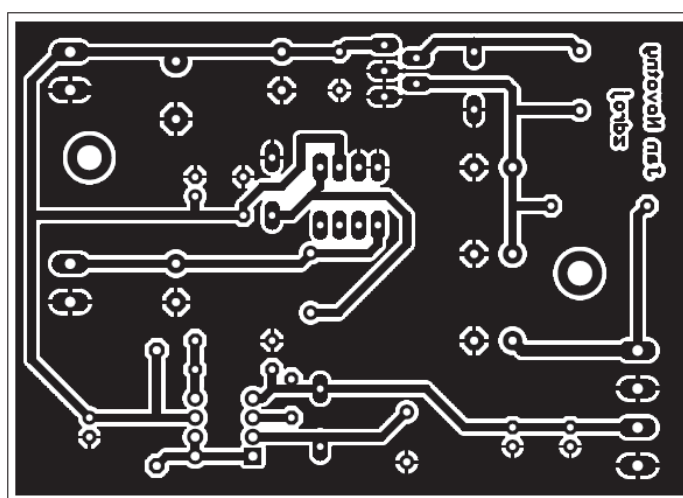
Deska plošných spojů měřicího systému (měřítko přibližně 1:1, skutečné rozměry desky 116,84×86,36 mm).



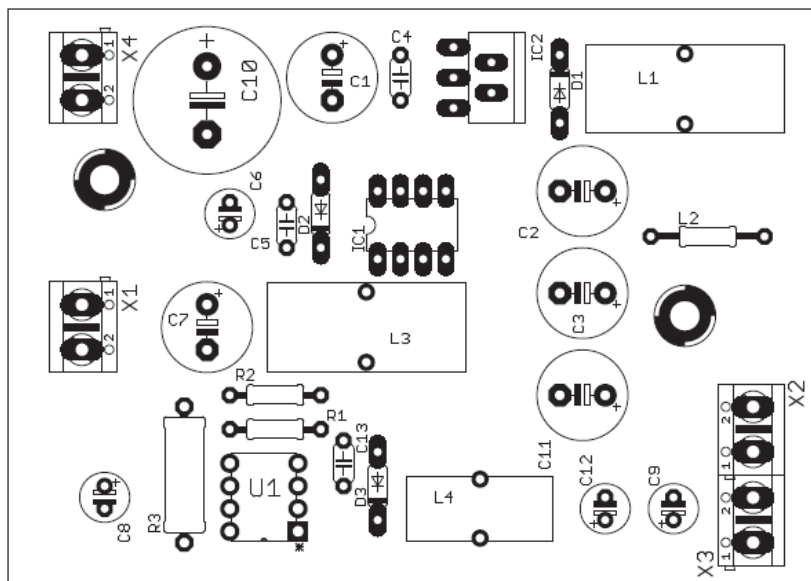
Osazovací pláněk desky plošných spojů měřicího systému-horní strana (měřítko přibližně 1,18:1).



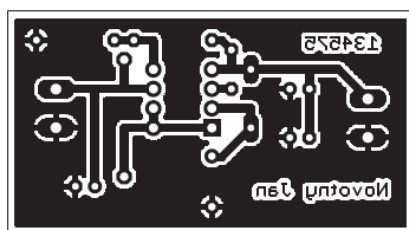
Osazovací plánec desky plošných spojů měřicího systému-spodní strana (měřítko přibližně 1,18:1).



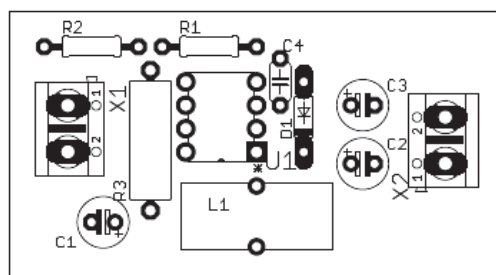
Deska plošných spojů napájecího zdroje měřicího systému (měřítko přibližně 1:1, skutečné rozměry desky 91,44×64,77 mm).



Osazovací plánec desky plošných spojů zdroje měřicího systému-horní strana (měřítko přibližně 1,18:1).



Deska plošných spojů invertujícího měniče (měřítko přibližně 1:1, skutečné rozměry desky 53,34×29,21 mm).



Osazovací plánec desky plošných spojů invertujícího měniče-horní strana (měřítko přibližně 1,24:1).

B POHLEDY NA VÝSLEDNÉ ZAŘÍZENÍ

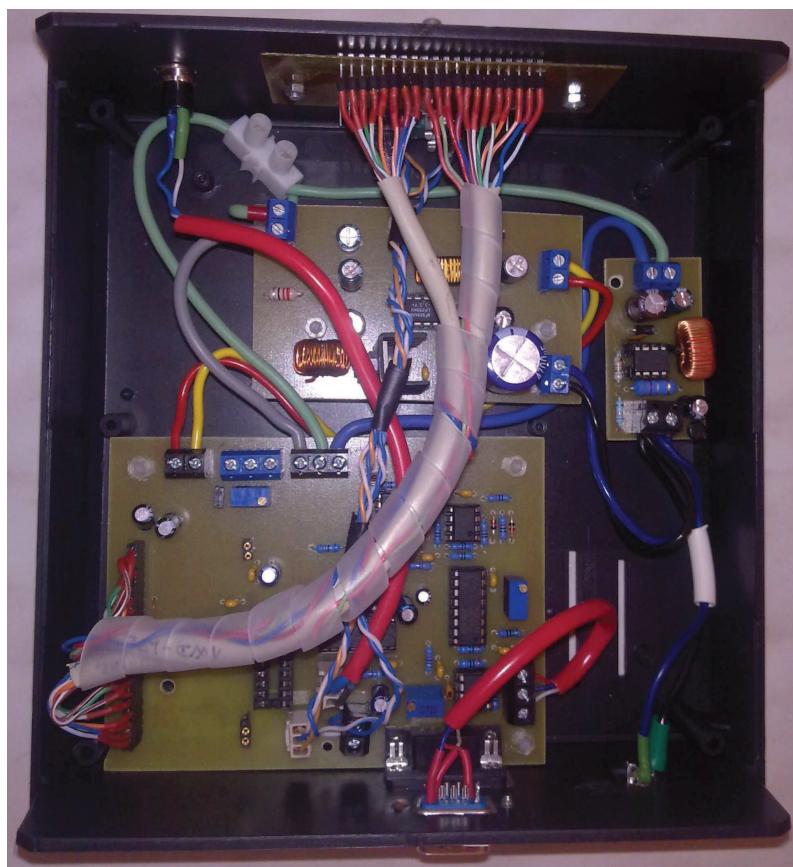
B.1 Pohledy na výsledné zařízení



Pohled na čelní panel hotového systému.



Pohled na zadní panel hotového systému.



Pohled na vnitřní uspořádání krabice systému (mikrokontrolér není osazen).



A)



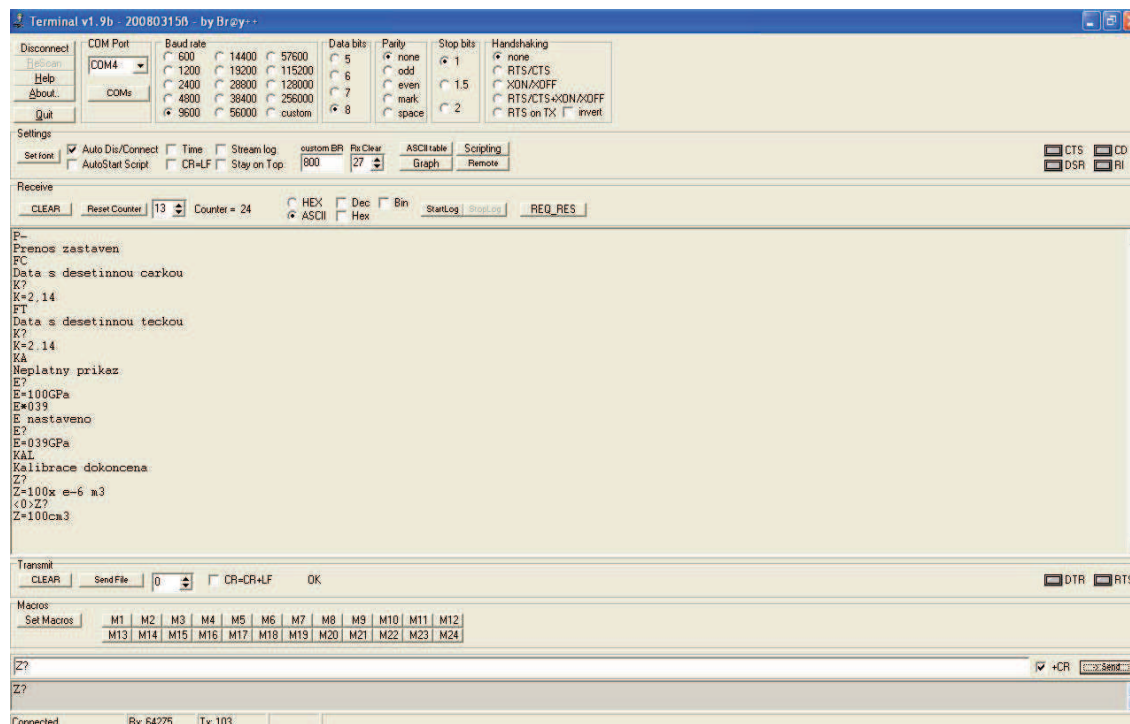
B)



C)

Ukázky zobrazení různých menu: A) menu měření, B) menu zadávání Youngova modulu (podobně vypadají i menu pro nastavení tenzometrické konstanty a sekčního modulu), C) menu spouštění a zastavování přenosu dat do PC (obdobně jsou uspořádány i menu kalibrace a menu volby formátu dat s des. tečkou nebo čárkou).

B.2 Screen shot rozhraní programu Terminal



C SEZNAMY SOUČÁSTEK

C.1 Seznam součástek pro hlavní desku měřicího systému.

Reference	Hodnota/typ	Cena/ks	Popis
C1,C8	22 pF	2 Kč	Keramický kondenzátor
C2,C3,C4,C5,C6,C7, C9,C16,C19, C20,C21	100 nF	1 Kč	Keramický kondenzátor
C12,C13,C14,15	0,1 μ F/63 V	0,71 Kč	Elektrolytický kondenzátor- radiální
C10,C11	10 μ F/16 V	1 Kč	Elektrolytický kondenzátor- radiální
C17	2,2 μ F/50 V	1,50 Kč	Elektrolytický kondenzátor- radiální
C18	1 μ F/50 V	1,10 Kč	Elektrolytický kondenzátor- radiální
D1,D2	BAT85	2,20 Kč	Schottkyho dioda 30 V/0,2 A

DISP1	EADOG162L-A	235,07 Kč	Dvouřádkový znakový LCD displej
IC1	NE5532	6,20 Kč	Dvojitý bipolární operační zesilovač, pouzdro DIP8
IC2,IC3	NE5534	7,60 Kč	Bipolární operační zesilovač, pouzdro DIP8
IC4	MSP430G2553	47,08 Kč	Mikrokontrolér, pouzdro DIP16
IC5	MAX3232CPE	127 Kč	Rozhraní RS232 sběrnice, pouzdro DIP16
IC6	INA2126	163,25 Kč	Dvojitý stejnosměrný zesilovač, pouzdro DIP16
JP1	S1G01	cca 1 Kč	Konektorové kolíky lámací-2 piny
J1	-	-	Drátová propojka
R1,R2,R3	270 Ω	5,50 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/0,1 %
R4,R18	22 k Ω	2 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/1 %
R5,R10	20 k Ω	2 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/1 %
R6,R7,R8,R9	10 k Ω	2 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/1 %
R11,R12,R13,R14	68 k Ω	2 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/1 %
R15	100 k Ω /64 Y 100K	9,10 Kč	Víceotáčkový odporový trimr stojatý
R16	10 k Ω /64 W 10K	27,20 Kč	Víceotáčkový odporový trimr stojatý
R17	100 k Ω	16,60 Kč	Cermentový odporový trimr ležatý
R19	200 Ω /64 Y 200R	27,20 Kč	Víceotáčkový odporový trimr stojatý
R20	150 Ω	5 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/0,1 %
R21	0 Ω	3 Kč	Rezistor SMD, pouzdro R2512
R22	4,7 k Ω	2 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/1 %
S1	TC-0103-T	2,60 Kč	Tlačítko
SW1	PEC-11-4225F-S0024	45,40Kč	Inkrementální spínač
U1	DAC101S101CIMM	59,42 Kč	10 bitový D/A převodník SMD, pouzdro MSOP8
X1,X2,X5	ARK500/3	3,80 Kč	Trojpolová svorkovnice RM = 5 mm

X3	ARK500/2	3,60 Kč	Dvojpólová svorkovnice RM = 5 mm
X4	CAN9Z90	10,10 Kč	9 pinová zásuvka Canon do DPS

C.2 Seznam součástek pro napájecí zdroj.

Reference	Hodnota/typ	Cena/ks	Popis
C1,C6,C8	100 μ F/25 V	1,50 Kč	Elektrolytický kondenzátor- radiální
C2,C9	220 μ F/25V low ESR	1,30 Kč	Elektrolytický kondenzátor s malým ESR-radiální
C3,C7,C11,C12	100 μ F/25 V low ESR	5,20 Kč	Elektrolytický kondenzátor s malým ESR-radiální
C4,C5	100 nF	1 Kč	Keramický kondenzátor
C10	4700 μ F/25 V	15,10 Kč	Elektrolytický kondenzátor- radiální
C13	270 pF	1,50 Kč	Keramický kondenzátor
D1,D2,D3	SB140	6,49 Kč	Schottkyho dioda 40 V/1 A, pouzdro DO-41
IC1	LM2594N-3.3	54,22 Kč	Spínaný stabilizátor 3,3 V, pouzdro DIP8
IC2	TL2575HV-12	53,25 Kč	Spínaný stabilizátor 12 V, pouzdro TO-220-5
L1	220 μ H	30,40 Kč	Toroidní tlumivka 1 A
L2	22 μ H	6,80 Kč	Axiální tlumivka 0,56 A
L3	100 μ H	22,10 Kč	Toroidní tlumivka 0,5 A
L4	470 μ H	49,35 Kč	Toroidní tlumivka 1 A
R1	1,5 k Ω	2 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/1 %
R2	13 k Ω	2 Kč	Metalizovaný rezistor 0,6 W/1 %
R3	0,82 Ω	3 Kč	Metal oxidový rezistor 2 W/5 %
U1	MC34063ABN	12,40 Kč	Spínaný stabilizátor -12 V, pouzdro DIP8
X1,X2,X3,X4	ARK500/2	3,60 Kč	Dvojpólová svorkovnice RM = 5 mm

C.3 Seznam ostatních součástek a dílů.

Reference	Typ	Cena/ks	Popis
Krabice	U-KP12	100 Kč	Plastová krabice 70×197×188
Konektor	CAN9V	5,50 Kč	9 pinová vidlice CANON do panelu
Konektor	DS-204B	5 Kč	Souosý napájecí konektor pro malá napětí 2,1 mm- vidlice, do panelu
Tlačítko	P-PB11	7,10 Kč	Tlačítkový spínač do panelu – 1-pólový spínací ON-OFF
Distanční sloupky	KDA6M3×15 W	4 Kč	Plastový distanční sloupek, délka 15 mm, na koncích šroub a závit
Matice	SKP-M03P	2,50 Kč	Plastová matice M3
Šrouby	SLKM3×10	1,10 Kč	Kovový šroub se zápuštnou hlavou, délka závitu 10 mm
Propojovací kabely	-	-	Izolované vodiče různých průměrů a barev izolací sloužící k pospojování komponentů uvnitř krabice

Poznámka: Uvedené ceny jsou pouze orientační a platí k datu 18. května 2013