

**UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**MĚŘENÍ NA SS ELEKTRICKÝCH STROJÍCH**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR: Jiří Klimeš**  
**VEDOUCÍ PRÁCE: doc. Ing. Jiří Macháček, CSc.**

**2009**

**UNIVERSITY OF PARDUBICE**  
**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING**  
**AND INFORMATICS**

**DC MOTOR MEASUREMENT**

**BACHELOR WORK**

**AUTHOR:**

**Jiří Klimeš**

**SUPERVISOR:**

**doc. Ing. Jiří Macháček, CSc.**

**2009**

**Univerzita Pardubice**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektrotechniky**  
**Akademický rok: 2008/2009**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří KLIMEŠ**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
  
Název tématu: **Měření na ss elektrických strojích**

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

Cílem je oživení nové laboratorní úlohy. Teoretická část: Nastudovat funkci ss el. motorů a generátorů, provozní charakteristiky těchto strojů a měření otáček tachodynamem. Implementační část: Proměření statických a dynamických charakteristik el. strojů v nové laboratorní úloze. Zařízení obsahuje motor spojený s generátorem, generátor má proměnnou zátěž a jeho otáčky měří tachodynamo. Měření se provádí přes počítač.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

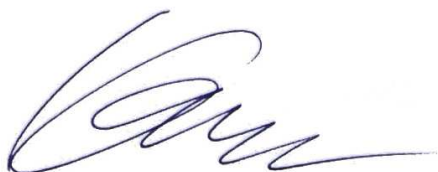
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Literatura: Heřman, J. a kol.: Příručka silnoproudé elektrotechniky.  
SNTL Praha 1984. Dokumentace k úloze.**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Macháček, CSc.**  
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2009**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2009**



doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.  
děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

Prohlašuji:

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 14.8. 2009

Jiří Klimeš

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Jiřímu Macháčkovi, CSc., za rady, připomínky a návrhy týkající se bakalářské práce a za odborné vedení při měření se softwarovými prostředky CTRL V3 a MATLABem. Dále děkuji firmě ATAS elektomotory Náchod, a.s. za poskytnutí potřebných materiálů a katalogových listů stejnosměrných strojů.

## **Souhrn**

Obsahem této bakalářské práce je popis principu a funkce stejnosměrných strojů a měření jejich statických charakteristik bez zátěže a se zatížením. Zařízení je ovládáno přes počítač a reálné otáčky jsou měřeny pomocí tachodynamu. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulkách a v grafech.

## **Klíčová slova**

Stejnoseměrný stroj, motor, generátor, tachodynamo, ctrl

# Obsah

1	Úvod .....	13
2	Stejnoseměrné stroje .....	14
2.1	Uspořádání stejnosměrného stroje.....	14
2.2	Princip stejnosměrného stroje.....	15
2.3	Indukované napětí stejnosměrného stroje.....	16
2.4	Komutace u stejnosměrného stroje.....	17
3	Rozdělení stejnosměrných strojů.....	18
3.1	Stejnoseměrné generátory .....	20
3.2	Stejnoseměrné motory .....	22
4	Stroje s permanentními magnety .....	23
4.1	Materiály pro permanentní magnety.....	23
4.2	Konstrukce strojů s permanentními magnety .....	25
5	Laboratorní měření .....	27
5.1	Popis zařízení.....	27
5.2	Popis komunikace mezi zařízením a PC.....	29
5.3	Naměřené hodnoty.....	31
6	Závěr.....	39



## Seznam obrázků

Obr. 1: Uspořádání stejnosměrného stroje.....	14
Obr. 2: Orientace polí statoru a rotoru.....	16
Obr. 3: Smyčka v rotujícím magnetickém poli.....	16
Obr. 4: Stejnosměrné stroje: a) s cizím buzením, b) s derivačním buzením, c) se sériovým buzením, d) s kompaundním buzením.....	19
Obr. 5: Schéma zapojení stejnosměrného generátoru s cizím buzením .....	20
Obr. 6: Vnější charakteristika stejnosměrného generátoru s cizím buzením .....	21
Obr. 7: Schéma zapojení stejnosměrného generátoru s derivačním buzením .....	21
Obr. 8: Vnější charakteristika stejnosměrného generátoru s derivačním buzením .....	22
Obr. 9: B-H charakteristiky PM .....	24
Obr. 10: Porovnání typu materiálu při vratné permeabilitě (kde $B_r$ je remanentní indukce, $B_{vr}$ – vratná indukce) .....	25
Obr. 11: Klasické uspořádání stroje s PM .....	26
Obr. 12: Segmentové uspořádání statoru.....	26
Obr. 13: Blokové schéma soustrojí .....	27
Obr. 14: Fotografie celého zařízení – pohled ze předu.....	28
Obr. 15: Fotografie celého zařízení – pohled ze zadu .....	28
Obr. 16: Měřicí jednotka CTRL V3 .....	31

## Seznam tabulek

Tab. 1 : Naměřené hodnoty s 0% zatížením.....	34
Tab. 2 : Naměřené hodnoty s 50% zatížením.....	34
Tab. 3 : Naměřené hodnoty se 100% zatížením .....	35

## Seznam grafů

Graf 1 : charakteristika $U_M = f(U_0)$ .....	32
Graf 2: Porovnání otáček vypočtených z rovnice (13) a (15).....	33
Graf 3 : Statická charakteristika $n = f(U_M)$ .....	36
Graf 4 : Statická charakteristika $U_D = f(n)$ .....	37
Graf 5 : Statická charakteristika $U_{TD} = f(U_0)$ .....	38

## Seznam zkratek

SS	stejnoseměrný
PM	permanentní magnet

# 1 Úvod

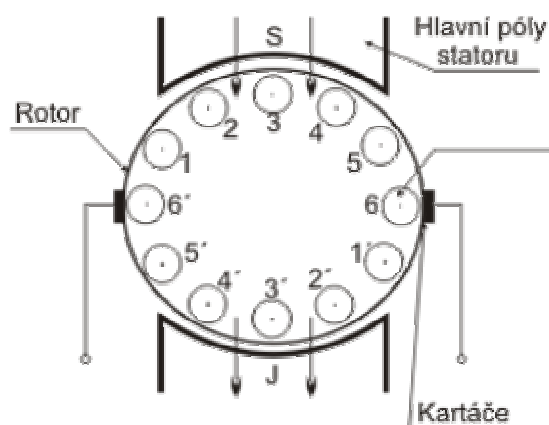
Stejnoseměrné stroje patří k nejstarším využívaným zdrojům elektrické energie, které pracují na principu přeměny elektrické energie na mechanickou. V současnosti se stejnosměrné stroje používají jako motory v elektrické trakci nebo v regulačních pohonech. V porovnání s asynchronními stroji jsou stejnosměrné stroje konstrukčně složitější, mají vysoké náklady na samotnou výrobu stroje a nákladnější údržbu.

Tato bakalářská práce je rozdělena na dvě hlavní části. První část je teoretická a je rozdělena do tří kapitol. V první kapitole se pojednává o uspořádání stejnosměrného stroje, principu a základních matematických vzorcích, o tom, jak se vytváří indukované napětí a okrajově o komutaci SS stroje. Ve druhé kapitole je rozdělení SS strojů, rozlišujeme je svou funkcí na motory a dynama. Třetí kapitola je zaměřena především na SS stroje s permanentními magnety, které byly pro měření použity. Jsou zde uvedeny materiály a vlastnosti pro permanentní magnety a také konstrukce strojů s PM. Druhá, praktická část se zabývá vlastním měřením statických charakteristik. Jejím obsahem je zapojení strojů, princip komunikace přes PC, výpočty a výsledné charakteristiky.

## 2 Stejnosměrné stroje

### 2.1 Uspořádání stejnosměrného stroje

Stejnosměrné motory se v praxi využívají pro velmi dobré regulační vlastnosti. Výkon stejnosměrných strojů se může pohybovat od několika W až několik tisíc kW. Motor je složen z nepohyblivé části stroje – statoru, na kterém jsou umístěny hlavní póly s budícím vinutím a pomocné póly, které zlepšují komutační vlastnosti stroje. Při zatížení stroje vzniká magnetické pole budícího vinutí, ale i pole kotvy, které vytváří soustava vodičů kotvy, kterým prochází proud. Toto pole se nazývá reakce kotvy. Z toho důvodu se pro potlačení reakce kotvy využívá kompenzační vinutí, které je vloženo mezi hlavní póly skládající se z pólového jádra a pólového nástavce.



Obr. 1: Uspořádání stejnosměrného stroje.

Rotor, nazývaný kotva, je pohyblivá část stroje složená z křemíkových izolovaných plechů s drážkami pro uložení rotorového vinutí. Cívky vinutí jsou společně připojené se vzájemně izolovaným lamelám komutátoru k hřídeli stroje. Na komutátor se osazují kartáče připevněné v držácích, jimiž se přivádí proud do vinutí kotvy a společně s kartáči tvoří sběrné ústrojí stroje. Grafitové kartáče se umísťují mezi po sobě následující hlavní póly a jejich počet je sudý jako u pólů. Komutátor plní funkci jako mechanický střídač u motorů a zajišťuje, aby úhel mezi magnetickým polem statoru a rotorem byl  $\beta = \pi / 2$ . Z toho vyplývá, že komutátor zabezpečuje přivedení správně orientovaného proudu do cívek vinutí kotvy. Při natočení kartáčů proti kotvě, bude zajištěna lepší komutace. Materiál, nastavení a zabroušení kartáčů významně ovlivní průběh komutace.

## 2.2 Princip stejnosměrného stroje

Principem stejnosměrného stroje je spojení dvou vodičů do jednoho závitu, který je umístěn na rotoru (*Obr. 2*). Svazek dvou vodičů tvoří vinutí kotvy a otáčí se v magnetickém poli, které bylo vytvořeno pomocí dvojice hlavních pólů. Vytvoření magnetické pole u stejnosměrného motoru je stejné jako u ostatních motorů - vliv silového působení magnetického pole na vodiče protékáným proudem a vytvoření indukovaného napětí do pohybujících se vodičů.

Stator má po obvodě pravidelně a střídavě umístěny navzájem magneticky opačně orientované vyniklé hlavní póly, pomocné a komutační póly, které napomáhají samotné komutaci rotorového vinutí.

Pro potlačení reakčního pole, které vzniká při protékáním proudu vinutím kotvy, se využívá kompenzační vinutí. Reakční magnetické pole je nežádoucí, protože zeslabuje a deformuje požadované magnetické pole.

Aby se stroj začal chovat jako motor, je třeba připojit ke kartáčům zdroj stejnosměrného napětí. Velikost působící síly v magnetickém poli je dána vztahem

$$F = B \cdot I_a \cdot l \quad (1)$$

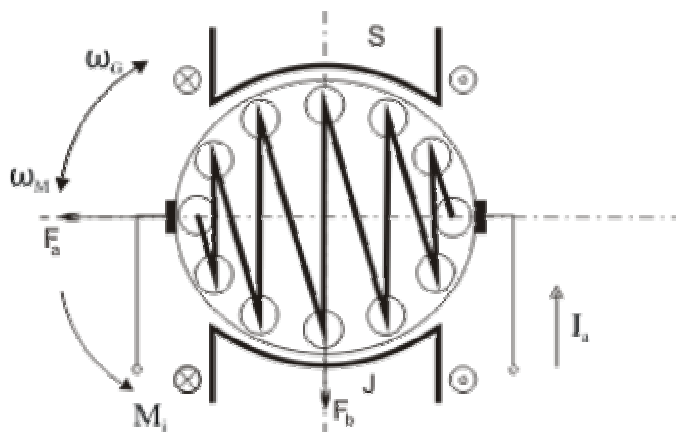
kde  $F$  je působící síla v magnetickém poli

$B$  – magnetická indukce

$I_a$  – proud protékající vodičem

$l$  – délka vodiče

Síly, které působí na vodiče, vytvářejí točivý moment a dochází k roztočení kotvy. Za jednu polovinu otáčky si vodiče vymění místa. Vliv komutátoru způsobí změnu směru proudu v obou vodičích a tím i dojde ke změně orientaci síly, která působí na vodič.



Obr. 2: Orientace polí statoru a rotoru

Podle vztahu (2) určíme vznikající maximální točivý moment souhlasného smyslu, který vzniká v magnetickém poli hlavních pólů.

$$M_i = k |F_a \times F_b| = k F_a F_b \sin\beta = k F_a F_b \quad (2)$$

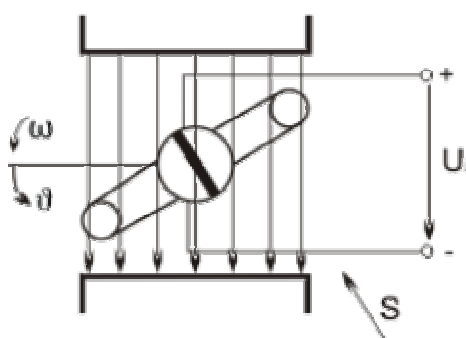
kde  $M_i$  je maximální točivý moment

$F_a$  – magnetické napětí kotvy

$F_b$  – magnetické napětí budícího vinutí

### 2.3 Indukované napětí stejnosměrného stroje

Na obrázku (Obr. 3) je znázorněn vznik indukovaného napětí stejnosměrného motoru na rotující smyčce v magnetickém poli.



Obr. 3: Smyčka v rotujícím magnetickém poli.



Pro tok, který prochází cívkou při homogenním magnetickém poli a při kladném směru toku, lze matematicky vyjádřit

$$\Phi_c = - \Phi_m \cos\vartheta, \text{ kde } \vartheta = \omega t \quad (3)$$

a dále

$$\Phi_m = D \cdot l \cdot B \quad (4)$$

z toho určíme vztah pro indukované napětí ve smyčce

$$u_i = \frac{d\Phi_c}{dt} = d \Phi_m \sin\vartheta \quad (5)$$

kde  $\Phi_c$  je celkový magnetický tok

$\Phi_m$  – maximální magnetický tok

$\vartheta$  – úhel natočení cívky

D – elektrická indukce

B – magnetická indukce

$u_i$  – indukované napětí

Vznik točivého momentu, který sleduje průběh indukovaného napětí, lze popsat jako výsledek působení dvou sil  $\mathbf{F}$ , kde velikost bude maximální v úhlech  $\vartheta = k \frac{\pi}{2}$  ( $k = 1, 3, 5, \dots$ ) a nulová pro  $\vartheta = k\pi$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ).

$$M_i(\vartheta) \approx u_i(\vartheta) \text{ pro } l = \text{konst.} \quad (6)$$

## 2.4 Komutace u stejnosměrného stroje

Komutace je proces, při kterém dochází za pomoci kartáčů ke změně směru proudu v cívce vinutí kotvy a níž by se měnila polarita cívek. Princip komutace spočívá v protékání proudu, kdy je cívka zapojená mezi dvě lamely a na první z lamel leží kartáč, který je zapojen s cívkou nakrátko.

Po skončení komutace leží kartáč na druhé lamele a cívkou začne protékat stejný proud jako na počátku komutace. Během komutace se do komutující cívky indukuje napětí, které vzniklo pohybem cívky v magnetickém poli a napětí reaktanční indukované časovou změnou proudu v komutující cívce. Pokud při zatížení stroje vlivem reakce kotvy se bude

měnit poloha tzv. magnetické normály, bude se komutující cívka nacházet v magnetickém poli s nenulovou indukcí, a tím se začne do cívky indukovat napětí. Před ukončením komutace dochází k samotnému zpoždění komutace vlivem indukčnosti cívky. Do cívky se bude indukovat reaktanční napětí, které zapříčiní vznik elektrického oblouku mezi kartáčem a odbíhající lamelou, ohřívání kartáčů, a tím se snižuje životnost sběracího ústrojí. Pro delší životnost a zlepšení komutace se využijí pomocné póly umístěné na statoru mezi póly hlavními.

### 3 Rozdělení stejnosměrných strojů

Stejnospměrné stroje mohou pracovat jako generátory (dynama) nebo jako motory, pro které platí vztahy (7)

$$U_i = k \Phi \omega$$

$$M = k \Phi I$$

$$U = U_i \pm R_a I \pm \Delta U_k$$

$$\Phi = \Phi(I_b) \tag{7}$$

z těchto vztahů plyne otáčivá rychlost motoru (8)

$$\omega = \frac{U_i}{k \Phi} = \frac{U - R_a I}{k \Phi}$$

$$M = k \Phi I \tag{8}$$

kde  $\omega$  je úhlová/otáčivá rychlost motoru

$U$  – napětí

$R_a$  – celkový činný odpor vinutí kotvy

$\Delta U_k$  – úbytek napětí kartáč – lamela

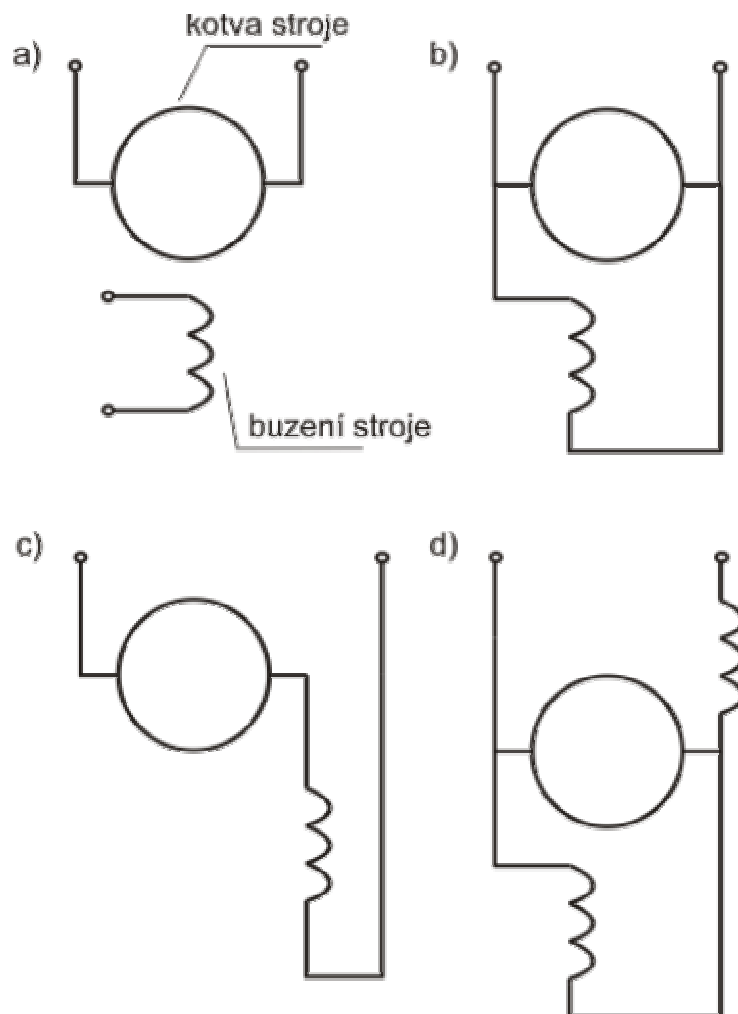
$I_b$  – budící proud

Stejnospměrné stroje nerozdělujeme podle pracovního chodu generátor/motor, ale podle způsobu napájení budícího vinutí hlavních pólů. Konstrukce generátorů a motorů je stejná, ale u motoru se ke kartáčům připojí zdroj stejnosměrného napětí. Dělení stejnosměrných strojů podle druhu buzení:

- a) stroje s cizím buzením – napájení se provádí dvojitým způsobem, a to buď z nezávislého stejnosměrného zdroje, nebo má místo hlavních pólů s vinutím permanentní magnety.

- b) stroj s derivačním buzením – paralelní zapojení budícího vinutí hlavních pólů ke kotvě.
- c) stroj se sériovým buzením – sériové zapojení budícího vinutí hlavních pólů s kotvou.
- d) stroj s kompaundním buzením – provedení smíšeného buzení, kdy na hlavních pólech je zapojeno vinutí sériové a derivační.

K posouzení charakteristických vlastností generátoru slouží zejména závislost svorkového napětí na zatěžovacím proudu generátoru při konstantním buzení a rychlosti. U motorů především mechanické charakteristiky, kdy se sleduje závislost úhlové rychlosti na momentu motoru při proměnných regulačních parametrech. Stroje mohou mít různá zapojení (Obr. 4).



Obr. 4: Stejnoseměrné stroje: a) s cizím buzením, b) s derivačním buzením, c) se sériovým buzením, d) s kompaundním buzením

### 3.1 Stejnoseměrné generátory

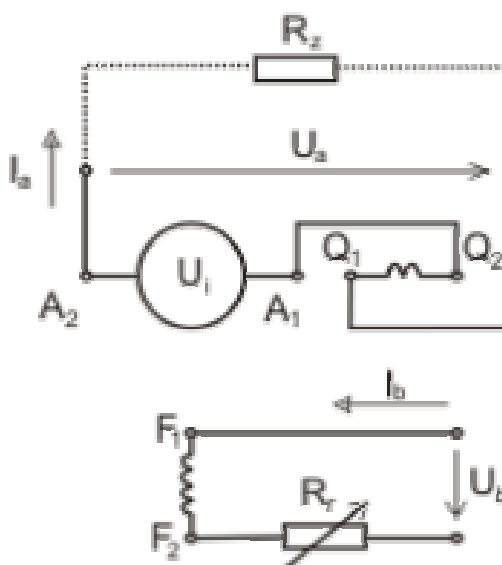
- a) Generátor s cizím buzením - Zapojení je popsáno u stroje s cizím buzením. Budící proud  $I_b$  není závislý na svorkovém napětí generátoru  $U_a$ , který se reguluje pomocí rezistoru  $R_r$ . Budící vinutí na svorkách  $F_1$  a  $F_2$ , kotva na  $A_1$  a  $A_2$  a vinutí pomocných pólů je znázorněné pomocí svorek  $Q_1$  a  $Q_2$ . Svorkové napětí zatíženého generátoru při konstantním budícím proudu a konstantních otáčkách je dáno vztahem:

$$U_a = U_i - R_a I_a = U_i - \Delta U_a \quad (9)$$

kde  $U_a$  je svorkové napětí generátoru

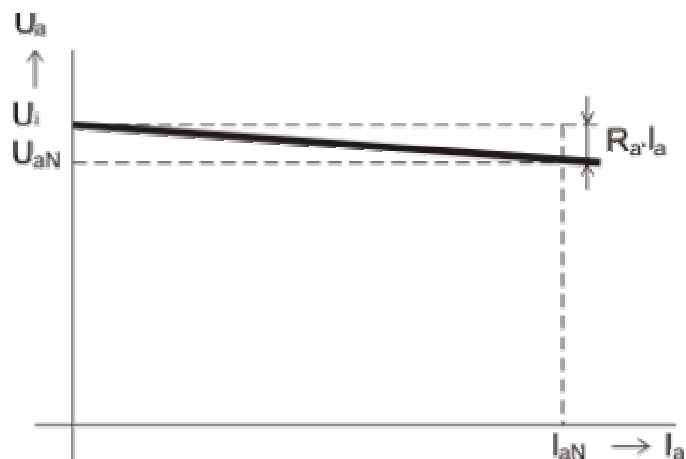
$I_a$  – proud kotvy

$\Delta U_a$  – celkový úbytek napětí obvodu kotvy



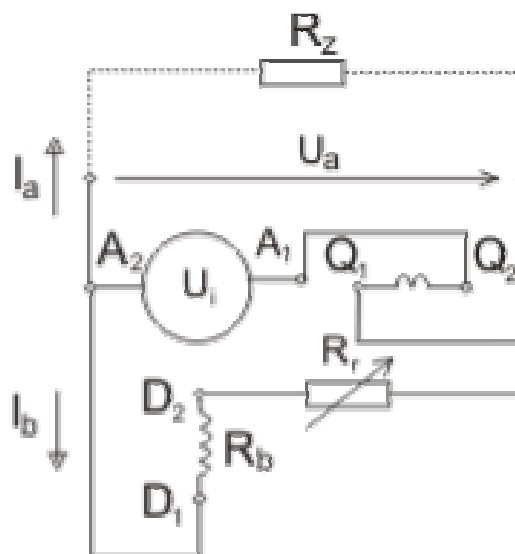
Obr. 5: Schéma zapojení stejnosměrného generátoru s cizím buzením

Protože stejnosměrný generátor s cizím buzením je tvrdý zdroj napětí, tak při zatížení generátoru klesá svorkové napětí minimálně. Při zkratování na svorkách generátoru dosahuje proud kotvy vysokých hodnot – vnější charakteristika (Obr. 6). Jelikož je tento stav pro motor nežádoucí, musí se polarita svorkového napětí měnit pomocí změny směru budícího proudu.



Obr. 6: Vnější charakteristika stejnosměrného generátoru s cizím buzením

- b) Generátor s derivačním buzením – Budící vinutí připojeno paralelně ke kotvě. K dosažení remanentního magnetizmu, který je důležitý pro funkci generátoru, se využívá budící vinutí z plechů feromagnetického materiálu.



Obr. 7: Schéma zapojení stejnosměrného generátoru s derivačním buzením

Remanentní magnetické pole se definuje remanentním magnetickým tokem a remanentní magnetickou indukcí. Při otáčení kotvy dojde k indukování malého remanentního napětí do vinutí kotvy a jeho působením protéká budícím vinutím proud. Zvýší se magnetický tok budících pólů a v přímé závislosti se naroste hodnota indukovaného a svorkového napětí. Napětí na svorkách generátoru se ustálí po dosažení hodnoty podle vztahu:

$$U_a = I_b \cdot (R_b + R_r)$$

$$I = I_a - I_b$$

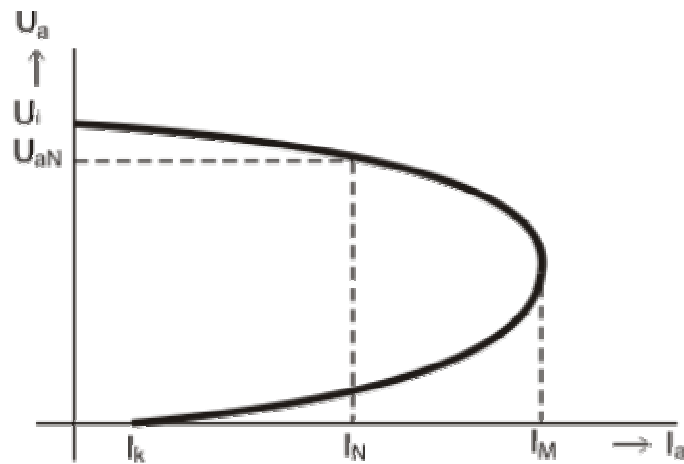
(10)

kde  $R_b$  je odpor budícího vinutí

$R_r$  – remanentní odpor

$U_{aN}$  – jmenovité napětí kotvy

$I_{aN}$  – jmenovitý proud kotvy



Obr. 8: Vnější charakteristika stejnosměrného generátoru s derivačním buzením

### 3.2 Stejnoseměrné motory

- a) Motor s cizím buzením – budící vinutí se provádí buzením vinutí hlavních pólů z nezávislého stejnosměrného zdroje. Řízení napětí kotvy  $U_a$  je nezávislé na budícím proudem  $I_b$ . Změnu smyslu otáčení (chodu) je možné provést změnou polaritý budícího proudu nebo změnou polaritý napětí. Výhodou je jednoduché řízení otáček změnou svorkového napětí, velký točivý moment při nízké rychlosti, snadná změna smyslu otáčení rotoru nebo velký rozsah.

Svorkové napětí zatíženého motoru je při  $I_b = \text{konst.}$  dáno vztahem:

$$U_a = U_i + R_a \cdot I_a = U_i + \Delta U_a \quad (9)$$

- b) Motor se sériovým buzením – budící vinutí motoru je zapojeno do série s obvodem kotvy. Buzení motoru je nezávislé na zatížení motoru, protože magnetický tok je dán funkcí proudu kotvy, který je totožný s budícím proudem a jeho velikost je závislá na zatížení stroje.

$$I_a = I_b \rightarrow \Phi = f(I_a) \quad (10)$$

a tedy

$$\Phi_b = k_b I_b = k_b I \quad (11)$$

kde  $k_b$  je konstanta budícího vinutí za předpokladu linearitu mag. obvodu

- c) Motor s derivačním buzením – budící vinutí je zapojeno paralelně k vinutí rotoru (ke kotvě). Protože proud statoru lze samostatně regulovat, využívá se tento typ motoru u strojů, kde jsou požadovány relativně neměnné otáčky.
- d) Motor s kompaundním buzením – k hlavním pólům je připojeno derivační a sériové budící vinutí. Má větší záběrový moment než derivační motor a rychlost se méně zmenšuje se zatížením než u sériového motoru. Používá se pro pohony s těžkým provozem.

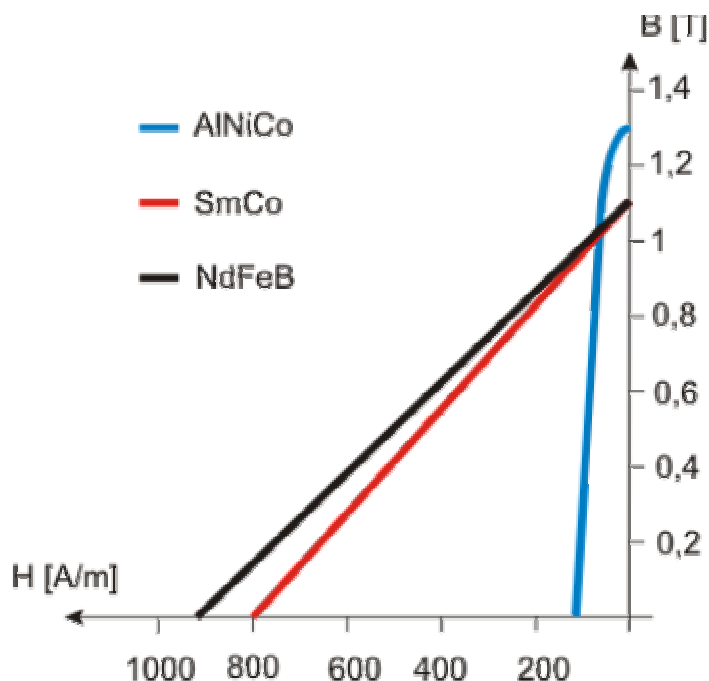
## 4 Stroje s permanentními magnety

### 4.1 Materiály pro permanentní magnety

Nejstaršími materiály pro permanentní magnety (dále PM) byly uhlíkatá ocel, slitiny AlNiCo, AlNi a další. Lepší vlastnosti pro výrobu magnetů měly materiály, které jsou používané dodnes, vyráběné technikou práškové metalurgie. Nejlepší možnosti využití PM bylo možné po vývoji magnetických materiálů na bázi vzácných zemin jako např. SmCo a NdFeB, které mají obtížnou obrobiteľnosť jako keramiky a približnou měrnou hmotnosť jakou měď.

Nežádoucí závislost teplotních vlastností materiálu NdFeB, který je i málo odolný vůči korozi, má vliv na jeho volbu při výběru materiálu pro DM. Jeho užití je omezené do 100°C. Cena se pohybuje dnes okolo 5 000 Kč/kg, přičemž před 10 lety 10 000 Kč/kg.

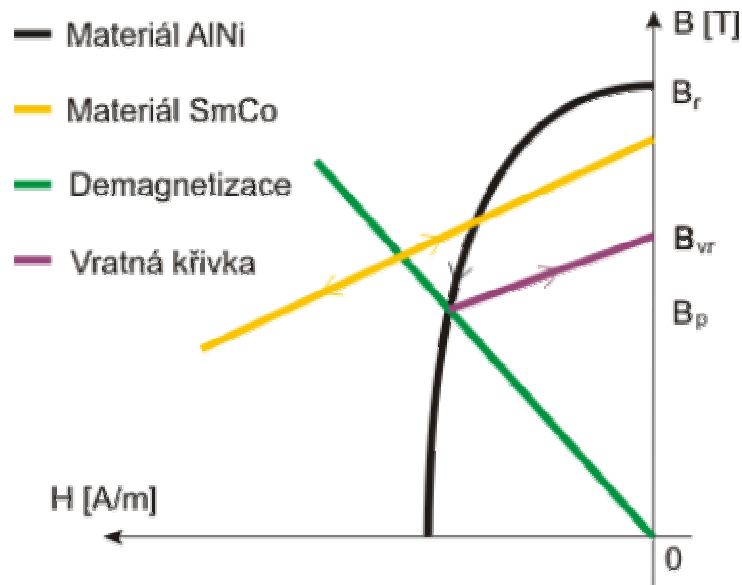
Zbytková remanence  $B = (0,6 \div 1,2)$  T se neliší příliš od starších materiálů, ale podstatná je vysoká odolnost proti demagnetizaci (velikost  $H_c$ ). Odolnost proti demagnetizaci se pohybuje v rozmezí  $(800 \div 1\,800)$  kA/m. Nejlepších ferity dosahují  $H_c \leq 250$  kA/m, AlNiCo pouze 35 kA/m. Ukazatel kvality materiálu vzácných zemin pro aplikaci je posuzováno podle součinu  $B_c \cdot H_c = 2000$ . Na (Obr. 9) jsou zakresleny charakteristiky jednotlivých materiálů v závislosti B-H.



Obr. 9: B-H charakteristiky PM

Další rozhodující faktor pro volbu těchto materiálů je jejich schopnost vrátit se do původního stavu po demagnetizaci (Obr. 10) nepřekračující relativní permeabilitu vakua, a tím nejsou vodivá pro cizí magnetická pole. Třetí rozhodující vlastností je splnění relativní permeability v rozmezí  $\mu_r = 1,2 \div 1,6$ . Materiály vzácných zemin jsou drahé a vhodnější z ekonomického hlediska pro PM jsou především ferity, případně pro méně náročné použití materiály typu AlNi.





Obr. 10: Porovnání typu materiálu při vratné permeabilitě  
(kde  $B_r$  je remanentní indukce,  $B_{vr}$  – vratná indukce)

## 4.2 Konstrukce strojů s permanentními magnety

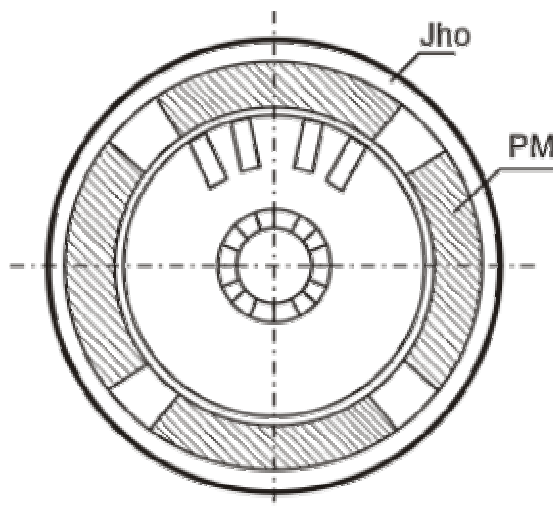
Stroje s permanentními magnety potřebují pro svůj chod magnetické pole nezávislé na proudu kotvy, a aby se zamezilo vzniku Joulových ztrát v budícím vinutí, je vhodnější řešení nahradit vinutí permanentními magnety. Podíl budících ztrát výkonu stroje  $\Delta P_b/P$  roste s klesajícím výkonem, proto je využití stroje s PM, které nepotřebují prostor pro chladicí médium a prostor pro umístění budící cívky. Rozměry kotvy samotného stroje jsou rozhodující pro velikost točivého momentu, který se určí součinem průměru  $D$ , délkou  $l$  a činitelem  $c_E$ , který respektuje vliv elektrického a magnetického využití.

$$M = c_E D^2 l \quad (12)$$

kde  $c_E$  je činitel respektující vliv elektrického a magnetického

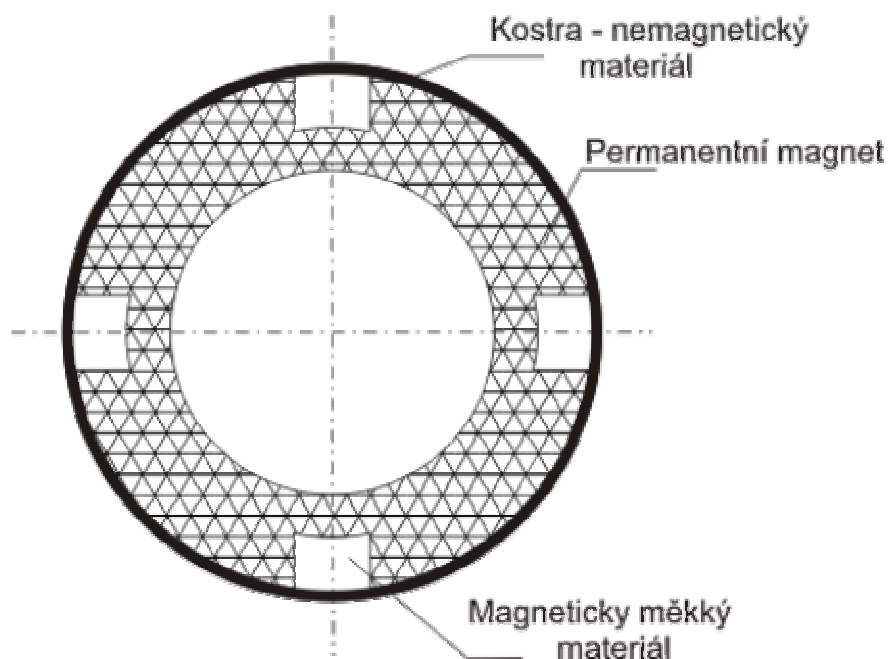
$D$  – průměr kotvy

$l$  – délka kotvy



Obr. 11: Klasické uspořádání stroje s PM

Využití PM je ekonomické řádově do několika kW a u velkých stejnosměrných strojů, které požadují odbuzení, se tento typ motoru nevyužívá. Na (Obr. 11) je znázorněna klasická konstrukce stejnosměrného stroje s PM a na (Obr. 12) uspořádání se segmentovými magnety, kde je výhodou poloviční průřez magnetů, a tím i menší vnější průměr stroje. Další možnou volbou pro sestavení stroje je axiální řešení konstrukce. Vinutí kotvy je provedeno metodou tištěných spojů. Výhodou axiálního uspořádání spočívá dosažením malých momentů setrvačnosti. Komutátor se nahradí elektronickým, PM se umístí na rotor a vinuté buzení kotvy bude na statoru.

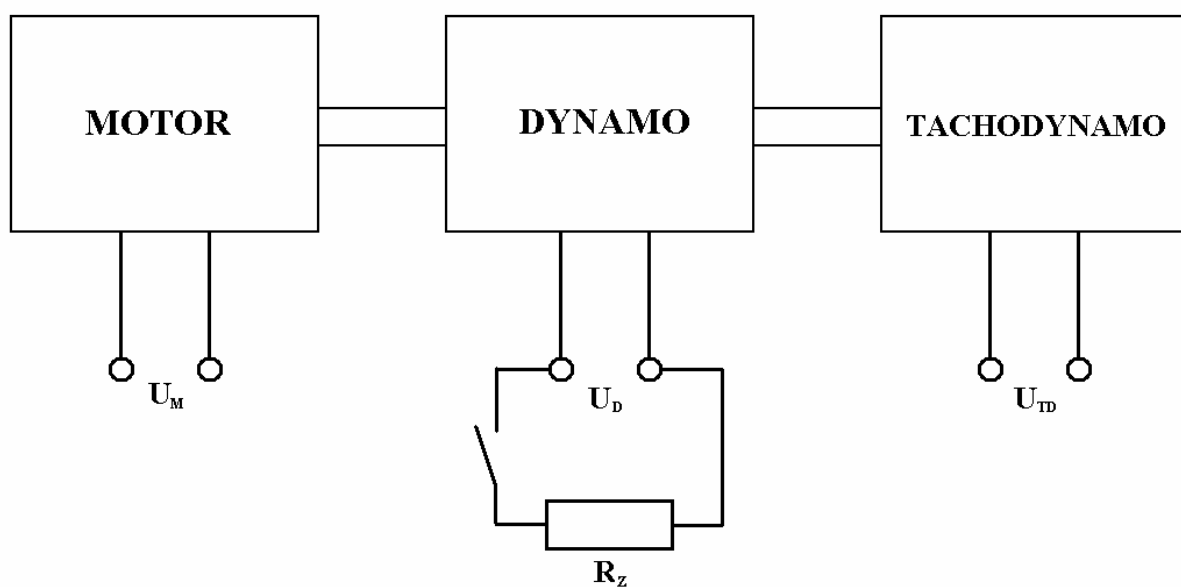


Obr. 12: Segmentové uspořádání statoru

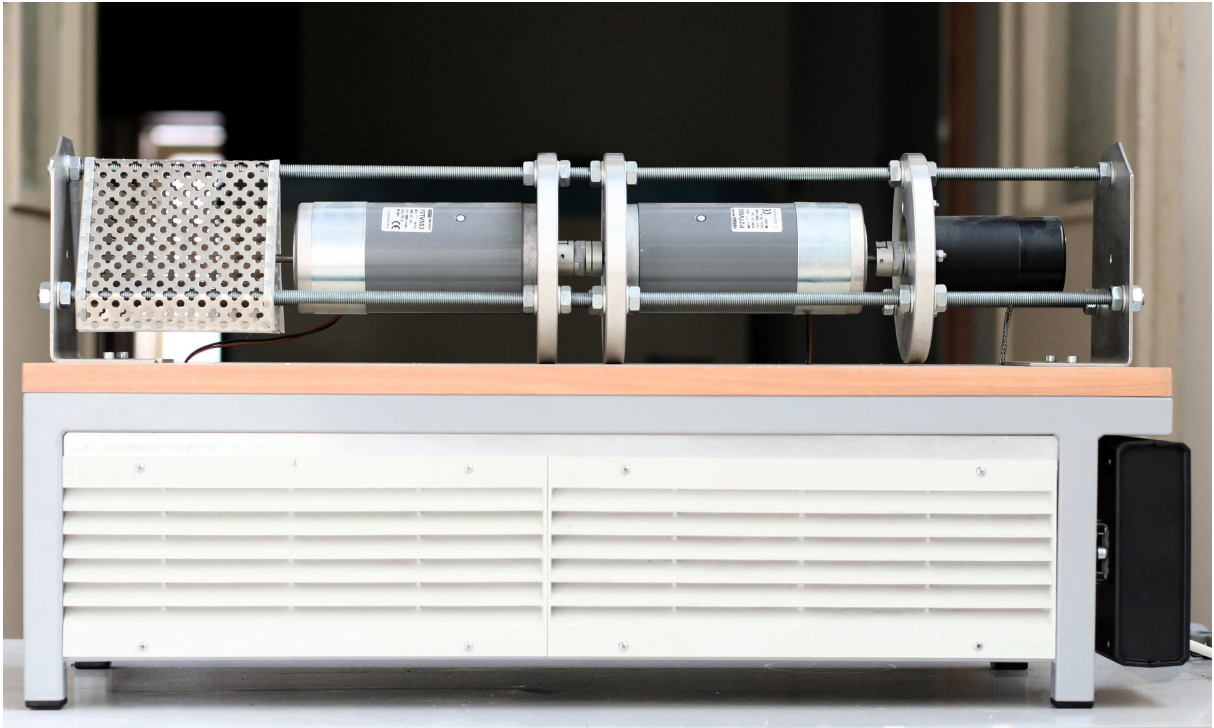
## 5 Laboratorní měření

### 5.1 Popis zařízení

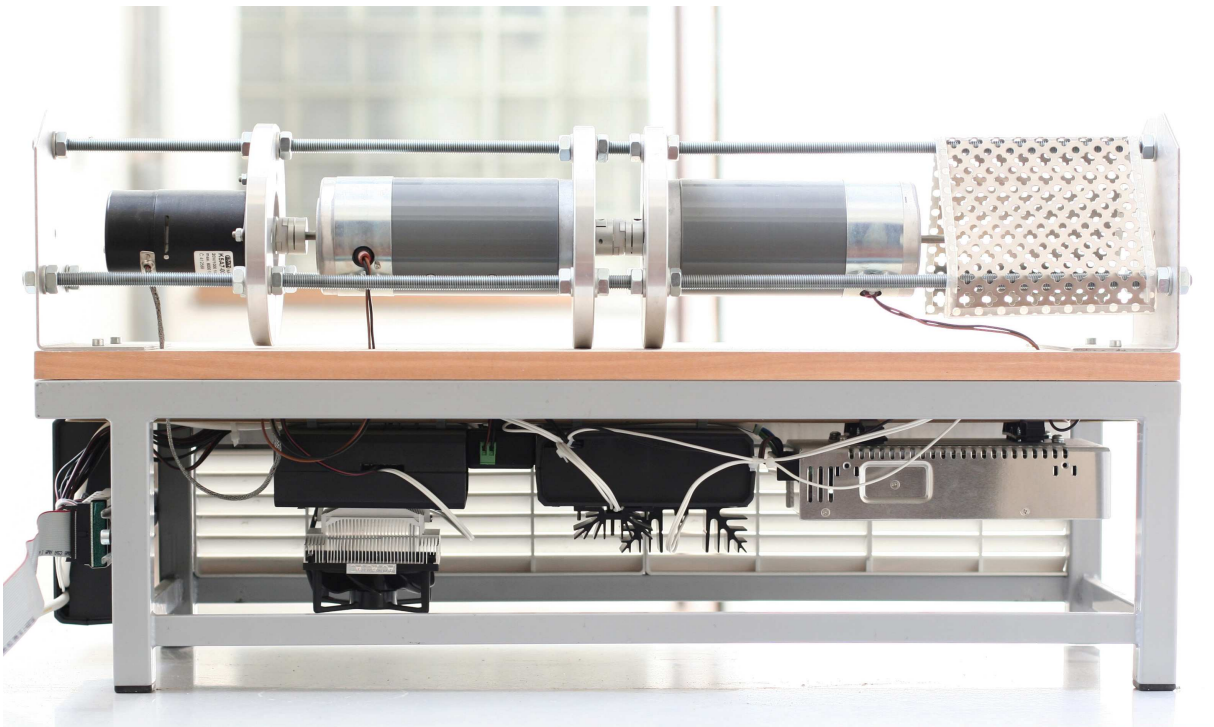
Jak je z (Obr. 13) vidět, soustava je tvořena motorem, který je spjat pevnou spojkou s dynamem, a dále s tachodynamem. Motor je napájen z elektronického zdroje napětím  $U_M$ , jehož velikost lze měnit vnějším napěťovým signálem 0-10V. Jako generátor je použit SS stroj o stejných štítkových hodnotách, jako motor. K němu je připojena regulovatelná elektronická zátěž  $R_Z$ , kterou jsem při měření využil na 0%, 50% a 100%. Jako poslední v řadě je tachodynamo, které se využívá pro měření otáček. Na (Obr. 14) a (Obr. 15) jsou zobrazeny fotografie celého zařízení.



Obr. 13: Blokové schéma soustrojí



*Obr. 14: Fotografie celého zařízení – pohled ze předu*



*Obr. 15: Fotografie celého zařízení – pohled ze zadu*

## 5.2 Popis komunikace mezi zařízením a PC

Zařízení je propojeno přes měřicí jednotku CTRL V3 do sériového portu počítače COM1. Jednotka CTRL V3 (*Obr. 16*) má přednastavené funkce pro MATLAB 6. Tyto funkce zajišťují ovládání výstupů, načítání vstupů a operace s pamětí. Níže je uvedena knihovna funkcí, která je převzata z literatury [6]:

### *function s = open\_port(com)*

Vytvoří serial port objekt **s**, nastaví jeho parametry a spojí se zařízením **COM** - jméno sériového portu (např. 'COM1', 'COM2', ...).

### *function y = get\_y(s, typ, index)*

Přečte vstup CTRL. **y** je hodnota přečteného analogového vstupu (napětí 0-10 V) nebo digitálního vstupu (0 - na vstupu je 0, 1 - na vstupu byl jeden nebo více impulsů 0-1-0 od posledního čtení, 2 - na vstupu byl jeden nebo více impulsů 1-0-1 od posledního čtení, 3 - na vstupu je 1). Parametr **typ** určuje, zda se jedná o analogový nebo digitální vstup ('a', 'd'). **Index** je číslo vstupu (u analogových 0-3, u digitálních 0-3).

### *function set\_u(s, typ, index, hodnota)*

Nastaví výstup CTRL. Parametr **typ** určuje, zda se jedná o analogový nebo digitální výstup ('a', 'd'). **Index** je číslo výstupu (u analogových 0-1, u digitálních 0-3). **Hodnota** je hodnota analogového výstupu (napětí 0-10 V) nebo hodnota digitálního výstupu (0, 1).

### *function set\_t(s, perioda)*

Nastaví periodu automatického vysílání obrazu vstupů a výstupů na hodnotu **perioda** v sekundách. Hodnota periody 0 vypíná automatické vysílání.

### *function [ya, yd, ua, ud]=get\_msg(s)*

Počká na zprávu od CTRL a vrátí obraz vstupů a výstupů. **ya** je vektor hodnot analogových vstupů, **yd** je vektor hodnot digitálních vstupů, **ua** je vektor hodnot analogových výstupů, **ud** je vektor hodnot digitálních výstupů.

### *function close\_port(s)*

Odpojí serial port objekt **s** od zařízení a odstraní jej z paměti.

Ovládání zařízení je popsáno následujícím programem:

```
% priprava vektoru t, u, y (po 20 vterinach)
t=[1:20:400]';
u=[0.5:0.5:10]' ; %vektor napeti po 0,5 V

% vytvor serial port objekt a spoj se zarizenim
s=open_port('COM2');

% v casech t mer napeti
fprintf(1,'%s\n','cas(s) u1(V) y1(V) u2(V) y2(V)')
tic
for i=1:length(t)
    % pockej na cas t(i)
    while toc<t(i),pause(0.01), end
    % nastav napeti
    set_u(s,'a',0,u(i));
    %nastav zátěž 100% 0,1; 50% 1,0; 0% 0,0:
    set_u(s,'d',1,0); set_u(s,'d',2,0);
    % mer otacky
    y(i)=get_y(s,'a',0); y1(i)=get_y(s,'a',1);
end

%zastav motor
set_u(s,'a',0,0);
% opdoj serial port objekt od zarizeni a odstran z pameti
close_port(s)

%jednoduche vykresleni:
plot(u',y)
```

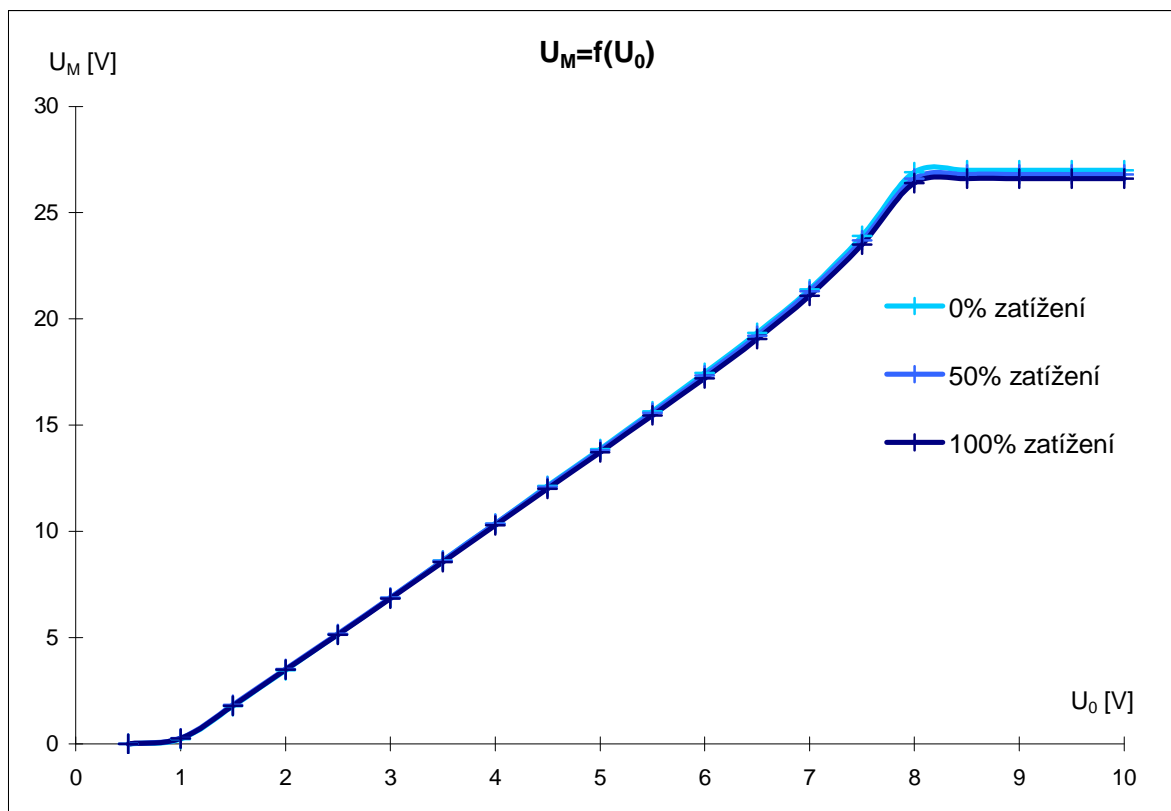


Obr. 16: Měřicí jednotka CTRL V3

### 5.3 Naměřené hodnoty

Měření probíhalo ve třech hlavních fázích. S nulovým zatížením, s 50% zátěží a nakonec se 100% zátěží. U každého měření bylo vysíláno napětí z MATLABu v rozsahu 0-10 V, po 0,5 V. Toto napětí je po zesílení na svorkách motoru ve skutečnosti vyšší a jeho velikost byla měřena voltmetrem. Závislost napětí na svorkách motoru  $U_M$  a napětí z počítače  $U_0$  je určena křivkou dle *Grafu 1*. Tato napětí se při zatížení prakticky nemění.

Graf 1 : charakteristika  $U_M = f(U_0)$



Mezi každou změnou ovládacího napětí byla prodleva 20 s, aby došlo k ustálení otáček. Pro zhotovení charakteristik bylo současně měřeno napětí na svorkách dynama  $U_D$  a tachodynamu  $U_{TD}$ . Otáčky byly získány buď z katalogového údaje v tachodynamu, kde 1000 otáčkám za minutu odpovídá napětí 20 V, to nazýváme převodní konstantou dynama  $k_{TD}$ . Otáčky tedy spočítáme dle vztahu (13),

$$n = U_{TD} \cdot k_{TD} \cdot 1000^{-1} \quad (13)$$

kde  $n$  – otáčky

$U_{TD}$  – napětí na svorkách tachodynamu

$k_{TD} = 20$  – převodní konstanta tachodynamu

nebo s využitím napětí snímaného do počítače a vynásobením konstanty  $k_0$  podle vztahu udávaného v návodu k přístroji (14).



$$k_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot k_{TD} \cdot 1000^{-1} \quad (14)$$

kde  $k_0$  – konstanta pro výpočet otáček z hodnoty napětí na tachodynamu

$R_1 = 656,3 \Omega$  – odpor děliče na vstupu karty

$R_2 = 114,7 \Omega$  – odpor děliče na vstupu karty

$k_{TD} = 20$  – převodní konstanta tachodynamu

Otáčky  $n_0$  (15) potom vypočteme jednoduše :

$$n_0 = (y') \cdot k_0 \quad (15)$$

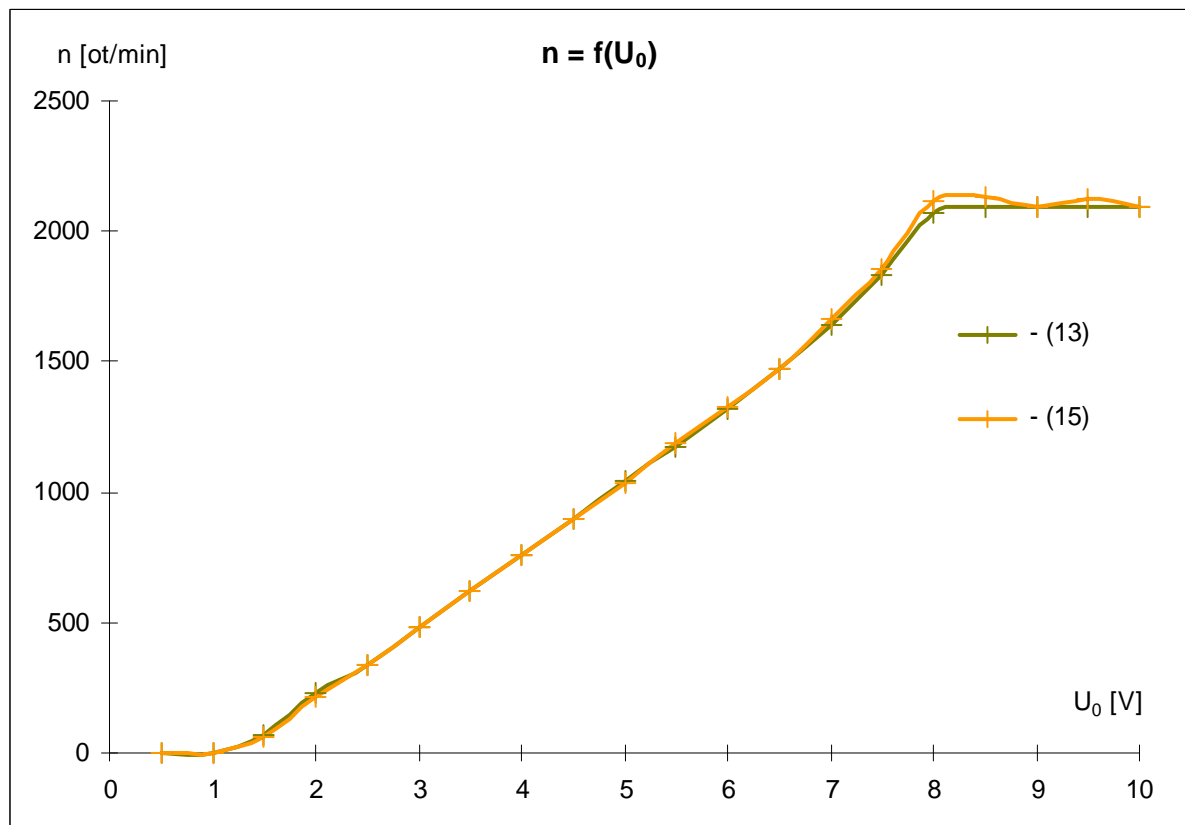
kde  $n_0$  – otáčky

$(y')$  – získaná hodnota napětí tachodynamu z MATLABu

$k_0$  – konstanta pro výpočet otáček z hodnoty napětí na tachodynamu

Otáčky vypočtené oběma způsoby se příliš neliší. Jejich srovnání je patrné z tabulek (Tab. 1-3) a z grafu *Grafu 2*. Hodnoty do *Grafu 2* byly použity z měření se 100% zátěží.

*Graf 2: Porovnání otáček vypočtených z rovnice (13) a (15)*



Tab. 1 : Naměřené hodnoty s 0% zatížením

vyslané napětí z pocitace $U_0$ [V]	získané hodnoty z matlabu [V]		vypočítané otáčky $n_0$ [ot/min]	naměřené hodnoty [V]			vypočítané otáčky $n$ [ot/min]
	napětí na zatezi ( $y1'$ )	tachodynamo ( $y'$ )		motor $U_M$	dynamo $U_D$	tachodynamo $U_{TD}$	
0,5	0,01	0,01	3,36	0	0	0	0
1	0,01	0,01	3,36	0,23	0	0	0
1,5	0,01	0,13	43,69	1,78	0,62	1,2	60
2	0,01	0,61	205,02	3,47	2,3	4,34	217
2,5	0,01	1,08	362,98	5,15	3,86	7,47	373,5
3	0,01	1,56	524,31	6,88	5,55	10,72	536
3,5	0,01	2,07	695,71	8,63	7,26	13,97	698,5
4	0,01	2,54	853,68	10,38	8,96	17,25	862,5
4,5	0,01	3,05	1025,09	12,15	10,7	20,5	1025
5	0,01	3,54	1189,77	13,88	12,41	23,7	1185
5,5	0,01	4,06	1364,54	15,66	14,16	27	1350
6	0,01	4,51	1515,78	17,46	15,92	30,4	1520
6,5	0,01	5,03	1690,55	19,34	17,8	33,8	1690
7	0,01	5,69	1912,38	21,4	19,9	37,7	1885
7,5	0,01	6,37	2140,92	23,9	22,3	42,2	2110
8	0,01	7,21	2423,24	26,9	25,1	47,5	2375
8,5	0,01	7,29	2450,13	27	25,4	48	2400
9	0,01	7,29	2450,13	27	25,4	48	2400
9,5	0,01	7,26	2440,04	27	25,4	48	2400
10	0,01	7,31	2456,85	27	25,4	48	2400

Tab. 2 : Naměřené hodnoty s 50% zatížením

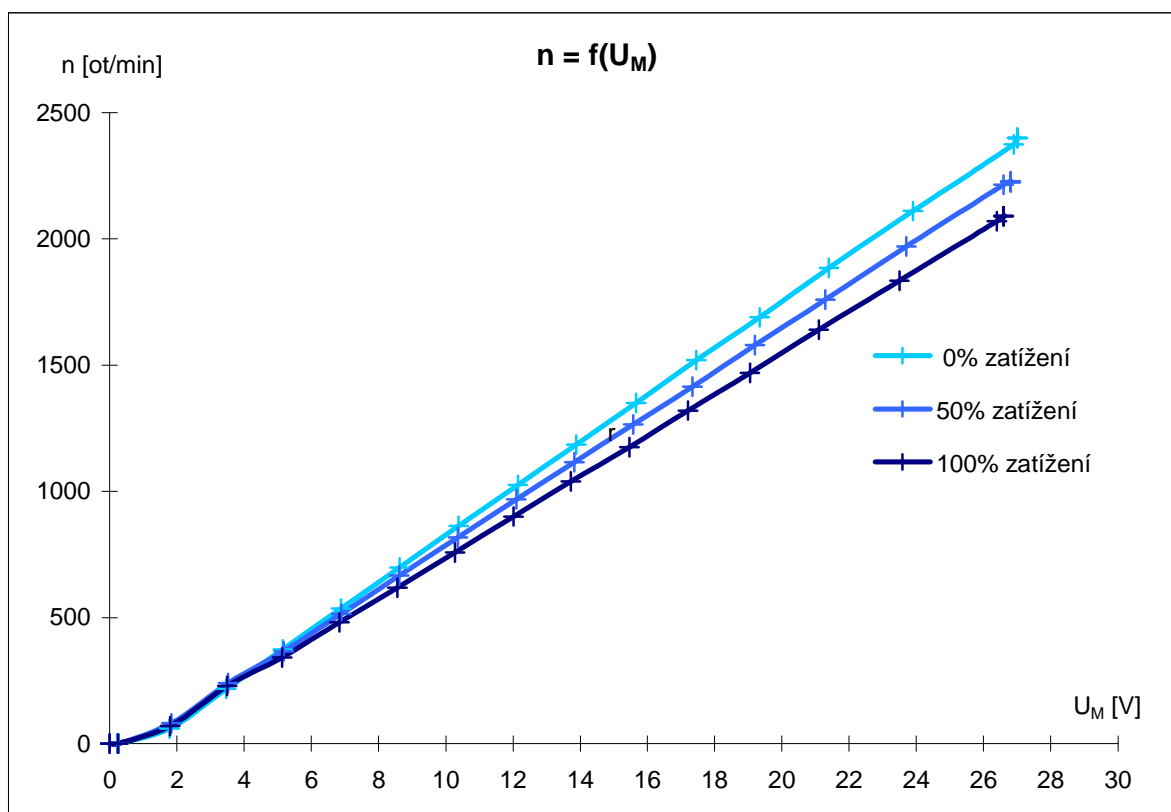
vyslané napětí z matlabu $U_0$ [V]	získané hodnoty z matlabu [V]		vypočítané otáčky $n_0$ [ot/min]	naměřené hodnoty [V]			vypočítané otáčky $n$ [ot/min]
	zatížení ( $y1'$ )	tachodynamo ( $y'$ )		motor $U_M$	dynamo $U_D$	tachodynamo $U_{TD}$	
0,5	0,01	0,01	3,36	0	0	0	0
1	0,01	0,01	3,36	0,27	0	0	0
1,5	0,01	0,2	67,22	1,84	0,89	1,63	81,5
2	0,01	0,68	228,54	3,53	2,55	4,8	240
2,5	0,36	1,08	362,98	5,18	3,33	7,32	366
3	0,5	1,53	514,22	6,89	4,64	10,3	515
3,5	0,63	1,97	662,11	8,62	5,98	13,32	666
4	0,76	2,43	816,71	10,36	7,34	16,34	817
4,5	0,91	2,92	981,39	12,1	8,75	19,37	968,5
5	1,04	3,33	1119,19	13,82	10,12	22,3	1115
5,5	1,2	3,78	1270,44	15,58	11,56	25,3	1265
6	1,35	4,27	1435,12	17,34	13,08	28,3	1415
6,5	1,5	4,73	1589,73	19,2	14,65	31,6	1580
7	1,7	5,23	1757,77	21,3	16,42	35,2	1760
7,5	1,9	5,93	1993,04	23,7	18,58	39,4	1970
8	2,13	6,68	2245,11	26,6	21	44,3	2215
8,5	2,16	6,62	2224,94	26,8	21,2	44,6	2230
9	2,17	6,64	2231,67	26,8	21,2	44,5	2225
9,5	2,18	6,82	2292,16	26,8	21,2	44,5	2225
10	2,23	6,68	2245,11	26,8	21,2	44,5	2225

Tab. 3 : Naměřené hodnoty se 100% zatížením

vyslané napětí z matlabu $U_0$ [V]	získané hodnoty z matlabu [V]		vypočítané otáčky $n_0$ [ot/min]	naměřené hodnoty [V]			vypočítané otáčky $n$ [ot/min]
	zatížení ( $y_1'$ )	tachodynamo ( $y'$ )		motor $U_M$	dynamo $U_D$	tachodynamo $U_{TD}$	
0,5	0,01	0,01	3,36	0	0	0	0
1	0,01	0,01	3,36	0,25	0	0	0
1,5	0,01	0,19	63,86	1,8	0,74	1,38	69
2	0,01	0,65	218,46	3,5	2,42	4,58	229
2,5	0,46	1,01	339,46	5,13	2,16	6,82	341
3	0,74	1,43	480,61	6,84	3,36	9,6	480
3,5	1,02	1,85	621,77	8,56	4,55	12,37	618,5
4	1,29	2,27	762,93	10,28	5,87	15,15	757,5
4,5	1,56	2,67	897,37	12,01	7,14	18	900
5	1,83	3,09	1038,53	13,72	8,42	20,8	1040
5,5	2,14	3,53	1186,41	15,46	9,79	23,5	1175
6	2,41	3,94	1324,21	17,21	11,09	26,4	1320
6,5	2,74	4,39	1475,45	19,05	12,47	29,4	1470
7	3,07	4,95	1663,67	21,1	13,97	32,8	1640
7,5	3,5	5,53	1858,60	23,5	15,88	36,7	1835
8	3,95	6,29	2114,03	26,4	18	41,4	2070
8,5	4	6,34	2130,84	26,6	18,28	41,8	2090
9	4,06	6,23	2093,87	26,6	18,3	41,8	2090
9,5	4,11	6,33	2127,48	26,6	18,3	41,8	2090
10	4,08	6,22	2090,51	26,6	18,3	41,8	2090

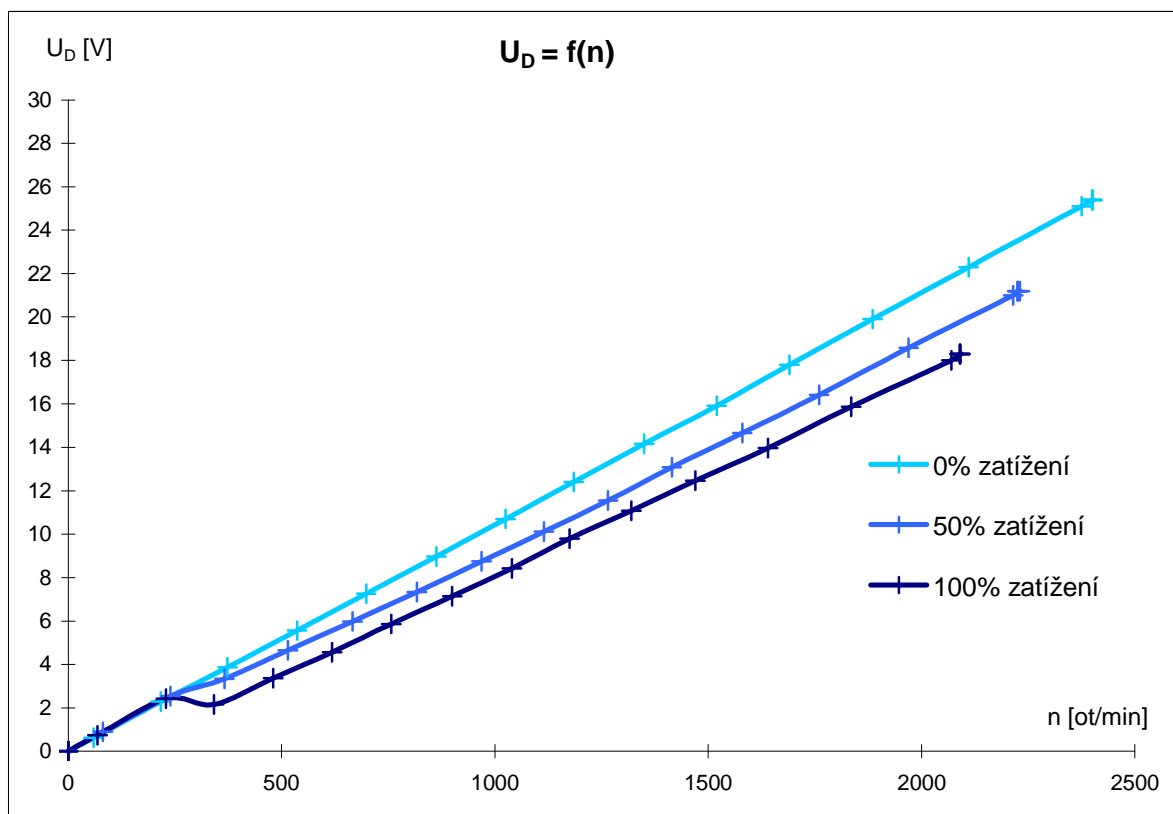
Z následujících charakteristik lze vyvodit několik závěrů. Otáčky v závislosti na napětí motoru  $U_M$  narůstají lineárně, a to i se zatížením. To ovšem neplatí pro nízká napětí, kdy motor ještě není schopen se roztočit. Otáčky soustavy jsou tedy nulové a proto i výstupní napětí tachodynamu  $U_{TD}$  je nulové (Graf 3).

Graf 3 : Statická charakteristika  $n=f(U_M)$



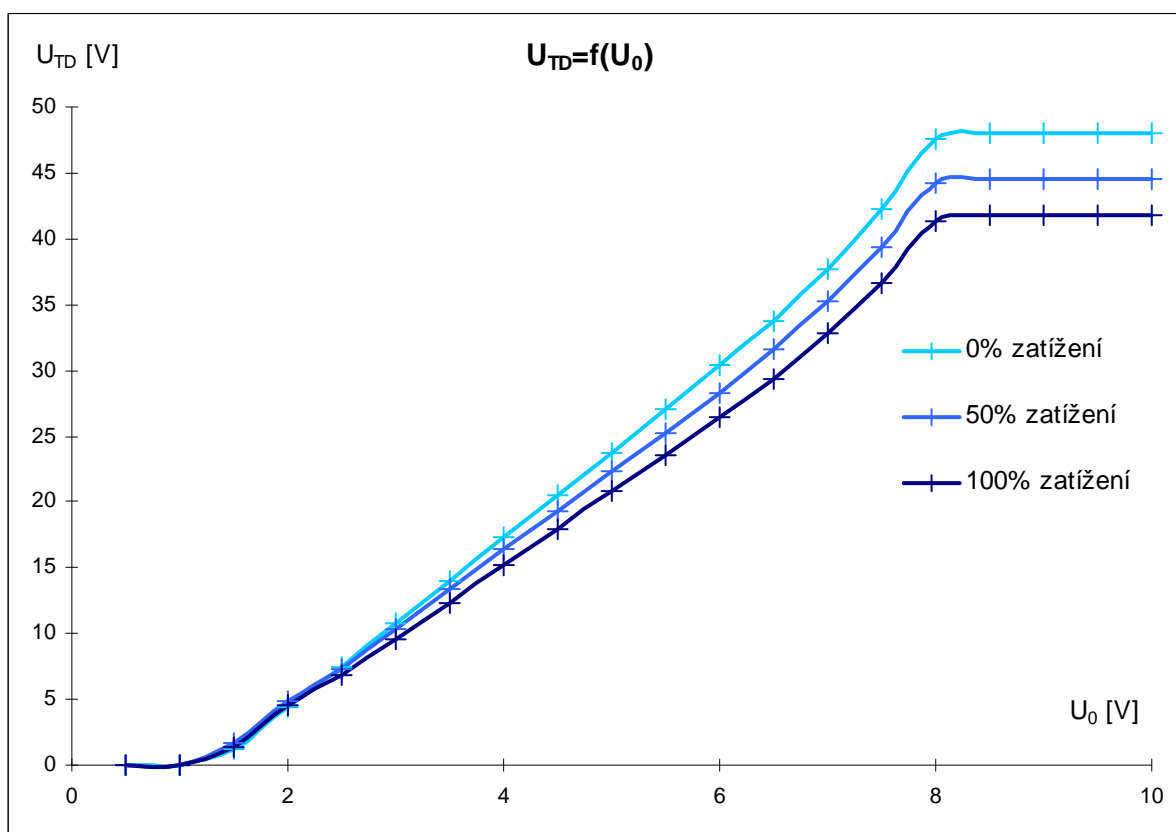
Pokud sledujeme chování dynama, tedy napětí dynama  $U_D$  v závislosti na otáčkách, je patrné, že charakteristiky vypadají podobně jako u motoru. Zde se nám zatížení na linearitě charakteristik projeví více, zejména v oblasti kolem 300 ot./min (Graf 4).

Graf 4 : Statická charakteristika  $U_D = f(n)$



V poslední charakteristice je vyobrazena závislost napětí na svorkách tachodynamu  $U_D$  na napětí vyslaného z počítače  $U_0$ . Charakteristika narůstá téměř lineárně, ovšem od 8 V napětí  $U_0$  je vidět, že napětí na svorkách tachodynamu  $U_{TD}$  již nenarůstá, nenarůstají tedy ani otáčky. Je to dáno omezením maximálního napětí do motoru  $U_M$  na 28,8 V (Graf 5).

Graf 5 : Statická charakteristika  $U_{TD} = f(U_0)$



## 6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo nastudovat funkci SS motorů a generátorů, provozní charakteristiky těchto strojů, čemuž jsem se věnoval v teoretické části. Jsou zde uvedeny základní principy funkce SS strojů, výpočty a konstrukční provedení.

V praktické části bylo oživeno měření na SS elektrických strojích a měření otáček pomocí tachodynamu. Laboratorní zařízení bylo úspěšně uvedeno do provozu včetně propojení s počítačem. Výsledkem jsou zobrazené statické charakteristiky, které odpovídají fyzikálnímu chování SS elektrických strojů. Součástí mělo být i měření dynamických charakteristik, to se ovšem nezdařilo z důvodu malé rychlosti počítače.

## Použitá literatura

- [1] R. Mravenec: *I. Elektrické stroje*, vyd. Praha, SNTL, L25-C2-II-84/55602, 1982.
- [2] R. Mravenec: *III. Návrh elektrických strojů točivých*, vyd. Praha, SNTL, L25-C2-II-84/55747, 1986.
- [3] V. Bartoš, J. Červený, J. Hruška, A. Kotlanová, B. Skála: *Elektrické stroje*, vyd. Západočeská univerzita v Plzni, 2006, ISBN 80-7043-444-9.
- [4] V. Bartoš: *Teorie elektrických strojů*, vyd. Západočeská univerzita v Plzni, ISBN 80-7043-509-7, 2006.
- [5] S. Kocman: *Stejnoseměrné stroje*, 1999
- [6] P. Klán, D. Honc, J. Jindřich: *Nová měřicí jednotka CTRL V3*, 2004