

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ**  
**ELEKTRONIKY**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Verifikace momentové charakteristiky soustrojí se ss  
strojem a synchronním strojem**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel TÁBORSKÝ**  
Osobní číslo: **E09B0090P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Verifikace momentové charakteristiky soustrojí se ss strojem  
a synchronním strojem**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište princip pohonu se stejnosměrným a synchronním strojem.
2. Navrhněte zapojení pro měření zátěžného úhlu a momentové charakteristiky.
3. Provedte měření na soustrojí.
4. Shrňte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

- 1. dokumentace Siemens**
- 2. Bartoš, V., Skala, B. : Měření na elektrických strojích. Skripta ZCU, Plzeň 2002**
- 3. internet**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jiří Srb**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Prohlášení**

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

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

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

V Plzni dne 5.6.2012

.....  
Pavel Táborský

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Srbovi za cenné rady a připomínky k vypracování této práce. Následně jeho ochotu při opakovaném testování výrobku.

Dále děkuji Katedře Teoretické Elektrotechniky za ochotné vyrobení desky plošného spoje, bez které by nešlo přístroj vyrobit.

## **Anotace**

Bakalářská práce popisuje princip stejnosměrného motoru, synchronního generátoru a jejich vzájemné propojení hřídelí. Dále se zabývá návrhem a konstrukcí přípravku pro měření zátěžného úhlu synchronního generátoru. Změřením charakteristik synchronního generátoru. Vyhodnocení naměřených hodnot a porovnání s teoretickými předpoklady.

## **Klíčová slova**

točivé magnetické pole, synchronní generátor, zátěžný úhel, točivý moment, momentová charakteristika, cizebuzený stejnosměrný motor, mikrokontrolér, optická závora, měření

## **Annotation**

The Bachelor's dissertation describes the principle of a DC motor, a synchronous generator and an interconnection their shafts. It also deals with the plan and the design of the device which is used to measure a power angle of the synchronous generator, with a measuring of characteristics of the synchronous generator and with an assessment of readings and comparison between them and theoretical assumptions.

## **Key words**

rotating magnetic field, synchronous generator, power angle, torque, speed torque characteristic, brushed DC electric motor, microcontroller vernier photogate, measuring

**OBSAH**

1	ÚVOD	9
2	TEORETICKÝ ÚVOD	12
2.1	Točivý moment	12
2.2	Stejnoseměrné stroje	12
2.2.1	Konstrukce	12
2.2.2	Vlastnosti	13
2.2.3	Základní Princip	14
2.2.4	Stejnoseměrný stroj jako generátor a motor	14
2.2.5	Indukované napětí a moment	15
2.2.6	Náhradní schéma v motorickém režimu	16
2.2.7	Řízení otáček	17
2.2.8	Komutace stejnosměrného stroje	18
2.3	Synchronní stroje	20
2.3.1	Konstrukce	20
2.3.2	Princip činnosti	21
2.3.3	Zátěžný úhel	22
2.3.4	Rozběh motoru	23
3	NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ ZÁTĚŽNÉHO ÚHLU	24
3.1	Čidlo mechanického snímače úhlu natočení	24
3.2	Čidlo elektrického snímače	26
3.2.1	Návrh napájecího zdroje přípravku	28
3.2.2	Návrh úpravy sinusového signálu na obdélníkový	29
3.3	Vyhodnocení obou signálů	30
3.3.1	Mikrokontrolér Atmega 8	31

3.3.2	LCD display	32
3.3.3	Návrh programu	33
3.4	Plošný spoj a konstrukční krabička	34
4	MĚŘENÍ NA SOUSTROJÍ	35
4.1	Popis soustrojí a elektrické schéma zapojení	35
4.2	Naměřené hodnoty a jejich zpracování	36
5	ZÁVĚR	39
	POUŽITÁ LITERATURA	40
	SEZNAM PŘÍLOH	41
	PŘÍLOHA A	42
	PŘÍLOHA B	43
	PŘÍLOHA C	43
	PŘÍLOHA D	44
	PŘÍLOHA E	45
	PŘÍLOHA F	46
	PŘÍLOHA G	47



## 1 Úvod

Tato bakalářská práce pojednává o zhodnocení naměřené charakteristiky synchronního generátoru. Je rozdělena do tří velkých částí. V teoretickém úvodu je věnováno popisu a funkci stejnosměrných a synchronních strojů. Praktická část je zaměřena od popisu k návrhu elektrického schématu až po jeho výrobu. V poslední části je věnováno měření na samotném soustrojí, které se skládá ze stejnosměrného cizebuzeného motoru a synchronního generátoru.

Točivý moment je důležitý parametr každého točivého stroje. Spolu s mechanickými otáčkami udává výkon stroje. Určuje tedy sílu, kterou je schopen stroj při rotačním pohybu vyvinout. Při návrhu každého pohonu je to jeden z hlavních parametrů. Zátěžný úhel synchronního stroje může nabývat jen určitého rozsahu. Je tedy potřeba kontrolovat, aby nedošlo k jeho překročení nad danou mez a tím i ke ztrátě synchronizmu stroje

Na již vyrobeném přístroji na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky, který fungoval na principu měření fázového posuvu dvou signálů za pomoci osciloskopu. Tato metoda se mi zdála nepraktická a to z důvodu neustálého přepočítávání rozdílů času na hodnotu zátěžného úhlu. Proto jsem se rozhodl vyrobit vlastní zařízení, které dokáže samostatně určit hodnotu zátěžného úhlu. A to z naměřeného času rozdílů mechanického signálu z hřídele a elektrického signálu ze statoru synchronního stroje. Pro viditelné zobrazení hodnot uživateli je použitý LCD display.

Tuto bakalářskou práci jsem si vybral z důvodu zájmu o problematiku měření na točivých strojích a také z možnosti výroby vlastního přístroje.

**Seznam symbolů**

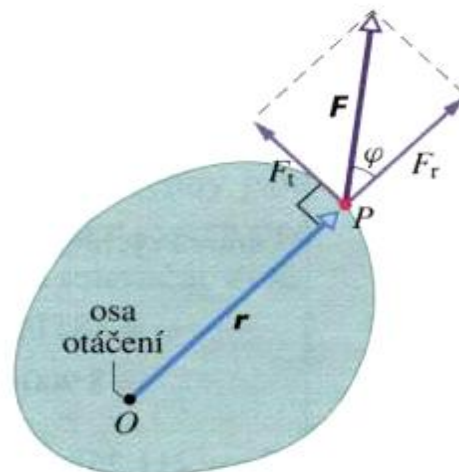
$\vec{F}$ [N]	vektor síly
$\vec{r}$ [m]	polohový vektor
$\vec{M}$ [N.m]	vektor točivého Momentu
M [N.m]	točivý Moment
R [ $\Omega$ ]	odpor
l [m]	délka
s [m <sup>2</sup> ]	průřez
$u_i$ [V]	indukované napětí
$\Phi$ [wb]	magnetická indukční tok
$d\vec{S}$ [m <sup>2</sup> ]	element plochy závitu
$\vec{B}$ [T]	vektor magnetické indukce
$S_z$ [m <sup>2</sup> ]	Plocha závitu
$B_{st}$ [T]	Střední hodnota magnetické indukce
$I_a$ [A]	Proud kotvy stejnosměrného stroje.
$\omega$ [rad/s]	mechanická úhlová rychlost
k[-]	konstanta ss stroje
$R_k$ [ $\Omega$ ]	Odpor kotvy ss stroje
$L_k$ [H]	Indukčnost kotvy ss stroje
$\Delta U_{kar}$ [V]	úbytek napětí na kartáčích ss stroje
$U_n$ [V]	napájecí napětí ss motoru
$\omega_s$ [rad/s]	synchronní úhlová rychlost synchronního stroje
$\omega_1$ [rad/s]	napájecí úhlová frekvence synchronního stroje
p [-]	Počet pól párů synchronního stroje
$\vec{F}_1$ [A.z]	Vektor magnetického napětí statoru synchronního stroje

$\vec{F}_2$ [A. z]	Vektor magnetického napětí rotoru synchronního stroje
$\beta$ [°]	Zátěžný úhel synchronního stroje
$P_\delta$ [W]	Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru.
$\vec{U}_{ib}$ [V]	vektor napětí od rotoru synchronního stroje
$\vec{U}$ [V]	vektor napětí ze statoru synchronního stroje
$M_p$ [N.m]	Moment pohonem stroje
$M_G$ [N.m]	Moment generátoru.
$J$ [kg.m <sup>2</sup> ]	moment setrvačnosti rotujících hmot.

## 2 Teoretický úvod

### 2.1 Točivý moment

Točivý moment je fyzikální veličina, která vyjadřuje otáčivý účinek síly působící na těleso. U elektrických strojů je to síla působící na vodič protékáný proudem v magnetickém poli závisí na jejím směru, orientaci, poloze a vzdálenosti od osy otáčení. Z těchto vlastností plyne, že točivý moment je vektorová veličina. (1)



Obr.1 síla působící na hmotný bod P[1]

$$\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r} \quad (1)$$

Tuto rovnici můžeme přepsat do tvaru (2)

$$M = F \cdot r \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

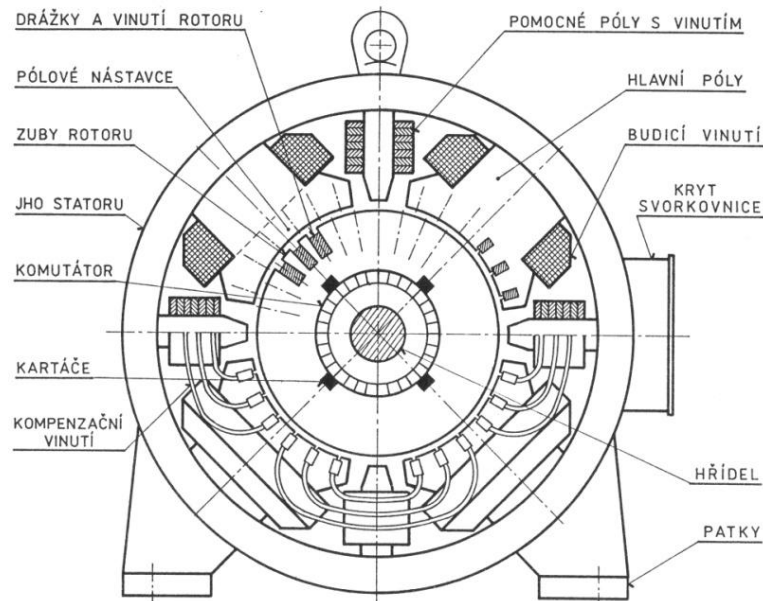
Kde  $F$  je velikost síly a  $r$  velikost vzdálenosti působíště síly od osy otáčení a úhel  $\varphi$ , který svírá oba vektory. Vektor síly  $F$  se dá rozložit na dvě složky na  $F_t$ , to je takzvaná tečná složka a její velikost  $F_t = F \cdot \sin \varphi$ , která způsobí otočení tělesa. Naopak síla  $F_r$  takzvaná radiální, která je rovnoběžná s polohovým vektorem  $\vec{r}$ . Tato síla nemá vliv na otáčení tělesa. Ideální stav je, je-li tato složka síly nulová, pak je vektor síly  $\vec{F}$  a polohový vektor  $\vec{r}$  jsou na sebe kolmé a točivý moment bude maximální. [1]

### 2.2 Stejnoseměrné stroje

#### 2.2.1 Konstrukce

Stejnoseměrný stroj se skládá ze statoru a rotoru. Stator je nepohyblivá část stroje, na kterém jsou umístěny hlavní póly s budícím vinutím, kompenzačním vinutím a pomocné (komutační) póly. Hlavní póly jsou složeny z pólového jádra a jeho nástavce. Do pólového jádra strojů s velkým výkonem se umísťuje kompenzační vinutí, kterým se potlačuje reakce pole kotvy. Toto vinutí je zapojeno do série s kotvou, stejně jako vinutí pomocných pólů. Rotor, občas nazývaný kotva, je pohyblivá část stroje. Velikost vzduchové mezery by měla být co nejmenší, aby se nezvětšil magnetický odpor a tím by stoupl budící proud vinutím na statoru. Skládá se z izolovaných křemíkových plechů, ve kterých jsou tvarovány drážky pro umístění vinutí. Jednotlivé cívky vinutí kotvy jsou propojeny navzájem odizolovanými

lamelami komutátoru. Komutátor je stejně jako magnetický obvod společně nasazen na hřídeli stroje a spolu s kartáči vytváří sběrné ústrojí stroje.[2,3]



Obr.2 Příčný řez stejnosměrným motorem[2]

### 2.2.2 Vlastnosti

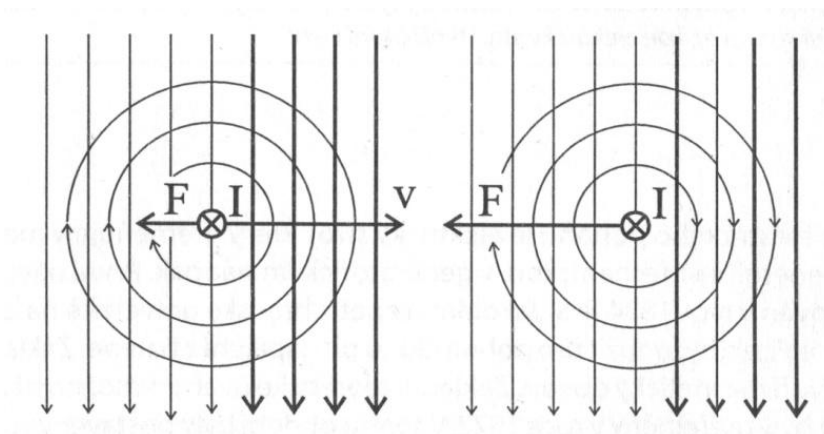
Stejnoseměrný elektrický pohon je nejstarším užívaným pohonem, který se udržel až do dnešní doby pro svoje dobré vlastnosti. Důležité vlastnosti stejnosměrných motorů jsou velká momentová a výkonová přetížitelnost, jednoduchá regulace otáček a to napětím kotvy anebo budícím proudem, velký točivý moment při malých otáčkách. Jednoduchá změna smyslu otáčení a to změnou polaritu napětí kotvy nebo změnou polaritu budícího proudu. Z tohoto pohledu jsou stejnosměrné motory nasazovány tam, kde se bude jednat o přerušovaný chod stroje, časté reverzace, velké proudové a napět'ové změny. Velké použití našli v automobilech jako startéry, stěračové motorky, využívají se také jako pohon oken a polohy sedadel. Pro měřicí techniku našly využití jako tachodynamy. Jejich výborné trakční vlastnosti se také používají v dopravě v elektrických lokomotivách, tramvajích a elektromobilech. Dále pak pro pohon zařízení válcoven, dolů v papírnách, u obráběcích strojů. Pro svou jednoduchost řízení se používají malé motorky pro elektronické hračky.

Jejich hlavní nevýhodou je komutátor, jelikož je to mechanická část stroje, dochází při provozu stroje k jeho opotřebení. Životnost stroje omezena stavem komutátoru. I přes to, že jsou stejnosměrné stroje stále více nahrazovány střídavými stroji. K jejich úplnému vytlačení, pro jejich výhody nejspíš nikdy nedojde [2,3,4]

### 2.2.3 Základní Princip

Každý točivý elektrický stroj je založena na vlastnostech vodiče v magnetickém poli. Můžeme rozlišit dvě situace.

Pohybujeme-li vodičem, který tvoří smyčku rychlostí v magnetickém poli, bude se indukovat ve vodiči napětí. Uzavřeme-li obvod, začne vodičem procházet proud podle pravidla letícího šípku, který kolem vodiče vytvoří magnetické pole, dle pravidla pravotočivého šroubu. Výsledné pole vyvolá kolem vodiče zhuštění a zředění siločar. Tento systém se bude snažit vrátit do rovnováhy a vyvolá Lorentzovu sílu  $F$ , která působí ve směru zředění siločar a také proti pohybu vodiče (Obr.3a). Další možností je, necháme-li vodičem procházet proud v naznačeném směru, bude síla působit ve stejném směru jako v předchozím případě, ale otáčet se bude opačným směrem (Obr.3b). Zde se také bude indukovat napětí a ve smyslu Lenzova zákona bude působit proti napětí napájecímu.[5]

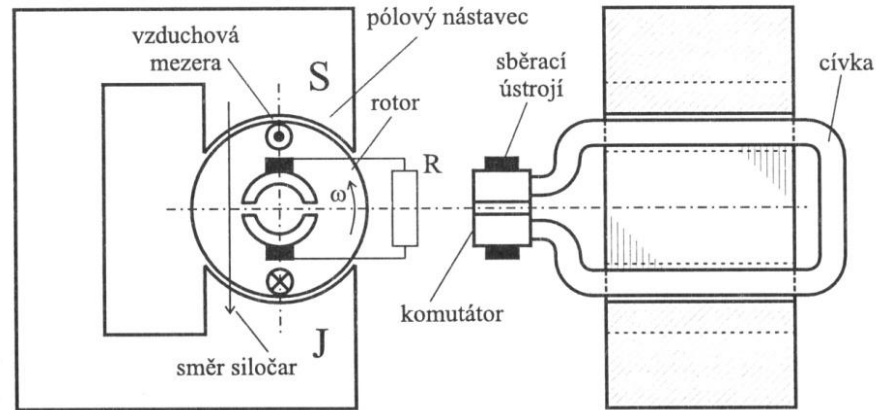


Vodič v magnetickém poli vlevo Obr.3a vpravo Obr.3b[5]

### 2.2.4 Stejnoseměrný stroj jako generátor a motor

Stator je tvořen trvalým magnetem s pólovými nástavci a na rotoru je navinut jeden závit, který je zapojen na konce komutátoru na něž jsou přiloženy kartáče (Obr.4) Otáčíme-li tímto závitkem rovnoměrnou rychlostí mezi dvěma póly, indukuje se na otáčející cívice střídavé napětí. Jeden kartáč sbírá napětí pod severním pólem a druhý kartáč sbírá napětí pod jižním pólem. V každém protilehlém vodiči závitu se indukuje napětí opačné polarity. Jsou-li zapojeny sériově, výsledné indukované napětí je aritmetický součet obou napětí. Na kartáčích změříme značně zvlněné stejnosměrné napětí. Navineme-li na rotor další závit posunutý prostorově o úhel  $\alpha$ . Bude také toto napětí fázově posunuto úhel  $\alpha$ . A výsledné napětí bude geometrickým součtem obou napětí, které bude zvlněné méně. To znamená, že čím více cívek na rotoru, tím méně zvlněné napětí a co do velikosti také větší. Prohození polarity jedné cívky

musí dojít v tom časovém okamžiku, kdy je indukované napětí nulové. To je v případě, kdy magnetický indukční tok jedním závitem je maximální. Indukované napětí v závitě je derivace toku podle času, které je nulové. Takže cívka, která zrovna komutuje je kolmo na směr indukčních siločar.[4]



Obr 4 jednoduché schéma stejnosměrného stroje[5]

Naopak budeme-li napájet kartáče stejnosměrným napětím bude působit Lorentzova síla na vodič. Tato síla vyvine moment, který začne otáčet závitěm. Tento moment bude taky proměnný jako indukované napětí. Dle vztahu (1) záleží na úhlu mezi poloměrem a silou. Tento úhel se plynule mění od 0° do 90°. Z toho plyne, že maximální moment bude, je-li směr siločar kolmý na směr síly. Nebo-li cívka je natočená tak, že je rovnoběžná se siločarami vyvolanými od statoru. Přidáním dalších cívek můžeme tento pulzační moment zmenšit a zvýšit střední hodnotu celkového momentu.[4]

### 2.2.5 Indukované napětí a moment

Dle Faradayova indukčního zákona vyplývá, že velikost indukovaného napětí je přímo úměrné záporně vzaté změně magnetického toku, což popisuje vzorec (3).

$$u_i = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

Magnetický indukční tok  $\phi$  jedním závitěm je dán vztahem (4), který vlastně vyjadřuje kolik siločar prochází plochou, která je tvořena jedním závitěm. Kde  $\vec{B}$  je vektor magnetické indukce a  $d\vec{S}$  vektor normály k ploše závitě a úhel  $\theta$  který je mezi nimi. Uvažujeme-li homogenní magnetickou indukci po celé ploše závitě. Zjednoduší se vztah podle vzorce (5)

$$\phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

$$\phi = B_{st} \cdot S_z \cdot \cos(\theta) \quad (5)$$

Po úpravách vyplyne vztah (5). Kde konstanta  $k$  zohledňuje konstrukční uspořádání stroje.

$$u_i = k \cdot \phi \cdot \omega \quad (6)$$

Uvažujeme-li ideální stroj, kde jsou nulové ztráty je mechanický výkon na hřídeli roven elektrickému příkonu.

$$M \cdot \omega = u_i \cdot I_a \quad (7)$$

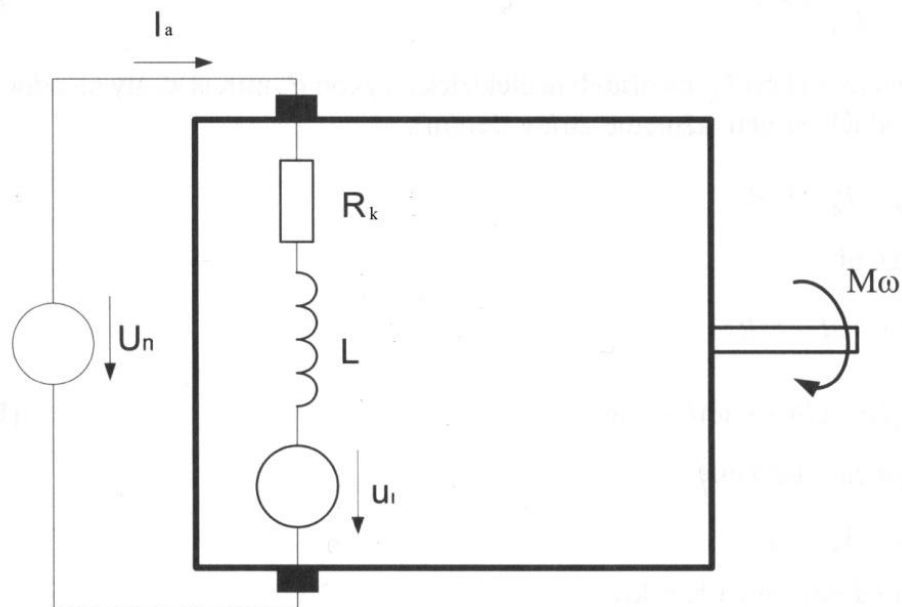
Vyjádřením momentu a dosazením za  $u_i$  ze vztahu (6) dostaneme výsledný vztah pro moment stroje.(8) [6]

$$M = K \cdot \phi \cdot I_a \quad (8)$$

### 2.2.6 Náhradní schéma v motorickém režimu

Náhradní schéma zobrazuje rozkreslené schéma vinutí kotvy stejnosměrného motoru, kde  $R_k$  je odpor kotvy a  $L_k$  je indukčnost kotvy a  $U_i$  je indukované napětí na kotvě.  $\Delta U_{kar.}$  je úbytek napětí na komutátoru. Zavedením jedné smyčky přes všechna napětí nám vyplyne diferenciální rovnice (9)

$$U_n = R_k \cdot I_a + L_k \frac{di_a}{dt} + U_i + 2 \cdot \Delta U_{kar.} \quad (9)$$



Obr.6 Náhradní schéma v motorickém režim [6]

Počítáme-li s motorem v ustáleném stavu, kdy střední hodnota proudu kotvou bude konstantní. Například při běhu naprázdno nebo konstantním zátěžným momentem na hřídeli,



bude napětí na indukčnosti nulové a dosadíme-li za  $U_i$  odvozené napětí ze vztahu (6). A pro jednoduchost položíme  $\Delta U_{\text{kom}}$  rovné nule. Zjednoduší se vztah podle vzorce (10)

$$U_n = R_k \cdot I + k \cdot \Phi \cdot \omega \quad (10)$$

Motor se před připojením napájecího napětí kotvy netočil. To znamená, že indukované napětí je nulové, jelikož je přímo úměrné otáčkám a vinutím pteče rozběhový proud  $I_R$  dán rovnicí (11).

$$I_R = \frac{U_n}{R_k} \quad (11)$$

Tento proud, ale velmi rychle klesne na ustálenou hodnotu vlivem zvyšujících se otáček rotoru a tím i  $U_i$  až do hodnoty dané zátěžným momentem nebo otáček naprázdno při nulovém zátěžném momentu. Při provozu bude téct motorem proud dle rovnice (12).

$$I_a = \frac{U_n - k \cdot \Phi \cdot \omega}{R_k} \quad (12.)$$

Nezatížíme-li motor žádným momentem, bude se točit naprázdno. Předpokládáme nulové činné a mechanické ztráty bude indukované napětí  $U_i$  a napájení napětí kotvy stejně velké. (13) Nepoteče vinutím žádný proud a otáčky motoru naprázdno budou dle vztahu (14).

$$U_i = U_n \quad (13.)$$

$$\omega_0 = \frac{U_n}{k \cdot \Phi} \quad (14.)$$

U reálného motoru nikdy nemůže  $U_i$  se rovnat  $U_n$  a to vlivem mechanických ztrát například třením hřídele o ložisko a proto vinutím pteče proud naprázdno  $I_0$ , který vytvoří činné ztráty na odporu kotvy  $R_k$  [7]

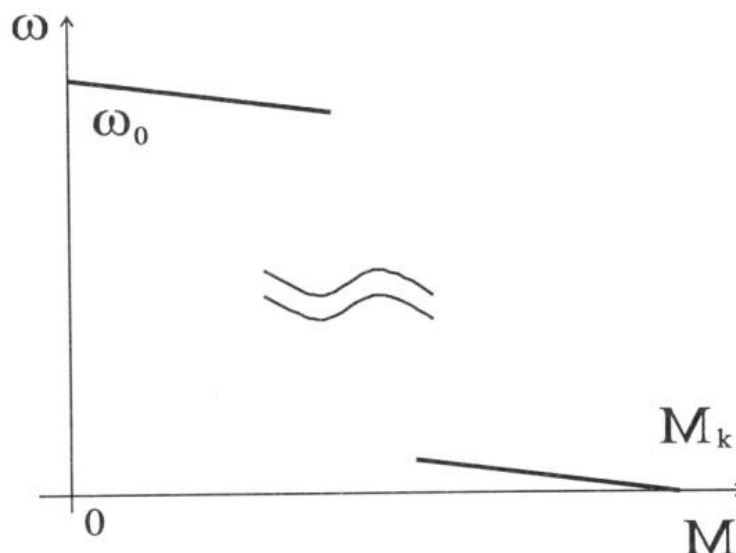
### 2.2.7 Řízení otáček

Do vztahu (10) dosadíme za  $U_i$  a za  $I_a$  vzejde vztah (15) a zjistíme, že u hotového motoru můžeme měnit jen tři parametry a to  $U_n$ ,  $\Phi$  a Přidáním sériového odporu ke kotvě  $R_k$ . Napětí  $U_n$  lze bezztrátově měnit jen změnou napájecího napětí. Při změně odporu kotvy vznikají další ztráty na přídavném rezistoru, které jsou nežádoucí. Proto se toto řízení už moc nepoužívá. Pro řízení napětí  $U_n$  se dnes používají pulzní měniče nebo řízené polovodičové usměrňovače.

$$\omega_{(M)} = \frac{U_n}{k \cdot \Phi} - \frac{R_k}{(k \cdot \Phi)^2} \cdot M \quad (15)$$

Z této funkce je vidět, že se jedná o klesající přímku (*Obr.7*). Není-li motor zatěžován

točí se rychlostí  $\omega_0$ . Při zatěžování mechanickým momentem klesají otáčky až na nulovou hodnotu. Do tohoto stavu by se neměl motor nikdy dostat, jelikož vinutím teče velký rozběhový proud na které vinutí není trvale přizpůsobeno.

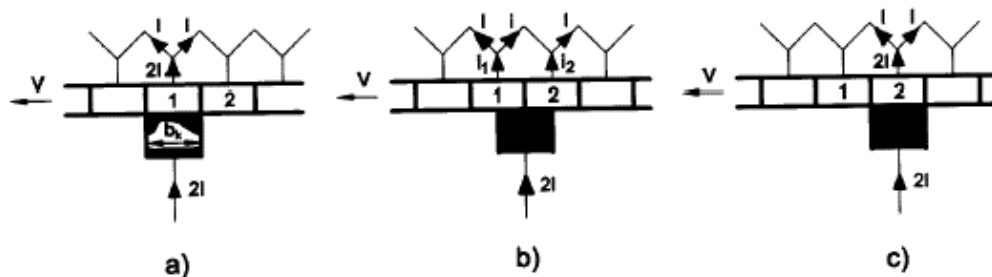


Obr. 7 Zatěžovací charakteristika[5]

Řízení otáček pomocí napětí  $U_n$  lze řídit otáčky od nuly do jmenovitých hodnot otáček, při odbuzování při konstantním napětí kotvy zvýšíme otáčky nad jmenovité, ale má to za následek změkčení charakteristiky. Přidáním rezistoru ke kotvě můžeme měnit směrnici přímky, která také změkčí charakteristiku.[5]

### 2.2.8 Komutace stejnosměrného stroje

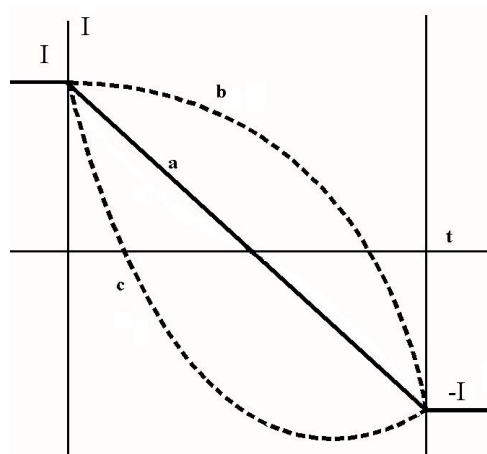
Při otáčení komutátoru přecházejí jednotlivé cívky z jedné paralelní větve do druhé a tím se mění i smysl procházejícího proudu, přičemž cívka je po jistou dobu, spojena přes kartáč nakrátko. Tento přechod se děje v takové poloze cívky, kdy se do komutující cívky neindukuje žádné napětí, takzvaná neutrální poloha. U nezatíženého stroje je poloha cívky uprostřed mezi hlavními póly. Při zatížení se tato poloha může posunout vlivem reakce kotvy. V okamžiku dle obr. (Obr.8a) protéká proud cívkou  $2I$  jedním směrem, který se rozdělí na dva proudy  $I$  který protečou dvěma paralelními větvemi a ty se pak sečtou na opačné straně sběracího kartáče pootočeného o  $180^\circ$ . Pootočí-li se komutátor (Obr.8b), rozdělí se proud  $2I$ , který je přímo úměrný dotykové ploše kartáče s lamelou. Cívka, která je mezi lamelami komutátoru číslem 1 a 2 začne komutovat. Když se kotva pootočí o jednu lamelovou rozteč a kartáč dosedne na lamelu 2. Změní se smysl proudu cívky, která je mezi lamelami 1 a 2. Tato změna proběhne za určitý čas, který se nazývá doba komutace



Obr. 8 rozdělení proudu při komutaci stroje[4]

Dochází ke komutaci v neutrální poloze, pak tento ideální případ nazýváme přímkovou komutací (Obr.9a). Není-li rychlost stroje zanedbatelná, musíme započítat vliv indukčnosti komutující cívky, ve které se vlivem rozptylových toků indukují reaktanční napětí

Toto reaktanční napětí se podle Lenzova zákona snaží zabránit změně proudu v komutující cívce. Komutující cívka se snaží udržet stávající stav proudu. To má za následek zmenšení strmosti proudu na začátku komutace. Rychlá změna proudu na konci komutace indukují velké reaktanční napětí na cívce, kterou právě opouští kartáč, což vede k jiskření a opalování přechodu kartáč - lamela. Tento stav se nazývá podkomutovaný stroj (Obr.9b). Aby se zamezilo tomuto stavu, musíme vytvořit takové magnetické pole pro komutující cívku, aby se do ní indukovalo napětí opačné polarity než je reaktanční napětí a to napětí komutační. U malých strojů bez komutačních pólů se toho docílí posutím kartáčů z neutrální polohy. U větších strojů zhotovíme komutační póly, které jsou umístěny mezi hlavními póly. Toto napětí je úměrné proudu kotvy proto se musí spojit vinutí sériově. A mělo by umožnit lineární komutaci. V praxi se volí pole pomocných pólů tak, aby komutační napětí bylo větší než reaktanční napětí. To má za následek snížení proudové hustoty na odběhové lamely komutátoru. Stroj bude překomutován.[4,8]



Obr. 9 Průběh proudu při komutaci[8]

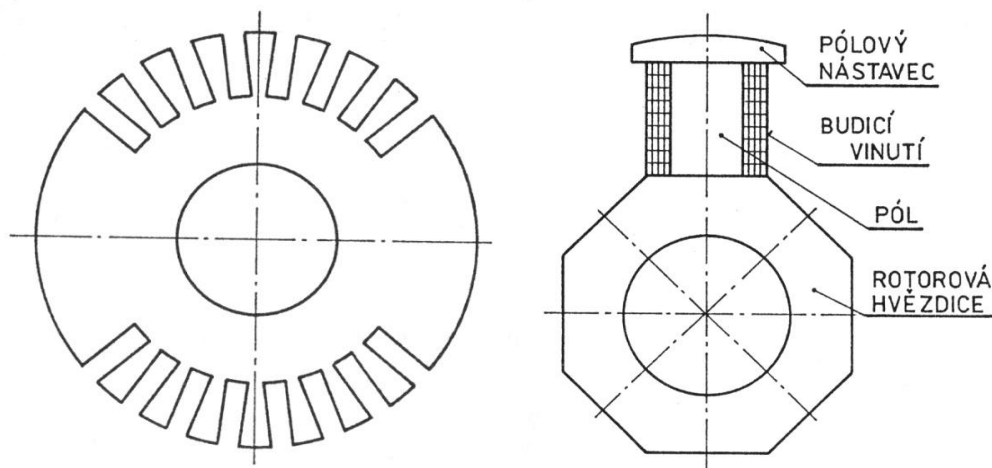
## 2.3 Synchronní stroje

Synchronní stroje lze rozdělit do tří skupin. Na generátory, kdy mechanická energie je přeměna na energii elektrickou. Motory, kdy elektrická energie je přeměněna na energii mechanickou. Dále na kompenzátory, kdy je stroj takzvaně přebuzený a připojen naprázdno k elektrizační soustavě. Ten chová se jako kondenzátor, který kompenzuje účinník v elektrizační soustavě. Synchronní motory se používají tam, kde není potřeba častého spouštění a reverzace otáček. Není-li pohon synchronním motorem řízen, může pracovat jen při konstantních otáčkách. Synchronní stroje jsou nejpoužívanější stroje pro výrobu elektrické energie. Nazývají se generátory, nejčastěji třífázové [2,3]

### 2.3.1 Konstrukce

Stroj se skládá z magnetického obvodu, elektrického obvodu, budiče a mechanické konstrukce. Stator se prakticky neliší od asynchronního stroje je složen z navzájem izolovaných plechů lakem nebo chemickou vrstvou tloušťky 0,35-05 mm. Listěný magnetický obvod musí být proto, aby se zamezilo ztrátám vířivými proudy a také ztrátám hysterezním. Na jeho obvodu jsou v drážkách navinuté cívky, které jsou posunuty prostorově o  $120^\circ$ .

Rotor se už podstatně liší od asynchronního stroje. Rozeznáváme dva druhy rotorů s hladkým rotorem (*Obr.10a*), kdy se též nazývá turboalternátor. Je konstruován jako dvou pólový z toho plyne malý průměr rotoru do 1,1m, aby se zamezilo velkým odstředivým silám na vinutí v drážkách rotoru. Naopak jeho délka může dosahovat až několik metrů. Používá se na výrobu energie u parních a jaderných elektrárn. Druhou variantou je Rotor s vyniklými póly (*Obr.10b*) nebo též hydroalternátor. Je konstruován jako pomaloběžný, tím pádem s větším počtem pólů desítky až stovky. Průměr rotoru je větší než u turboalternátoru, ale jeho délka je naopak menší. Vlivem proměnné vzduchové mezery vzniká navíc další složka momentu, která nezávisí na budícím proudu takzvaná reluktanční. Tento moment se snaží nastavit maximální magnetickou vodivost. Používá se jako zdroj energie pro vodní elektrárny. U tohoto typu rotoru může být umístěn tlumič v pólových nástavcích, který tlumí kývání rotoru při přechodových stavech změny zatížení.[2,3]



Obr.10a Řez rotorem turboalternátoru vlevo[2]

Obr.10b Řez rotorem osmi pólového hydroalternátoru vpravo[2]

Rotor u obou typů se napájí stejnosměrným napětím z budiče. To je malý stejnosměrný cizebuzený generátor na hřídeli stroje, jeho budicí vinutí je umístěno na dva sběrací kroužky na ty dosedají kartáče, které jsou vyvedeny na svorkovnici. Jelikož rotorem prochází stejnosměrný budicí tok a točí-li se synchronní rychlostí, neindukuje se do rotoru žádné střídavé napětí. Rotor může být masivní, ale z konstrukčního hlediska je rotor složen také z listěných plechů.[2,3]

### 2.3.2 Princip činnosti

Funkce synchronního motoru je založena na točivém magnetickém poli na statoru, které vybudí tři cívky, napájené harmonickým napětím a prostorově a elektricky pootočený o  $120^\circ$ . Toto točivé magnetické pole je unášeno rychlostí  $\omega_s$  (16). Kde  $\omega_1$  je úhlová rychlost daná napájecím kmitočtem sítě a  $p$  je počet pólpárů stroje.

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p} \quad (16)$$

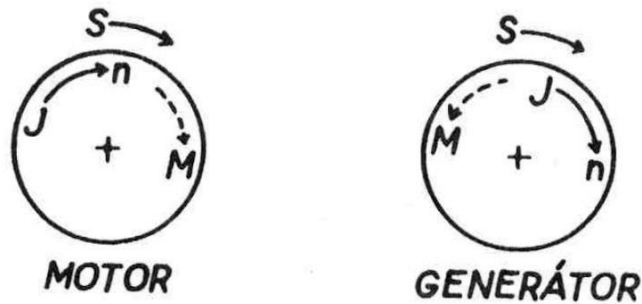
Na rotoru v drážkách je umístěno budicí vinutí, které je napájeno stejnosměrným napětím. To vytvoří otáčivé pole rotoru, které reaguje s točivým magnetickým polem na statoru. Vektorový součin obou dvou rotujících polí je úměrný momentu stroje (17).

$$\vec{M} \sim \vec{F}_1 \times \vec{F}_2 \quad (17)$$

Zavedeme-li úhel  $\beta$  svírající oba vektory, můžeme absolutní velikost momentu napsat rovnici (18), kde  $F_1$  je velikost pole statoru a  $F_2$  velikost pole rotoru. Obě pole jsou úměrné velikosti proudu, který prochází vinutím.

$$M \sim F_1 \cdot F_2 \cdot \sin \beta \quad (18)$$

Z toho plyne vlastnost, že obě pole musí mít stejnou úhlovou rychlost, takzvanou synchronní. Bude-li jedna složka magnetického napětí nulová, moment nemůže vzniknout. Poloha obou vektorů určuje, v jakém režimu stroj pracuje. Je-li pole rotoru opožděno za polem statoru. To znamená, že pole statoru táhne za sebou pole rotoru. Tím je vyvíjen kladný moment a pracuje stroj jako motor. Táhne-li pole rotoru pole statoru stroj pracuje jako generátor, vyvíjí záporný moment a brzdí pohonné zařízení generátoru. (Obr.11) [3]



Obr.11 Stav synchronního stroje[11]

### 2.3.3 Zátěžný úhel

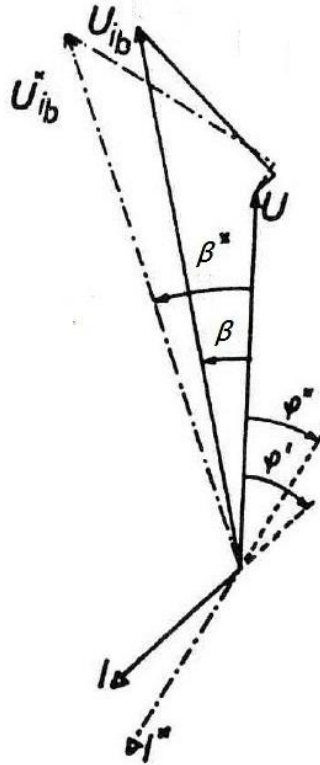
Zatěžovací úhel  $\beta$  je úhel mezi fázory  $U$  a  $U_{ib}$ . Počítáno od  $U$  k  $U_{ib}$  proti směru hodinových ručiček. U motoru bude záporný úhel mezi fázory a u generátoru kladný. Na (obr. 13) je přebuzený synchronní generátor. Výkon, který je dodáván pohonným soustrojím a přenášený přes vzduchovou mezeru (19) se rovná součtu výkonu, který dodá generátor do sítě a ztrát ve vinutí kotvě.

$$P_{\delta} = mRI^2 + mUI \cos \varphi \quad (19)$$

Zvýšíme-li moment pohonného stroje. Moment generátoru, který působí proti momentu stroje pohonného, nemůže okamžitě zvýšit svojí hodnotu vlivem momentu setrvačnosti rotujících hmot. Rozdíl obou momentů (21) bude urychlovat rotor a frekvence rotorového pole generátoru bude narůstat. Tím se zvětší úhlová rychlost fázoru  $U_{ib}$ , který se bude vzdalovat fázoru  $U$ . Tím se začne zátěžný úhel se zvětšovat (Obr.12). Při určitém úhlu nastane rovnováha momentů. Rotor by se neměl dále urychlovat, bude se ale roztáčet dál, do té doby, než moment generátoru bude větší než moment pohonného stroje. Tím se začne rotor přibrzďovat. Tomuto ději se říká kývání vlivem změny zatěžovacího úhlu. Tento jev se snaží potlačit tlumič v rotoru generátoru, ve kterém se bude indukovat napětí a to vlivem kývání rotoru. Vznikne tedy skluz rotoru vůči točivému poli a vytvoří se asynchronní moment takzvaný tlumící. Po pár výkyvech se ustálý moment a oba fázory se točí stejnou rychlostí a

to synchronní. Fázorový diagram označený hvězdičkou je nová ustálená hodnota. Činný výkon dodávaný do sítě se zvýší vlivem většího proudu a účinníku

$$M_p - M_G = J \frac{d\omega}{dt} \quad (20)$$



Obr.12 Změna zátěžného úhlu při změně zatížení[11]

Moment stroje je tedy úměrný zatěžovacímu úhlu  $\beta$ , tento úhel může nabývat hodnot ve stabilním chodu motoru maximálně  $-90^\circ$ . Překročí-li se jeho hodnota nad maximální mez motor vypadne ze synchronizmu a začne se zpomalovat vlivem momentu zátěže, který je větší než moment motoru až do zastavení rotoru. V chodu generátoru je maximální úhel  $+90^\circ$ . Dojde-li k jeho překročení, ztratí se magnetická vazba mezi oběma poli. Generátor ztratí synchronní rychlost a bude se velmi rychle urychlovat (20) vlivem nulového momentu generátoru do velkých otáček, kde hrozí poškození stroje.[9]

#### 2.3.4 Rozběh motoru

Ze zastaveného synchronního motoru nemůže mechanická rychlost rotoru okamžitě dosáhnout rychlosti točivého pole statoru a to vlivem momentu setrvačnosti rotující hmoty zátěže a rotoru. Proto rozběh synchronního stroje musí doprovázet spouštěcí zařízení, které se postará o rozběh motoru a vtažení do synchronizmu. Rotor, který je opatřen tlumičem, ten se dá využít pro asynchronní rozběh. Podmínkou je, aby tlumič byl dimenzován na rozběhový

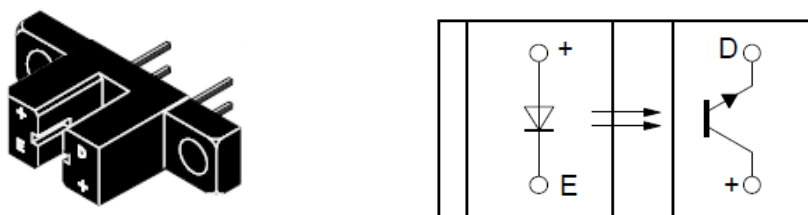
proud, musí tedy snést tepelnou energii při rozběhu. Rozběh pomocí frekvenčního měniče, kdy od nulových otáček pomalu zvyšujeme rychlost točivého magnetického pole tak, aby rotor stroje byl za každých podmínek vtažen do synchronizmu. Další možností je pomocí přídatného motoru na hřídeli. Motor může být stejnosměrný nebo asynchronní. V případě, že jde o asynchronní stroj musí mít o dva póly méně než motor synchronní. To proto, aby asynchronní rychlost pohonu byla stejná, jako rychlost synchronního roztáčeného stroje.[9]

### 3 Návrh přípravku pro měření zátěžného úhlu.

Pro návrh přípravku se může vycházet změřením dvou signálů a to průběhu napětí na výstupů generátoru a signálu, kde se právě nalézá poloha hřídele vůči signálu z výstupního napětí synchronního generátoru. Vhodným změřením obou signálů, přejde měření na problematiku měření fázového posuvu dvou signálů. Měření se bude provádět na synchronním generátoru, který je čtyřpólový. Nastane tedy problém rozdílnosti mechanické frekvence na hřídeli a frekvence výstupního střídavého napětí. Dále se bude muset oba dva signály přeměnit na stejný průběh napětí a stejnou napěťovou úroveň. Po vyřešení těchto problémů, bude stačit změřit jen čas mezi dvěma signály, který je úměrný fázovému posuvu a také zátěžnému úhlu  $\beta$ .

#### 3.1 Čidlo mechanického snímače úhlu natočení

Pro snímání polohy hřídele byla použita optická závora TCST2103 (Obr.13). Skládá se z fotodiody, která vyzařuje světlo v infračerveném spektru o vlnové délce 950 nm a detektoru, kterým je fototranzistor. Byla zvolena varianta čidla s konstrukčními otvory na uchycení závory k plošnému spoji.



Obr.13 Vlevo optozávora TCST2103 a vpravo její vnitřní zapojení[10]

fotodioda		fototranzistor	
$U_f$ [V]	1.25	$U_{CE}$ [V]	70V
$I_f$ [mA]	60mA	$I_c$ [mA]	100mA

Tab.1 elektrické parametry optické závory



Napájení čidla  $U_n$  bylo zvoleno 5V. Pro toto napětí byly navrženy rezistory na omezení proudu. Pomocí voltampérové charakteristiky fotodiody a výstupní charakteristiky fototranzistoru byly spočítány vhodné rezistory. Pro fotodiodu bylo zvoleno napětí  $U_f = 1,1V$  pro toto napětí se odečetl z voltampérové příslušný proud  $I_f = 5mA$  a spočetli předřadný rezistor  $R_A$  (21). Byla zvolena nejbližší vyšší hodnotu  $R_A$  z řady E12 a to hodnota 820  $\Omega$ .

$$R_A = \frac{U_n - U_f}{I_f} = \frac{5 - 1,1}{0,005} = 780 \Omega \quad (21)$$

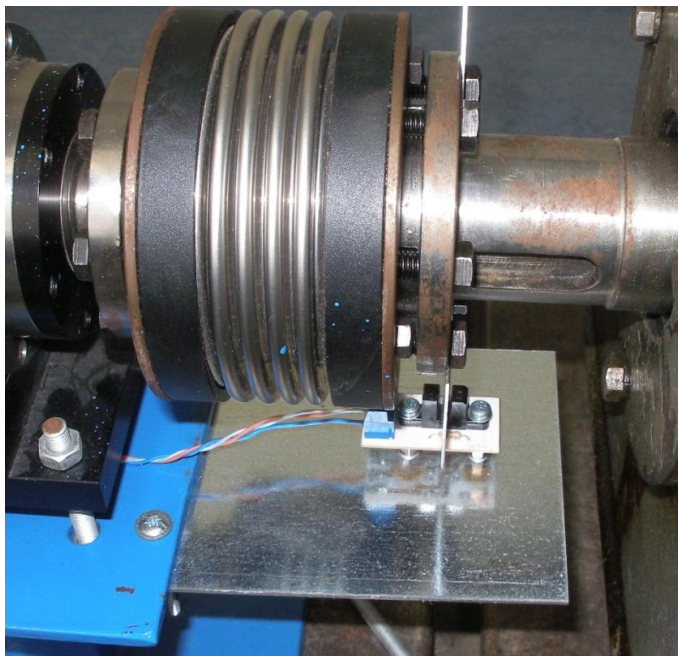
Zapojení fototranzistoru bylo zvoleno se společným kolektorem a to proto, že neinvertuje výstupní napětí. Z výstupní charakteristiky, kde parametrem je  $I_f$  se pro  $U_{ce} = 5V$  a pro  $I_f = 5mA$  odečetl proud  $I_c$ , který byl 600 $\mu A$ . Pro tento proud saturační napětí fototranzistoru nepřekročí hodnotu 0,3V. Rezistor se spočítali podle vzorce (22). Byla zase zvolena nejbližší vyšší hodnota z řady E12 a to hodnota 8k2.[10]

$$R_E = \frac{U_n - U_{sat}}{I_c} = \frac{5 - 0,3}{0,000006} = 7,8 k\Omega \quad (22)$$

Po návrhu rezistorů bylo celé zapojení realizováno na nepájivém poli, tím jsme také ověřili funkčnost optické závory. Pomocí generátoru obdélníkového signálu o frekvenci 25Hz a amplitudě 5V, který byl zapojen na vstup optické závory s předřadným rezistorem  $R_A$ . Na rezistor  $R_E$  byl připojen osciloskop, který snímal výstupní signál. Po úspěšném ověření funkčnosti zařízení bylo přistoupeno k realizaci plošného spoje. K vyhotovení plošného spoje optické závory bylo nakresleno schéma plošného spoje (*Příloha B*) v programu EAGLE ve verzi 6.2.0. Napájení, výstup i zem bylo vyvedeno na svorkovnici AK500/3, která bude zprostředkovávat napájení a komunikaci. Po návrhu desky plošného spoje (*Příloha C*) bylo přistoupeno k její výrobě. Z cuprextitu o síle mědi 35  $\mu m$  se vyřízl požadovaný rozměr. Dále se nakreslil pomocí leptuvzdorného laku na plošný spoj požadovaná předloha. Po zaschnutí se ponořil plošný spoj do lázně leptacího roztoku na bázi chloridu železitého, který odleptá nezakrytou měď. Po odleptání zůstanou jen nakreslené cesty plošného spoje. Po umytí spoje lihem, který odstraní leptuvzdorný lak byl nanesen pájitelný lak, který ochrání plošný spoj před oxidací mědi.

Poté co byl hotový plošný spoj. Ten se potřeboval upevnit k soustrojí. Po konzultaci s vedoucím bakalářské práce bylo rozhodnuto, že kotouček, který tvoří půlkruh se uchyťtí na spojku, která spojuje oba stroje. Spojka je k sobě připevněna pomocí šesti šroubů M6 s roztečí 60°. Toho bylo využito a plánovalo se uchyťtí kotouček k ní. Pod rotujícím kotoučkem bylo potřeba uchyťtí čidlo. Využilo se stávající konstrukce, která vyčnívala pod spojkou a jen se prodloužila a uchyťtí pomocí dvou šroubů M4. Pomocí posuvného měřítka se rozměřily

základní rozměry kotoučku a dílu na uchycení čidla. V programu SolidWorks byl vytvořen výkres (*Příloha A*). Po uvážení, že kotouček nedokážeme vyrobit ručně. Nechali jsme si ho vyrobit z pozinkovaného plechu o tloušťce 1mm pomocí technologie vysekávání nástrojem, tím samym způsobem byla vyrobena i konstrukce na uchycení čidla.



*Obr.14 detail optické závory umístěné pod hřídelí*

### 3.2 Čidlo elektrického snímače

Pro snímání polohy točivého magnetického pole bylo využité výstupní fázové napětí synchronního generátoru. Tento harmonický signál o efektivní hodnotě 230V a frekvenci 50Hz se bude muset upravit na obdélníkový signál o amplitudě 5V a frekvenci 25Hz. Budeme muset tedy použít součástky pro dosažení tohoto signálu.

Prvně se musela změnit napěťová úroveň na menší hodnotu. To bylo využito malým transformátorkem, který byl použit i na napájení celého přípravku pro měření. Měli jsme tedy střídavé napětí o malé hodnotě, které bylo po jednocestném usměrnění převedeno na obdélník pomocí operačního zesilovače zapojeného jako komparátor. Pro napájení bylo zvoleno nesymetrické napájení a to z konstrukce jednoduššího zdroje napájení. Za komparátor byl vložen klopný obvod D, zapojený jako dělička frekvence dvěma. Za něj bylo vloženo hradlo XOR, kde na jeho druhý vstup jsme připojili na generátor obdélníkového průběhu o frekvenci 25 Hz, který představoval snímač mechanického natočení hřídele. Výstup hradla je úměrný fázovému posuvu obou signálů. Stačí tedy odměřit čas trvání pulzu, který je odebrán dvakrát za periodu. Napájecí napětí bylo zvoleno 5V. Podle tohoto napětí a výstupního proudu byl

navržen zdroj, který zprostředkoval napájení. Vše bylo zapojeno do nepájivého kontaktního pole. Poté jsme pomocí osciloskopu měřili signály na výstupech jednotlivých zapojení obvodů. Po odměření bylo zjištěno, že oba signály nemají přesně stejnou frekvenci. Oba dva signály byly z jiného zdroje, u kterých nedokážeme zajistit přesně stejnou frekvenci. Také nelze změřit fázový posuv obou signálů. Dále byla zjištěna nepříjemná skutečnost a to, že klopný obvod D se nepřeklápí. Bylo tedy přistoupeno k jiné variantě. Vyndalo se hradlo XOR a klopný obvod D a přistoupeno se na skutečnost, že frekvence se bude muset vydělit dvěma softwarově.

Po ověření funkčnosti bylo přistoupeno na první testování na skutečném stroji. K odměření fázového rozdílu obou signálů se použil hotový výrobek, který byl vyroben v rámci předmětu Vývojové práce na projektech. Zařízení se muselo modifikovat tím, že se napájely dva drátky na externí přerušení mikrokontroléru Atmega8 od firmy Atmel. Zařízení bylo už doplněno alfanumerickým LCD displayem, kde se mohl zobrazit zátěžný úhel a čas mezi dvěma náběžnými hranami dvou obdélníkových signálů. Po zapojení potřebných napájecích napětí stejnosměrného a synchronního generátoru. Napájení přípravku se připojilo na výstup generátoru. Dvoukanálovým osciloskopem byly měřeny oba dva signály. Nastavil se kotouček na hřídeli tak, že signál z optické závory předbíhal signál z komparátoru. Tím se nasimuloval chod v generátorickém režimu. Signál z optické závory byl dobrý. Jeho střída byla 50% a perioda 40 ms. Zato signál z komparátoru byl značně zdeformovaný na náběžné a sestupné hraně obdélníkového signálu. Napájení bylo dáváno postupně na všechny tři fáze generátoru. Výsledek z komparátoru se nezměnil a LCD display vypisoval pokaždé jinou hodnotu zátěžnému úhlu. Proto bylo toto řešení zavrhnuto.

Místo komparátoru se použil optočlen s výstupním hradlem, který opticky oddělí signál z transformátoru. Jelikož není mezi vstupem a výstupem žádná vazba signál by neměl být zdeformovaný. Na výstup optočlenu se připojil klopný obvod D jako dělička dvěma, který už správně dokázal vydělit frekvenci. Po ověření funkčnosti této varianty pomocí osciloskopu, bylo přistoupeno k druhému testování přípravku. Po opětovném připojení napájecích napětí obou strojů byly měřeny oba dva signály pomocí osciloskopu. Oba průběhy napětí byly nezarušené s konstantní periodou 40ms. LCD display ale zobrazoval jiný rozdíl času náběžných hran obou signálů než osciloskop. To bylo způsobené přetečením časovače, který přeteče každých 32,7ms což odpovídá úhlu 295°. Oba signály měli tedy fázový posuv větší než 295°. Oprava se dosáhla vhodným pootočením kotoučku na hřídeli soustrojí. Bylo dosaženo hodnoty kolem 3°. Dále bylo potřeba nějak zatížit generátor, abychom ověřili

funkčnost změny zátěžného úhlu. To bylo uděláno připojením proudově dimenzovaného drátového reostatu na jednu fázi generátoru. Postupně se zatěžoval generátor posouváním jezdcy reostatu a sledovalo se na osciloskopu a na LCD display hodnoty rozdílů obou náběžných hran a zátěžného úhlu. Při jmenovitém proudu se dosáhlo na hodnotu kolem 5°. Po úspěšném testování bylo přistoupeno k samotné realizaci výrobku.

### 3.2.1 Návrh napájecího zdroje přípravku

Prvně jsme navrhli napájecí systém celého obvodu. Napájení bylo zvoleno 5V s ohledem na mikropočítač, LCD display a klopný obvod D. Ke stabilizaci napětí byl zvolen obvod 7805. Jedná se o sériový zpětnovazební stabilizátor. Bylo zapotřebí určit efektivní napětí sekundární strany transformátoru, to vypočteme dle vzorce (23)

$T_j$ [°C]	-40~150	$U_{drop}$ [V]	2
$U_{in}$ [V]	35	$P_d$ [W]	1.9
$U_{out}$ [V]	5	$I_{out}$ [A]	1,5

Tab.2 elektrické parametry Stabilizátoru 7805[11]

$$U_{trs} = \frac{U_{out} + (U_{drop} + 0,5) + (2 \cdot U_{to})}{\sqrt{2}} = \frac{5 + 2 + 0,5 + 2 \cdot 0,7}{\sqrt{2}} = 6,3 \text{ V} \quad (23)$$

Zvolila se hodnota napětí ze jmenovité řady. A to napětí nejbližší větší a to hodnotu 9V. Dále bylo potřeba vypočíst hodnotu filtračního kondenzátoru  $C_1$ . Při daném odběru proudu. Provedl se odhad odběru zařízení, který jsme stanovily na 0,3A. Proud kondenzátorem je dán vztahem (24). Odebíráme-li z kondenzátoru konstantní proud, můžeme derivaci napětí podle času přepsat na podíl diferencí a vyjádříme si ze vzorce hodnotu  $C_1$  (26).

$$I_{C1} = C_1 \frac{dU_{C1}}{dt} = C_1 \frac{\Delta U_{C1}}{\Delta t} \quad (24)$$

Máme-li můstkové usměrnění je perioda usměrněného napětí rovna 10ms. tento čas je také dobou, kdy kondenzátor hradí proud do obvodu místo usměrňovače. Ve skutečnosti je tato doba o něco kratší. Hodnota  $\Delta U_{C1}$  je maximální přípustné zvlnění napětí. Můžeme ho vypočíst dle vztahu (25).

$$\Delta U_{C1} = U_{trs} \cdot \sqrt{2} - 2 \cdot U_{to} - U_{out} + 0,5 + U_{drop} = 9 \cdot \sqrt{2} - 1,4 - 7,5 = 3,8 \text{ V} \quad (25)$$

$$C_1 = I_{C1} \frac{\Delta t}{\Delta U_{C1}} = 0,3 \frac{10 \cdot 10^{-3}}{3,8} = 0,789 \text{ mF} \quad (26)$$

Hodnota filtrační kapacity byla zvolena nejbližší vyšší ze jmenovité řady a to hodnota 1mF. Vypočetl se také ztrátový výkon na stabilizátoru (27) a výkon transformátoru (28).

$$P_{sta} = I_{out} \cdot (0,5 + U_{drop}) = 0,3 \cdot (0,5 + 2) = 0,75 \text{ W} \quad (27)$$

$$P_{tr} = I_{out} \cdot U_{trs} = 0,3 \cdot 9 = 2,7 \text{ VA} \quad (28)$$

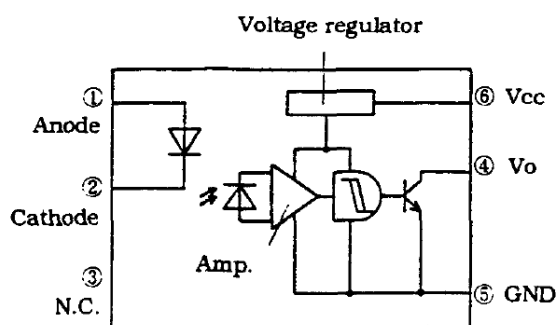
Ve skutečnosti vlivem návrhu většího filtračního kondenzátoru bude tato hodnota ztrátového výkonu na stabilizátoru o něco větší a to vlivem menšího zvlnění. Úbytek napětí v propustném směru usměrňovacích diod byl při návrhu zvolen 0,7V. Hodnota napětí filtračního kondenzátoru byla zvolena 25V. Výkon transformátoru byl zvolen nejbližší vyšší ze jmenovité hodnoty a to 3 VA.

### 3.2.2 Návrh úpravy sinusového signálu na obdélníkový

Po návrhu zdroje jsme mohli přistoupit k úpravě signálu z harmonického tedy sinusového na obdélníkový signál. Potřebovali jsme nejprve harmonický signál usměrnit takovým způsobem, aby polovina periody harmonického signálu byla sinusová a druhá polovina nulová. Použili jsme usměrňovací diodu, kterou jsme zapojili jako jednocestný usměrňovač. Měli jsme usměrněný signál sinusového tvaru o délce trvání půlperiody 10ms. Pro převod na obdélník se hodil optočlen PC900V Sharp (*Obr.15*). Vnitřní zapojení se skládá z vysílací diody a fotodetektoru. Za kterým následuje zesilovač, který je připojen na hradlo se Schmittovým klopným obvodem, který se chová jako komparátor s hysterezí a zabraňuje vzniku zákmitů výstupního signálu v okolí úrovně překlápění hradla spínání. Výstup hradla je přiveden na tranzistor zapojený se společným emitorem a s otevřeným kolektorem, kde můžeme dle své volby navrhnout kolektorový rezistor.

dioda		tranzistor	
$I_f$ [mA]	50	$V_{cc}$ [V]	16
$U_r$ [V]	6	$I_{ol}$ [mA]	50
$U_f$ [V]	1,1	$U_{ol}$ [V]	0,2
$P_d$ [mW]	70	$P_d$ [mW]	150

Tab.3 elektrické parametry optické závory PC900 Sharp[12]



Obr.15 vnitřní zapojení optické závory PC900V Sharp[12]

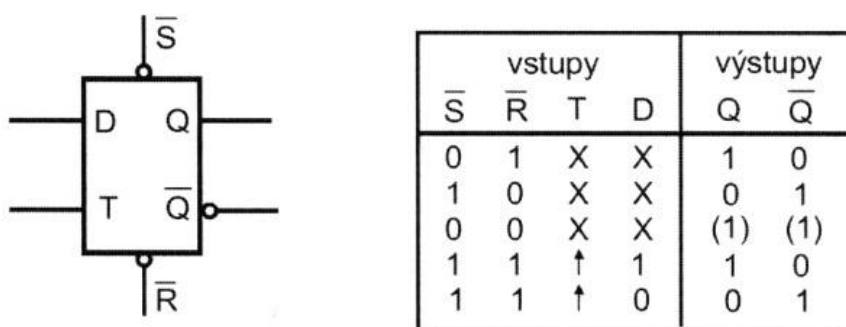
Výpočet předřadného rezistoru před diodu, se provedl na omezení maximálních elektrických parametrů optočlenu. Jelikož se dioda napájí z harmonického signálu bude se počítat s maximální hodnotou napětí. S ohledem na spotřebu vezmeme jednu pětinu maximálního proudu diodou. Z této úvahy můžeme vypočíst předřadný rezistor (29). Zvolili jsme nejbližší vyšší hodnotu 1k2.

$$R_1 = \frac{U_{trns} \cdot \sqrt{2} - U_{to} - U_f}{10 \cdot 10^{-3}} = \frac{9 \cdot \sqrt{2} - 0,7 - 1,1}{10 \cdot 10^{-3}} = 1090 \Omega \quad (29)$$

Navržení předřadného rezistoru (30) do kolektoru tranzistoru se řídilo stejným postupem jako u předřadného rezistoru u diody. Proud se také zvolil pětinový. Byla zvolena hodnota 510  $\Omega$ . [12]

$$R_2 = \frac{U_n - U_{ol}}{10 \cdot 10^{-3}} = \frac{5 - 0,2}{10 \cdot 10^{-3}} = 480 \Omega \quad (30)$$

Máme tedy obdélníkový signál o frekvenci 50 Hz. Tento signál se bude potřebovat vydělit dvěma na frekvenci 25 Hz. Na to se výborně hodí klopný obvod typu D (Obr.16) reagující na náběžnou hranu signálu. Zapojí-li se vstupy  $\bar{R}$  a  $\bar{S}$  na logickou jedničku. Data na vstupu D se přepíšou na výstup Q v okamžiku přechodu signálu na vstupu T z logické nuly na logickou jedničku. Zapojí-li se zpětná vazba z  $\bar{Q}$  na D a na vstup T se přivede signál o frekvenci 50 Hz. Na výstupu Q a budeme mít signál o poloviční frekvenci a to 25 Hz. Na výstupu  $\bar{Q}$  otočen o 180 V pouzdru jsou dva tyto obvody druhý obvod, který nepoužívá a připojí se na +5V. A to s ohledem na rušivé napětí, aby se zbytečně nepřeklápěl a nezvyšovala se spotřeba obvodu. [13]



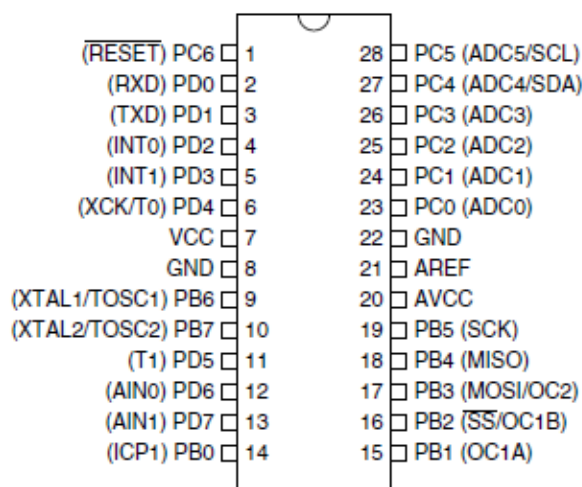
Obr.16 schematická značka klopného obvodu D a jeho pravdivostní tabulka [13]

### 3.3 Vyhodnocení obou signálů

Oba dva obdélníkové signály se stejnou frekvencí budeme potřebovat něčím vyhodnotit a to z hlediska fázového posuvu. Už při testování se používal mikrokontrolér Atmega8, který se osvědčil, tak byl použit k finální konstrukci přípravku.

### 3.3.1 Mikrokontrolér Atmega 8

Tento nízko příkonový mikroprocesor od firmy Atmel z rodiny AVR je vytvořený na rozšířené RISC Architektuře. Vykonává instrukci v jediném hodinovém taktu hodin. Při frekvenci krystalu 16Mhz dosahuje Výkonu 16 MIPS (Milion Instructions per Second). V pouzdru DIP 28 (Obr.17). Obsahuje 23 Programovatelných vstupních/výstupních pinů. Maximální proud jedním pinem je 40mA. Celkově přes všechny piny nesmí téct více než 300mA. Udávaná spotřeba při napájení 5V je 20mA. Maximální pracovní napětí je 6V. Pracovní teplota -55°C až 125°C.[14]

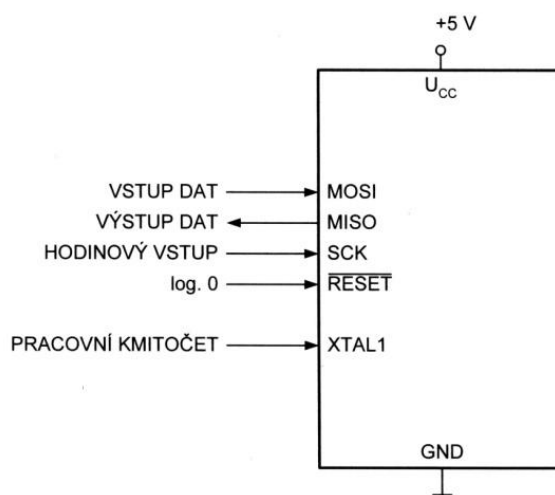


Obr.17 rozložení vývodu v pouzdru DIP mikrokontroléru Atmega8[14]

#### Základní vlastnosti:

- 32 osmi bajtových registrů
- instrukční soubor o obsahu 130-ti instrukcí
- datová paměť RAM o kapacitě 1kB
- programová paměť Flash o kapacitě 8kB
- počet přeprogramování je 10 000 cyklů
- datová paměť EEPROM o kapacitě 512 B
- dva 8-bitové čítače/časovače
- jeden 16- bitový čítač/časovač
- 6 kanálů A/D převodníku s rozlišením 10 bitů
- analogový komparátor
- sérové rozhraní SPI, UART, I<sup>2</sup>C

K programování byl použit sériový kanál SPI (Serial Peripheral Interface). Programování probíhá přímo v aplikaci. Nemusí se tedy přesouvat obvod do programátoru. Komunikace probíhá po čtyřech vývodech a to MOSI, MISO, SCK, RESET. Programátor je nastaven jako master řídí tedy mikroprocesor, který je nastaven jako slave (Obr.18). Při programování je po celou dobu držen v logické 0. Nahrávaná data jsou zapisována každou náběžnou hranou hodinového pulzu SCK.[15]



Obr.18 Zapojení pro programování pomocí SPI[15]

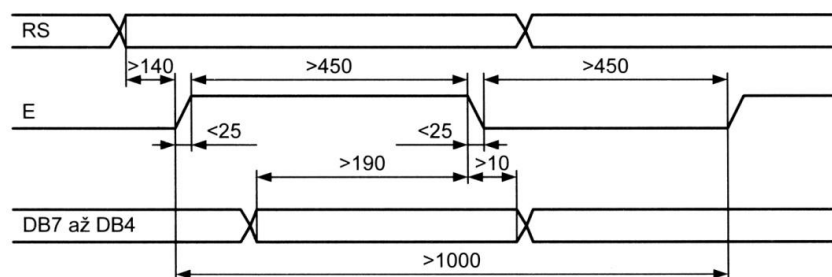
### 3.3.2 LCD display

Pro zobrazení se používá alfanumerický LCD display s řadičem HD44780 se zobrazovací maticí 2x8 (2 řádky 8 sloupců), která pro naše účely stačí. Komunikace probíhá po čtyřech bitech. Komunikaci řídí bit RS, který se stará o přenos dat nebo příkazu. Bit R/W čtení nebo zápis příkazu nebo dat. Tento bit je trvale bude trvale uzemněn, jelikož budeme jen zapisovat. Další bit E je povolovací bit zápisu nebo čtení.

Display obsahu dva typy pamětí DD RAM zde jsou uloženy alfanumerické znaky potřebné k zobrazení. Tato paměť se adresuje pomocí sedmi bitů a představuje pozici znaku na display, kde se má zobrazit daný znak. Znaková sada je v rozměru znaku 5x7 bodů. DG RAM dává možnost uživateli si přednastavit až osm vlastních znaků na adresách 00H až 07H. Znak je možno vytvořit v rozměru 5x8 bodů.

Posloupnost zápisu v 4 bitové komunikace je naznačena na (Obr. 19) Signál RS připojen na log. 0. Prvně se aktivuje bit RS log 0 jde o příkaz log. 1 jde o data. Aktivujeme vstup E do log 1 následně pošleme po bitech DB7 až DB4 horní polovinu bytu a deaktivujeme vstup E do log. 0 stejným postupem zapíšeme dolní polovinu bytu.[16]





Obr.19 časové průběhy zápisu dat nebo příkazu na display uvedené časy jsou v ns.[16]

### 3.3.3 Návrh programu

Při návrh řídicího programu se používalo software CodeVisionAVR Evaluation V2.05.6 Tento program je v této verzi zdarma. Má ale omezení napsaného kódu na 4kB. Jeho hlavní přednost je, že má implementovaný generátor kódu a knihovny na různé periferie včetně knihovny LCD s řadičem HD44780, který využíváme.

Budeme měřit do rozsahu 10ms. Tento čas odpovídá fázovému natočení 90° Což pro naše účely stačí. Máme oba dva signály připojené na vstup vnějšího přerušení INT0 (mechanický úhel) a INT1 (elektrický úhel) oba dva vstupy se nakonfigurují tak, aby obsloužily rutinu přerušení při náběžné hraně obdélníkového signálu. Bude se měřit synchronní stroj jen v generátorickém režimu. Mechanický signál bude tedy předbíhat signál elektrický a to o čas, který změříme. Pro odměření času se použije jeden 16 bitový časovač. Zapnutí časovače bude v okamžiku náběžné hrany na pinu INT0 poté se začne měřit čas, až do uplynutí náběžné hrany INT1, kde se časovač zastaví. Změřený čas se přepočte na úhel, kde 90° odpovídá naměřenému času 10ms. A výsledný úhel se vypíše na LCD display. Z důvodu rychlých změn hodnot na LCD display, je přepisován každou 1s a to, aby byly hodnoty čitelné.

Jeden hodinový takt se rovná jednomu strojovému taktu, který trvá (31). Pro naplnění 16 bitového časovače T1 uběhne doba (32). Tento čas nestačí k rozsahu 10ms. Budeme muset tedy vydělit interní děličkou hodiny mikroprocesoru a to osmi (33).

$$t_s = \frac{1}{16 \cdot 10^6} = 62,5 \text{ ns} \quad (31)$$

$$t_{\check{c}1} = 62,5 \cdot 10^{-9} \cdot (2^{16} - 1) \doteq 4,1 \text{ ms} \quad (32)$$

$$t_{\check{c}8} = (8 \cdot 62,5 \cdot 10^{-9}) \cdot (2^{16} - 1) \doteq 32,8 \text{ ms} \quad (33)$$

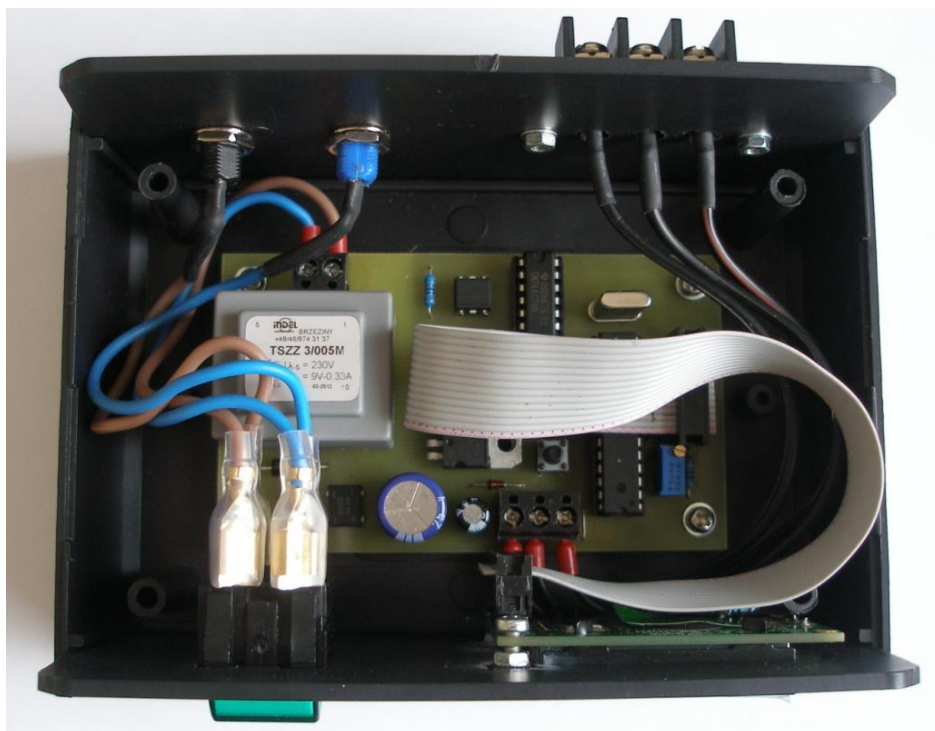
$$t_{1p} = (8 \cdot 62,5 \cdot 10^{-9}) = 0,5 \text{ us} \quad (34)$$

Čas 32,8ms je už dostačující a odpovídá přibližně úlu 295,2°. Do této hodnoty by se časovač při měření nikdy neměl dostat. Jedno přičtení do registru časovače trvá 0,5us to

odpovídá úlu  $0,0045^\circ$ . Nám stačí měřit s přesností  $0,1^\circ$ . Celkovou hodnotu časovače, který se skládá ze dvou osmi bitových registrů, se vynásobí s číslem  $0,0045$  a tím pádem budeme mít hodnotu v úlech. Další osmibitový časovač se stará, aby výpis úhlu proběhl každou 1s. Program nejprve inicializuje všechny potřebné registry na ovládání potřebných periférií, jako jsou časovače T0 a T1, externí přerušeni na INT0, INT1 a LCD display připojený k portu D. Dále se napsala funkce *prevod\_na\_retezec*, která se stará o převod desetinného čísla na řetězec znaků uložený do pole. V nekonečné smyčce se vypisuje hodnota zátěžného úhlu  $\beta$  a časového rozdílu obou náběžných hran v us.

### 3.4 Plošný spoj a konstrukční krabička

Jako ochrana proti přepětí na sekundární je použitý bipolární transil a to s ohledem na diodu v optočlenu, ke které je navržen předřadný rezistor na 9V. K proudovému přetížení transformátoru na sekundární straně slouží vratná pojistka. Ta se chová na principu PTC termistoru, kdy průchodem proudu se na ní vytváří Jouelovy ztráty a tím zvětší svůj odpor a proud následně poklesne.



Obr.20 plošný spoj v konstrukční krabičce

Plošný spoje se vyrobil v návrhovém programu EAGLE ve verzi 6.2.0, která je zdarma ke stažení jako verze light, kde použitelná velikost plošného spoje je  $100\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ . Tento rozměr pro naše účely postačí. Do každého rohu se umístil jeden otvor s průměrem  $3,2\text{ mm}$  na uchycení plošného spoje do krabičky. Byla použita krabička U-KP09 bez otvorů o rozměrech

150 mm x 179 mm x 70 mm. Skládá se ze čtveřice dílů a pomocí čtyř šroubů se dá sešroubovat. Dále se vyřízly otvory pro kolébkový dvoupólový spínač se zelenou doutnavkou, kde spínací vývody jsou vyvedeny pomocí čtyř konektoru faston na které jsme nasunuli PVC izolaci a otvor na LCD display, který je připojen přes čtrnácti žilový kabel zakončený na obou stranách konektorem. Ten zajišťuje komunikaci s mikrokontrolérem a napájení podsvětlení. Poté se vyvrtali otvory na uchycení vyvedené svorkovnice na zadní straně panelu krabičky a pro přístrojové zdířky pro napájení celého přípravku. Plošný spoj se umístil na čtyřech distančních sloupcích, které jej drží mechanicky upevněný v krabičce.

## 4 Měření na soustrojí

### 4.1 Popis soustrojí a elektrické schéma zapojení

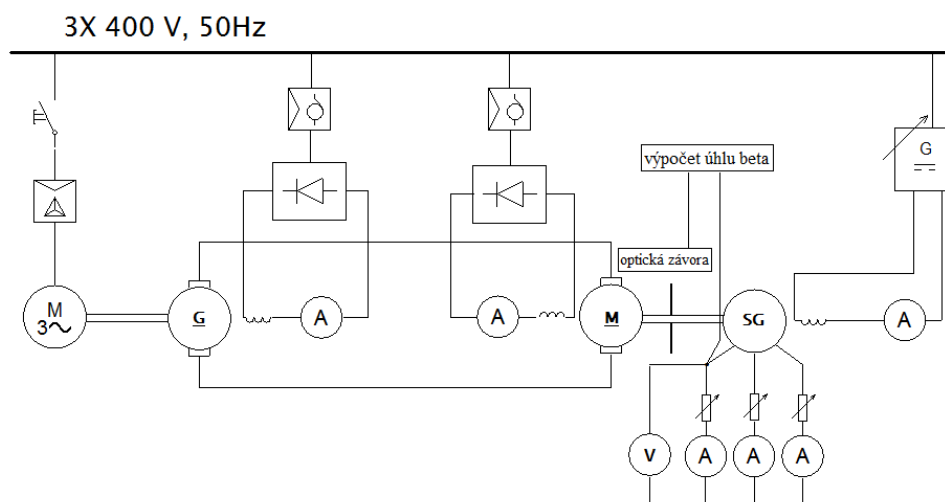
Soustrojí, na kterém se měří se skládá ze stejnosměrného motoru a cizím buzením od výrobce MEZ Brno typu TMN 16b a čtyřpólového synchronního generátoru s vyniklými póly od výrobce MEZ Drásov typu 1G-3. Soustrojí je spojeno přes mechanickou spojku. Oba tyto stroje se nachází na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky Na hřídeli soustrojí jsou připevněna dvě čidla pro měření otáček a točivého momentu.

stejnosměrný motor TMN 16B		Synchronní generátor 1G-3	
Výkon	5,5KW	činný výkon	2,4KW
Napětí kotvy	220V	zdánlivý výkon	3KVA
Proud kotvy	29A	cos φ	0,8
buzení	220V	výstupní napětí Y/Δ	380V/220V
Proud buzení	0,85A	Výstupní Proud Y/Δ	4,5A/7,9A
otáčky	1400 ot/min	budič	65V
krytí IP	21	otáčky	1500 ot/min
třída izolace	E	Provedení a tvar	HO-DB

Tab.4 Parametry soustrojí

Nejprve se zapojilo silové schéma soustrojí (Obr.21) to se skládá celkem ze čtyř strojů. Pro napájení kotvy stejnosměrného motoru je použité dynamo, kde se může regulovat jeho buzení přes autotransfornátor s usměrňovačem a tedy i napětí na kotvě připojeného motoru. Dynamo pohání asynchronní motor s rozběhem hvězda/trojúhelník. Buzením motoru můžeme regulovat otáčky daného soustrojí, které je stejné jako buzení dynama. Buzení synchronního generátoru je použitý stejnosměrný stabilizovaný zdroj. Prvně se nechal rozběhnout asynchronní motor a následně se oba dva stejnosměrné stroje nabudili. Pomocí stroboskopu a buzením stejnosměrného motoru se dorovnaly otáčky na 3000 ot/min. Statorové vinutí

synchronního generátoru bylo zapojeno do hvězdy. Následně se začal synchronní generátor nabuzovat stejnosměrným napětím do hodnoty výstupního fázového napětí 230V.



Obr.21 schéma zapojení soustrojí



Obr.22 měřící stanoviště

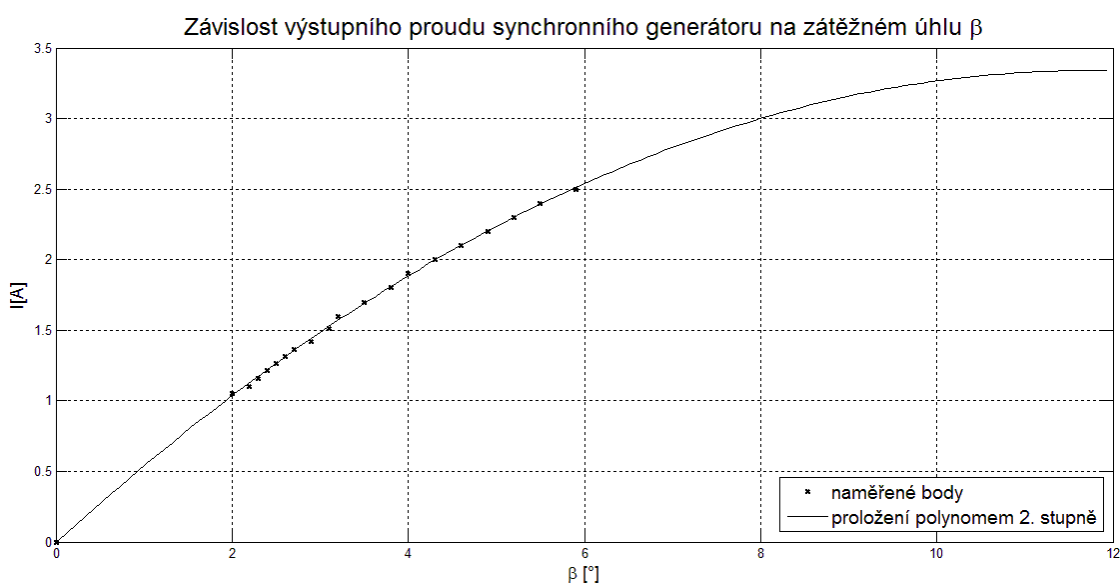
#### 4.2 Naměřené hodnoty a jejich zpracování

Při měření jsme nezprovoznily zařízení pro měření točivého momentu, proto se změřila jen charakteristika závislosti výstupního proudu na zátěžném úlu. Na svorkovnici se připojila

zátěž ve formě reostatů o hodnotě  $210\Omega$  2,5A. Tento reostat byl s největší proudovou zatížitelností a také s největší hodnotou odporu, které jsme v laboratoři našly. Při nastavení reostatu na hodnotu  $210\Omega$ , nám poskytla měření proudu až hodnoty kolem 1A

V prvním měření jsme provedli korekci zátěžného úhlu při chodu generátoru naprázdno. Vlivem mechanických ztrát a také nepřesnému nastavení mechanického kotoučku na hřídeli vůči obdélníkovému signálu získaného z generátoru jsme nedostali oba signály ve fázi. Potřebovali jsme, aby se oba obdélníkové signály překrývali. Toho se docílilo zavedením konstanty v programu *korekce\_uhlu*. Změřením času, mezi dvěma náběžnými hranami obou obdélníkových signálů při chodu generátoru naprázdno jsme dopočítali konstantu, kterou jsme pak při výpočtu odečítali od naměřeného času. Tím jsme docílili nulového zátěžného úhlu při chodu naprázdno. Následně jsme zatěžovali rovnoměrně všechny tři fáze posouváním reostatu až do maximální hodnoty 2,5 A danou omezením reostatu. Nemohli jste tedy měřit, až do jmenovitého výstupního proudu 4,5A. Při zapojení vinutí do hvězdy.

měřený proud ve třech fázích pomocí tří ampérmetrů jsme se snažili udržovat na stejné hodnotě. Spočetli jsme pomocí aritmetického průměru průměrný proud, který jsme vynášeli do grafu v závislosti na zátěžném úhlu (*Graf 1*).



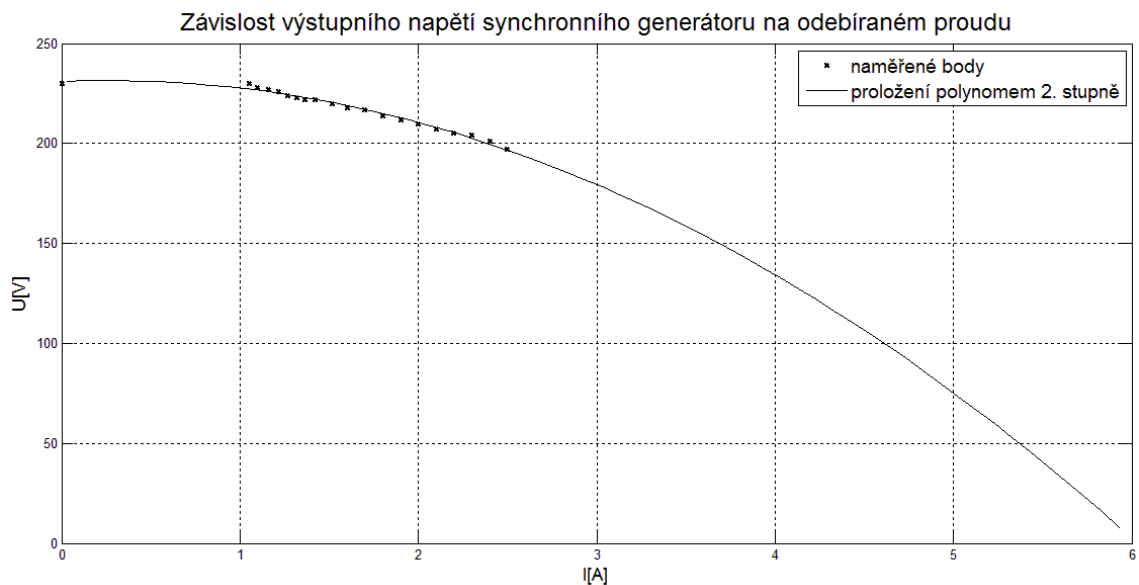
*Graf 1*

Činný výkon při zanedbání indukčnosti vedení a závitů se přeměnil na teplo při proudu 2,5A se na všech třech reostatech vytvořilo teplo o výkonu 1500W. Při této hodnotě se značně hřály, proto jsme je při měření chladili ventilátorem. Jelikož se nemohlo měřit až do 4,5A nedokážeme sestavit celou charakteristiku. Proto jsou oba grafy proloženy polynomem druhého stupně, který ukazuje, jakým směrem by se hodnoty při pokračování měření mohly

dostat.

Při měření jsme se dopustili chyby, které jsme jsi všimli, až při zpracování naměřených hodnot. Zapomnělo se dodržovat otáčky soustrojí na hodnotě 1500 ot./min. Při návrhu v programu do mikrokontroléru se počítá, že synchronní generátor bude připojen k elektrizační soustavě. Tím budou otáčky vlivem pevné frekvence sítě 50Hz konstantní. Při zatěžování synchronního generátoru do reostatů nám, ale klesaly otáčky. Vlivem poklesu otáček se zvětšila perioda obou obdélníkových signálů, které zpracovává mikrokontrolér. A už neplatila konstanta zavedená v programu. Naměřený čas 10ms se nerovná  $90^\circ$ . Poklesnou-li otáčky až na polovinu to je 750 ot./min. Bude perioda obdélníkového signálu 80ms a  $90^\circ$  se bude rovnat 20ms. A zátěžný úhel bude dvojnásobný. Průběh grafu naměřených hodnot (*Graf 1*) je tedy změřen s chybou, která rostla v závislosti na odebíraném proudu a tím i poklesu otáček. Zátěžný úhel by tedy se zatížením nerostl tak rychle a extrém proležené funkce už nebude kolem  $12^\circ$ . Ale posune se do vyšších hodnot.

Dále se v průběhu měření nezvyšovalo buzení synchronního generátoru, aby se udrželo konstantní výstupní napětí, které vlivem zatížení klesalo. K buzení jsme využívali zdroj pouze o maximálním výstupním napětí 30V. Při jmenovitém proudu 4,5A potřebuje buzení synchronního generátoru 65V. Této hodnoty se tedy ani nemohlo dosáhnout. Hodnoty napětí v závislosti na odebíraném proudu ukazuje (*Graf 2*)



*Graf 2*

## 5 Závěr

Cíl této bakalářské práce bylo navrhnout a vyrobit zařízení pro měření zátěžného úhlu synchronního generátoru a následné verifikace momentové charakteristiky. Tato charakteristika nemohla být změřená z důvodu nezprovoznění zařízení pro vyhodnocení momentu z čidla umístěné na hřídeli. Proto byla změřená jiná charakteristika.

Změřená charakteristika závislosti odebíraného proudu na zátěžném úhlu je podobná charakteristice momentové. Jelikož moment stroje je přímo úměrný mechanickému výkonu na hřídeli při konstantních otáčkách. Výkon na hřídeli je úměrný výkonu dodávanému do reostatů a výkon na reostatech je úměrný proudům, které jimi procházejí.

Toto zařízení pro měření se dá použít jen pro synchronní stroje, které pracují na pevné napájecí frekvenci. Po úpravě programu by se dalo měřit i na strojích s jiným počtem pólů než u našeho měřeného stroje. Nebude-li na jiném stroji použita stejná spojka jako na měřeném stroji, bude se muset také znovu vyrobit kotouček na hřídel. Aby hodnota zátěžného úhlu nebyla závislá na otáčkách stroje, museli bychom je také měřit. Tím přidat do programu proměnnou, která by na základě změny otáček měnila přepočít časů na úhel. Při měření jsme také narazili na problém, kdy po připojení zátěže k synchronnímu stroji se zátěžný úhel otočil o  $180^\circ$ . Tento jev nastával jen náhodně a proto jsme ho nedovedli odstranit.

V průběhu realizace přístroje na měření se musely řešit konstrukční chyby, které nebyly na první pohled viditelné. Muselo se tedy přistoupit k alternativnímu řešení dané situace. Celá bakalářská práce byla pro mě bohatou zkušeností, ve které jsem využil znalosti získané v průběhu studia střední a vysoké školy.

## Použitá literatura

- [1] Halliday, D., Resnick, R., Walker J.: Fyzika Část 1 Mechanika. Prometheus, 2000.
- [2] Měříčka, J., Hamata, V., Voželínek, P.: Elektrické stroje. Praha: ČVUT, 2001.
- [3] Bartoš V., Červený J., Hruška J., Skala B., Kotlanová A.: Elektrické stroje. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004.
- [4] [online]. [cit. 2012-01-26]. Dostupné z:  
[http://home.zcu.cz/~tvystein/downloads/+ES/ss\\_stroje\[1\].pdf](http://home.zcu.cz/~tvystein/downloads/+ES/ss_stroje[1].pdf)
- [5] Javůrek, J.: Regulace Moderních elektrických pohonů. Praha: Grada, 2003.
- [6] Novák, P.: Mobilní roboty. Praha: Technická literatura BEN, 2005.
- [7] [online]. [cit. 2012-05-30]. Dostupné z: <http://free-energy.xf.cz/teorie/elmot.pdf>
- [8] [online]. [cit. 2012-05-30]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/ss.pdf>
- [9] Hruškovič, L.: Elektrické stroje. Bratislavě: Slovenská technická univerzita, 1999.
- [10] [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/521/521-043/dsh.521-043.1.pdf>
- [11] [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/330/330-001/dsh.330-001.1.pdf>
- [12] [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/43381/SHARP/PC900.html>
- [13] Davídek, V., Antošová, M.: Číslicová technika. České Budějovice: Kopp, 2006.
- [14] [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc8159.pdf>
- [15] Matoušek, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR ATmega16, 4. Díl. Praha: Technická literatura Ben, 2006.
- [16] Matoušek, D.: Práce s inteligentními displeji LCD, 1. Díl. Praha: Technická literatura Ben, 2006.



## **Seznam Příloh**

**Příloha A** – Výkres zapojení mechanického upevnění čidla a kotoučku na spojku hřídele

**Příloha B** – Schéma zapojení optické závory

**Příloha C** – Osazovací schéma DPS čidla a schéma vodivých cest

**Příloha D** – Schéma zapojení přípravku pro měření zátěžného úhlu

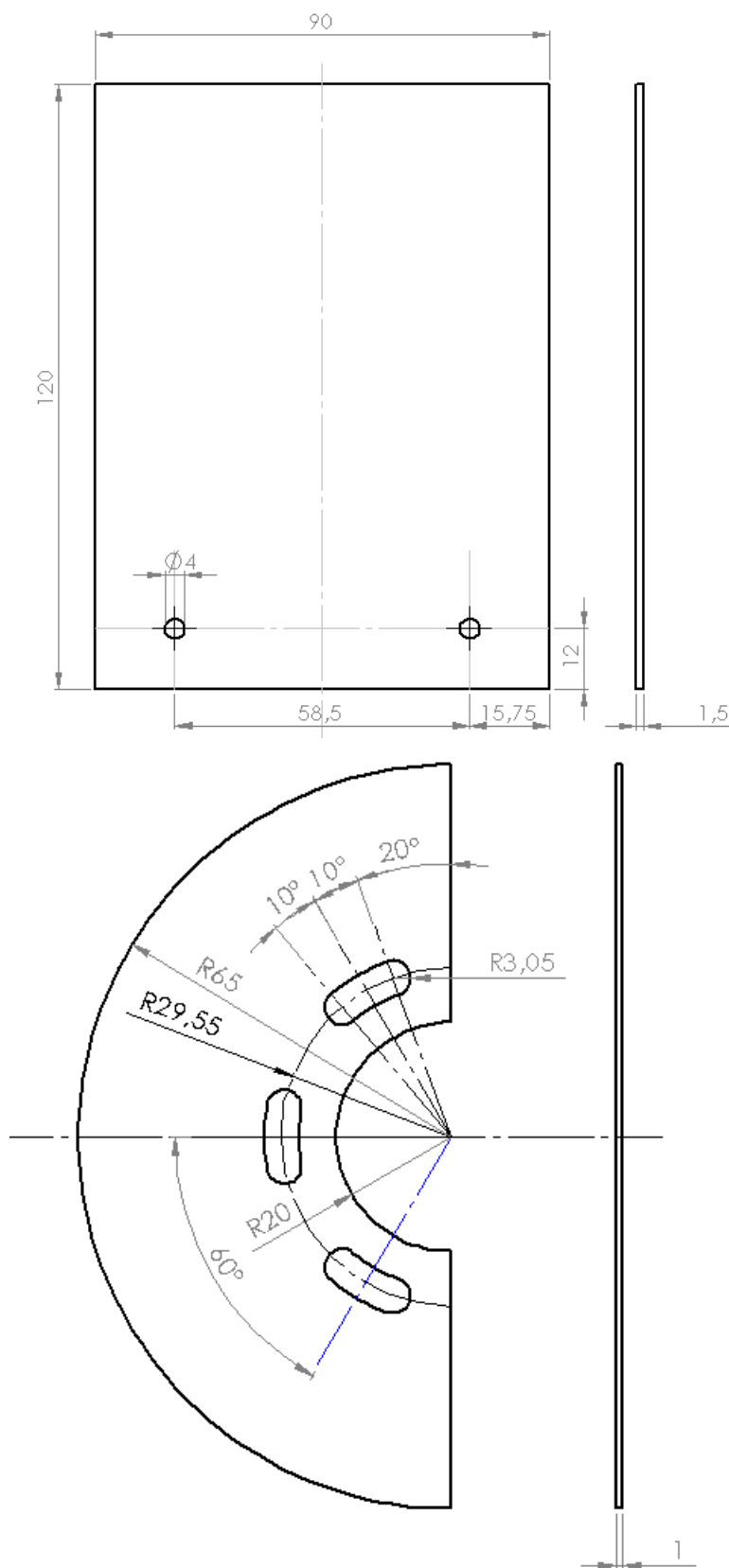
**Příloha E** – Osazovací schéma DPS přípravku pro měření zátěžného úhlu a schéma vodivých cest

**Příloha F** – Seznam použitých součástí

**Příloha G** – Program pro mikroprocesor

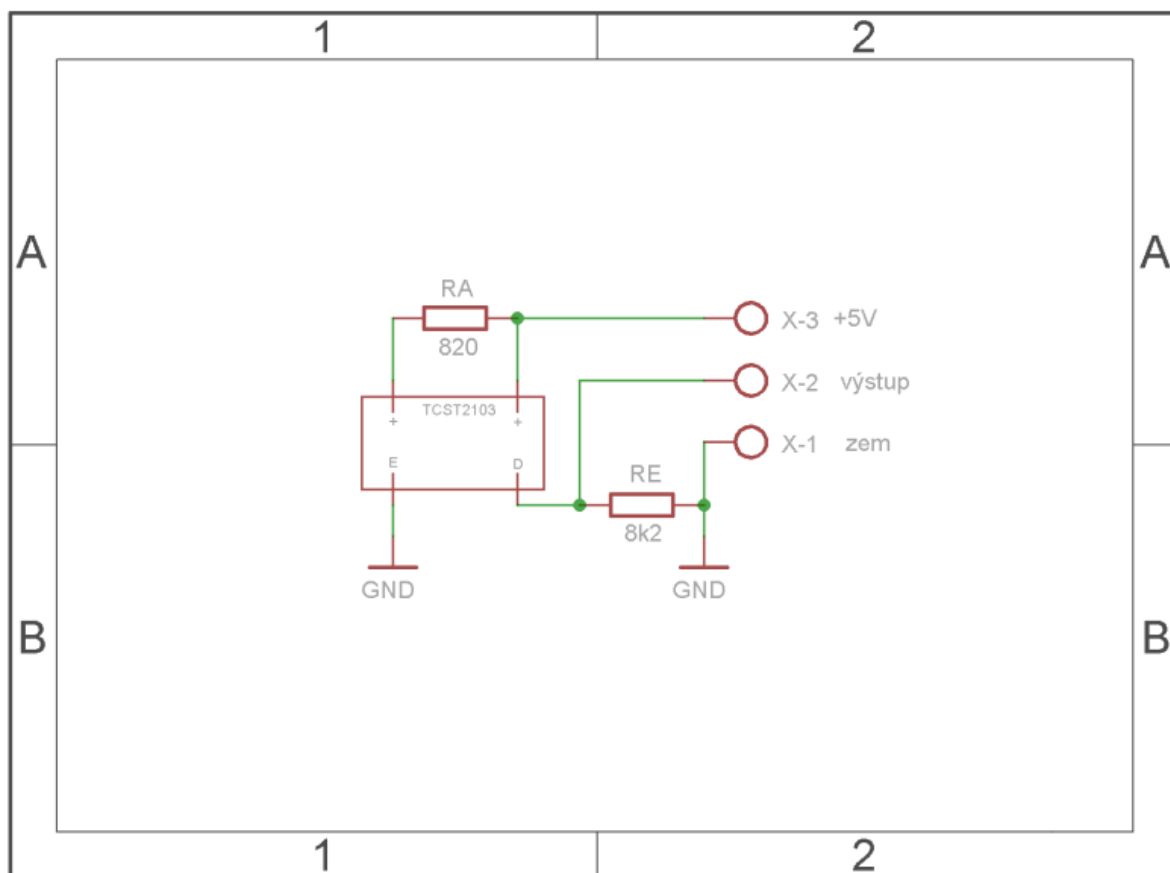
**Příloha A**

Výkres zapojení mechanického upevnění čidla a kotoučku na spojku hřídele



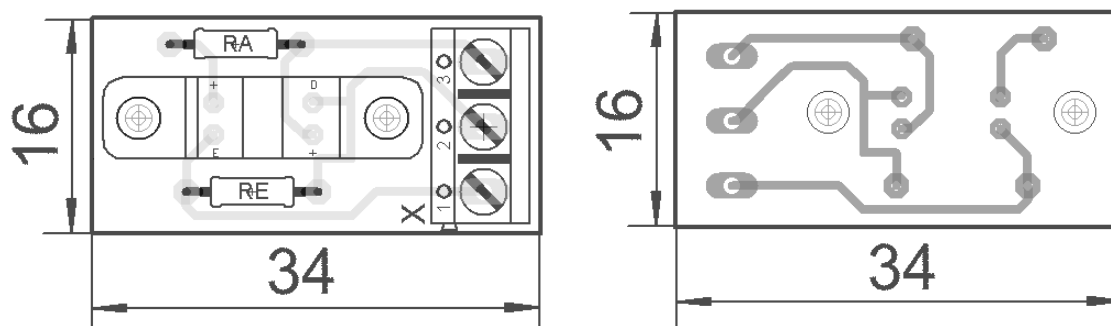
## Příloha B

Schéma zapojení optické závory



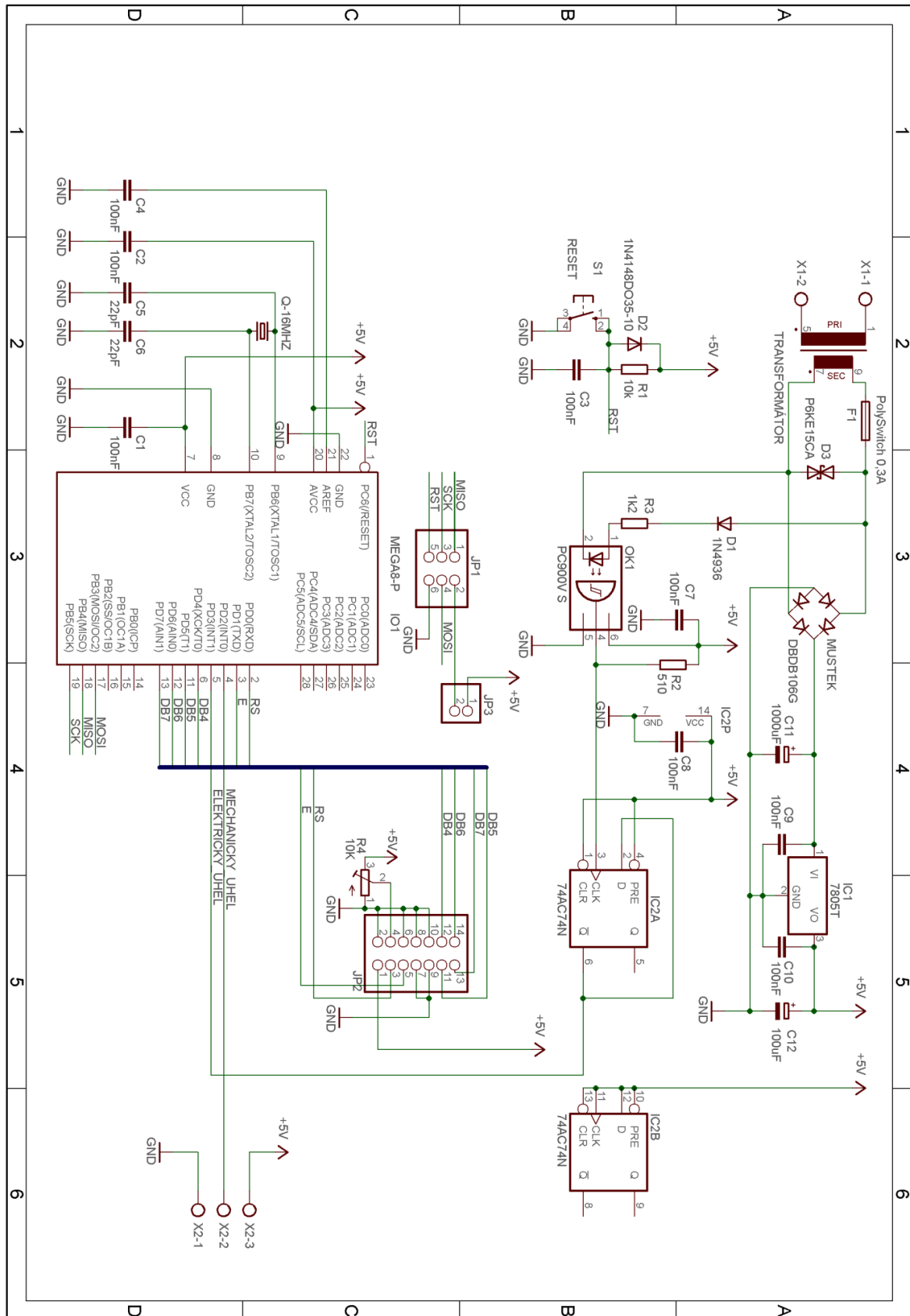
## Příloha C

Osazovací schéma DPS čidla a vodivých cest



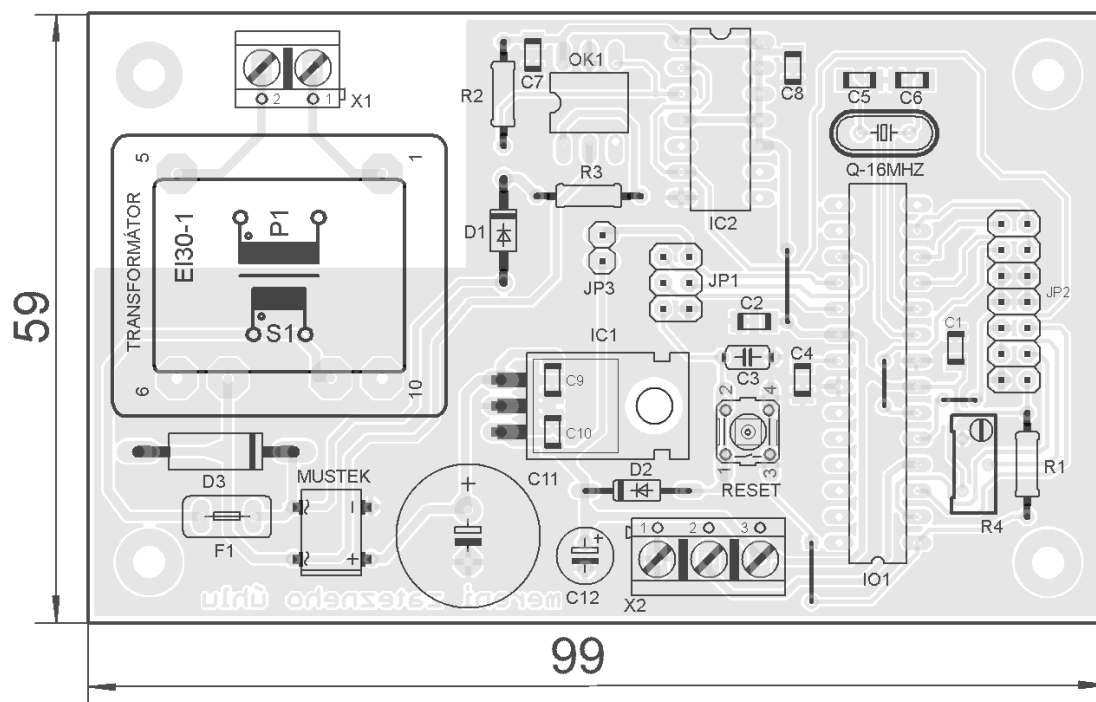
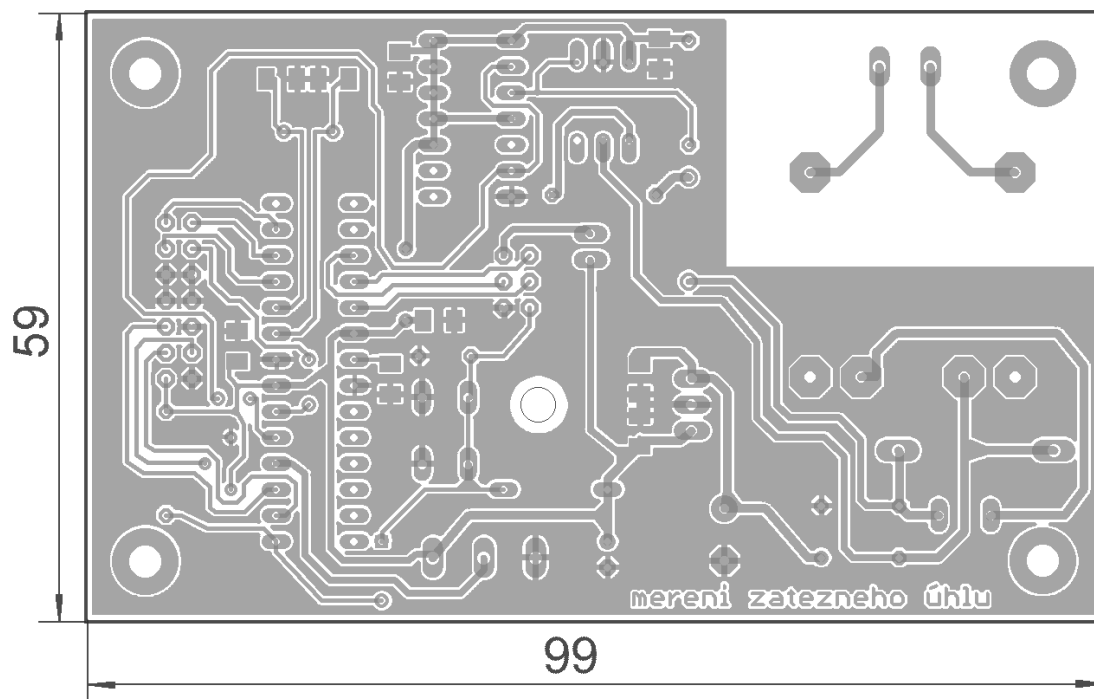
**Příloha D**

Schéma zapojení přípravku pro měření zátěžného úhlu



## Příloha E

Osazovací schéma DPS přípravku pro měření zátěžného úhlu a schéma vodivých cest



**Příloha F**

## Seznam součástek

Označení	Počet	Typ	pouzdro
C1, C2, C3, C4, C7, C8, C9, C10	8	100nF	SMD 1206
C5, C6	2	22pF	SMD 1206
C11	1	1000uF/25V	E5-13
C12	1	100uF/16V	E2,5-6
D1	1	1N4936	D0-41
D2	1	1N4148	D0-35
D3	1	P6KE15CA	D0-15
F1	1	PolySwitch 0,3A	TE5
IC1	1	7805T	TO-220
IC2	1	74AC74N	DIL14
IO1	1	MEGA8-P	DIL28
OK1	1	PC900V S	DIL06
KP1	1	2X03	2,54 mm
JP2	1	2X07	2,54 mm
JP3	1	1X02	2,54 mm
můstek	1	DBDB106G	2,54 mm
Q	1	16MHz	HC49/S
R1	1	10k	0207/10
R2	1	510	0207/10
R3	1	1k2	0207/10
RA	1	820	0207/10
RE	1	8k2	0207/10
RESET	1	S1	B3F-10XX
TRANSFORMÁTOR	1	9V/ 3VA	EI30-1
X1	1	AK500/2	con-ptr500
X2	2	AK500/3	con-ptr500
OPTOZÁVORA	1	TCST2103	-

## Příloha G

## Vývojový diagram pro mikrokontrolér

