

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Regulátor stejnosměrného elektromotoru

**vedoucí práce: Ing. Antonín Předota, Ph.D.**  
**autor: Bc. Eva Andrllová**

**2012**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Eva ANDRLOVÁ**  
Osobní číslo: **E09B0099P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Regulátor stejnosměrného elektromotoru**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Definujte dynamický model stejnosměrného elektromotoru, který pracuje do zátěže, ve tvaru soustavy obyčejných diferenciálních rovnic.
2. Definujte úlohu řízení otáček ve zpětnovazební smyčce - měření otáček je zatíženo náhodným rušivým signálem (šumem).
3. Navrhněte regulaci pro stabilizaci otáček pro tuto úlohu.
4. Demonstrujte řešení, tedy chování uzavřené regulační smyčky, v prostředí C.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Antonín Předota, Ph.D.**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimír Škocil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řízení stejnosměrného motoru s cizím buzením. Cílem práce je návrh regulátoru proudu a rychlosti a provedení simulace celého pohonu v přechodových a ustálených stavech. Programy na řízení regulace pohonu jsou psány v jazyce C.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. V úvodu jsou objasněny základní pojmy z oblasti regulace a stejnosměrných motorů. Poté je odvozen matematický model cize buzeného motoru a čtyřkvadrantového pulzního měniče. Třetí část se zabývá popsáním návrhu regulátoru proudu a rychlosti. Ve čtvrté části je vytvořena simulace reálného pohonu v okamžitých hodnotách pomocí diferenciálních rovnic.

## **Klíčová slova**

Regulace, regulátor proudu, regulátor rychlosti, stejnosměrný motor s cizím buzením.

## **Abstract**

This bachelor thesis presents the control of DC motor. The aim of this thesis is the design of speed and current controller and simulation of the whole drive in transitional and steady states. Programs for controlling of DC electric drive are written in the language C.

The thesis is divided into four main parts. Basic terms of regulation and DC motor are explained in the introduction. In the next part mathematical models of DC motor and chopper has been made. The third part deals with the design of controller of speed and current. In the fourth part the simulation of real drive has been made for immediate values with differential equations.

## **Key words**

Regulation, speed controller, current controller, DC motor.

## **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 vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

V Plzni dne 27.5.2012

Bc. Eva Andrllová

.....

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Antonínu Předotovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

Obsah.....	7
Seznam zkratk a symbolů.....	8
Úvod.....	10
1 Sestavení regulačního schéma pohonu .....	14
1.1 Matematický model stejnosměrného cize buzeného motoru.....	14
1.2 Matematický model čtyřkvadrantového pulzního měniče .....	16
1.3 PS regulátor.....	19
2 Návrh regulátorů proudu a rychlosti.....	20
2.1 Úprava bloku motoru.....	21
2.2 Návrh regulátoru proudu.....	22
2.3 Návrh regulátoru rychlosti.....	25
3 Simulace reálného pohonu stejnosměrného motoru.....	28
Závěr.....	32
Použitá literatura.....	33
Přílohy.....	34
Příloha A - Simulace pohonu.....	34
Příloha B - Návrh regulátorů.....	38

## Seznam zkratek a symbolů

PWM .....	pulzně šířková modulace
$L_A$ .....	celková indukčnost a obvodu kotvy
$R_A$ .....	celkový odpor obvodu kotvy
$I_d, i_d$ .....	proud kotvy
$U_d$ .....	střední hodnota napětí na výstupu měniče (na svorkách motoru)
$M$ .....	momentu motoru
$M_z$ .....	moment zátěže
$J$ .....	moment setrvačnosti
$u_f$ .....	řídící signál pro měnič
$U_{fmax}$ .....	maximální řídící napětí pro měnič
$U_C$ .....	napětí kondenzátoru na vstupu měniče
$u_p$ .....	pilový signál
$T_d$ .....	dopravní zpoždění
$T_p$ .....	perioda pily
$\tau_{PWM}$ .....	„střední doba“ dopravního zpoždění reakce PWM bloku na změnu $u_f$
$K_{PWM}$ .....	zesílení bloku PWM
$f_{sp}$ .....	spínací frekvence měniče
$U_i$ .....	indukované napětí motoru
$K_{Ri}, K_{R\omega}, K_{Rx}$ , .....	zesílení regulátoru proudu, rychlosti a polohy
$\tau_{Ri}, \tau_{R\omega}, \tau_{Rx}$ , .....	časová konstanta regulátoru proudu, rychlosti a polohy
$K_{\check{c}i}, K_{\check{c}\omega}, K_{\check{c}x}$ , .....	přenos čidla proudu, rychlosti a polohy
$F_{o_i}, F_{o_\omega}, F_{o_x}$ .....	přenos otevřené smyčky proudu, rychlosti a polohy
$A_{o_i}, A_{o_\omega}, A_{o_x}$ .....	zesílení otevřené smyčky proudu, rychlosti a polohy [dB]



$\varphi_{o_i}, \varphi_{o_\omega}, \varphi_{o_x}$ .....	fázové zpoždění otevřené smyčky proudu, rychlosti a polohy
$F_{w_i}, F_{w_\omega}, F_{w_x}$ .....	přenos uzavřené smyčky proudu, rychlosti a polohy
$A_{w_i}, A_{w_\omega}, A_{w_x}$ .....	zesílení uzavřené smyčky proudu, rychlosti a polohy [dB]
$\varphi_{w_i}, \varphi_{w_\omega}, \varphi_{w_x}$ .....	fázové zpoždění uzavřené smyčky proudu, rychlosti a polohy
$\varphi_b$ .....	bezpečnost ve fázi
$\omega_{\tilde{r}}$ .....	$\omega$ , při které $\varphi_{o\_bez\ reg} = \varphi_b$
$\_bez\ reg$ .....	bez vlivu regulátoru (přenos regulátoru nastaven na 1)
$\omega_w$ .....	požadovaná úhlová rychlost
$R_\omega, R_I$ .....	regulátor rychlosti, proudu
$I_w$ .....	požadovaný proud
$k\Phi$ .....	magnetický tok s konstantou
$F_d$ .....	přenos bloku dopravního zpoždění
$\varepsilon$ .....	regulační odchylka
$K_r$ .....	konstanta regulátoru
$\tau_r$ .....	časová konstanta regulátoru
$\tau_{mot}$ .....	časová konstanta motoru
$F_r$ .....	přenos regulátoru
$F_{omot}$ .....	přenos otevřené smyčky motoru
$F_{mot}$ .....	přenos uzavřené smyčky motoru

## Úvod

Stejnoseměrné stroje jsou historicky nejstaršími elektrickými stroji datovaných zhruba v sedmdesátých letech 19. století. V současné době jejich význam poklesl, protože jsou nahrazovány asynchronními nebo synchronními stroji, to se týká hlavně strojů s velkými výkony. Důvodem je složitější konstrukce a nižší provozní spolehlivost kvůli pravidelné údržbě sběracího ústrojí. V oblasti malých výkonů se stejnosměrné stroje stále používají např. jako pomocné motorky v automobilech, v CD mechanikách. [3,4,7] V současnosti jsou stále více používány elektronicky komutované stejnosměrné motory, které jsou však principiálně podobné spíše motorům synchronním.

Konstrukčně se stejnosměrné stroje skládají ze statoru a z rotoru. Na statoru je budicí obvod buď s permanentním magnetem nebo s hlavními póly, které jsou buzeny stejnosměrným proudem. Po obvodu statoru se polarita hlavních pólů střídá. Rotor je zhotovován z plechů, které jsou od sebe vzájemně odizolovány a jsou pevně uchyceny na hřídeli. Vinutí rotoru se ukládá do drážek. Cívky, které tvoří rotorové vinutí, mají své vývody připojeny na komutátor. Komutátor je válec, který je složen z navzájem odizolovaných měděných lamel. Každá lamela má na sebe připojené dva vývody patřící různým cívkám, to znamená, že se celé vinutí rotoru zapojuje přes komutátor do série. Na komutátor dosedají kartáče, jejichž počet se obvykle rovná počtu hlavních pólů. Přes kartáče se přivádí proud do vinutí kotvy. Kartáče spolu s komutátorem tvoří sběrné ústrojí stroje. [8]

Stejnoseměrné motory se rozdělují na motory s cizím buzením, s buzením paralelním, sériovým nebo smíšeným.

Motor s cizím buzením má budicí vinutí napájené z nezávislého stejnosměrného zdroje. Jeho magnetický tok lze tedy regulovat nezávisle na zatížení. Cize buzené motory jsou proto snadno říditelné a jsou používány v průmyslu jako samočinné regulační pohony.

Motor s paralelním buzením má budicí vinutí napájené ze stejného zdroje jako rotor. Vlastnosti a využití má prakticky stejné jako motor s cizím buzením, otáčky však u něj nelze řídit napětím na rotoru.

Motor se sériovým buzením má budicí vinutí zapojené do série k rotoru. Budicí vinutí musí být proto dimenzováno na stejný proud jako vinutí kotvy. Mezi kladné vlastnosti motoru se sériovým buzením patří velký moment při rozběhu. Jeho otáčky výrazně klesají se zatížením. Sériové motory byly dříve využívány hlavně pro pohon vozidel jako jsou tramvaje, trolejbusy či elektrické lokomotivy.

Pro automatické řízení motorů je zapotřebí zavedení systému regulace. Termín regulace znamená udržování fyzikálních veličin na předem daných hodnotách, či zajištění vhodného přechodu na nově stanovené hodnoty podle optimalizačních kritérií (např. jednoduchost, hospodárnost, spolehlivost). Veličina, která je regulátorem udržována v předepsaných podmínkách, se označuje jako regulovaná veličina. Může být libovolného druhu. V elektrických veličinách se jedná hlavně o napětí, proud, el. výkon, v mechanických veličinách lze vyjmenovat otáčky, tlak, moment, v hydraulických veličinách se mluví hlavně o průtoku či hladině a do tepelných regulovatelných veličin lze zařadit teplotu nebo množství tepla.

Průběh regulace spočívá ve vyhodnocování okamžité hodnoty regulované veličiny na základě zpětné vazby. Pomocí níž lze určit regulační odchylku mezi skutečnou a požadovanou hodnotou. Regulátor se snaží odchylku co nejvíce minimalizovat a tím zajišťuje potřebnou přesnost celého systému. Regulátor ovládá akční člen. Podle toho, zda je akční člen pod kontrolou člověka nebo je ovládán samočinně nějakým zařízením, může se regulace rozlišit na ruční a automatickou. Zařízení, které má být regulováno, se nazývá regulovaná soustava. V regulované soustavě mají velký význam poruchové veličiny. Nejedná se o poruchy v pravém slova smyslu (že je něco rozbitého), ale o normální stav soustavy, kdy dojde např. ke změně zatěžovacího momentu.

Existují tři typy regulace, které jsou rozčleněny podle úkolů, které má regulace plnit. Prvním typem je regulace na konstantní hodnotu, při které má být hodnota regulované veličiny udržována na předepsané a stálé hodnotě. Druhým typem je regulace vlečná, kdy se regulovaná veličina mění v závislosti na jiné fyzikální veličině. To znamená, že řídicí veličina  $w$  není konstantní a skutečná hodnota regulované veličiny se musí těmto změnám přizpůsobovat. Posledním typem je regulace programová. Jedná se o zvláštní případ vlečné regulace, kdy je žádaná hodnota předem dána programem. [3,5,6]

Zařízení, které samočinně provádí regulaci se nazývá regulátor. Lze rozeznat velké množství typů regulátorů, které se liší jak svým provedením, tak funkcí. Regulátory je možno rozdělit z několika hledisek. Jedním z nich je přívod energie. Rozeznáváme regulátory přímé a nepřímé. Přímé regulátory se vyznačují tím, že nepotřebují vlastní zdroj energie a energii odebírají z regulované soustavy. Naopak nepřímé regulátory vlastní zdroj energie vyžadují. Další hledisko členění je konstrukční provedení. Podle tohoto kritéria se rozlišují regulátory na mechanické, pneumatické, hydraulické a elektrické. Regulátory analogové a digitální se liší ve tvaru přenosového signálu. U regulátorů se rozeznávají tři druhy chování:

- proporciální (P),
- integrační (I),
- derivační (D).

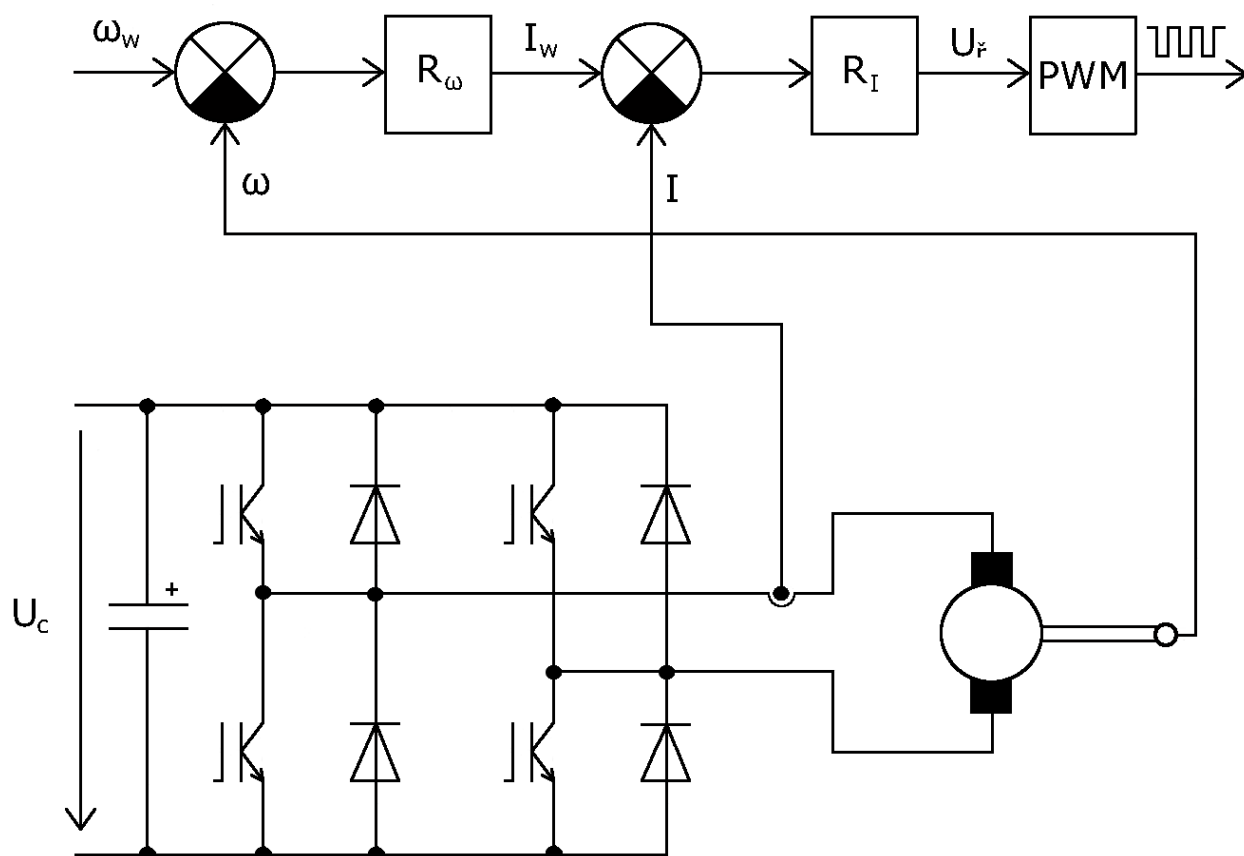
Složením těchto vlastností vznikají kombinované regulátory (např. PI, PD). [6]

P regulátor se chová jako zesilovač, regulační odchylka je přímo úměrná akční veličině. Samotný P regulátor nedokáže docílit nulové regulační odchylky.

I regulátor má akční veličinu přímo úměrnou integraci regulační odchylky. Výhoda I regulátoru je úplná eliminace regulační odchylky, tedy dosažení stavu, kdy je odchylka nulová. Nevýhodou je menší dynamika systému a zhoršení jeho stability.

D regulátor má akční veličinu přímo úměrnou derivaci regulační odchylky. Nelze ho použít samostatně, protože by v ustáleném stavu došlo k rozpojení obvodu. Používá se ve spojení P nebo I regulátorů. Mezi jeho vlastnosti patří zrychlování regulačního děje za cenu zesilování šumu.

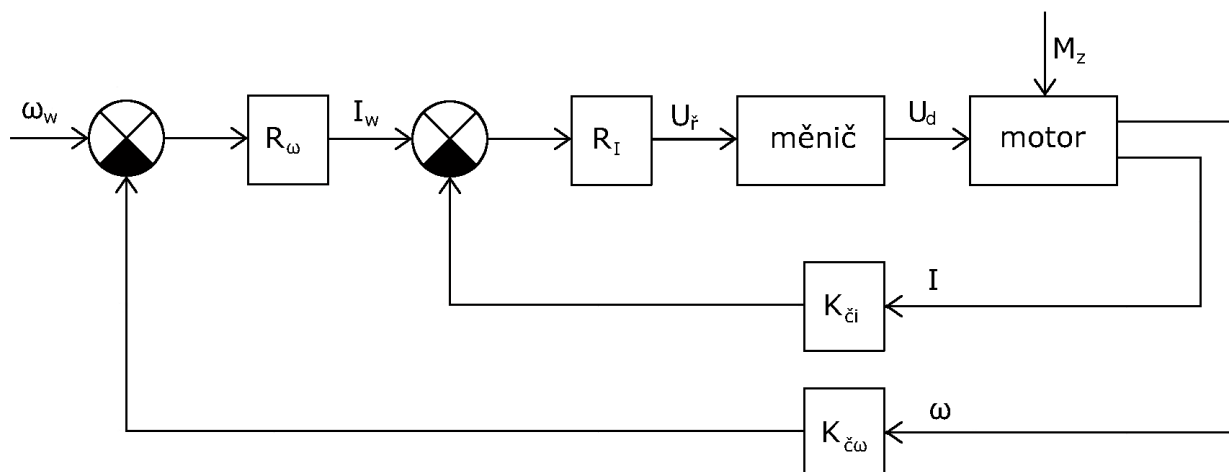
Tato bakalářská práce se zabývá návrhem regulátoru proudu a rychlosti pro stejnosměrný motor s cizím buzením a následnou simulací celého pohonu v přechodových a ustálených stavech. Motor je napájen pomocí čtyř-kvadrantového pulzního měniče (H můstku). Pro simulaci je používáno pouze dvoustavové řízení pulzního měniče. Na výstupu měniče je tedy napětí kondenzátoru buď kladné nebo záporné. Regulace motorů je většinou realizována pomocí smyčky regulace proudu a nadřazenou smyčkou regulace otáček. V případě potřeby může obsahovat ještě smyčku regulátoru polohy. Schéma zapojení celého systému, včetně regulace, je na obr. 1.



Obr. 1: Schéma zapojení pohonu s cize buzeným motorem s regulací otáček

## 1 Sestavení regulačního schéma pohonu

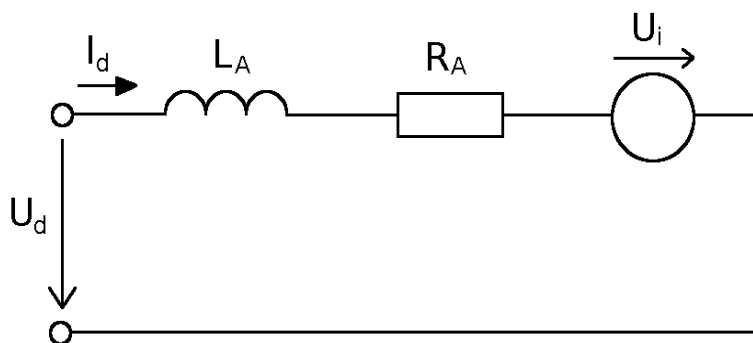
Pro simulace je potřeba vypočítat všechny „měřené“ veličiny z obr.1. Schéma z obr. 1 bylo proto upraveno dle obr 1.1. Bloky měnič a motor představují matematické modely měniče a části motoru a budou odvozeny dále.



Obr. 1.1: Zjednodušené regulační schéma pohonu se stejnosměrným motorem

### 1.1 Matematický model stejnosměrného cize buzeného motoru

Náhradní schéma stejnosměrného cize buzeného motoru je na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Náhradní schéma stejnosměrného motoru

Prvky  $L_A$  a  $R_A$  zahrnují celkovou indukčnost a odpor obvodu kotvy. Z náhradního schéma na obr. 1.2 lze sestavit rovnici:

$$U_d = R_A i_d + L_A \frac{di_d}{dt} + U_i \quad (1.1)$$

Pomocí Laplaceovy transformace vztahu (1.1) lze vypočítat proud kotvy  $i_d$ :

$$U_d - U_i = R_A I_d + L_A p I_d \quad (1.2)$$

$$I_d = \frac{U_d - U_i}{R_A + p L_A} \quad (1.3)$$

Přenos motoru lze určit jako podíl proudu kotvy  $I_d$  a napájecího napětí  $U_d$ :

$$F_{mot} = \frac{I_d}{U_d - U_i} = \frac{1}{R_A + p L_A} = \frac{1/R_A}{1 + p L_A/R_A} = \frac{K_{mot}}{1 + p \tau_{mot}} \quad (1.4)$$

Z vypočítaného proudu lze určit moment motoru ze vztahu:

$$M = k \phi I_d \quad (1.5)$$

Ze znalosti momentu motoru  $M$ , po odečtení momentu zátěže  $M_z$ , je možno vypočítat rychlost motoru  $\omega$  jako:

$$\omega = \int \frac{1}{J} (M - M_z) dt \quad (1.6)$$

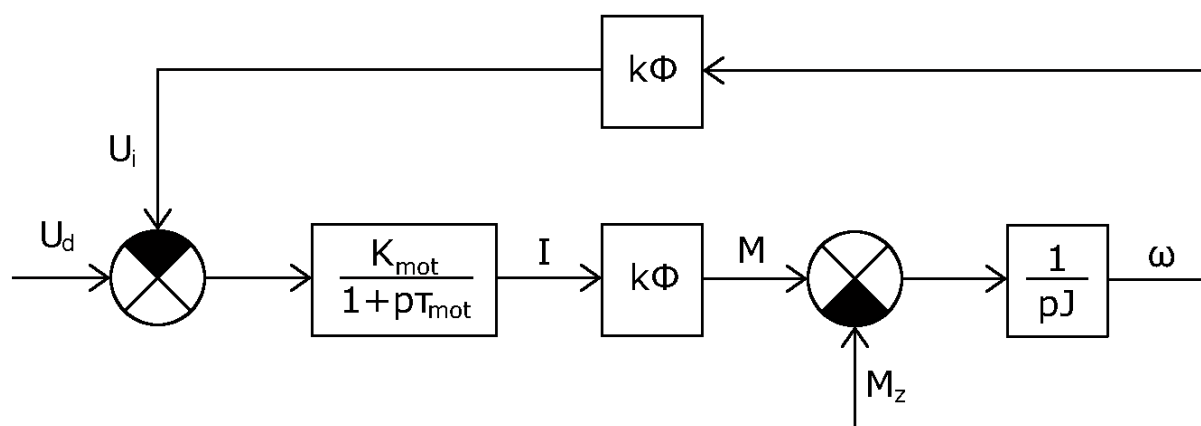
Je vhodné vztah (1.6) upravit pomocí Laplaceovy transformace na tvar:

$$\omega = \frac{1}{pJ} (M - M_z) \quad (1.7)$$

Pro výpočet indukovaného napětí lze použít vztah:

$$U_i = k \phi \omega \quad (1.8)$$

Ze vztahů je dále možné sestavit blokové schéma modelu stejnosměrného cize buzeného motoru dle obr. 1.3.



Obr. 1.3: Blokové schéma cize buzeného motoru

Pro řešení simulace pohonu se stejnosměrným motorem pomocí diferenciálních rovnic lze ze vztahu (1.1) určit:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{U_d - U_i - R_A i_d}{L_A} \quad (1.9)$$

Proud  $i_d$  tekoucí indukčností kotvy se nemůže měnit skokem. Pro výpočet proudu v čase  $t + \Delta t$ , za podmínky dostatečně malého  $\Delta t$  lze použít vztah:

$$i_d(t + \Delta t) \doteq i_d(t) + \frac{di_d}{dt} \Delta t \quad (1.10)$$

Uvedené rovnice je možno zapsat v jazyce C:

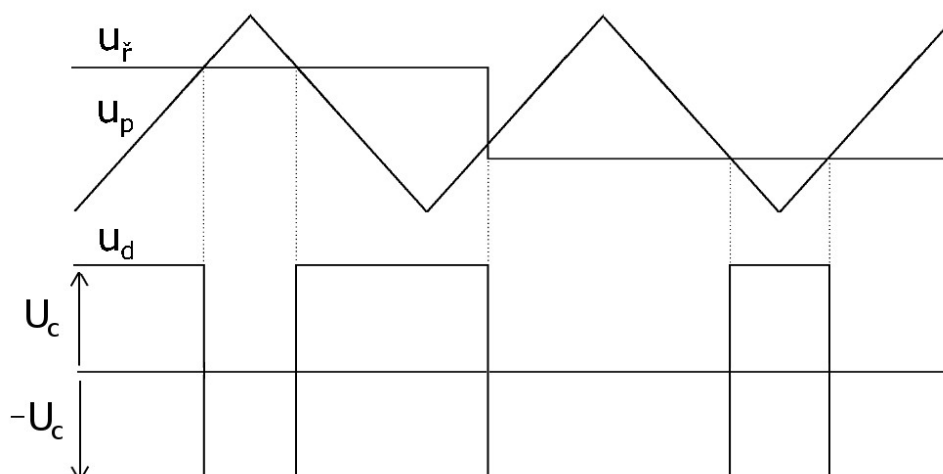
```
i += (ud-ui-R*i)*dt/L;
M = kfi*i;
w += (M-Mz)*dt/J;
ui = kfi*w;
```

## 1.2 Matematický model čtyřkvadrantového pulzního měniče

Pulzní měnič je vhodné řídit pomocí PWM, která zajistí konstantní spínací frekvenci a požadovanou velikost napětí na napájecích svorkách motoru.

Spínání pomocí PWM lze realizovat porovnáváním požadovaného průběhu  $u_f$  s pilovitým signálem (viz obr. 1.4) Z hlediska lepšího umístění pulzu je vhodnější symetrická pila, ale pro jednoduchost bývá většinou realizována jako nesymetrická. Pilový signál je možno vytvořit pomocí čítače při diskrétní regulaci, nebo pomocí cyklicky zkratovaného kondenzátoru připojeného přes rezistor k napájecímu napětí při analogové regulaci. Při koincidenci pilového signálu s řídicím signálem dochází k přepnutí tranzistorů pulzního měniče a napětí na motoru změní svoji polaritu.





Obr. 1.4: Spínání PWM

Při volbě mezí pilovitého signálu je vhodné dbát na dobré zvolení mezí. Napětí na výstupu měniče může dosáhnout hodnot v rozsahu  $\langle -U_c; U_c \rangle$ . Pokud toho lze dosáhnout, měly by meze odpovídat dosažitelným hodnotám na výstupu měniče, resp. dovolí-li to řídicí obvody (rozsah čítače), pak je vhodnější zvolit meze pilového signálu jako  $\pm U_{řmax}$ . V případě, že tato možnost využít nelze (napájecí napětí s jednou polaritou, čítač neumožňující čítat ze záporných hodnot), musí být signál  $u_ř$  posunut o polovinu rozsahu pilového signálu. Dále v práci bude počítáno s pilovým signálem v rozsahu  $\pm U_{řmax}$ . Pak v ustálených stavech poměrná hodnota řídicího napětí odpovídá poměrné střední hodnotě výstupního napětí měniče, tedy:

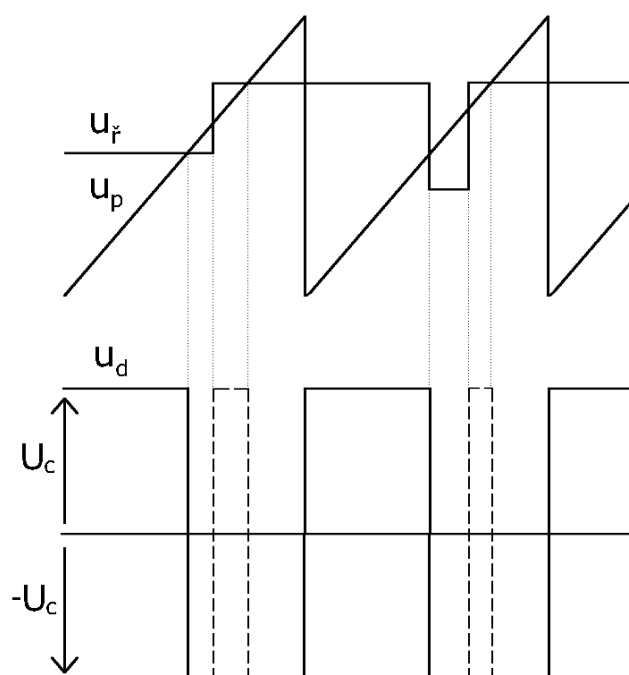
$$\frac{u_ř}{U_{řmax}} = \frac{U_d}{U_c} \quad (1.11)$$

kde  $U_d$  je střední hodnota napětí na výstupu pulzního měniče.

Pomocí vztahu (1.11) lze určit napěťový přenos bloku měniče jako poměr výstupního napětí a vstupního řídicího signálu:

$$K_{PWM} = \frac{U_d}{u_ř} = \frac{U_c}{U_{řmax}} \quad (1.12)$$

K přepnutí měniče dochází pouze při koincidenci pilového signálu  $u_p$  s řídicím signálem  $u_ř$ . Pro dodržení konstantní frekvence je navíc nutno zabránit opětovnému přepínání měniče při rychlých změnách řídicího signálu  $u_ř$  (viz obr. 1.5).



Obr. 1.5: Zabránění opětovnému přepínání

Změna  $u_f$  se projeví až při další koincidenci s  $u_p$ . Dochází zde tedy k „dopravnímu zpoždění“ mezi řídicím napětím a střední hodnotou výstupního napětí. Délka tohoto zpoždění závisí na poslední koincidenci a na velikosti změny  $u_f$  a je v intervalu  $T_d = \langle 0; T_p \rangle$ . Pro zjednodušení se používá „střední doba“  $\tau_{PWM}$ :

$$\tau_{PWM} = \frac{T_p}{2} = \frac{1}{2f_{sp}} \quad (1.13)$$

kde  $f_{sp}$  je spínací frekvence měniče. Přenos bloku dopravního zpoždění lze pak ještě dále zjednodušit dle [1] rozvojem podle Taylorovy resp. McLaurinovy řady:

$$F_d = e^{-p\tau_{PWM}} = \left(1 + p\tau_{PWM} + p^2 \frac{\tau_{PWM}^2}{2!} + \dots\right)^{-1} \quad (1.14)$$

Běžné spínací frekvence měniče jsou kolem 1-4 kHz. Pak  $\tau_{PWM}$  vychází v řádu tisícín. Pro běžné výpočty se proto mohou vyšší řády ve vztahu (1.14) zanedbat. Pro celkový přenos pulzního měniče lze napsat vztah:

$$F_{PWM} = \frac{K_{PWM}}{1 + p\tau_{PWM}} \quad (1.15)$$

Pro možnost simulace řízení pulzního měniče pomocí PWM modulace v okamžitých stavech je nutno generovat pilový signál. To lze realizovat výpočetní smyčkou, ve které bude postupně přičítána konstanta odpovídající úrovni požadovaného maximálního řídicího signálu  $U_{fmax}$  a požadované spínací frekvenci pulzního měniče  $f_{sp}$ .

$$u_p(t + \Delta t) = u_p(t) + 2U_{\dot{r}_{max}} \Delta t f_{sp} \quad (1.16)$$

Po dosažení hodnoty  $u_p = U_{\dot{r}_{max}}$  je  $u_p$  nastaveno na  $-U_{\dot{r}_{max}}$ .

Uvedené rovnice je možno zapsat v jazyce C:

```

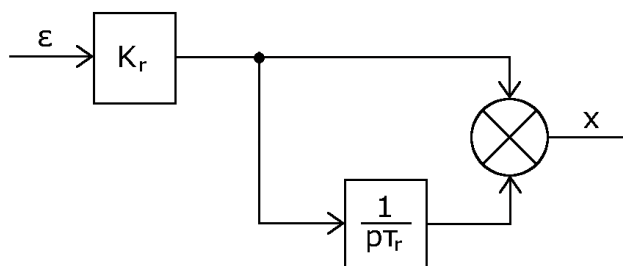
if (ur >= up)
{
    if (m)
        ud = Uc;
}
else
{
    ud = -Uc;
    m = 0;
}
up += 2 * Umax * dt * fsp;
if (up > Umax)
{
    up = -Umax;
    m = 1;
}

```

Konstanta  $m$  je v programu použita pro, již zmíněné, zabránění opětovného přepínání měniče při rychlých změnách řídicího signálu  $u_r$ .

### 1.3 PS regulátor

PS regulátor je diskretní variantou PI regulátoru. Integrace je zde nahrazena sumací. Často bývá označován jen jako PI regulátor. Při návrhu programu lze vycházet z obecné struktury PI regulátoru z obr. 1.6.



Obr. 1.6: PI regulátor

Přenos bloku regulátoru lze určit jako:

$$F_r = K_r + \frac{K_r}{p \tau_r} \quad (1.17)$$

Výstupní signál regulátoru lze po převedení do časové oblasti a následné diskretizaci určit jako:

$$X(p) = K_r \epsilon(p) + \frac{K_r}{p \tau_r} \epsilon(p) \quad (1.18)$$

$$x(t) = K_r \epsilon(t) + \frac{K_r}{\tau_r} \int \epsilon(t) dt \quad (1.19)$$

$$x(t) = K_r \epsilon(t) + \frac{K_r}{\tau_r} \sum_{l=0}^t \epsilon(l) \Delta t \quad (1.20)$$

Při sestavování programu pro PS regulátor je nutné zahrnout omezovač výstupního signálu a omezovač sumační složky. Lze použít algoritmus, který při překročení horní, nebo spodní meze omezovače výstupního signálu přestane přičítat sumační složku a výstupní signál nastaví na horní resp. spodní mez. Možný zápis v jazyce C je:

```
//----PS-regulator i-----
ei = (iw - i*Kci);
ur = Kri*(ei + Si/tauri);
if(ur > Urmax)
ur = Urmax;
else
if (ur < -Urmax)
ur = -Urmax;
else
Si += ei*dt;
```

## 2 Návrh regulátorů proudu a rychlosti

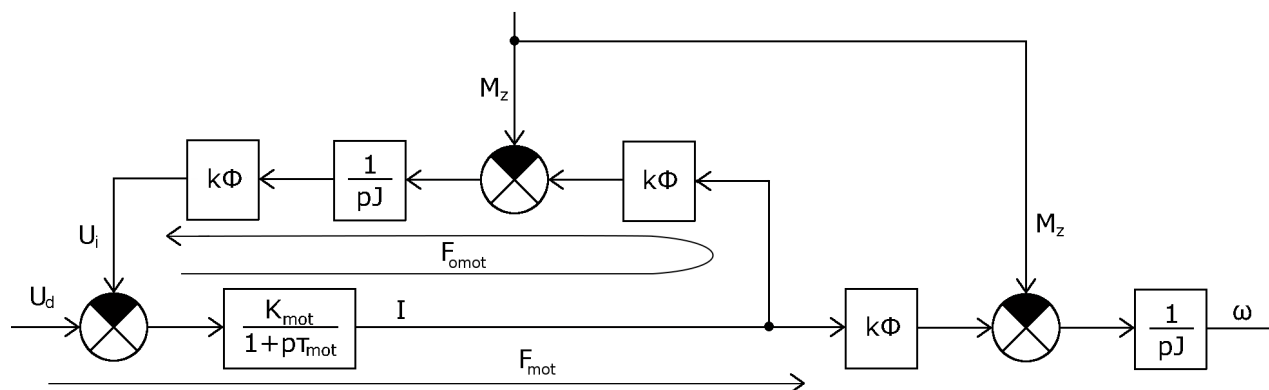
Pro návrh regulátorů lze použít Nyquistovo kritérium stability. Při návrhu regulátorů proudu a rychlosti je vhodné rozdělení regulačního schéma na vnitřní proudovou smyčku a na nadřazenou smyčku regulace rychlosti. Při návrhu regulátoru proudu lze pomocí přenosů jednotlivých bloků určených v kap. 1 nejprve sestavit amplitudovou a fázovou logaritmickou frekvenční charakteristiku

(Bodeho diagram) pro přenos v otevřené smyčce. Přenos regulátoru je nastaven jako 1 (resp. zesílení regulátoru je voleno 1 a časová konstanta regulátoru jako nekonečná). Pro zvolenou bezpečnost ve fázi je pak z této charakteristiky možno určit potřebné zesílení a časovou konstantu regulátoru. Po přenastavení hodnot regulátoru lze určit přenos a vykreslit frekvenční charakteristiky pro uzavřenou proudovou smyčku proudu. Celkový přenos uzavřené smyčky proudu je pak použit jako blok při návrhu smyčky rychlosti a celý proces se opakuje (sestavení Bodeho diagramu pro otevřenou smyčku a přenosu regulátoru rychlosti nastaveného na 1 a výpočet zesílení a časové konstanty regulátoru rychlosti pro zvolenou bezpečnost ve fázi). Osa  $\omega$  je logaritmická, proto je vhodnější použít při výpočtu proměnný krok. Zápis výpočtu v jazyce C:

w += h\*w;

## 2.1 Úprava bloku motoru

Z hlediska rozdělení na jednotlivé bloky, pro návrh regulátoru proudu a rychlosti, je vhodné zpětnou vazbu od indukovaného napětí zavést už v místě vypočítaného proudu motoru  $I_d$ . Výsledné blokové schéma je na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Výsledné blokové schéma stejnosměrného cizě buzeného motoru

Vztah (1.4) lze tedy upravit:

$$F_{omot} = \frac{K_{mot}}{1 + p\tau_{mot}} \frac{(k\Phi)^2}{pJ} \quad (2.1)$$

$$F_{mot} = \frac{F_{omot}}{1 + F_{omot}} \frac{pJ}{(k\Phi)^2} \quad (2.2)$$

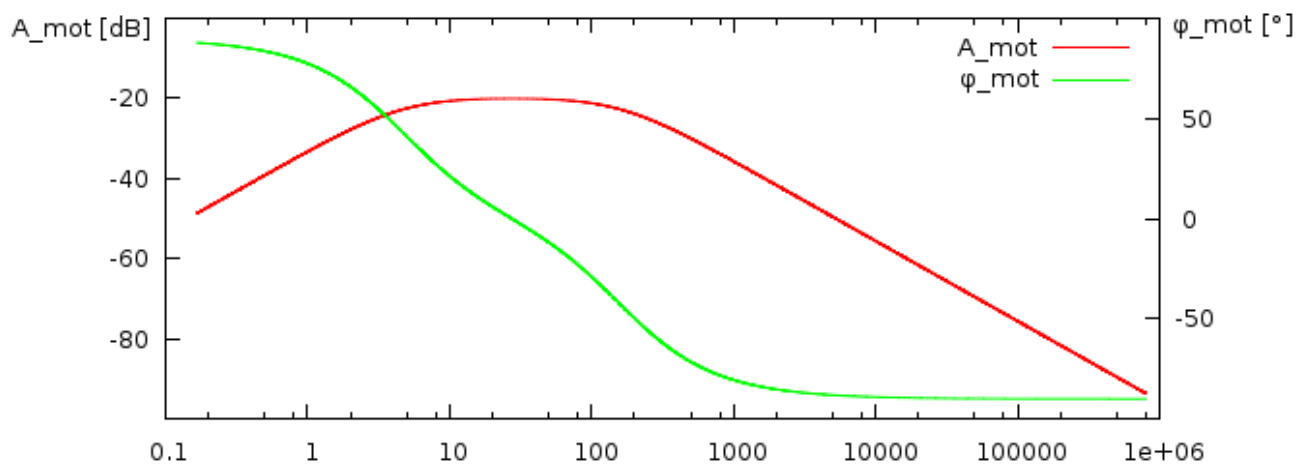
Uvedené vztahy je možno, pro ustálené stavy, zapsat v jazyce C jako:

```
Fomot = (Kmot/(1+Tmot*w*_Complex_I))*kfi*kfi*(1/(_Complex_I*w*J));
Fmot = Fomot*_Complex_I*w*J/((1+Fomot)*kfi*kfi);
```

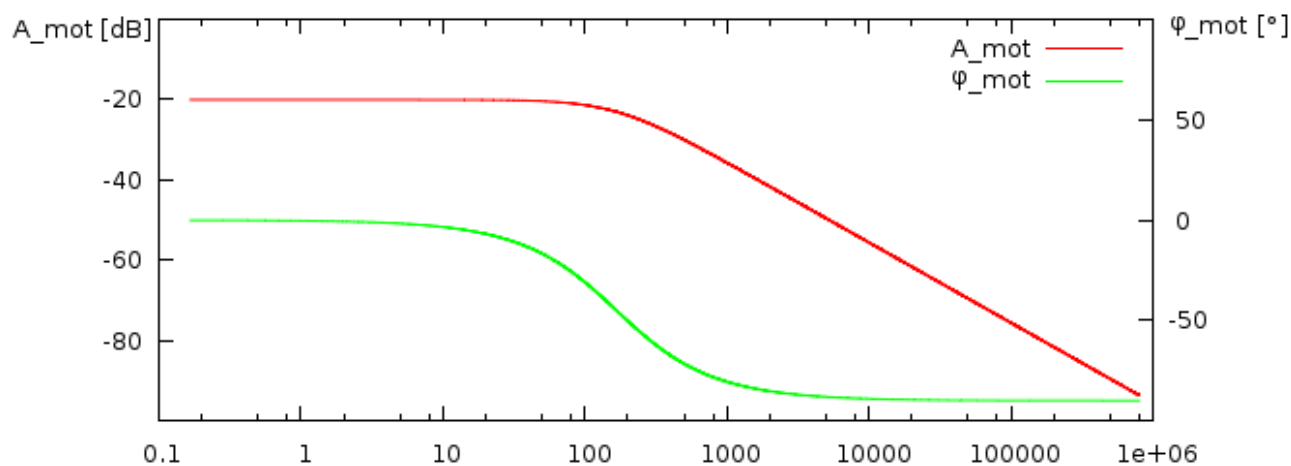
Zpětná vazba od indukovaného napětí  $U_i$  lze při návrhu regulátoru zanedbat, protože změny proudu kotvy jsou mnohem rychlejší než změny rychlosti motoru. Místo vztahu (2.2) pak postačí vztah (1.4). Program v jazyce C pak bude značně jednodušší:

```
Fmot = Kmot / (1 + Tmot * w * _Complex_I);
```

Na obr. 2.2 je amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika bloku motoru bez zanedbání smyčky  $U_i$ , na obr. 2.3 jsou stejné charakteristiky při zanedbání vlivu  $U_i$ .



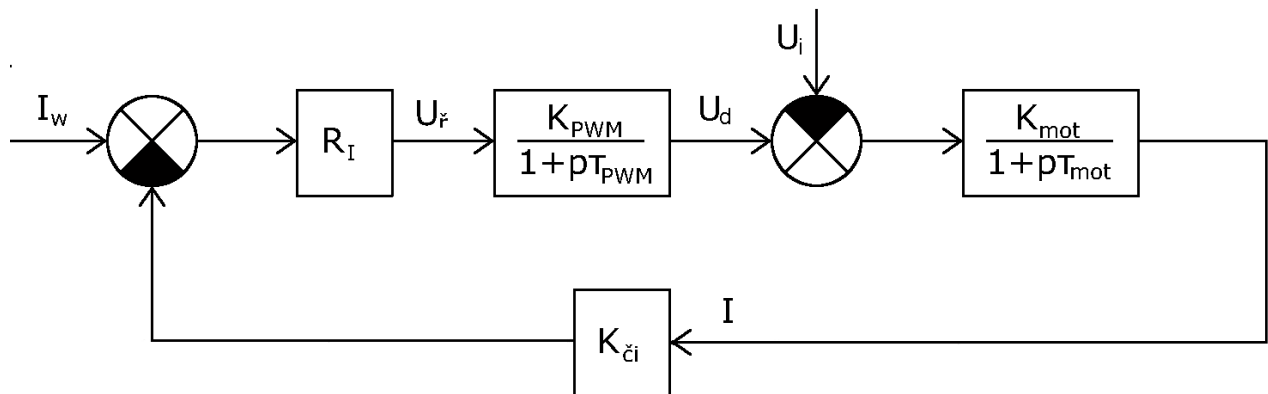
Obr. 2.2: Amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika bloku motoru bez zanedbání smyčky  $U_i$



Obr. 2.3: Amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika bloku motoru při zanedbání vlivu smyčky  $U_i$

## 2.2 Návrh regulátoru proudu

Z odvozených bloků měniče a motoru a ze znalosti zesílení čidla proudu lze namalovat regulační schéma pro vnitřní proudovou smyčku dle obr. 2.4.



Obr. 2.4: Regulační schéma pro vnitřní proudovou smyčku

Z něj je možno určit přenos  $F_{o\_i\_bez\_reg}$ , zesílení  $A_{o\_i\_bez\_reg}$  a fázové zpoždění  $\varphi_{o\_i\_bez\_reg}$  otevřené smyčky (o) proudu ( $_i$ ) bez regulátoru (přenos regulátoru je nejprve volen 1). Při zanedbání vlivu zpětné vazby indukovaného napětí  $U_i$  lze vypočítat fázové zpoždění:

$$\varphi_{o\_i\_bez\_reg} = -\arctg(\omega\tau_{pwm}) - \arctg(\omega\tau_{mot}) \quad (2.3)$$

Fázové zpoždění  $\varphi_{o\_i\_bez\_reg}$  je v programu vypočítáno v radiánech a je ho tedy třeba přepočítat na stupně. Po těchto úpravách je  $\varphi_{o\_i\_bez\_reg}$  porovnáváno s požadovanou bezpečností ve fázi  $\varphi_b$  a při jejím překročení je zjištěna  $\omega_r$  (řezu). Uvedené vztahy je možno zapsat v jazyce C:

```
//pocitani fi motoru + pwm do w = wr
while (fio_i > (-180 + fib)) // smycka pocitajici wr - rezu
{
    fio_i = -atan(w * Tpwm) - atan(w * Tmot);
    fio_i = fio_i * 180 / M_PI; // prepočet z radianu na stupne
    w += h * w; // urcity pocet vypoctu na dekadu
}
```

Následně je vypočítáno zesílení otevřené smyčky proudu  $A_{o\_i\_bez\_reg}$  pro  $\omega = \omega_r$ , ze kterého je možno určit zesílení regulátoru proudu  $K_{ri}$ :

$$A_{o\_i\_bez\_reg}(\omega_r) = 20 \log \left| \frac{K_{pwm}}{1 + j\omega_r\tau_{pwm}} \frac{K_{mot}}{1 + j\omega_r\tau_{mot}} K_{\chi i} \right| = -20 \log(K_r) \quad (2.4)$$

$$K_{ri} = 10^{-A_{o\_i\_bez\_reg}(\omega_r)/20} \quad (2.5)$$

Časová konstanta regulátoru  $\tau_{ri}$  je volena ve vzdálenosti dvou dekád od  $\omega_r$ , aby nedošlo ke zhoršení bezpečnosti ve fázi a zároveň aby integrační složka měla velký vliv na kompenzaci poruchových veličin.

$$\tau_{ri} = 100/\omega_f \quad (2.6)$$

Vztahy lze zapsat v jazyce C:

```
// vypocet Ao, Kri a Tri pro w=wr
Ao = 20*log10(cabs((Kpwm/(1+w*Tpwm*_Complex_I))*Kci*~
~(Kmot/(1+w*Tmot*_Complex_I))));
Kri = pow(10.0,-Ao/20); // vypocet Kri ze zesileni
Tri = 100./w;          // vypocet Tri z wr
```

Po výpočtu  $\tau_{ri}$  a  $K_{ri}$  je možno určit přenos otevřené smyčky proudu včetně vlivu regulátoru, pro přenos motoru spočítaný dle (1.4), nebo (2.2). Dále je možno určit přenos, zesílení a fázové zpoždění uzavřené smyčky proudu.

$$F_{o_i} = \frac{K_{PWM}}{1 + p\tau_{PWM}} F_{mot} \left( K_{ri} + \frac{K_{ri}}{p\tau_{ri}} \right) \quad (2.7)$$

$$F_{w_i} = \frac{F_{o_i}}{(1 + F_{o_i})K_{\check{c}i}} \quad (2.8)$$

$$A_{w_i} = 20 \log |F_{w_i}| \quad (2.9)$$

$$\varphi_{w_i} = \arctg \left( \frac{\Im(F_{w_i})}{\Re(F_{w_i})} \right) \quad (2.10)$$

Výstup funkce  $\arctg$  nemusí být ve vhodném rozsahu (např.  $\arctg(1)$  lze vyhodnotit jako  $45^\circ$ , nebo jako  $-135^\circ$ ) a je ho tedy potřeba upravit. Uvedené vztahy je možno zapsat v jazyce C:

```
// pocitani prenosu a zes. s otevrenou smyckou
Fo_i = (Kpwm/(1+Tpwm*w*_Complex_I))*Fmot*~
~(Kri + Kri/(w*Tri*_Complex_I))*Kci;

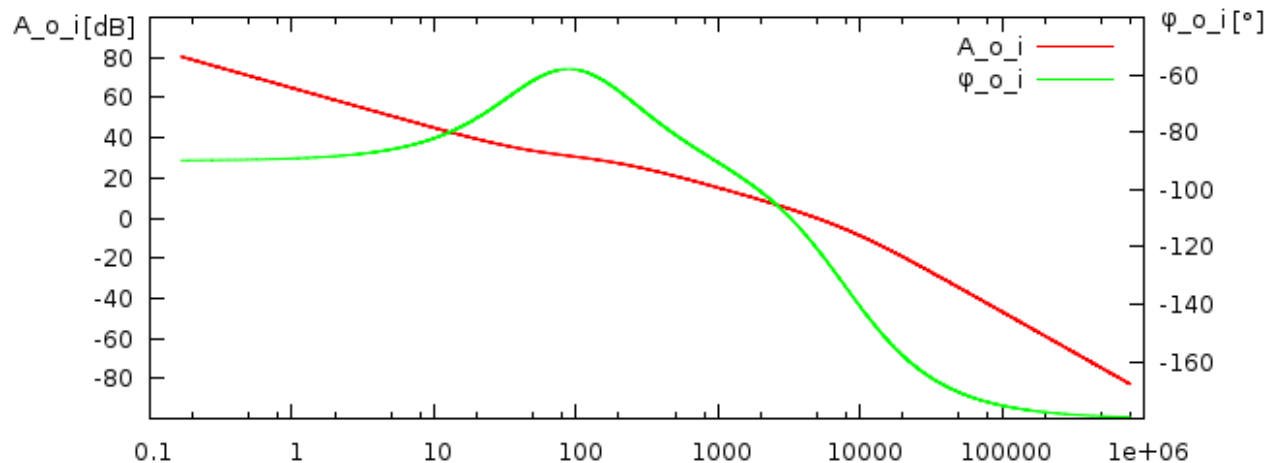
// pocitani prenosu a zes. s uzavrenou smyckou
Fw_i = Fo_i/(Kci*(1 + Fo_i)); // prenos uzavrene smycky
Aw = 20*log10(cabs(Fw_i));    // zesileni uzavrene smycky

// fi uzavrene smycky
fiw_i = atan(cimag(Fw_i)/creal(Fw_i));
fiw_i = fiw_i*180/M_PI; // prepocet z radianu na stupne
if (fiw_i > 0)           // uprava fi na spravne hodnoty
```

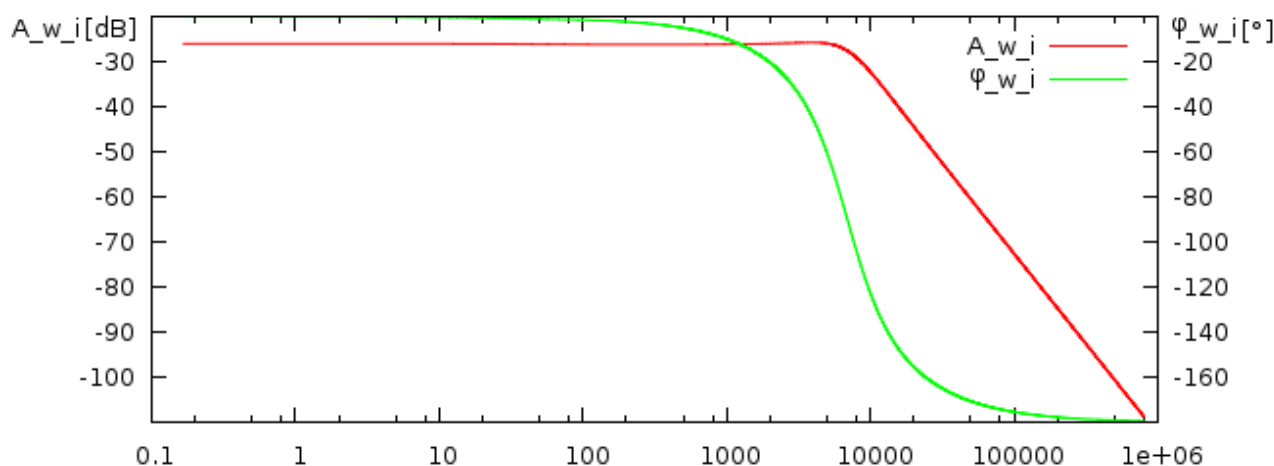


```
fiw_i == 180;
```

Na obr. 2.5 je zobrazena amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika pro otevřenou a na obr. 2.6 pro uzavřenou smyčku proudu.



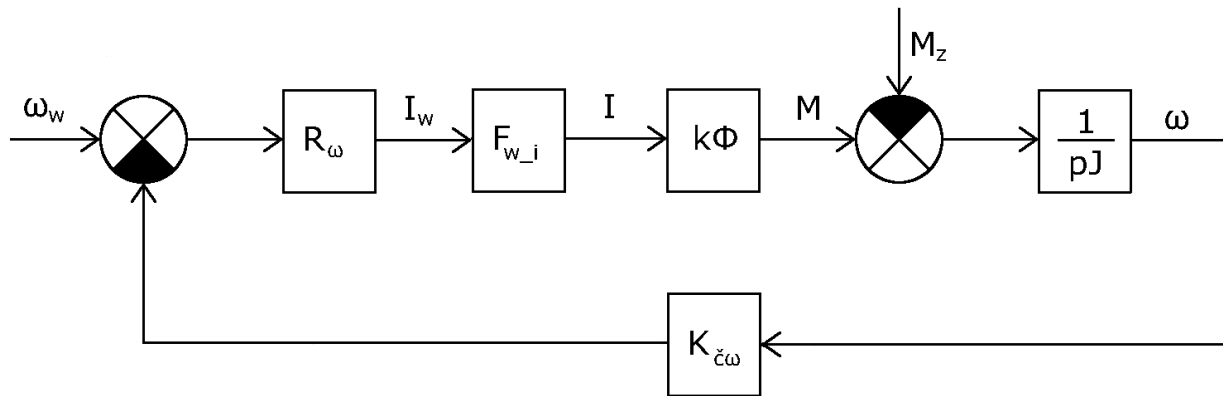
Obr. 2.5: Amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika pro otevřenou smyčku proudu



Obr. 2.6: Amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika pro uzavřenou smyčku proudu

### 2.3 Návrh regulátoru rychlosti

Pro návrh regulátoru rychlosti lze použít podobný postup jako při návrhu regulátoru proudu. Uzavřená proudová smyčka je při výpočtech brána jako jeden ucelený blok. Schéma je na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Regulační schéma pro nadřazenou smyčku rychlosti

Přenos regulátoru rychlosti je zvolen jako 1 a je spočítán přenos otevřené smyčky otáček  $F_{o_{\omega\_bez\_reg}}$ , ze kterého je vypočítáno fázové zpoždění  $\varphi_{o_{\omega\_bez\_reg}}$ . Dle požadované bezpečnosti ve fazi  $\varphi_b$  je zjištěna  $\omega_{\check{r}}$  (řezu) a z vypočítaného  $A_{o_{\omega\_bez\_reg}}$  je možno určit  $K_{r\omega}$  a  $\tau_{r\omega}$  stejným způsobem jako při návrhu regulátoru proudu. Nebude-li používáno zesílení, lze  $K_{r\omega}$  určit přímo z přenosu.

$$F_{o_{\omega\_bez\_reg}} = F_{w_i} k \Phi \frac{1}{pJ} K_{\check{c}\omega} \quad (2.11)$$

$$\varphi_{o_{\omega\_bez\_reg}} = \arctg \left( \frac{\Im(F_{o_{\omega\_bez\_reg}})}{\Re(F_{o_{\omega\_bez\_reg}})} \right) \quad (2.12)$$

$$K_{r\omega} = \frac{1}{|F_{o_{\omega\_bez\_reg}}(\omega_{\check{r}})|} \quad (2.13)$$

Tyto vztahy je možno zapsat v jazyce C:

```

Fo_w = Fw_i*kfi*Kcw/(_Complex_I*w*J);
// fi otevrene smycky rychlosti
fio_w = atan(cimag(Fo_w)/creal(Fo_w));
...
Trw = 100./wr_w; //vypocet Trw z wr - posunuti o 2 dekady
Ao = 20*log10(cabs(Fo_w_rezu)); // vypocet zesileni v bode w=wr
Krw = 1/cabs(Fo_w_rezu); //pow(10.0,-Ao/20); //vypocet Krw

```

Dále je možno určit přenos  $F_{o_{\omega}}$ , zesílení  $A_{o_{\omega}}$  a fázové zpoždění  $\varphi_{o_{\omega}}$  otevřené a uzavřené ( $F_{w_{\omega}}$ ,  $A_{w_{\omega}}$ ,  $\varphi_{w_{\omega}}$ ) smyčky rychlosti s regulátorem rychlosti.

$$F_{o_{\omega}} = \left( K_{r\omega} + \frac{K_{r\omega}}{p\tau_{r\omega}} \right) F_{o_{\omega\_bez\_reg}} = \left( K_{r\omega} + \frac{K_{r\omega}}{p\tau_{r\omega}} \right) F_{w_i} k \Phi \frac{1}{pJ} K_{\check{c}\omega} \quad (2.14)$$

$$A_{o_\omega} = 20 \log |F_{o_\omega}| \quad (2.15)$$

$$\varphi_{o_\omega} = \arctg \left( \frac{\Im(F_{o_\omega})}{\Re(F_{o_\omega})} \right) \quad (2.16)$$

$$F_{w_\omega} = \frac{F_{o_\omega}}{(1 + F_{o_\omega}) K_{\zeta\omega}} \quad (2.17)$$

$$A_{w_\omega} = 20 \log |F_{w_\omega}| \quad (2.18)$$

$$\varphi_{w_\omega} = \arctg \left( \frac{\Im(F_{w_\omega})}{\Re(F_{w_\omega})} \right) \quad (2.19)$$

Uvedené výpočty lze zapsat v C:

```
// pocitani prenosu a zes. s otevrenou smyckou rychlosti
```

```
Fo_w = (Krw + Krw/(w*Trw*_Complex_I))*Fw_i*~
```

```
~kfi*Kcw/(_Complex_I*w*J);
```

```
Ao = 20*log10(cabs(Fo_w));
```

```
// pocitani prenosu a zes. s uzavrenou smyckou rychlosti
```

```
Fw_w = Fo_w/(Kcw*(1 + Fo_w)); // prenos uzavrene smycky
```

```
Aw = 20*log10(cabs(Fw_w)); // zesileni uzavrene smycky
```

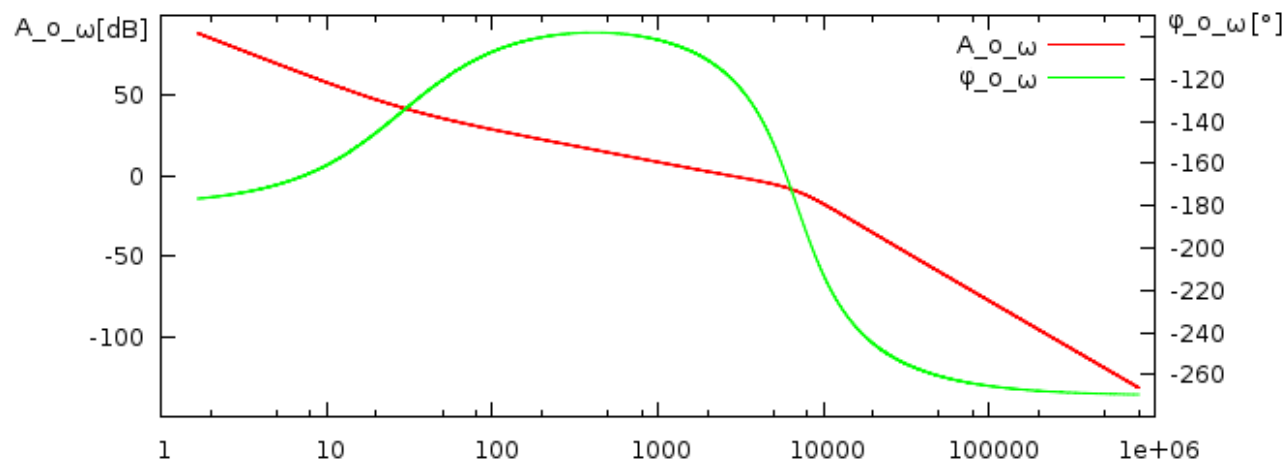
```
fio_w = atan(cimag(Fo_w)/creal(Fo_w));
```

```
fio_w = fio_w*180/M_PI; // prepočet z radianu na stupne
```

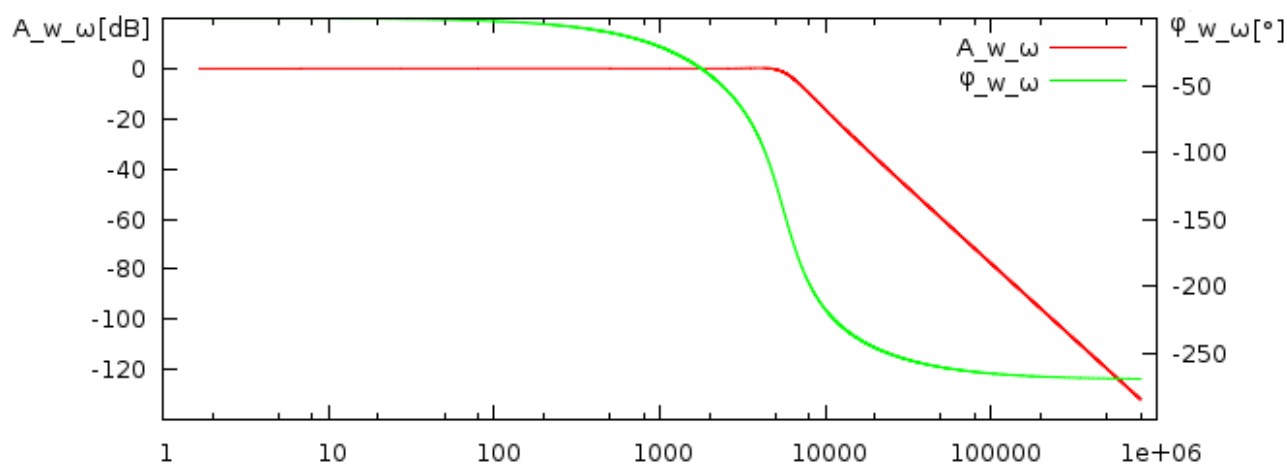
```
fio_w -= 180; // uprava fi na spravne hodnoty
```

```
fiw_w = atan(cimag(Fw_w)/creal(Fw_w));
```

Pomocí uvedených vztahů lze vykreslit frekvenční charakteristiky pro otevřenou (obr. 2.8) a uzavřenou (obr. 2.9) smyčku rychlosti.



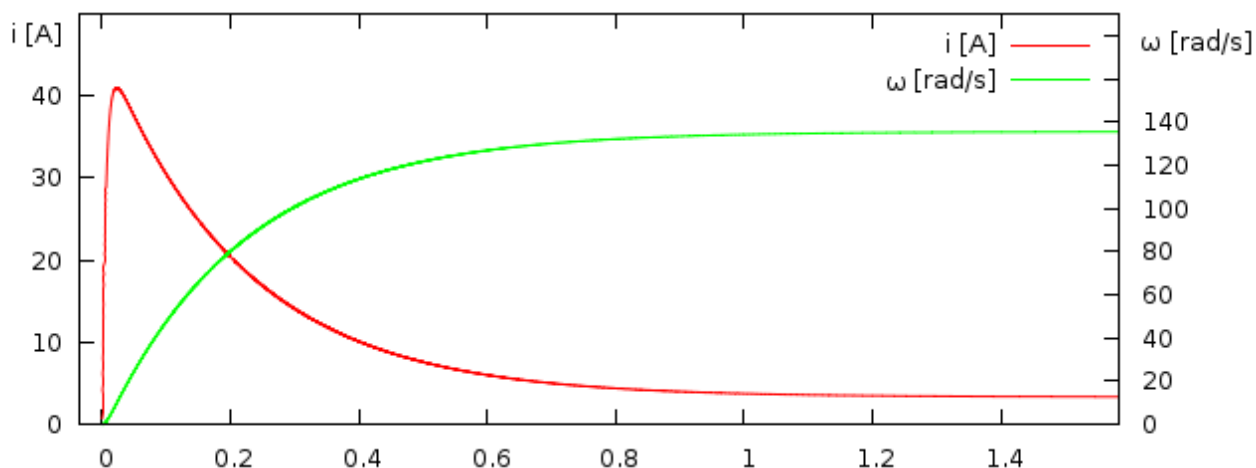
Obr. 2.8: Amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika pro otevřenou smyčku rychlosti



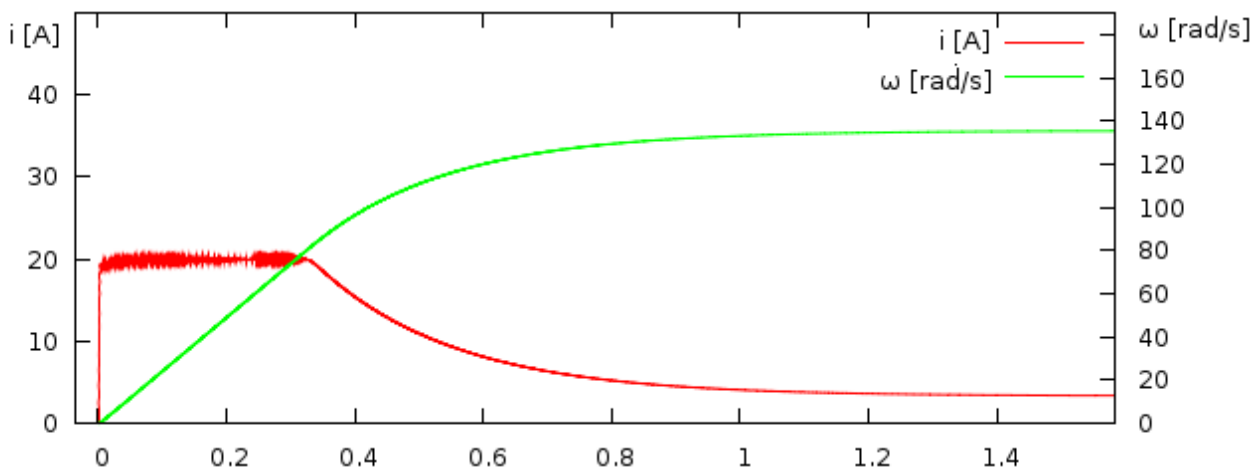
Obr. 2.9: Amplitudová a fázová logaritmická frekvenční charakteristika pro uzavřenou smyčku rychlosti

### 3 Simulace reálného pohonu stejnosměrného motoru

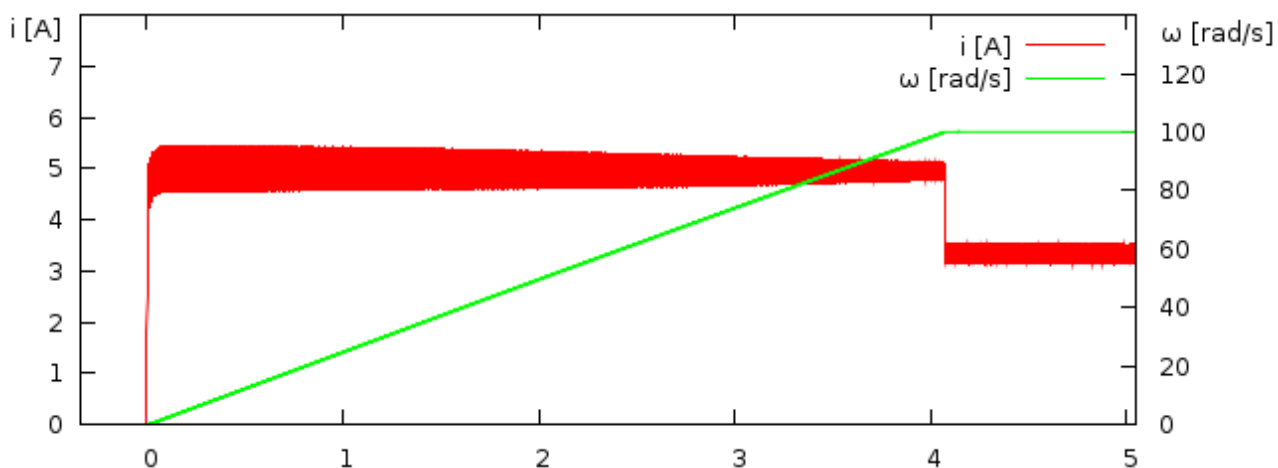
Po návrhu prvků regulátorů dle kapitoly 2 lze pomocí vztahů z kapitoly 1 sestavit simulační program celého pohonu. Následují výstupy požadovaných veličin. Na obr. 3.1 je zobrazen průběh proudu a rychlosti motoru při konstantním napájecím napětí a s konstantním zatížením (jeřábová charakteristika). Na obr. 3.2 jsou stejné průběhy, ale pro pohon napájený měničem s požadavkem konstantního proudu kotvy a na obr. 3.3 je pohon s regulací otáček. Na obr. 3.4 je poté zobrazen detail průběhu proudu a průběh výstupního napětí měniče.



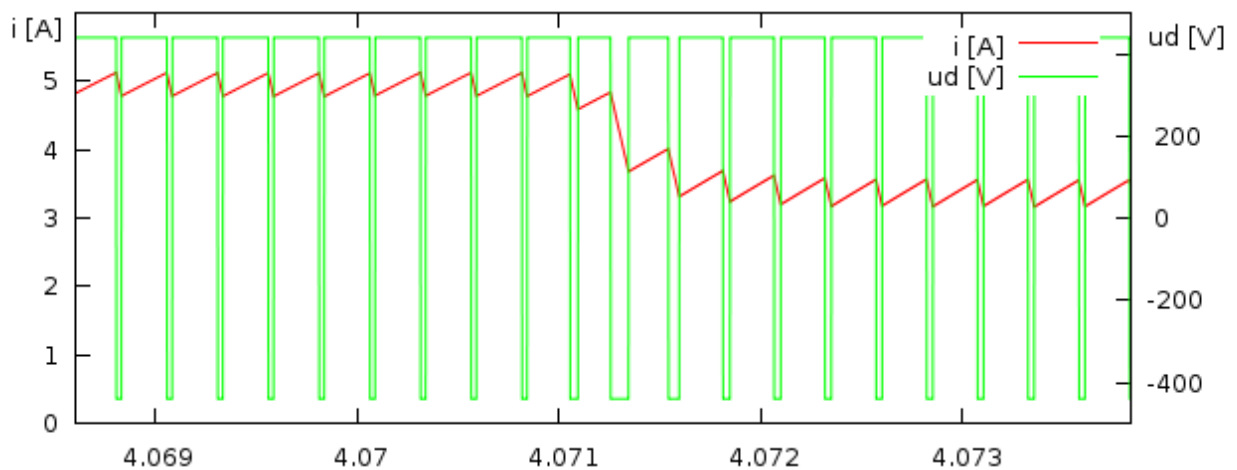
Obr. 3.1: Průběh proudu a rychlosti motoru při konstantním napájecím napětí a s konstantním zatížením



Obr. 3.2: Průběh proudu a rychlosti motoru napájeného měničem, s regulací proudu



Obr. 3.3: Průběh proudu a rychlosti motoru napájeného měničem, s regulací rychlosti



Obr. 3.4: Detail průběhu proudu a výstupního napětí měniče

V další části práce byl pro ukázkou možnosti regulace polohy zkonstruován program pro výpočet polohy a nad smyčku otáček byla přidána nadřazená smyčka s regulátorem polohy. Poloha je počítána pomocí integrace rychlosti:

$$x = K_x \int \omega dt \quad (3.1)$$

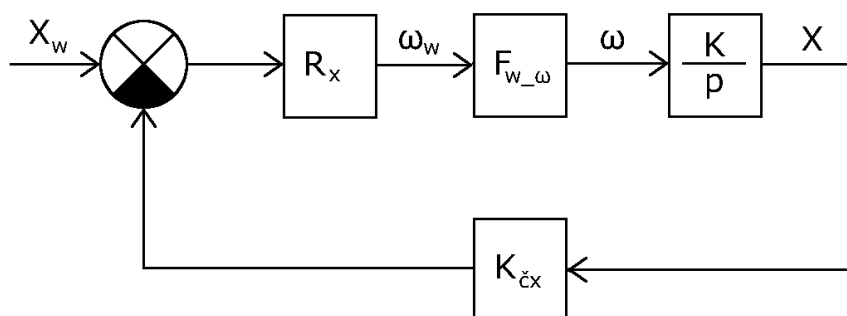
Diskretizací vztahu (3.1) lze dostat:

$$x = K_x \sum \omega \Delta t \quad (3.2)$$

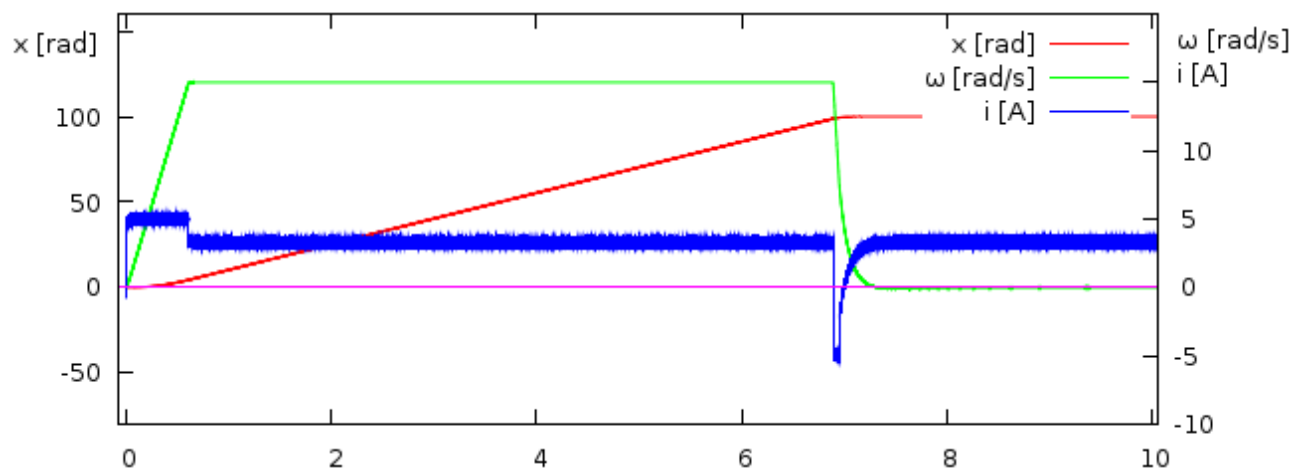
Vztah (3.2) lze zapsat v jazyce C:

```
x += Kx*w*dt;
```

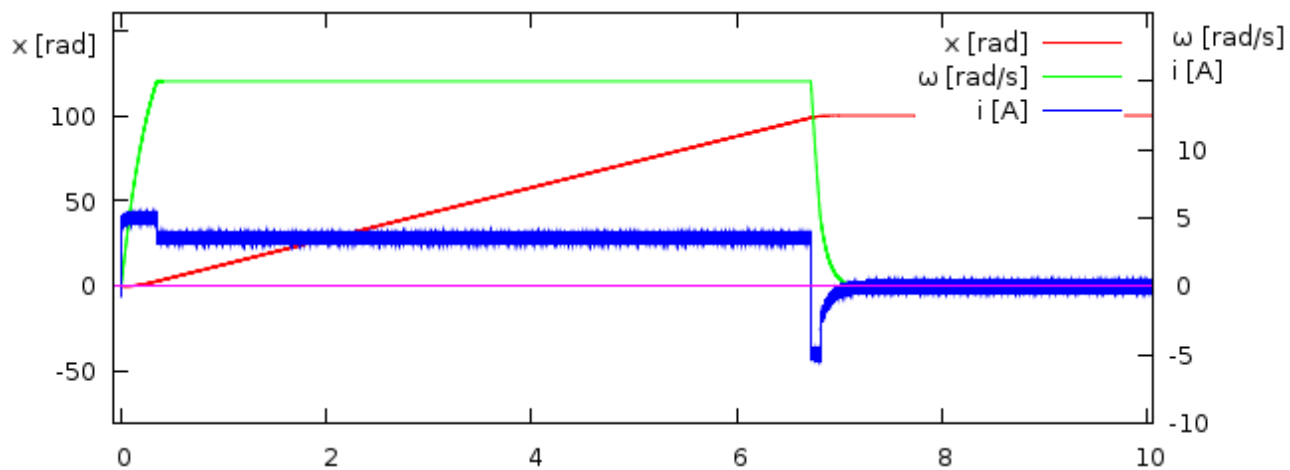
Regulační schéma pohonu s regulátorem polohy je na obr. 3.5. Na obr. 3.6 jsou zobrazeny průběhy polohy, rychlosti a proudu pro pohon s regulací polohy a konstantním zatěžovacím momentem. Na obr. 3.7 jsou stejné průběhy pro zátěž, jejíž moment je přímo úměrný otáčkám motoru.



Obr. 3.5: Regulační schéma pohonu s regulátorem polohy, s podřazenou smyčkou rychlosti



Obr. 3.6: Průběhy polohy, rychlosti a proudu pro pohon s regulací polohy a konstantním zatěžovacím momentem



Obr. 3.7: Průběhy polohy, rychlosti a proudu pro pohon s regulací polohy se zátěží, jejíž moment je přímo úměrný otáčkám motoru

## **Závěr**

Uvedená bakalářská práce se zabývala problematikou návrhu regulátoru stejnosměrného cize buzeného motoru, napájeného ze stejnosměrné sítě pomocí čtyřkvadrantového pulzního měniče. V rámci práce byly napsány dva programy. První řeší návrh regulátorů pomocí Nyquistova kritéria stability. Druhý se zabývá simulací celého pohonu včetně regulací v okamžitých hodnotách. Programy byly napsány v jazyce C. Výsledné charakteristiky byly vykresleny pomocí programu Gnuplot. Výsledné charakteristiky ukazují možnost rychlé polohové regulace stejnosměrného cize buzeného motoru. Z průběhů amplitudových frekvenčních charakteristik je zřejmá i poměrně velká odolnost systému proti vysokofrekvenčnímu rušení.



## **Použitá literatura**

- [1] PITTERMANN, Martin. *Elektrické pohony – základy*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-729-2.
- [2] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2009. ISBN 978-80-7232-383-8.
- [3] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing,a.s., 2003. ISBN 80-247-0507-9.
- [4] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. ISBN 80-704-3509-7.
- [5] OPPELT, Winfried. *Příručka regulační techniky*. Praha: SNTL. ISBN 04-536-67.
- [6] KUBÍK, Stanislav, Zdeněk KOTEK a Miroslav ŠALAMON. *Teorie regulace*. Praha: SNTL, 1974. ISBN 04-518-74.
- [7] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje I, II*. Plzeň: VŠSE, 1986. ISBN 55-061-86.
- [8] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2482-2.

## Přílohy

### ***Příloha A - Simulace pohonu***

```
#include <stdio.h>

#define Uc      440.
#define dt      0.000001
#define tk      20.
#define fsp     4000.
#define Kx      1.
//motor
#define kfi     3.
//#define Mz    10.
#define R      10.
#define L      0.06
#define J      0.2
//PS-reg i
#define Urmx   100.
#define Kri    4.
#define tauri  0.02
#define Kci    20.
//PS-reg w
#define Iwmax  100.
#define Krw    3705.
#define taurw  0.035
#define Kcw    1.
//PS-reg x
#define wmax   15.
#define Krx    12.
#define taurx  0.07
#define Kcx    1.

//motor
```

```
double i=0, ud=0, ui=0, Md=0, w=0, Mz=0;
//PWM
double ur=0, imin=0, up=0;
//PS-reg I
double ei=0, iw=0, Si=0;
//PS-reg w
double ew=0, w_w=0, Sw=0;
//PS-reg x
double x=0, ex=0, xw=100, Sx=0;

int l=0, m=1;
double t=0;

int main(void)
{
    FILE *out;
    if((out = fopen("out.txt","w"))==NULL)
    {
        printf("nelze otevrit soubor");return(1);
    }

    while (t < tk)
    {
//if(t>tk/2) w_w=-100;
        Mz=0.7*w;
// ----PWM-----
        if (ur > up)
        {
            if(m)
                ud = Uc;
        }
        else
        {
            ud = -Uc;
        }
    }
}
```

```
    m = 0; // * pro zamezení opetovneho prepnuti
  }      // * tzn. pro udrzeni konst spinaci frekvence
up += 2*Urmax*dt*fsp;
if (up > Urmax)
{
  up = -Urmax;
  imin = i;
  m = 1;
}
//-----motor-----
i += (ud - ui - R*i)*dt/L;
Md = kfi*i - Mz;
w += Md*dt/J;
ui = kfi*w;

//-----vzdalenost-----
x += Kx*w*dt;

//----PS-regulator x-----
ex = (xw - x*Kcx); // pozadovana - skutecna hodnota
w_w = Krx*ex + Sx/taurx; // vypocet vystupni hodnoty regulatoru
if(w_w > wmax) // vystupni omezovac a omezovac integrace
  w_w = wmax;
else
  if (w_w < -wmax)
    w_w = -wmax;
  else
    Sx += ex*dt;

//----PS-regulator w-----
ew = (w_w - w*Kcw); // pozadovana - skutecna hodnota
iw = Krw*(ew + Sw/taurw); // vypocet vystupni hodnoty reg
if(iw > Iwmax) // vystupni omezovac a omezovac integrace
  iw = Iwmax;
```

```
else
    if (iw < -Iwmax)
        iw= -Iwmax;
    else
        Sw += ew*dt;

//----PS-regulator i-----
ei = (iw - i*Kci);          // pozadovana - skutecna hodnota
ur = Kri*(ei + Si/tauri); // vypocet vystupni hodnoty reg
if(ur > Urmx)              // vystupni omezovac a omezovac integrace
    ur = Urmx;
else
    if (ur < -Urmx)
        ur = -Urmx;
    else
        Si += ei*dt;

//-----vypsani hodnot---
if (++l > 100) // vypsani kazde ste hodnoty
{
    fprintf(out,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf~
    ~ %lf\n",t,i,w,ud,up,ur,ui,x);
    l=0;
}
t += dt;
}
fclose(out);
}
```

**Příloha B - Návrh regulátorů**

```
#include<stdio.h>
#include<complex.h>
#include<math.h>

#define fib 60.
#define h 0.001
//PWM
#define Uc 440.
#define fsp 4000.
#define Urmax 100.
#define Kpwm (Uc/Urmax)
#define Tpwmm (1/(2*fsp))
//motor
#define kfi 3.
#define R 10.
#define L 0.06
#define J 0.2
#define Kmott (1/R)
#define Tmott (L/R)
// přenos čidla i
#define Kci 20.
// přenos čidla w
#define Kcw 1.

//přenos(F) otevřené (o) a uzavřené (w) smyčky proudu (_i) a
otacek(_w)
double complex Fo_i=0,Fo_w=0, Fw_i=0,Fw_w=0,Fo_w_rezu=0;
//přenos motoru
double complex Fomott=0, Fmott=0;
//zesílení otevřené a uzavřené smyčky
double Ao=0, Aw=0;
```

```

//fazove zpozdeni (fi) otevrene (o) a uzavrene (w) smycky proudu~
~(_i) a otacek(_w)
double fio_i=0, fio_w=0, fiw_i=0, fiw_w=0;
//wr_w, wr_x - rezu, _rychlosti, _polohy
double w=(0.01/Tmot),wr_w=0;
//zesileni (K) a casova konstanta (T) regulatoru proudu (i) ~
~a otacek (w)
double Kri=0,Tri=0,Krw=0,Trw=0;
int l=1, m=1;

FILE *out1, *out2;

int main(void)
{
if((out1 = fopen("/home/evicka/bp/out1.txt","w"))==NULL)
{
printf("nelze otevrit soubor");return(1);
}
if((out2 = fopen("/home/evicka/bp/out2.txt","w"))==NULL)
{
printf("nelze otevrit soubor");return(1);
}
// ===== navrh regulatoru I zacatek =====
//pocitani fi motoru + pwm, dokud jejich soucet nepresahne~
~zadanou bezpecnost ve fazi
while (fio_i>(-180+fib)) // smycka pocitajici wr - rezu
{
fio_i = -atan(w*Tpwm)-atan(w*Tmot);
fio_i = fio_i*180/M_PI; // prepocet z radianu na stupne
w += h*w; // urcity pocet vypoctu na dekadu
}

// vypocet zesileni, Kri a Tri pro w=wr
Ao = 20*log10(cabs((Kpwm/(1+w*Tpwm*_Complex_I))*Kci*(Kmot/~

```

```

~(1+w*Tmot*_Complex_I))));
Kri = pow(10.0,-Ao/20); // vypocet Kri v w=wr: 20log(Kr)=-Ao
Tri = 100./w;          // vypocet Tri z wr - posunuti o 2 dekady

// vypsani fib[°] (pro overeni), w, A, Kri, Tri
printf("fib = %.0lf \nwri = %.2lf \nAi = %.3lf\nkri =~
~%.3lf\nTri = %lf\n\n", 180+fio_i, w,Ao,Kri,Tri);
// ===== navrh regulatoru I konec =====

//---amp. + faz. frekvencni charka-----
w = 0.001/Tmot; // zacatek 2 dekady prvnim zlomem - Tpwm<<Tmot
while(w < (100/Tpwm)) // konec 2 dekady za druhym zlomem
{
// ===== proudova smycka zacatek =====
/*
// pocitani prenosu motoru vctne vlivu ui
Fomot = (Kmot/(1+Tmot*w*_Complex_I))*kfi*kfi*(1/(_Complex_I*~
~w*J));
Fmot = Fomot*_Complex_I*w*J/((1 + Fomot)*kfi*kfi);
*/
// pocitani prenosu motoru pri zanedbani vlivu ui
Fmot = Kmot/(1+Tmot*w*_Complex_I);

// pocitani prenosu a zes. s otevrenou smyckou - ~
~ PI-reg,PWM,motor,Kci
Fo_i = (Kpwm/(1+Tpwm*w*_Complex_I))*Fmot*(Kri + Kri/~
~(w*Tri*_Complex_I))*Kci;
Ao = 20*log10(cabs(Fo_i)); // zesileni otevrene smycky

// pocitani prenosu a zes. s uzavrenou smyckou
Fw_i = Fo_i/(Kci*(1 + Fo_i)); // prenos uzavrene smycky
Aw = 20*log10(cabs(Fw_i)); // zesileni uzavrene smycky

// fi otevrene smycky

```



```

fio_i = atan(cimag(Fo_i)/creal(Fo_i));
fio_i = fio_i*180/M_PI; // prepočet z radianu na stupne
if (fio_i > 0) // * uprava fi na spravne hodnoty
    fio_i = fio_i - 180; // * napr. arctg(1) vyhodnoti jako
                        // * 45st spravne je -135st.

// fi uzavrene smycky
fiw_i = atan(cimag(Fw_i)/creal(Fw_i));
fiw_i = fiw_i*180/M_PI; // prepočet z radianu na stupne
if (fiw_i > 0) // uprava fi na spravne hodnoty
    fiw_i -= 180;
// ===== proudova smycka konec =====

// ===== otackova smycka nalezeni wr zacatek =====
Fo_w = Fw_i*kfi*Kcw/(_Complex_I*w*J);

// fi otevrene smycky rychlosti
fio_w = atan(cimag(Fo_w)/creal(Fo_w));
fio_w = fio_w*180/M_PI; // prepočet z radianu na stupne
fio_w -= 180; // uprava fi na spravne hodnoty
if(fio_w > (-180 + fib))
{
    wr_w = w;
    Fo_w_rezu = Fo_w; // ulozeni prenosu pro wr - rezu
}
// ===== otackova smycka nalezeni wr konec =====

//vypsani sledovanych hodnot do souboru
fprintf(out1,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf %lf~
~ %lf\n",w,Ao,fio_i,Aw,fiw_i, 20*log10(cabs(Fmot)),~
~(180/M_PI)*atan(cimag(Fmot)/creal(Fmot)),fio_w);
w += h*w; //urcity pocet vypoctu na dekadu
}

```

```
// ===== navrh regulatoru w zacatek =====
Trw = 100./wr_w; //vypocet Trw z wr - posunuti o 2
dekady
Ao = 20*log10(cabs(Fo_w_rezu)); // vypocet zesileni v bode w=wr
Krw = 1/cabs(Fo_w_rezu); //pow(10.0,-Ao/20); //vypocet
Krw z prenosu, nebo ze zesileni v bode w=wr: 20log(Kr)=-Ao

// vypsani hodnot wr_w, Ao, Krw, Trw
printf("wr_w = %.2lf \nAw = %.3lf\nkrw = %.3lf\nTrw= %lf\n\n",~
~ wr_w,Ao,Krw,Trw);
// ===== navrh regulatoru w konec =====

w = 0.01/Tmot;
m = 0;
while(w < (100/Tpwm))
{
// pocitani prenosu a faze s otevrenou smyckou vcetne vlivu ui
Fomot = (Kmot/(1 + Tmot*w*_Complex_I))*kfi*kfi*(1/~
~(_Complex_I*w*J));
Fmot = Fomot*_Complex_I*w*J/((1 + Fomot)*kfi*kfi);

//prenos otevrene smycky proudu - PI-reg,PWM,motor,Kci
Fo_i = (Kpwm/(1 + Tpwm*w*_Complex_I))*Fmot*(Kri + Kri/~
~(w*Tri*_Complex_I))*Kci;

// prenos uzavrene smycky I
Fw_i = Fo_i/(Kci*(1 + Fo_i));

// pocitani prenosu a zes. s otevrenou smyckou rychlosti - PI--
~reg,Fw_i,kfi,Kcw
Fo_w = (Krw + Krw/(w*Trw*_Complex_I))*Fw_i*kfi*Kcw/~
~(_Complex_I*w*J);
Ao = 20*log10(cabs(Fo_w));
```

```
// pocitani prenosu a zes. s uzavrenou smyckou rychlosti
Fw_w = Fo_w/(Kcw*(1 + Fo_w)); // prenos uzavrene smycky w
Aw    = 20*log10(cabs(Fw_w)); // zesileni uzavrene smycky w

fio_w = atan(cimag(Fo_w)/creal(Fo_w));
fio_w = fio_w*180/M_PI; // prepocet z radianu na stupne
fio_w -= 180; // uprava fi na spravne hodnoty z

fiw_w = atan(cimag(Fw_w)/creal(Fw_w));
fiw_w = fiw_w*180/M_PI; // prepocet z radianu na stupne
if ((fiw_w > 0) || (m == 1)) // uprava fi na spravne hodnoty
{
    fiw_w = fiw_w - 180;
    m = 1;
}

//vypsani sledovanych hodnot do souboru
fprintf(out2,"%lf %lf %lf %lf %lf %lf ~
~%lf\n",w,Ao,fio_i,Aw,fio_w, 20*log10(cabs(Fo_w)),fiw_w);
w += h*w; //urcity pocet vypoctu na dekadu
}

fclose(out1);
fclose(out2);
}
```