

Regulace otáček elektromotoru

Miroslav Krůžela

Dipl./Bakal. práce
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta Aplikované Informatiky

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubomíru Macků, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a pomoc s řešením problémů s touto prací.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval/a samostatně a použitou literaturu jsem citoval/a.

Ve Zlíně, 14. 06. 2006

.....

jméno diplomanta

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem laboratorní úlohy pro výuku elektrotechnických předmětů, konkrétně návrhem regulace otáček soustavy motor-generátor obsažené ve stavebnicové sestavě RC. Teoretická část práce obsahuje přehled v současné době používaných elektromotorů, dále pak popis elektromotoru konkrétně použitého při návrhu úlohy. Dále jsou v ní uvedeny možnosti regulace jednotlivých druhů elektromotorů.

V laboratorní úloze je k regulaci použito klasických spojitých regulátorů. Součástí práce je i vzorový protokol.

This bachelor work is drawn as project of lab task for education of elektrotechnics. The centerpiece of this work is project of speed kontrol at systém engine-generator, wich is included in modular construction RC. In the teoretical part of the work is including the sumary of elektromotors, wich are standartly using on the prezent and description of elektromotor used in this concrete project. Next part of this bachelor work is putting mind to regulation of serval type sof elektromotors.

In the lab task has been used conventional contiinuakl regulators. One part of this work is also sample report.

OBSAH

ÚVOD	6
1 TEORETICKÁ ČÁST	7
1.1 DĚLENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ:.....	7
1.2 DĚLENÍ ELEKTROMOTORŮ	7
1.2.1 Elektromotory na střídavý proud.....	8
1.2.2 Elektromotory na stejnosměrný proud	13
1.2.3 Motor použitý v sestavě RC	20
1.3 REGULACE OTÁČEK MOTORŮ.....	21
1.3.1 Řízení otáček motoru na střídavé napětí.....	21
1.3.2 Řízení krokových motorů	23
1.3.3 Regulace otáček motoru na stejnosměrné napětí.....	25
2 PRAKTICKÁ ČÁST	30
2.1 ZADÁNÍ LABORATORNÍ ÚLOHY	30
2.2 VZOROVÝ PROTOKOL	39
ZÁVĚR	43
3 LITERATURA	44
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	45
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK	49

ÚVOD

Elektrická energie je v současné době jednou z nejdůležitějších energií. Má širokou škálu využití a velká část lidstva je na ní závislá.

Výroba elektrické energie a její využití v průmyslu jsou dnes spojeny s nutností přeměny mechanické energie na elektrickou a naopak. Neméně důležitá je přeměna mezi jednotlivými druhy elektrické energie - tj. přeměna velikosti napětí, frekvence atd. K těmto přeměnám dochází v elektrických strojích.

Elektrické stroje se dají rozdělit na dvě hlavní skupiny. V první skupině se nacházejí stroje neobsahující pohyblivé části - do ní patří transformátory. Ve druhé skupině nalezneme stroje točivé, patří do ní elektromotory a generátory.

V průmyslové praxi nalézají využití převážně elektromotory, a to pro pohon strojů, dopravníkových pásů, v ekologické dopravě atd. S tím souvisí potřeba regulace otáček těchto točivých strojů - ať už se v praxi jedná o řízení rychlosti posuvu pásu, pohybu stroje, natočení ventilu či rychlosti elektromobilu. Regulaci otáček elektromotoru se věnuje i má bakalářská práce.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Dělení elektrických strojů:

Elektromotory spadají do kategorie elektrických strojů. Proto si nejdříve nastíníme rozdělení elektrických strojů [1,2].

Nejzákladnější dělení elektrických strojů se provádí podle dvou hledisek:

a/ podle přeměny energie

b/ podle principu činnosti

ad a/ Jde asi o nejdůležitější dělení strojů pro praktické využití. Elektrický stroj může

sloužit jako zdroj elektrické energie (přeměňuje jiný druh energie na elektrickou).

Strojům vyrábějícím střídavou elektrickou energii říkáme alternátory, strojům vyrábějícím stejnosměrnou, říkáme dynama.

Zvláštním případem elektrických strojů, které se chovají jako zdroj, je transformátor, jenž mění jeden druh elektrické energie na druhý.

Ad b/ Dělení podle principu činnosti zahrnuje dva pohledy. První zohledňuje rozdílnost ve zdroji energie pro motor a druhý rozlišuje průběh otáček.

Tudíž rozlišujeme:

- motory asynchronní
- motory synchronní
- motory stejnosměrné
- motory komutátorové (na střídavý proud)

1.2 Dělení Elektromotorů

Regulace otáček elektromotoru obecně je velmi rozmanitá. Její realizace je různá u různých typů motorů [1,2,6]. V této kapitole se s jednotlivými typy elektromotorů seznámíme podrobněji.

1.2.1 Elektromotory na střídavý proud

Elektromotory na střídavý proud jsou velmi rozšířené. Hodně se o to zasloužil vynález asynchronního motoru (konec 19. století v berlínských laboratořích firmy AEG).

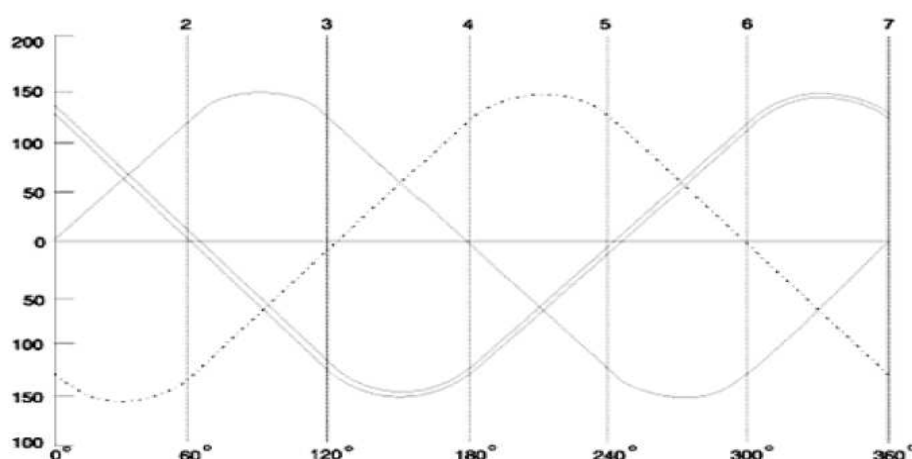
1.2.1.1 Základní pojmy

Pro lepší pochopení střídavých elektromotorů a jejich funkcí bude zde vysvětleno několik základních pojmů.

1.2.1.1.1 Točivé trojfázové magnetické pole

Točivé magnetické pole je takové pole, které plynule mění svůj směr a to otáčením kolem určité pevné osy. Točivé magnetické pole se dá velmi snadno vytvořit mechanicky rovnoměrným otáčením magnetu. Takovým způsobem vzniká točivé magnetické pole např. v generátorech. Při průchodu tohoto pole trojfázovým vinutím na statoru generátoru se indukuje trojfázové napětí, které opět po připojení na trojfázové vinutí generuje točivé pole.

U trojfázového napětí platí, že fázor napětí každé fáze je zpožděn o 120 stupňů za předcházejícím. Po připojení tohoto napětí na cívky statoru se v jednotlivých cívkách potom indukují magnetické toky, jejichž součet dává fázor konstantní velikosti, ale proměnného směru.



Obr. 1 Vznik rotačního pole v trojfázovém vinutí

1.2.1.1.2 Synchronní otáčky

Synchronní otáčky se definují z rotačního magnetického pole[2]. Podle obrázku 1 je v jednotlivých časech 1,2,3,4,5,6,7 posunutí fází stejné tj. 90°. Z toho vyplývá, že za jeden kmit proudu vykoná fázor výsledného magnetického toku Φ také jednu otáčku.

Obecně za f kmitů vykoná fázor f otáček. Má-li motor více pólů (zatím jsme uvažovali dvojpólový motor), pootočí se během jednoho kmitu fázor magnetického toku o úhel odpovídající jedné dvojici pólů. Pro otáčky fázoru magnetického toku tedy platí:

$$n = \frac{f}{p} \quad [s^{-1}; Hz, -] \quad (1.)$$

Kde f je kmitočet napájecího napětí (proudu)

p počet pólových dvojic

V praxi se tyto otáčky nazývají synchronní otáčky n_s a pro jejich výpočet se používá vztah

$$n_s = \frac{60f}{p} [\text{min}^{-1}; Hz, -] \quad (2)$$

1.2.1.1.3 Asynchronní otáčky, skluz

Vložíme-li do kruhového točivého magnetického pole vytvořeného trojfázovým statorovým vinutím závit spojený nakrátko (v praxi klec) , otočný kolem své osy, bude se v něm indukovat proud dle pravidla pravé ruky. Točivé magnetické pole se pohybuje synchronními otáčkami n_s [2]. Na vodič (závit) působí síla, jejíž smysl je dán pravidlem levé ruky. Závit se otáčí ve stejném smyslu jako točivé magnetické pole. Pole jako by strhávalo závit za sebou.

Otáčky n závitů jsou však vždy menší než synchronní otáčky n_s . Pokud by byly stejné,

v rotoru (závit) by se neindukoval proud, tudíž by nevznikal silový účinek. Vzhledem k mechanickým ztrátám v ložiskách, tření rotoru o vzduch a dalším brzdícím vlivům by otáčky okamžitě klesly na velikost, při které se elektromagnetický moment motoru rovná celkovému brzdnému momentu.

Rozdíl otáček točivého magnetického pole n_s a otáček rotoru n vyjadřujeme poměrnou hodnotou tzv. skluzem

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3)$$

Častěji se udává v procentech

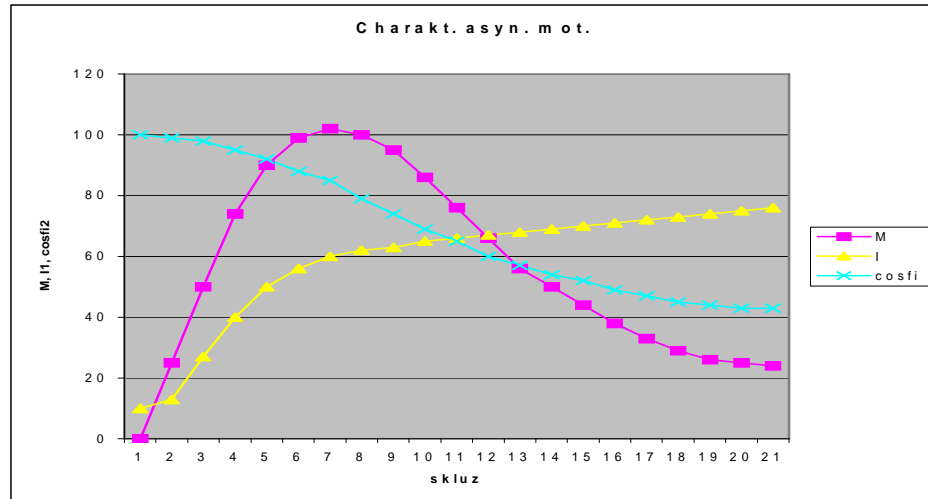
$$s_{\%} = \frac{n_s - n}{n_s} * 100 \quad (4)$$

1.2.1.2 Motory asynchronní

Asynchronní motory jsou elektrické stroje, které vynikají konstrukční jednoduchostí, velkou účinností (90 až 96%) a bezporuchovým chodem i v těžkých provozních podmínkách. Jsou laciné a jejich obsluha i údržba jednoduchá, proto je to nejrozšířenější druh elektrických motorů (zajišťující více než 90% elektrických pohonů). Název asynchronní dostaly tyto motory proto, že se otáčky rotoru zpožďují za synchronní rychlostí točivého elektromagnetického pole statoru. Nepatrný skluz má rotor i při chodu naprázdno, větší při zatížení a největší v okamžiku připojení motoru na síť[2].

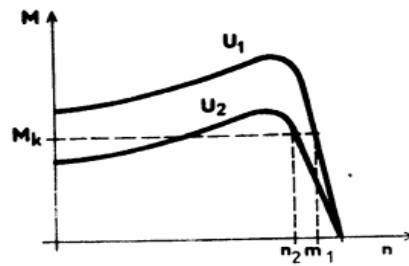
Princip činnosti asynchronních motorů lze popsat takto:

Při připojení trojfázového vinutí statoru na trojfázovou napájecí síť se rotor sám roztočí, protože točivé magnetické pole protíná vinutí rotoru a indikuje v něm proud. Proud indikovaný ve vodičích rotoru vytvoří vlastní magnetické pole rotoru, takže se rotor roztočí ve směru točivého pole statoru silovým působením tohoto točivého pole na pole rotoru. Čím víc je rotor mechanicky zatížen, tím víc se zpožďuje za točivým polem (roste skluz, klesají otáčky), tím rychleji jsou vodiče rotoru protínány točivým polem, a proto se v rotoru indikuje větší proud. Vlivem většího proudu v rotoru se zvětší proud ve statoru, obdobně jako u transformátoru. Motor tedy odebírá ze sítě pouze tak velký proud, jaký odpovídá okamžitému mechanickému zatížení rotoru. Na obr 1 jsou uvedeny typické charakteristiky asynchronního motoru. Tj. závislost momentu, proudu a účinník.



Obr. 2 Charakteristiky Asynchronního motoru

M-moment motoru, I- vstupní proud, cosφ-účinník



Obr. 3 Vliv statorového napětí na na velikost otáček

Motor nakrátko:

Vlastní motor je tvořen statorom složeným z plechů, v jehož drážkách je umístěno trojfázové vinutí. Statorový svazek je nainstalován do kostry motoru, která je uzavřena ložiskovými štíty s ložisky. Rotor je složený z plechů a má v drážkách klecové vinutí a jako celek je nalisován na hřídel.

Tabulka 1 Typy provedení rotoru nakrátko

Kotva	Charakteristika	Výhody	Nevýhody
Jednoduchá	Klecové vinutí odstříknuté z hliníku	Jednoduchá konstrukce, velká účinnost, účinník a přetížitelnost	Velký záběrný proud, menší záběrný moment
Odporová	Jednoduchá klec se zvětšeným odporem	Jednoduchá konstrukce, zvýšený záběrný moment, menší záběrný proud	Horší účinnost, měkká mechanická charakteristika
Dvojitá	Dvě klece nad sebou, horní klec má větší odpor a menší rozptylovou indukčnost, při rozběhu proud teče převážně horní klecí	Zvýšený záběrný moment, snížený záběrný proud	Složitá konstrukce, horší účinnost, horší účinník
Vírová	Úzké vysoké klece, vlivem rozptylového pole se při rozběhu vytlačí proud do malé plochy vodiče, čímž se zvětší odpor	Zvýšený záběrný moment, snížený záběrný proud	Menší momentová přetížitelnost, horší účinnost, horší účinník

Motor kroužkový:

Liší se od motoru nakrátko provedením motoru a sběracím ústrojím. Trojfázové vinutí rotoru je zapojeno do hvězdy už při výrobě. Konce jeho vinutí jsou vyvedeny ke kroužkům, na něž dosedají uhlíkové kartáče, jež jsou umístěny na držácích. Vývody kartáčů jsou připojeny na svorky rotorové svorkovnice. Celé sběrací ústrojí je chráněno krytem.

1.2.1.3 Motory synchronní

Synchronní motory mají vinutí statoru stejné jako asynchronní, ale v rotoru je umístěno vinutí napájené stejnosměrným proudem. Rotor se tedy chová jako trvalý magnet. Stejnosměrný proud, nazývaný budící, lze měnit. V důsledku tohoto se rotor pohybuje synchronně s magnetickým polem statoru. Otáčky jsou dané kmitočtem sítě a počtem pólových dvojic dle vztahu 2.

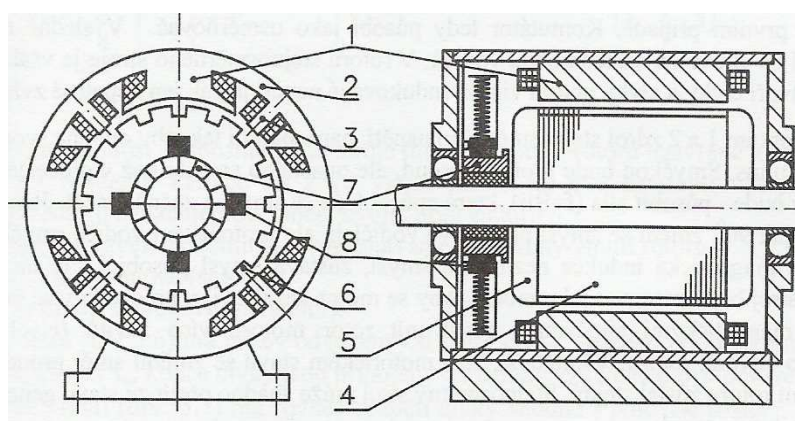
Při chodu naprázdno se osa rotorového (budícího) vinutí a osa točivého magnetického pole kryjí. Zatížením dochází k relativnímu vychýlení osy budícího vinutí; rotor za polem zaostává. Stále však rotuje synchronně s polem statoru.

Závislost úhlu, o který rotor zaostává za polem statoru, je sinusová. Tudiž maximálního momentu je dosaženo při úhlu 90° . Velikost momentu lze ovlivnit i budícím proudem.

Budící proud ovlivňuje i účinník $\cos \varphi$.

1.2.2 Elektromotory na stejnosměrný proud

Jsou nejstarším druhem elektrických strojů. Vzhledem k výhodám střídavého proudu a používaných střídavých motorů jejich význam časem klesal. V moderní době se vzhledem k jejich výborným vlastnostem (snadná regulace otáček) znovu využívají v regulačních pohonech. Velkou zásluhu má na tom polovodičová technika, která umožňuje snadno přeměnit střídavý proud na stejnosměrný.



Obr. 4 stavba synchronního motoru

1 - Statorový budící obvod s hlavními póly, 2 - Magnetický obvod statoru, 3 - Pomocné póly, 4 - Rotor, 5 - Vinutí rotoru, 6 - Drážky, 7-Komutátor, 8 – Kartáče

Stator je tvořen aktivním magnetickým jhem, vede magnetický tok mezi póly. Ke statoru se připevňují hlavní a pomocné póly a zpravidla i sběrací ústrojí. Protože magnetický tok je buzen stejnosměrným proudem, vyrábělo se dříve jho statoru z magneticky měkké lité oceli nebo válcované oceli. Modernější stroje určené pro regulační pohony rychlou změnou i reverzací proudu nebo napájené zvlněným napětím mají jho složené z běžných konstrukčních plechů tloušťky 1 mm navzájem od sebe izolovaných. Z plechů se dnes skládají i hlavní a pomocné póly.

Hlavní póly jsou připevněny ke jhu statoru šrouby. Na jejich jádrech jsou umístěny budící cívky spojené do série tak, aby se polarita sousedních pólů střídaly. Pólovými nastavci hlavních pólů se upravuje průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

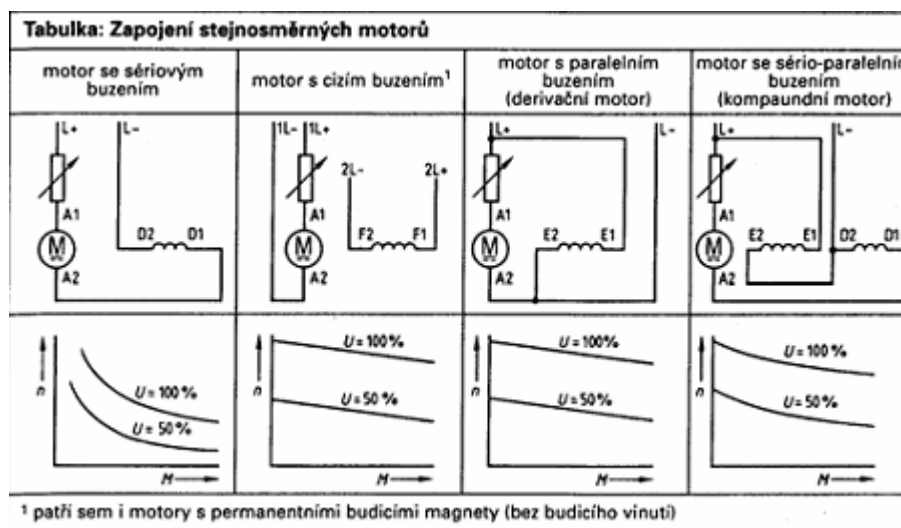
Pomocné póly jsou umístěny mezi hlavními póly. Jsou úzké a nemají pólové nastavce. Vinutí, které je na nich umístěno, je zapojeno do série s vinutím kotvy a zlepšuje provozní vlastnosti stroje.

Kotva má válcovitý tvar a je tvořena magnetickým obvodem, komutátorem, vinutím a hřídelem.

Magnetický obvod je tvořen z elektrotechnických plechů navzájem od sebe izolovaných, neboť u stejnosměrných motorů dochází v rotoru k střídavé magnetizaci. Plechy mají tvar mezikruží nebo jeho částí. Na vnějším obvodu mezikruží jsou vylisovány drážky pro vinutí.

Tabulka 2 Dělení stejnosměrných motorů podle zapojení buzení vzhledem ke kotvě

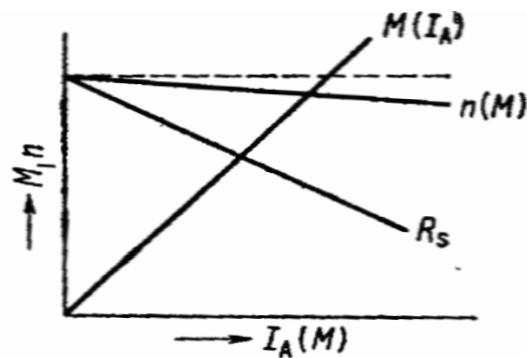
Přehled stejnosměrných motorů	
Typ motoru	Regulace
S cizím buzením	Odporem v obvodu rotoru a odporem v obvodu buzení. Pulzním měničem.
S paralelním buzením	Odporem v obvodu rotoru a odporem v obvodu buzení. Pulzním měničem
Buzení permanentními magnety	Odporem v obvodu rotoru. Pulzním měničem.
Se sériovým buzením	Odporem v sériovém obvodu. Pulzním měničem.



Obr. 5 Zapojení stejnosměrných motorů

1.2.2.1 S cizím buzením

Budící vinutí je napájeno z cizího zdroje a není galvanicky odděleno od kotvy. Zapojení je prakticky stejné jako dynamo s cizím buzením až na spouštěcí rezistor R_s , který je u větších motorů nutný ke zmenšení proudového rázu do sítě při spouštění motoru .



Obr. 6 Charakteristiky stejnosměrného motoru s cizím buzením

Výhody:

- jednoduché řízení rychlosti
- velký točivý moment
- snadná změna smyslu otáčení
- velký rozsah otáček a výkonů

Nevýhody:

- maximální rychlost stroje je omezena komutací a komutátorem
- nutná údržba komutátoru

Použití:

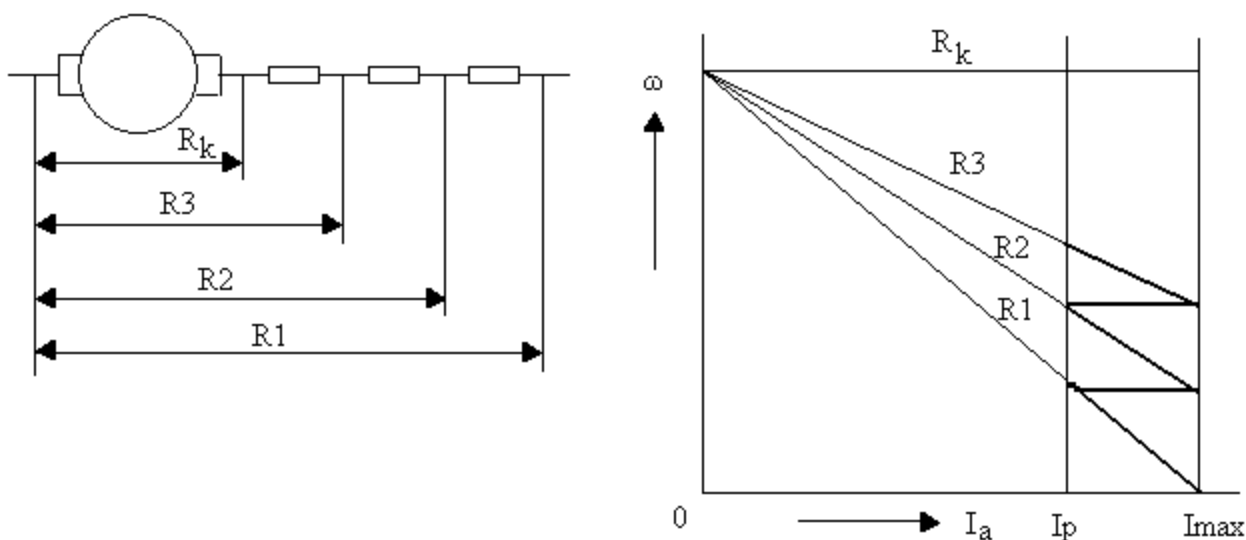
Automobilový průmysl - pohony různých mechanismů malých výkonů, například pohon oken

Pohony kamer - malé výkony

Pohony obráběcích strojů, lodí, ponorek, elektromobilů, těžních strojů - střední výkony

Pracovní režimySpouštění:

Stejnoseměrný cizí buzený motor nemůžeme spustit přímým zapnutím na síť, protože by byl velký záběrný proud a moment. Spouštění buď pomocí říditelného zdroje napětí nebo předřadných odporů.

Odporové spouštění:

Odporové spouštění je jednoduché. Jeho princip spočívá v měnění odporu v obvodu kotvy.

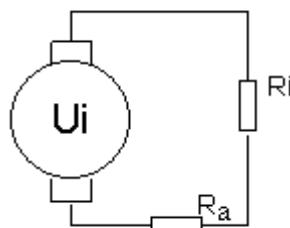
Jeho velkou nevýhodou jsou ztráty ve spouštěcím obvodu.

Brzdění:

Kinetická energie pohonu se mění v brzdných odporech v teplo nebo se jako elektrická energie vrací do napájecího zdroje.

Brzdění do odporu:

Jednoduché brzdění do odporu - motory se odpojí od zdroje a pracují jako generátory, do obvodu kotvy se připojí odpor R_i



Obr. 7 Brzdění motoru odporem

Dobrá brzdění do klidu není možné. Do klidu je nutno pohon přivést mechanickou brzdou.

Brzdění protiproudem :

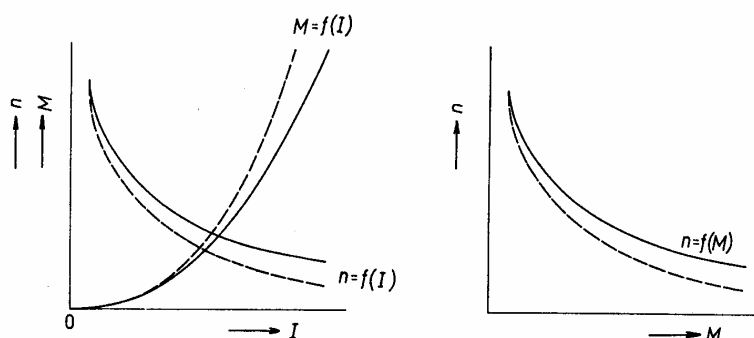
motory zůstávají během brzdění připojeny ke zdroji.

K tomuto typu brzdění dochází, jestliže je motor zapojen pro jistý smysl otáčení, ale vlivem břemene nebo setrvačných hmot se otáčí v obráceném směru. Jeho indukované napětí kotvy se potom sčítá s přiloženým napětím zdroje.

1.2.2.2 Se sériovým buzením

Na síť se připojuje přes spouštěč; pouze pro malé motorčky lze připojit přímo k síti. Všechna vinutí sériového motoru jsou zapojena do série s kotvou.

Místo permanentního magnetu se pro stator běžných větších motorů využívá elektromagnetu. Pokud je vinutí statoru (budicí vinutí) spojeno s vinutím rotoru do série, mluvíme o sériovém elektromotoru. Tento typ elektromotoru má točivý moment nepřímo úměrný otáčkám. To znamená, že stojící elektromotor má obrovský točivý moment. Využívá se proto především u dopravních strojů a v elektrické trakci (vlaky, metro, tramvaje). Ve spojení s generátorem je schopen ideálně nahradit mechanickou převodovku. Dostupnější sériový elektromotor (narozdíl od AC) proto často nalezneme také v levnějších přestavbách.



Obr. 8 Charakteristiky motoru se sériovým buzením

Brzdění motoru:

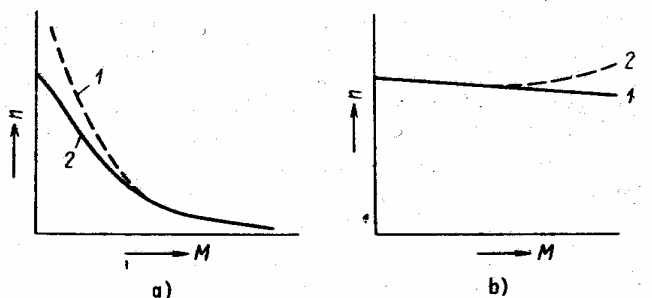
- Protiproudem: při brzdění se zátěžovým momentem je potřeba posunout pracovní bod motoru do oblasti záporných otáček. Toho se dosáhne vložením rezistoru do obvodu kotvy.
- Rezistorem: motor se odpojí od sítě a přepojí se na brzdový rezistor

1.2.2.3 Derivační elektromotor

Derivační elektromotor má elektromagnet statoru napájený paralelně s motorem. Otáčky tohoto motoru jsou méně závislé na zátěži motoru. Navíc lze proud statoru samostatně regulovat. Proto se tento typ motoru využívá především u strojů, kde jsou požadovány relativně neměnné otáčky

1.2.2.4 Kompandní elektromotor

Napájecí vinutí je provedeno sério-paralelně.



Obr. 9 Charakteristiky motoru s kompandním buzením a/momentová 1-sériové 2-sérioparalelní buzení b/ momentová charakteristika 1- sérioparalelní 2-paralelní buzení

1.2.2.5 Krokové motory

Krokové motory jsou zpravidla používány jako výkonové prvky ve strukturách elektrických pohonů pro nastavování polohy a rychlosti bez zpětné vazby. Jejich oblast použití sahá od jednoduchých pohybů od bodu k bodu přes rychlé časově krátké posuvy (v textilním oboru, počítačích a kancelářských zařízeních) až k přesným dvou a tříosovým polohovacím robotům. Dalším okruhem aplikací je řízení otáček s realizací přímého pohonu vřetene strojů, pohonů různých dávkovačů, čerpadel, navíječek apod.

Vyznačují se rychlým uváděním do provozu bez náročného nastavování parametrů regulátorů s relativní nezávislostí na zatížení a připojených momentech setrvačnosti. Pracují s minimální údržbou po celou dobu své životnosti. Charakteristickou vlastností motoru je otáčení hřídele po krocích. Jedna otáčka je složena z pevně definovaného počtu kroků, který odpovídá konstrukci a způsobu řízení. Nemluvíme zde tedy o rychlostech otáčení (otáčkách), ale o frekvenci krokování. Motory využívají svůj maximální moment již od nejnižší rychlosti, což je jednou z jejich specifických vlastností. V jednoduchých aplikacích jsou většinou používány dvoufázové krokové motory.

V pohonech s mikrokrokovým pohybem mají uplatnění pětifázové motory. Rostoucí požadavky na moderní krokové motory, zejména snížení hlučnosti a zvýšení výkonu, vedou k používání třífázových krokových motorů, které v sobě slučují všechny nejlepší vlastností používaných dvoufázových a pětifázových motorů. Jsou schopny odevzdat o 30-50 % vyšší výkon. Díky své vyšší účinnosti jsou tak rozměrově menší při stejném kroutícím momentu.

Princip funkce krokových motorů

Základním principem krokových motorů je pohyb rotoru o jeden krok. Krok je definován jako mechanická odezva rotoru krokových motorů na jeden řídicí impuls řídicí jednotky, při níž vykoná rotor pohyb z výchozí magnetické klidové polohy do nejbližší magnetické klidové polohy. Změna polohy se dosahuje změnou napájení vinutí jednotlivých fází statoru. Po sepnutí určité fáze se rotor snaží natočit tak, aby výsledný magnetický odpor byl minimální. U nezatíženého motoru se tedy sesouhlasí poloha zubů statoru a rotoru. V

této poloze má motor nulový statický vazební moment a při vychýlení vnější zátěží moment stroje narůstá a maximální hodnota statického vazebního momentu odpovídá natočení

o čtvrtinu kroku. Jedno mechanické otočení hřídele krokového motoru o 360° představuje určitý počet kroků, jejichž počet je dán konstrukcí motoru a způsobem řízení. Řídicí kmitočet je definován jako kmitočet řídicího signálu v Hz nebo v kHz.

Počet otáček je definován:

$$n = \frac{60 \cdot f_z \cdot \alpha}{360} \quad (5)$$

Kde: f_z - kmitočet kroku [Hz]

α – úhel kroku [$^\circ$]

1.2.3 Motor použitý v sestavě RC

Jedná se o stejnosměrný motor o výkonu 3,8W, jenž je spojen se stejným motorem. Druhý motor se dá použít jako zátěž.

Důležité údaje o motoru:

Maximální napětí – 12V

Spouštěcí napětí – 0,5V

Průměrné proudové zatížení – 8 mA

Maximální proudové zatížení – 0,38A

Momentová konstanta – 19,3 mNm

Momentová konstanta v sobě zahrnuje mechanické i magnetické vlastnosti motoru (vzduchová mezera u rotoru, magnetická indukce atd.).

Součástí sestavy je také optický snímač, tachodynamo a převodník frekvence/napětí.

Tachodynamo i převodník má parametr převodu 1V/ 1000 ot./min.

Optický snímač dává 100 impulzů/ ot.

Pro úplnost je níže uveden seznam vstupů a výstupů:

IN1- vstup výkonového zesilovače AMPL1

IN2- vstup výkonového zesilovače AMPL2

OUT1- výstup tachodynamu

OUT2- výstup tachodynamu se zařazeným filtrem a zesilovačem

OUT3- analogový výstup optického snímače otáček

OUT4- digitální výstupy optického snímače otáček

DIR- směr otáčení

A, B- sledy impulzů z optického snímače (fázově posunuty o 90°)

GND- zem sestavy motor-generátor (nutné propojení se zemí systému RC)

Pomocí přechodové charakteriky byla provedena identifikaci tohoto motoru. Chová se jako soustava prvního řádu s přenosem:

$$F_{m(s)} = \frac{0,28}{(2,977s - 1)^3} \quad (6)$$

Pomocí revidované Ziegler-Nicholsové metody byly navrženy regulátory s těmito parametry:

P: $k_r=13$

PI: $k_r=11,7$ $T_I=10,5$

PD: $k_r=15,6$ $T_D=0,75$

PID: $k_r=16,25$ $T_I=6$ $T_D=1,5$

1.3 Regulace otáček motorů

Ve většině případech by se měl spíše použít termín řízení otáček, protože regulace zahrnuje zpětnou vazbu.

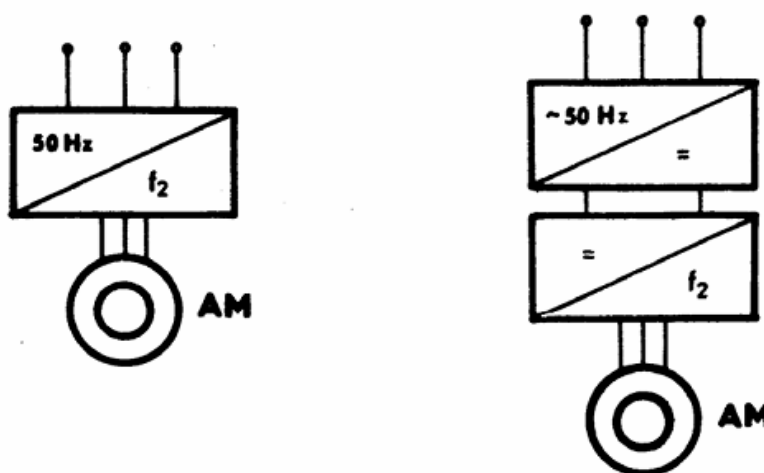
1.3.1 Řízení otáček motoru na střídavé napětí

Níže uvedené možnosti jsou pro asynchronní motor. U synchronního motoru lze použít nejspíš jen řízení otáček změnou kmitočku[1,2].

Řídit otáčky je možno těmito způsoby:

- **změnou skluzu** se u asynchronních motorů s kroužkovým rotorem provádí rotorovým spouštěčem, tím se značná část výkonu ztrácí na rezistorech, a proto je tento způsob nevhodný
- **změnou pólů** je možné u motorů s rotorem nakrátko jen stupňovitě, proto se tento způsob málo používá
- **změnou kmitočtu** napájecího proudu vyžaduje samostatný trojfázový zdroj s proměnným kmitočtem. Dříve používané rotační měniče jsou drahé a mají složitou

údržbu, proto se v poslední době používají statické měniče kmitočtu



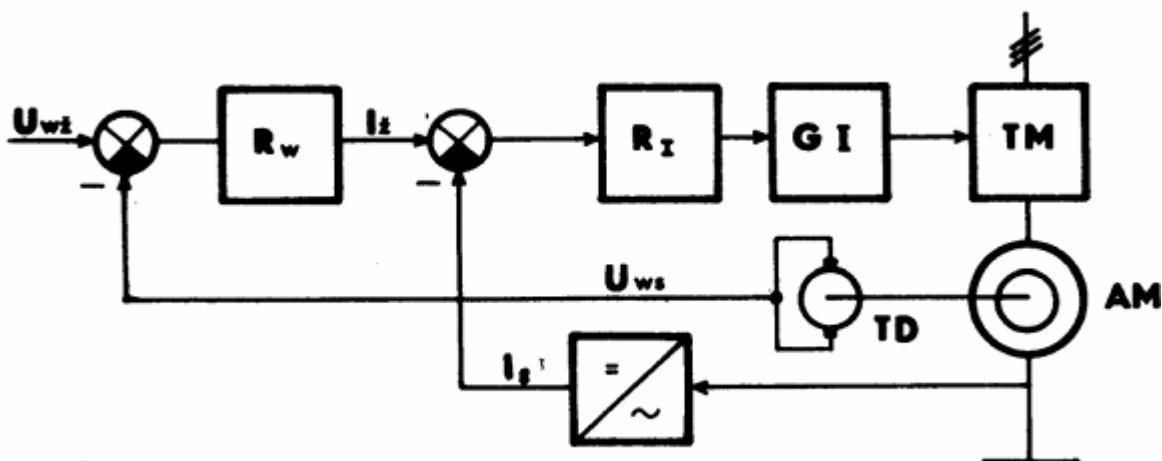
Obr. 10 Regulace otáček asynchronního motoru frekvenčními měniči

Na obrázku 10 jsou znázorněny dva typy – přímý a nepřímý měnič. Přímý měnič je schopen měnit kmitočty v rozmezích 0 – 1/3 hodnoty převáděné frekvence. Proto je výhodnější použití nepřímých frekvenčních měničů, které nejdříve převáděný proud usměrní a z toho usměrněného zdroje jsou pak schopny vyrábět střídavý proud v rozmezí 5 – 100 kHz.

Velkou výhodou při použití frekvenčních měničů je možnost plynulého řízení otáček při rozběhu, během chodu i doběhu.

- **regulace napětí na statoru** pomocí tyristorových můstků. Řízením okamžiku spínání tyristorů lze měnit střední hodnotu velikosti přiváděného napětí, a tím i moment motoru. Při stejném zatížení motoru pak dojde ke změně otáček. Regulační

obvod, který by realizoval tento princip je na obr. 9. Do regulátoru otáček R_w je přiváděno napětí úměrné požadovaným otáčkám U_{wz} a napětím U_{ws} z tachodynamu TD, které je úměrné skutečným otáčkám. Na základě porovnání těchto hodnot je generován proud I_z , který je úměrný požadovanému zvýšení nebo snížení otáček motoru. Regulátor R_I je zařazen do obvodu pro ochranu motoru proti přetížení a podle poměru hodnot I_s a I_z řídí generátor impulsů GI, který spíná tyristorový můstek TM.



Obr. 11 Regulace otáček asynchronního motoru změnou napětí na satoru tyristorovým
můstkem

1.3.2 Řízení krokových motorů

Nejjednodušším způsobem řízení krokových motorů je spínání buzení pro celé kroky. V tomto režimu je vždy napájeno jen vinutí jedné fáze statoru (A, B, C), a to jmenovitým proudem kladné nebo záporné polarity (viz obr.12). Při tomto režimu je počet kroků na otáčku dán vztahem:

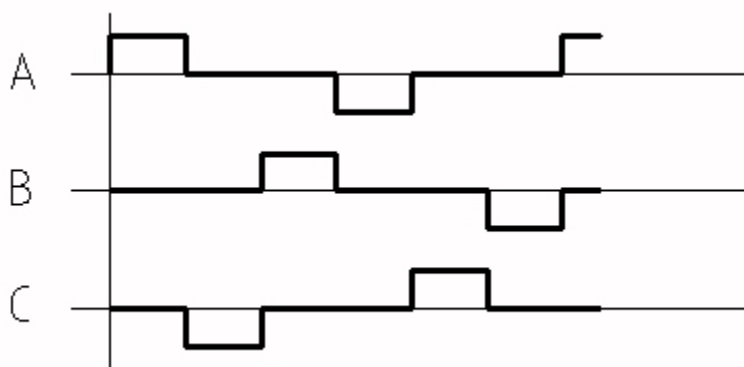
$$z = k \cdot p \cdot m \quad (7)$$

Kde:

k- konstanta pro řízení po celých krocích ($k = 2$)

p- počet pólových dvojic

m- počet fází motoru



Obr. 12 Spínání fází krokového motoru pro celý krok

Tento způsob krokování je zastaralý pro svoje výrazné přechodové děje, pulzující moment a nestabilitu krokových motorů při různých budících frekvencích.

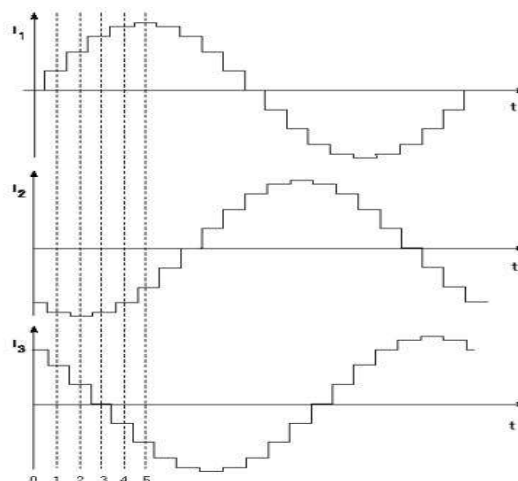
Se zvýšenými nároky na přesnost pohybu se dnes používá systém řízení mikrokrokování, který odstraňuje nežádoucí jevy řízení po celých krocích. Nejpoužívanějším typem mikrokrokování v řídicích jednotkách je postupné zvyšování, respektive snižování budícího proudu pro generování rotujícího magnetického pole pomocí trojfázové sinusové funkce metodou PWM (pulsně šířkové modulace). Napájení sinusovým proudem vede ke snížení obsahu vyšších harmonických, snížení ztrát, snížení hlučnosti a rovnoměrnějšímu momentu. Čím je více změn na periodu (sinusovky), tím může být frekvence krokování větší.

Počet změn na periodu v praxi bývá $k = 4, 8, 10, 20$ a u přesnějších aplikací i vyšší. Počet kroků na otáčku při tomto způsobu řízení je:

$$z = k \cdot p_p \quad (8)$$

kde: k - počet změn proudu(mikrokroků) na jednu periodu
 p_p - počet pólpárů krokového motoru

Konkrétně rotační trojfázový krokový motor VRDM 397/50 má 50 pólpárů ($p_p = 50$) a jeden základní krok je rozdělen na 20 mikrokroků ($k = 20$), takže podle uvedeného vztahu má motor 1000 kroků na otáčku, což odpovídá velikosti kroku $\alpha = 0,36^\circ$.



Obr. 13 Spínání fází krokového motoru v režimu mikrokrokování sinusovou funkcí

1.3.3 Regulace otáček motoru na stejnosměrné napětí

Vzhledem k elektromotoru použitým v laboratorní úloze toto téma bude rozvedeno trochu víc a bude směřováno do nízkých napětí.

1.3.3.1 Regulátory napětí (ztrátové)

- změnou odporu ve spouštěcím obvodu

Nejjednodušší řízení otáček lze realizovat přidáním odporu (proměnného odporu) do budícího obvodu.

Výhodou tohoto řízení je jednoduchost konstrukce, naopak nevýhodou velký ztrátový výkon (tepelné vyzařování).

- pomocí stabilizátorů napětí

Používání stabilizátorů napětí při řízení otáček je dnes běžně používané. Možných zapojeníh je velké množství.

-Rotační měnič napětí = Leonardova skupina

Leonardova skupina je soustava dvou motorů, které slouží jako zdroje proměnného napětí pro řízení elektromotor. Tato skupina se skládá z asynchronního motoru s konstantními otáčkami

a stejnosměrného stroje s cizím buzením. Toto propojení umožňuje řídit otáčky v širokém rozsahu, při čemž otáčky nejsou závislé na zatížení. Používá se v aplikacích, kde je žádoucí plynulé a hospodárné řízení otáček.

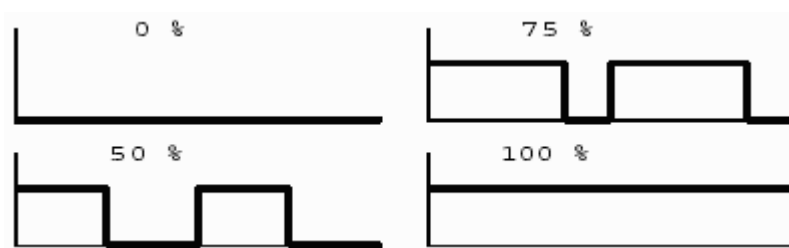
Toto zapojení má i další využití mimo řízení otáček.

1.3.3.2 Regulátory výkonu (bezztrátové)

Jedním ze způsobů jak vytvořit nastavitelný zdroj s nízkým tepelným vyzařováním (vysoká účinnost užitečné energie) je konstrukce spínaného měniče napětí.

PWM modulace (PWM - puls width modulation)

Jednoduchou a rozšířenou metodou bezztrátové regulace výkonu je pulsně šířková modulace. Nejedná se o nic jiného než o periodické spínání napětí s danou střídou - poměrem času, kdy je napětí zapnuto a vypnuto.



Obr. 14 Příklad PWM modulace

Obrázky výše názorně ukazují jak vypadá přidělení výkonu 0 % (vypnuto), 50, 75 % (spínáno) a 100 % (stále sepnuto). Při pulzní regulaci zůstává proud i napětí stejné, ale mění se aktivní doba, kdy prochází proud motorem. Motor takto regulovaný má pak stejnou sílu v celém rozsahu otáček.

Výhodou této metody je jednoduchost, zbývá jen určit spínací frekvenci, ta se volí jako nejnižší frekvence, při které se bude motor plynule otáčet (nebude škubat v rytmu spínací frekvence).

Stejně jako u stabilizátorů napětí je i tady více možností jak sestavit PWM regulátor. Jedna z možností je použít universálního obvodu NE555. Zapojení s NE555 umožňuje měnit šířku impulsu v rozsahu od 2-3% do 96-98%.

1.3.3.3 Regulátory se zpětnou vazbou - PID regulace

Cílem řízení nebo regulace je generovat akční veličinu $u(t)$ (napětí, proud) tak, aby se regulovaná veličina $y(t)$ (skutečné otáčky) chovala podle předem zadaného cíle, jež je charakterizován žádanou veličinou $w(t)$ (žádané otáčky). Nejúčinnějším způsobem, jak tohoto cíle dosáhnout, je použití záporné zpětné vazby podle Obr. 15. Ke známému přenosu regulovaného systému $G(s)$ je nutné nalézt přenos regulátoru $R(s)$ tak, aby regulační odchylka $e(t)$ byla co nejmenší.



Obr. 15 Základní regulační obvod

Složky regulátoru:

P - proporcionální člen

Je popsán jednoduchou rovnicí:

$$U_R = r_0 e(t) \quad (9)$$

Řečeno jednoduše slouží jen pro zesílení nebo zeslabení signálu.

Pásmo proporcionality je definováno jako:

$$P = \frac{1}{r_0} \times 100 [\%] \quad (10)$$

Odpovídá počtu procent změny vstupní veličiny, která změní 100% výstupní veličiny.

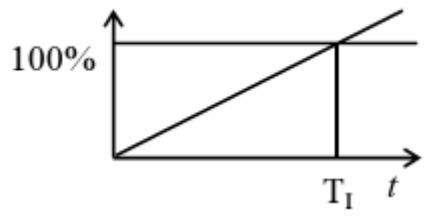
P regulátor zanechává trvalou regulační odchylku

I - integrační člen

Je popsán integračním vztahem:

$$u_R(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau R_I(s) = \frac{1}{T_I s} \quad (11)$$

T_I je čas, který odpovídá, za který při 100% změně na vstupu naroste 100% na výstupu. Jinak řečeno, T_I znamená čas, který by potřeboval čistě integrační regulátor, aby přestavil akční člen (výstupní signál) do polohy, které dosáhne PI regulátor v čase $t=0$ vlivem své proporcionální složky.



Obr. 16 Integrační průběh

D - derivační člen

Ideální D člen je popsán diferenciálním vztahem:

$$u_R(t) = T_D e'(t) = T_D \frac{de(t)}{dt} R_D(s) = T_D \times s \quad (12)$$

T_D je čas, který by potřeboval čistě proporcionální regulátor, aby přestavil akční člen, aby přestavil akční člen (výstupní signál) do polohy, které dosáhne PD regulátor v čase $t=0$ vlivem své derivační složky.

D člen se využívá pro snížení překmitů při použití regulátoru na kmitavé regulační pochody.

Ideální D člen zesiluje šumy, proto ho nelze použít samostatně.

Prakticky se tedy používá realistický D - člen se setrvačností prvního řádu, který popisuje přenos:

$$R_D(s) = \frac{T_D s}{\tau_p s + 1} = \frac{T_D s}{\frac{T_D}{N} s + 1} \quad N \in \langle 3; 10 \rangle \quad (13)$$

D člen se využívá pro snížení překmitů při použití regulátoru na kmitavé regulační pochody.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Zadání laboratorní úlohy

Úkol:

1. Změřte charakteristiku motoru (závislost momentu na budícím proudu)
2. Ověřte funkci P regulátoru ,pro srovnání uveďte i průběh bez zapojeného regulátoru
3. Ověřte funkci I regulátoru ,pro srovnání uveďte i průběh bez zapojeného regulátoru
4. Ověřte funkci PI regulátoru ,
5. Zjistěte vliv D složky u PID regulátoru.

Teorie:

Stejnoseměrné motory

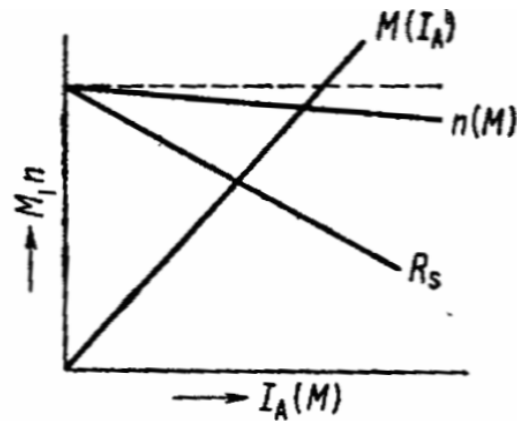
Jsou nejstarším druhem elektrických strojů. S přihlédnutím k výhodám střídavého proudu a používaných střídavých motorů jejich význam časem klesal. V moderní době se kvůli k jejich výborným vlastnostem (snadná regulace otáček) znovu využívají v regulačních pohonech. Velkou zásluhu má na tom polovodičová technika, která umožňuje snadno přeměnit střídavý proud na stejnosměrný.

Stejnoseměrné motory se dále dělí podle zapojení buzení vzhledem ke kotvě:

Přehled stejnosměrných motorů	
Typ motoru	Regulace
S cizím buzením	Odporem v obvodu rotoru a odporem v obvodu buzení. Pulzním měničem.
S paralelním buzením	Odporem v obvodu rotoru a odporem v obvodu buzení. Pulzním měničem
Buzení permanentními magnety	Odporem v obvodu rotoru. Pulzním měničem.
Se sériovým buzením	Odporem v sériovém obvodu. Pulzním měničem.

S cizím buzením

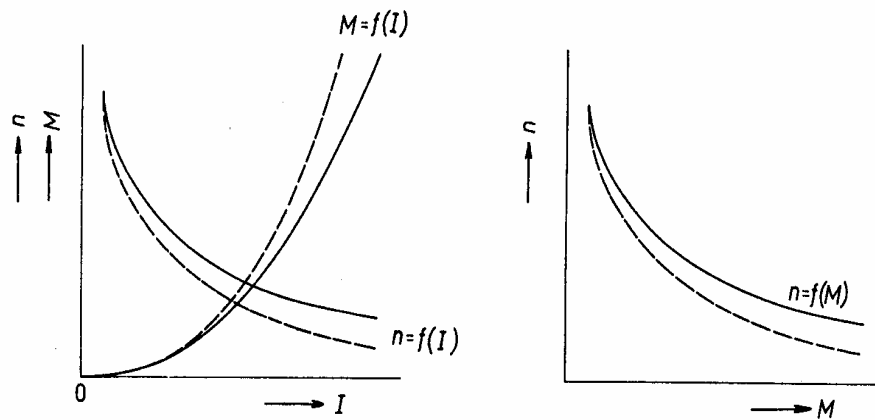
Budící vinutí je napájeno z cizího zdroje a není galvanicky odděleno od kotvy. U tohoto typu lze velmi lehce řídit otáčky, i směr otáčení. Mezi další výhody patří velký moment a velké rozpětí výkonů. Hlavní nevýhodou je komutace, která způsobuje omezení rychlosti a klade nároky na údržbu komutátoru.



Charakteristiky stejnosměrného motoru s cizím buzením

Se sériovým buzením

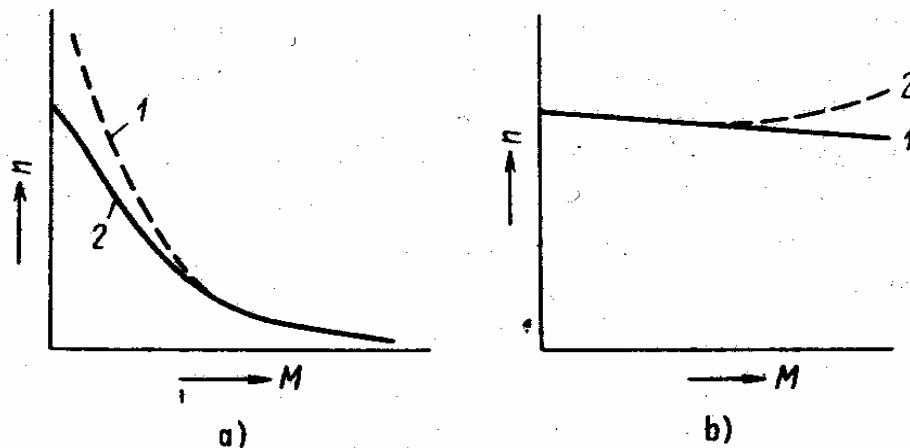
Tento typ elektromotoru má točivý moment nepřímo úměrný otáčkám. To znamená, že stojící elektromotor má obrovský točivý moment. Využívá se proto především u dopravních strojů a v elektrické trakci (vlaků, metro, tramvaje). Ve spojení s generátorem je schopen ideálně nahradit mechanickou převodovku.



Zatěžovací a otáčková charakteristika motoru se sériovým buzením

kompaundní elektromotor

Napájecí vinutí je provedeno sérioparalelně.



Obr. 17 Charakteristiky motoru s kompaundním buzením a/ momentová 1-sériové 2-sérioparalelní buzení b/ momentová charakteristika 1- sérioparalelní 2-paralelní buzení

Motor použitý v sestavě RC

Jedná se o stejnosměrný motor o výkonu 3,8W, jenž je spojen se stejným motorem, který se dá použít jako zátěž.

Pro jeho točivý moment platí vztah:

$$M=I.k$$

Kde I je budící proud a k je konstanta daná fyzickými vlastnostmi a parametry motoru.

Důležité údaje o motoru:

Maximální napětí – 12V

Spouštěcí napětí – 0,5V

Průměrné proudové zatížení – 8 mA

Maximální proudové zatížení – 0,38A

Momentová konstanta – 19,3 mNm

Momentová konstanta v sobě zahrnuje mechanické i magnetické vlastnosti motoru

(vzduchová mezera u rotoru, magnetická indukce atd.).

Součástí sestavy je také optický snímač, tachodynamo a převodník frekvence/napětí.

Tachodynamo i převodník má parametr převodu 1V/ 1000 ot./min.

Optický snímač dává 100 impulzů/ ot.

Pro úplnost je níže uveden seznam vstupů a výstupů:

IN1- vstup výkonového zesilovače AMPL1

IN2- vstup výkonového zesilovače AMPL2

OUT1- výstup tachodynamu

OUT2- výstup tachodynamu se zařazeným filtrem a zesilovačem

OUT3- analogový výstup optického snímače otáček

OUT4- digitální výstupy optického snímače otáček

DIR- směr otáčení

A, B- sledy impulzů z optického snímače (fázově posunuty o 90°)

Zesilovače AMPL1 a AMPL2 slouží k zesílení proudu, protože zdroj RC má proudové omezení.

Pomocí přechodové charaktericky byla provedena identifikaci tohoto motoru. Chová se jako soustava prvního řádu s přenosem:

$$F_{m(s)} = \frac{0,28}{(2,977s - 1)^3} \quad (14)$$

Pomocí revidované Ziegler-Nicholsové metody byly navrženy regulátory s těmito parametry:

P: $k_r=13$

PI: $k_r=11,7$ $T_I=10,5$

PD: $k_r=15,6$ $T_D=0,75$

PID: $k_r=16,25$ $T_I=6$ $T_D=1,5$

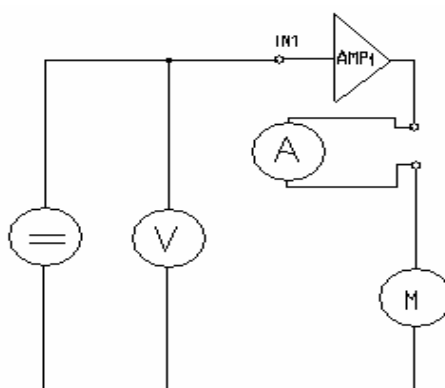
Popis použitých přístrojů a součástek:

Zdroj RC symetrický
Zdroj RC 5V
Interface PC
Základní deska RC
Rozdílový člen
PID regulátor
C kapacitní dekáda
Sada odporů

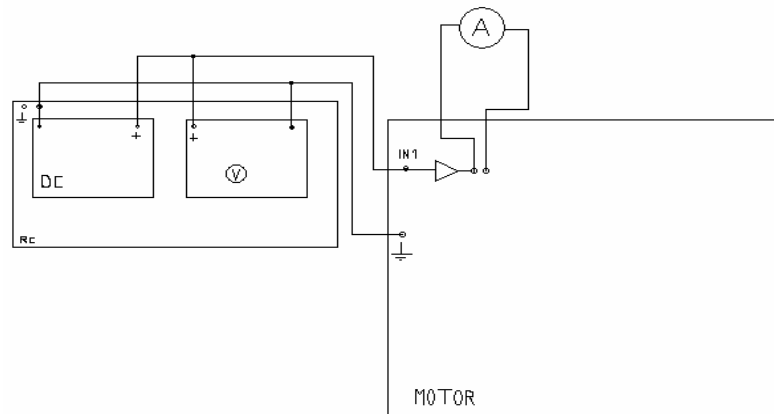
Postup měření:

NASTUDUJTE VLASTNOSTI MOTORU

Motor připojíme ke zdroji symetrického napětí. Na základní desku RC napojíme stejnosměrný zdroj a voltmetr. Zdroj připojíme na vstup IN1 a na zem motoru, která bude spojená se zemí desky RC. Voltmetrem kontrolujeme napětí na stejnosměrném zdroji. Ampérmetr představovaný přístrojem METEX připojíme za zesilovač na sestavě RC motor-generátor.



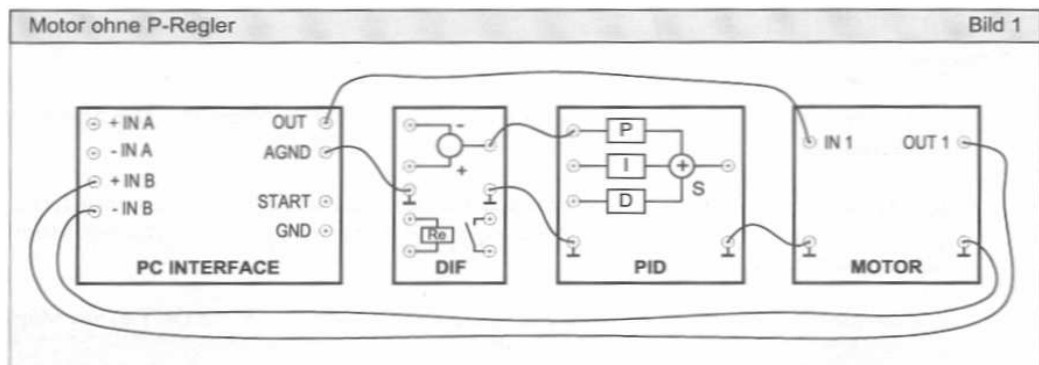
Obr. 18 Zapojení pro měření charakteristiky motoru



Obr. 19 Blokové znázornění měření charakteristiky motoru

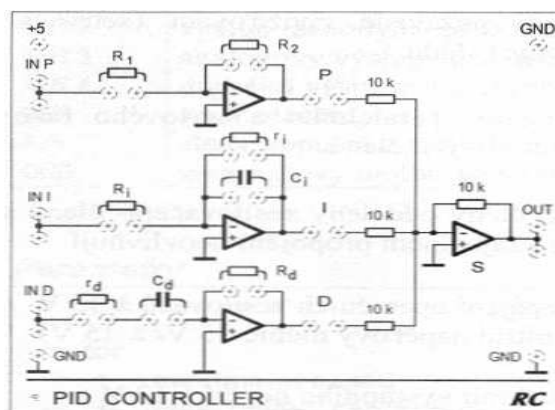
Poté vhodně volíme napětí a odečítáme budící proud a otáčky rotoru.

2/Zapojíme obvod dle následujícího obrázku.



Obr. 20 zapojení pro měření přechodové charakteristiky bez regulátoru

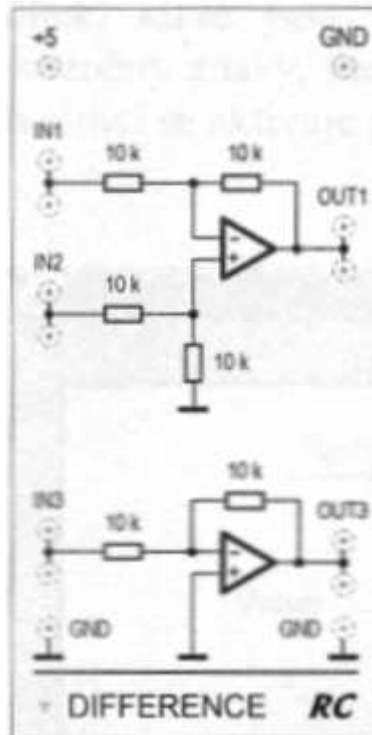
Kde PID člen je :



Konektory:

IN P- vstup P členu
 IN I- vstup I členu
 IN D- vstup D členu
 OUT- výstup synátoru
 +5- napájení +5V
 GND- zem

A DIF člen je:



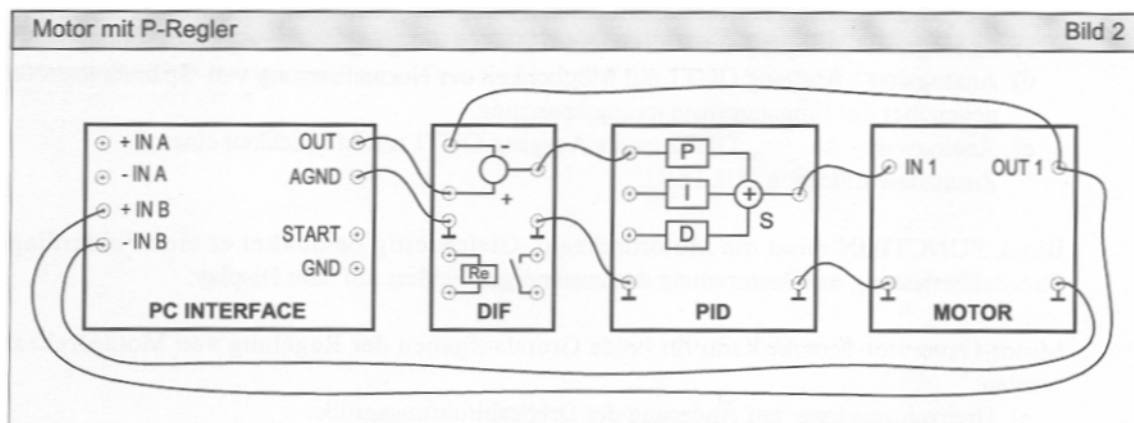
Konektory:

IN 1- Invertující vstup zesilovače
 IN 2- Neinvertující vstup zesilovače
 OUT 1- Výstup zesilovače
 IN 3- Vstup invertoru
 +5- Napájení +5V
 GND- Zem

Poté otevřeme program RC2000 a zvolíme generátor+osciloskop.Otevřeme průběh žádané veličiny pod názvem motor.

Zkontrolujeme, zda jsou osy nastaveny na stejné měřítko.Zvolíme režim sekvence a na první sekvenci změříme tento průběh.

Vypneme zdroj a zapojíme obvod podle následujícího schématu:



Obr. 21 Zapojení s P regulátorem

Nastavíme hodnoty P složky podle zadání:

- a) $R_1 = R_2 = 10k$
- b) $R_1 = 5k, R_2 = 20k$
- c) $R_1 = 2k, R_2 = 20k$

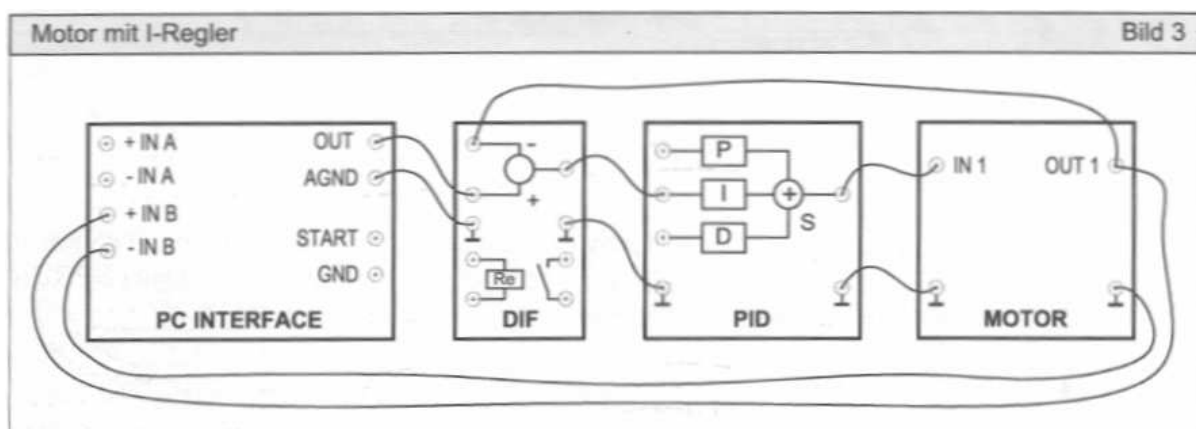
další sekvencí změříme přechodovou charakteristiku s aktuálním nastavením.

PŘI PŘENASTAVOVÁNÍ JE NUTNO ODPOJIT MOTOR OD ZDROJE!

Tento postup se opakuje pro všechna nastavení P regulátoru.

Poté výsledný obrázek uložíme.

3/ V podstatě se opakuje stejný postup jako u předchozího. Zapojení pro I regulátor je :



Obr. 22 Zapojení s I regulátorem

Použijeme tato nastavení:

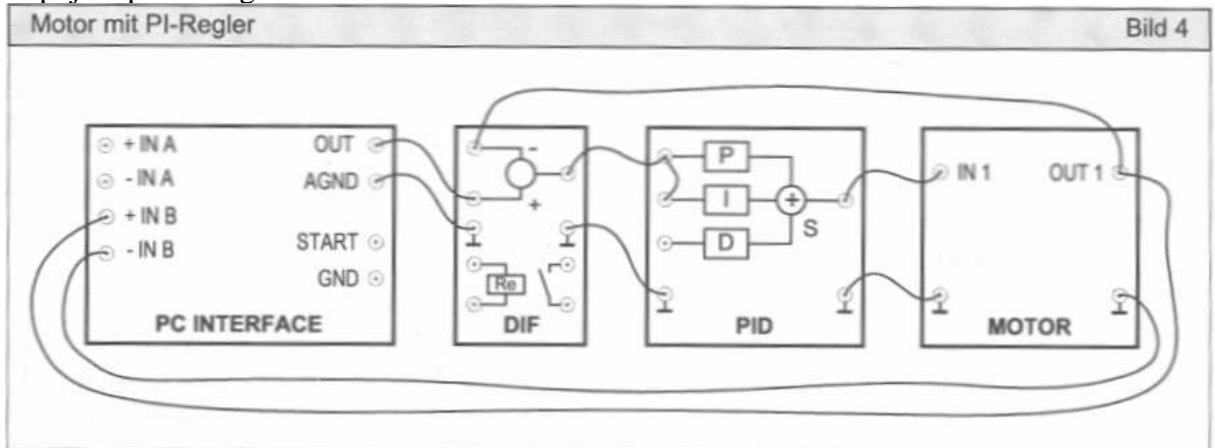
- a) $R_1 = 100k$, $C = 68n$
- b) $R_1 = 500k$, $C = 68n$
- c) $R_1 = 1M$, $C = 68n$

4/Postup je stejný jako u P regulátoru

Použijeme tato nastavení:

- a) PI - $R_i = 100k$, $R_1 = 10k$, $R_2 = 10k$
- b) PI - $R_i = 200k$, $R_1 = 10k$, $R_2 = 10k$
- c) PI - $R_i = 100k$, $R_1 = 2k$, $R_2 = 20k$

Zapojení pro PI regulátor:



Obr. 23 Zapojení s PI regulátorem

Poznámka: kapacita kondenzátoru může být i jiná podle dostupného zařízení. Měla by ale být okolo 100nF

2.2 Vzorový protokol

Úkol:

Úkol:

1. Změřte charakteristiku motoru (závislost momentu na budícím proudu)
2. Ověřte funkci P regulátoru ,pro srovnání uveďte i průběh bez zapojeného regulátoru
 - a) $R_1 = R_2 = 10k$
 - b) $R_1 = 5k, R_2 = 20k$
 - c) $R_1 = 2k, R_2 = 20k$
3. Ověřte funkci I regulátoru ,pro srovnání uveďte i průběh bez zapojeného regulátoru
 - a) $R_1 = 100k, C = 68n$
 - b) $R_1 = 500k, C = 68n$
 - c) $R_1 = 1M, C = 68n$
4. Ověřte funkci PI regulátoru ,pro srovnání uveďte i průběh bez zapojeného regulátoru,
 - a) PI - $R_i = 100k, R_1 = 10k, R_2 = 10k$
 - b) PI - $R_i = 200k, R_1 = 10k, R_2 = 10k$
 - c) PI - $R_i = 100k, R_1 = 2k, R_2 = 20k$
5. Zjistěte vliv D složky u PID regulátoru.

Popis použitých přístrojů a součástek:

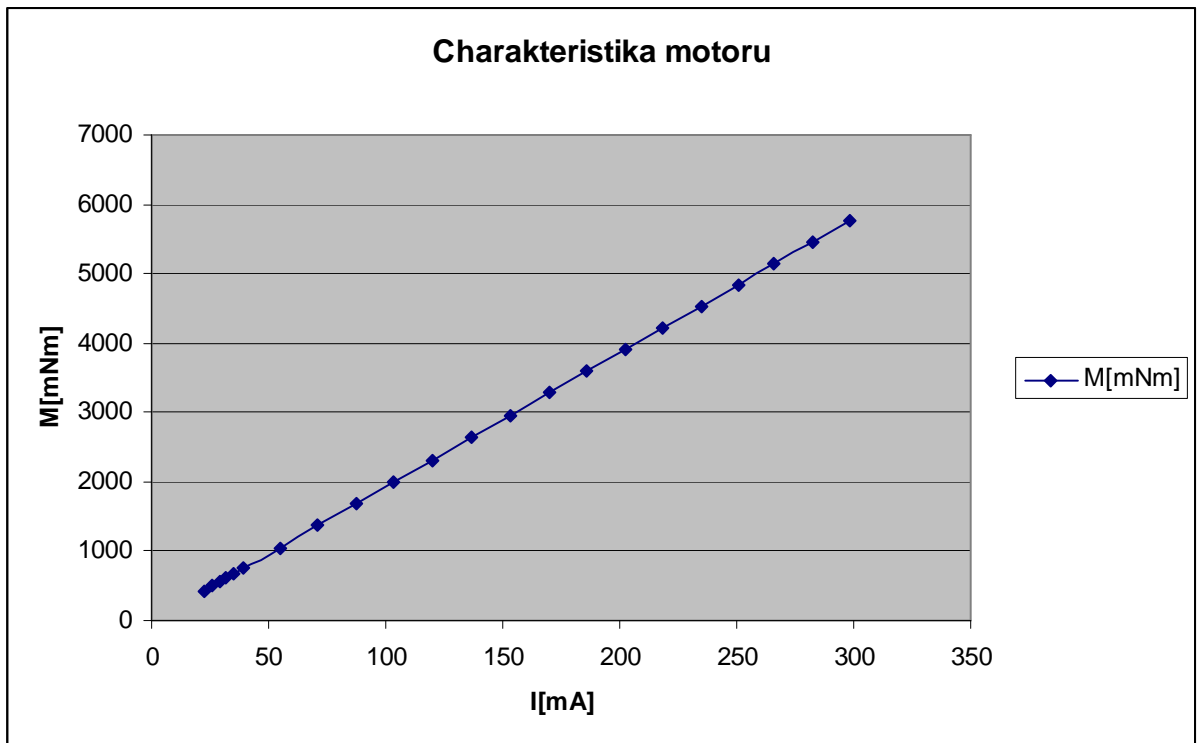
Z1 symetrický zdroj RC
Z napájení ze základní desky RC (5,31V)
C kondenzátor
R rezistor
Analog and Digital unit
RS232
OSC RC200

Zapojení:

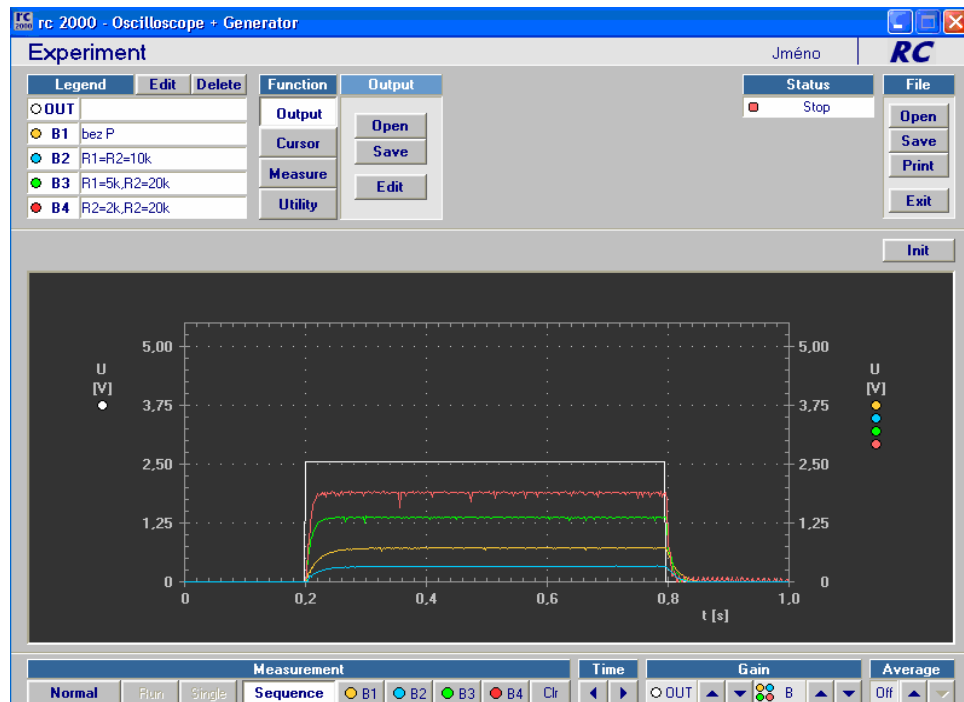
Viz. Zadání laboratorní úlohy

Grafy:

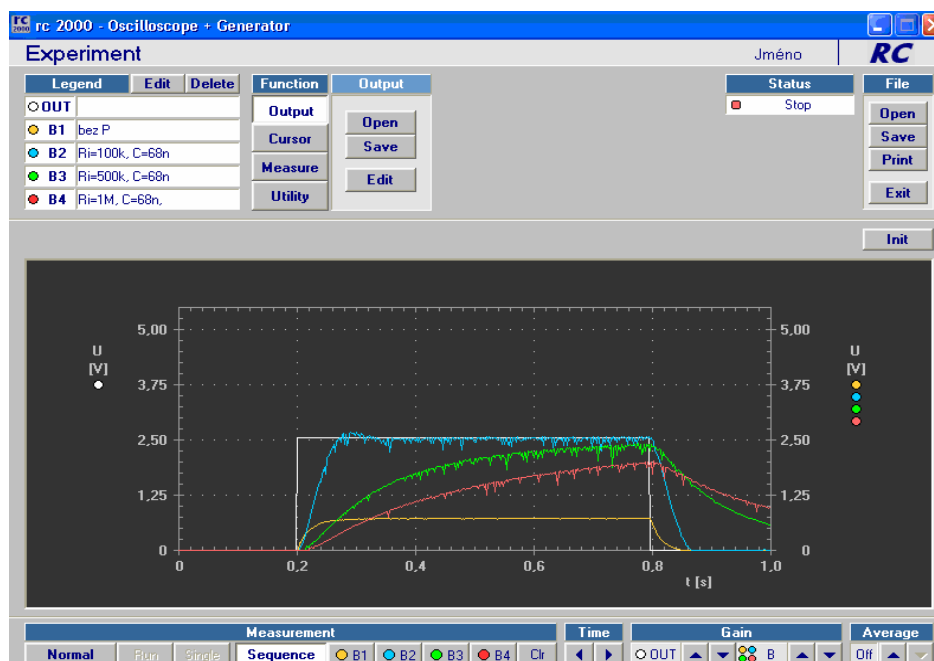
1/charakteristika motoru



2/Měření regulace elektromotoru P regulátorem:



3/Měření regulace elektromotoru I regulátorem:



4/Měření regulace elektromotoru PI regulátorem:



Závěr:

Ad1/ Podle teorie lze z naměřené charakteristiky usoudit, že se jedná o motor s cizím buzením.

Ad2/ Z teorie o P regulátoru je jasné, že nejde dosáhnout nulové regulační odchylky. Bez zapojeného regulátoru (žlutá) se napětí na výstupu vyšplhá jen na zhruba čtvrtinu žádané hodnoty. Z dalších nastavení (z hlediska zesílení) vyznívá nejlépe čtvrté (oranžová). Toto nastavení ale má velkou nevýhodu v kmitání signálu.

Ad3/ U I regulátoru lze dosáhnout nulové regulační odchylky i různých typů průběhů. Opět pro porovnání je změřena přechodová charakteristika bez zapojeného regulátoru (žlutá).

První nastavení (modrá) vyvolává je periodický tlumený signál, druhé nastavení (zelená) signál skoro na mezi periodicity a třetí (oranžová) je tlumený aperiodický signál. Pro rychlé dosažení žádané hodnoty se považuje za ideální průběh prvního nastavení. V případě požadavku na nulový překmit je vhodné druhé nastavení.

Ad4/ U tohoto regulátoru je patrné podstatné zrychlení regulace. Průběhy jsou obdobné jako v předchozím případě. Rozdíl oproti nastavení samostatného I regulatoru je ten že ten, že poslední dva průběhy se liší velmi málo a o oba jsou zhruba na mezi periodicity.

Ad5/ D složka u PID regulátoru se uplatňuje pouze u kmitavého průběhu, kde přispívá ke zmenšení překmitů a rychlejšímu ustálení.

ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl proveden návrh laboratorní úlohy zabývající se řízení otáček stejnosměrného motoru použitého v soustavě motor-generátor obsažené ve stavebnicové sestavě RC. Teoretická část úlohy má seznámit studenty se základními druhy stejnosměrných motorů. V praktické části studenti provedou měření momentové charakteristiky daného motoru, na jejímž základě ověří druh motoru. V regulaci si ověří funkci PID regulátoru a vlivy jednotlivých složek na kvalitu a rychlost regulačního pochodu.

Cílem této práce bylo navrhnout laboratorní úlohu tak, aby studenti pomocí experimentů, prováděných v laboratoři, rozšířili své znalosti teoretické i praktické, a to co nejsrozumitelnějším způsobem .

3 LITERATURA

- [1] Prof. Ing. František Poliak, Doc. Ing. Viliam Fedák CSc., Prof. Ing. Ladilav Zboray CSc. : Elektrické pohony, 3. vydání ,Praha: Alfa 1987
- [2] Říha, J.: Elektrické stroje a přístroje, SNTL, Praha, 1990
- [3] systém EDUCON při FEL ZČU Plzeň na <http://educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2005112604>
- [4] pojednání o krokových motorech na stánkách <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05043/>
- [4] <http://maturitanazamku.kvalitne.cz/pdf/ELN15B.pdf>
- [5] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
- [6] V. Šilhán, F. Bernat, J Vaníček: Elektrotechnika II, SNTL-nakladatelství technické, 1986

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α -úhel kroku

AM-asynchronní motor

f-kmitočet napájecího proudu

f_z -kmitočet kroku

GI-generátor impulzů

I, I₁-vstupní proud

I_z -proud úměrný změně otáček

k-konstanta pro řízení po celých krocích

m-počet fází motoru

M-moment

n-otáčky fázoru

n_s -synchronní otáčky

p-počet pólových dvojic

pp-počet pólových párů

PWM-pulzně šířková modulace

r_0 -zesílení

R_i -brzdící rezistor

R_s -spouštěcí rezistor

R_w -regulátor otáček

s-skluz

$s\%$ -skluz v procentech

TD-tachodynamo

T_D - derivační konstanta

TM-tyrystorový můstek

T_I - integrační konstanta

U_{ws} -napětí z tachodynamama

U_{wz} -napětí úměrné otáčkám

z-počet kroků na otáčku

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vznik rotačního pole v trojfázovém vinutí.....	8
Obr. 2 Charakteristiky Asynchronního motoru	11
Obr. 3 Vliv statorového napětí na velikost otáček.....	11
Obr. 4 stavba synchronního motoru.....	13
Obr. 5 Zapojení stejnosměrných motorů	14
Obr. 6 Charakteristiky stejnosměrného motoru s cizím buzením.....	15
Obr. 7 Brzdění motoru odporem.....	17
Obr. 8 Charakteristiky motoru se sériovým buzením.....	18
Obr. 9 Charakteristiky motoru s kompaudním buzením a/momentová 1-sériové 2- sérioparalelní buzení b/ momentová charakteristika 1- sérioparalelní 2-paralelní buzení.....	18
Obr. 10 Regulace otáček asynchronního motoru frekvenčními měniči.....	22
Obr. 11 Regulace otáček asynchronního motoru změnou napětí na statoru tyristorovým..	23
Obr. 12 Spínání fází krokového motoru pro celý krok.....	24
Obr. 13 Spínání fází krokového motoru v režimu mikrokrokování sinusovou funkcí.....	25
Obr. 14 Příklad PWM modulace.....	26
Obr. 15 Základní regulační obvod	27
Obr. 16 Integrační průběh.....	28
Obr. 17 Charakteristiky motoru s kompaudním buzením a/momentová 1-sériové 2- sérioparalelní buzení b/ momentová charakteristika 1- sérioparalelní 2-paralelní buzení.....	32
Obr. 18 Zapojení pro měření charakteristiky motoru	34
Obr. 19 Blokové znázornění měření charakteristiky motoru.....	35
Obr. 20 zapojení pro měření přechodové charakteristiky bez regulátoru.....	35
Obr. 21 Zapojení s P regulátorem.....	37
Obr. 22 Zapojení s I regulátorem.....	37
Obr. 23 Zapojení s PI regulátorem.....	38

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Typy provedení rotoru nakrátko	12
Tabulka 2 Dělení stejnosměrných motorů podle zapojení buzení vzhledem ke kotvě.....	14