

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Derivační složka regulátoru v regulaci stejnosměrného motoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel HANČ**
Osobní číslo: **E15B0009K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Derivační složka regulátoru v regulaci stejnosměrného motoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Sestavte zjednodušený simulační model regulace rychlosti stejnosměrného cize buzeného motoru.
2. Navrhněte parametry otáčkového a proudového regulátoru typu PID.
3. Zhodnoťte přínos derivační složky regulátoru, srovnajte její vliv s předvýpočtem (feed-forward).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

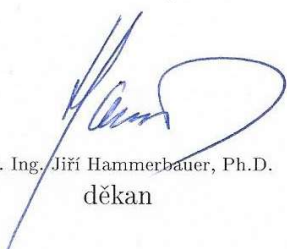
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Janda, Ph.D.**


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zhodnocení přínosu derivační složky regulátoru pro stejnosměrný cize buzený motor. Jejím cílem je porovnání regulátoru PI, PID a PI s dopřednou vazbou v regulaci rychlosti otáček. K porovnání těchto regulátorů slouží simulace v prostředí MATLAB.

Klíčová slova

Stejnosměrný motor, simulace motoru, regulátor typu PI, regulátor typu PID, Feedforward, MATLAB, měření stejnosměrného motoru.

Abstract

This bachelor thesis deals with an evaluation of the contribution of the derivative parameter of the regulator for DC motor. Its purpose is to compare PI, PID and PI with feedforward loop in speed control. To compare these controllers are used in MATLAB simulation.

Key words

DC motor, motor simulation, PI type controller, PID type controller, feedforward, MATLAB, DC motor measurement.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval 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.

.....

podpis

V Plzni dne 10.6.2018

Pavel Hanč

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Jandovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 OBECNÁ TEORETICKÁ ČÁST	12
1.1 PRINCIP ČINNOSTI A ZÁKLADNÍ USPOŘÁDÁNÍ STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU	12
1.2 ROZDĚLENÍ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORŮ DLE TYPY BUZENÍ	13
1.3 OBECNÝ POPIS REGULACE	14
1.4 ZPŮSOBY REGULACE STEJNOSMĚRNÝCH CIZE BUZENÝCH MOTORŮ	15
1.4.1 <i>Rozběh a brždění stejnosměrného cize buzeného motoru</i>	16
1.4.2 <i>Způsoby řízení rychlosti cize buzeného stejnosměrného motoru</i>	17
1.5 SPOJITÉ ŘÍZENÍ.....	18
1.5.1 <i>Použité funkční bloky řízení</i>	19
1.6 VÝBĚR REGULÁTORU.....	20
1.6.1 <i>Použití derivační složky v regulátoru</i>	21
1.6.2 <i>Použití dopředné vazby (feedforward)</i>	22
2 PRAKTICKÁ ČÁST	23
2.1 ANALÝZA DANÉHO STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU	23
2.1.1 <i>Štítkové hodnoty motoru a výpočet předpokládaných parametrů</i>	23
2.2 SESTAVENÍ SIMULAČNÍHO MODELU REGULACE RYCHLOSTI	24
2.2.1 <i>Blokové schéma modelu motoru</i>	24
2.2.2 <i>Sestrojení akčního bloku</i>	25
2.2.3 <i>Kaskádní regulace stejnosměrného motoru</i>	27
2.3 SIMULAČNÍ MODEL REGULACE VNITŘNÍ PROUDOVÉ SMYČKY	28
2.3.1 <i>Simulační model regulace vnitřní proudové smyčky PI</i>	29
2.3.2 <i>Simulační model regulace vnitřní proudové smyčky PID</i>	31
2.3.3 <i>Simulační model regulace vnitřní proudové smyčky PI_FF</i>	33
2.3.4 <i>Porovnání vnitřních proudových smyček</i>	35
2.4 NAVRŽENÍ NADŘAZENÉ RYCHLOSTNÍ SMYČKY	36
2.4.1 <i>Navržení nadřazené rychlostní smyčky PI</i>	37
2.4.2 <i>Navržení nadřazené proudové smyčky PID</i>	39
2.4.3 <i>Navržení nadřazené otáčkové smyčky PI_FF</i>	41
2.5 POROVNÁNÍ REGULÁTORŮ PI, PID A PI_FF PRO STEJNOSMĚRNÝ MOTOR.....	43
ZÁVĚR	45
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	46
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA 1 – ZADÁVÁNÍ PARAMETRŮ	1

PŘÍLOHA 2 – SIMULACE PROUDOVÉ SMYČKY.....	2
PŘÍLOHA 3 – SIMULACE RYCHLOSTNÍ SMYČKY.....	4
PŘÍLOHA 4 – VYKRESLENÍ GRAFU.....	7

Seznam symbolů a zkratk

U_N	Jmenovité napětí [V]
I_N	Jmenovitý proud [A]
P_N	Jmenovitý výkon [W]
ΔP	Jmenovité ztráty [W]
R_m	Odpor v obvodu kotvy [Ω]
L_m	Indukčnost v obvodu kotvy [H]
R_b	Odpor v obvodu buzení [Ω]
L_b	Indukčnost v obvodu buzení [H]
M	Elektromagnetický moment [$N \cdot m$]
M_z	Moment zátěže [$N \cdot m$]
u_a	Napětí pro obvod kotvy [V]
u_a	Budící napětí [V]
u_i	Indukované napětí [V]
u_f	Řídící napětí [V]
u_p	Napětí pilového signálu [V]
U_{mv}	Napětí na výstupu měniče[V]
U_d	Střední hodnota napětí na výstupu měniče[V]
i_a	Proud obvodu kotvy [A]
i_a	Budící proud [A]
$k\phi$	Regulační konstanta [$V \cdot s$]
J	Moment setrvačnosti [$kg \cdot m^2$]
ω	Úhlová rychlost [$rad \cdot s^{-1}$]
τ	Časová konstanta
F_m	Přenos motoru
$F_{wi}, F_{w\omega}$,	přenos uzavřené smyčky proudu a rychlosti
$F_{Oi}, F_{O\omega}$,	přenos otevřené smyčky proudu a rychlosti
MATLAB.....	Matrix laboratory

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zhodnocení přínosu derivační složky regulátoru v regulátoru PID pro stejnosměrný cize buzený motor a její porovnání s PI regulátorem s dopřednou vazbou.

V průběhu této práce bude sestaven zjednodušený simulační model regulace rychlosti stejnosměrného cize buzeného motoru dle zadaných a měřených parametrů reálného motoru. Pro tento motor bude následně navržen PI, PID, PI regulátor s dopřednou vazbou a tyto regulátory budou porovnány. Simulace proběhne v programu Matlab.

Pohony se stejnosměrnými cize buzenými motory jsou dnes v převážné míře nahrazovány především asynchronními motory s frekvenčními měniči. Stejnosměrné motory mají, ale stále své výhody jako jsou například snadné řízení otáček, polohy, momentu respektive proudu procházejícího kotvou. Jejich uplatnění se tedy přesouvá především do výuky, kde mohou díky svým vlastnostem posloužit jako dobrý příklad návrhu regulace.

V minulosti bylo pravidlem navrhovat pro stejnosměrný cize buzený motor pouze regulátor typu P anebo PI dle požadovaných vlastností a derivační složka se neuplatňovala. Toto pravidlo mělo základ v napájení stejnosměrného motoru, kde kvůli použití usměrňovače se spojitými regulátory, nebo použití asynchronních dynam, docházelo ke vzniku zvlněných a zašuměných proudů. V současné době se pro napájení dají použít 4 kvadrantové pulsní měniče. Při jejich vhodně nastavené vzorkovací frekvenci dochází k minimalizaci zvlnění. Tím je možné do regulace přidat i derivační složku, která může zlepšit vlastnosti regulátoru.

Pokud by byl přínos derivační složky při regulaci stejnosměrného cize buzeného motoru dobře viditelný, pak by mohl výsledek praktické části této práce posloužit jako pomůcka při výuce regulační techniky.

1 Obecná teoretická část

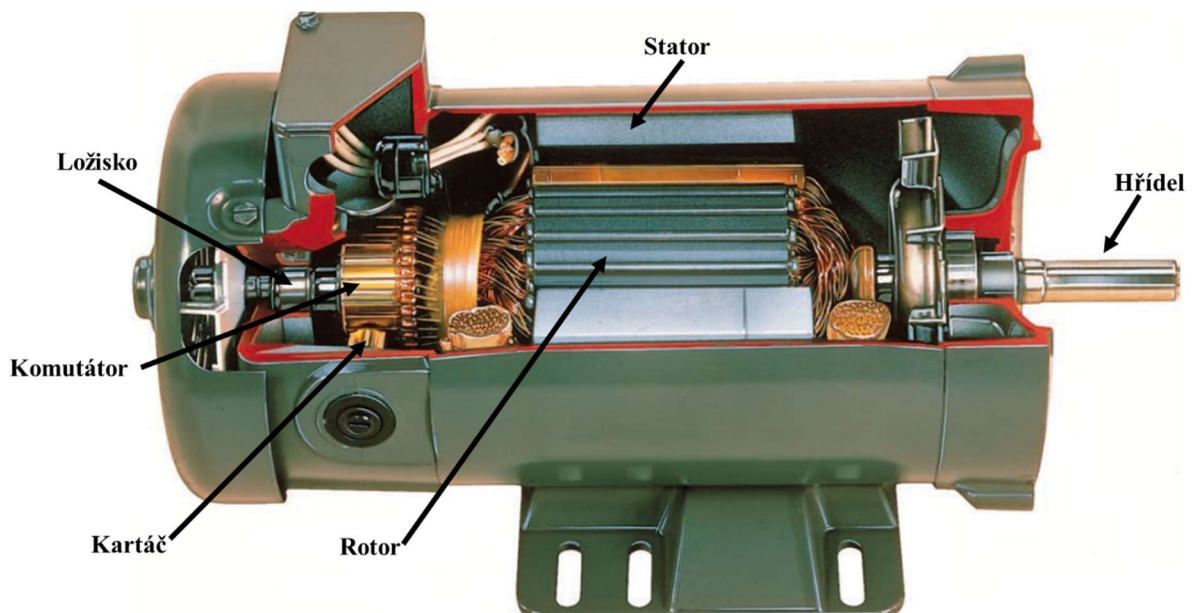
1.1 Princip činnosti a základní uspořádání stejnosměrného motoru

Základní princip stejnosměrného motoru spočívá v působení magnetických sil na vodič protékající elektrickým proudem procházející v magnetickém poli. Na tento vodič působí magnetická síla daná vztahem:

$$F_m = B \cdot i \cdot l \quad (1.1)$$

Síla vychyluje tento vodič do směru daného Flemingovým pravidlem levé ruky, které říká: Pokud ukazováček, prostředníček a palec levé ruky jsou vzájemně kolmé a pokud ukazováček představuje směr magnetického pole, prostředníček označuje směr proudu, pak palec představuje směr, kterým se vodič vychýlí. Poté komutátor otočí směr toku elektrického proudu ve vodiči a cyklus se opakuje. První stroj na stejnosměrný proud byl sestaven již roku 1832 Hippolytem Pixiim

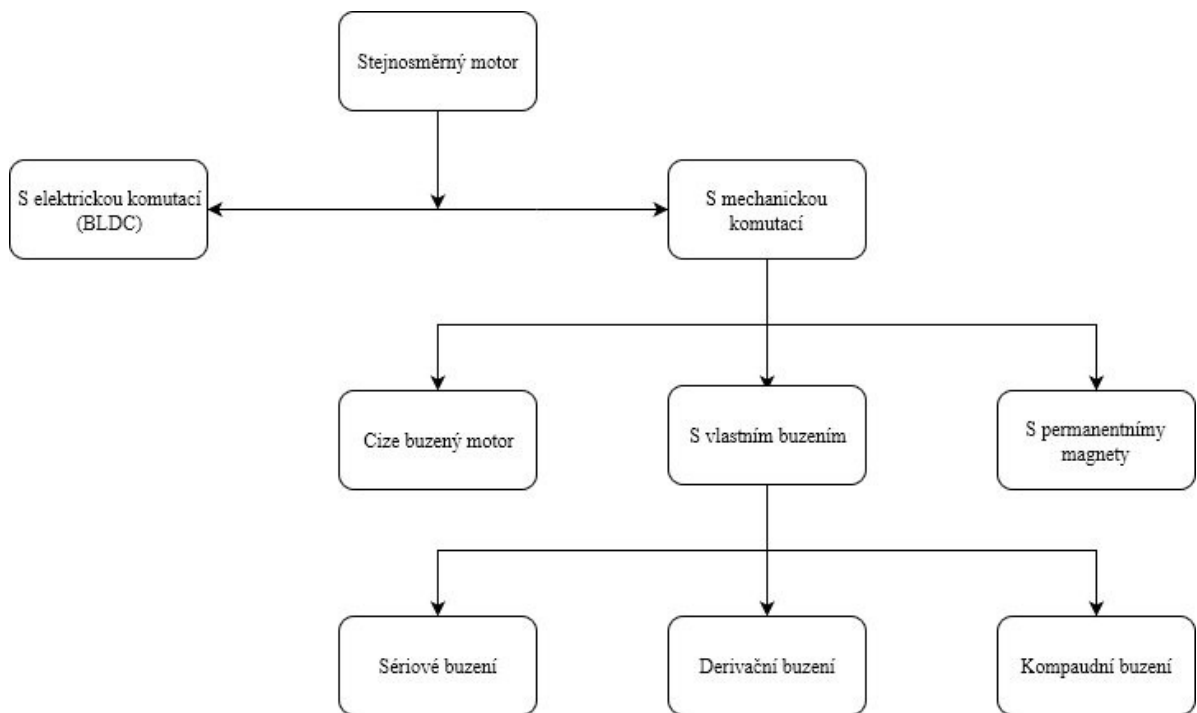
Všechny stejnosměrné motory mají tři základní části: rotor (kotva), stator a komutátor (Obr.1.1). Tyto části mají různé konstrukce dle typu motoru, ale princip je totožný. Dalšími důležitými prvky motoru jsou ložiska, chladicí ventilátor, svorkovnice, kartáče. [2]



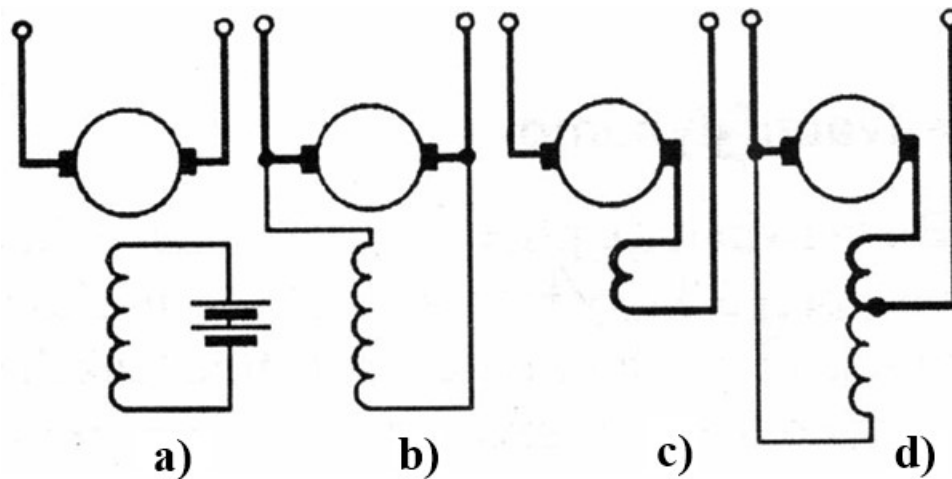
Obr.1.1: Řez stejnosměrným motorem [8]

1.2 Rozdělení stejnosměrných motorů dle typu buzení

Existuje několik druhů stejnosměrných motorů a jejich nejčastější dělení je dle druhu buzení. Cize buzené motory mají buzení statoru z jiného „nezávislého“ zdroje stejnosměrného napětí, než buzení rotoru, u motorů s vlastním buzením se využívá stejného zdroje napětí pro stator i rotor a podle zapojení vinutí se dělí na derivační (paralelní zapojení), sériové nebo kompaundní (smíšené). Dále se k nabuzení využívá permanentních magnetů především u menších motorů, viz *Obr.1.2*. Dle druhu (*Obr. 1.3*) buzení se mění charakteristické vlastnosti stroje, u motorů zejména rychlosti otáčení a momentu v závislosti na řídicích parametrech.[2]



Obr.1.2: Rozdělení stejnosměrných motorů



Obr. 1.3: Druhy buzení stejnosměrných motorů: a) s cizím buzením, b) s derivačním buzením, c) se sériovým buzením, d) s kompaundním buzením [10]

1.3 Obecný popis regulace

„Regulace je nejčastější a nejdůležitějším typem řízení. Jedná se o udržování potřebných fyzikálních veličin na předem stanovených hodnotách, případně zajištění nejvýhodnějšího přechodu na nově zadané hodnoty regulovaných veličin podle zadaných optimálních kritérií. V průběhu regulace se vyhodnocují hodnoty regulovaných veličin a odezvy na regulační zásahy okamžitě. Podle nich je aktuálně korigována činnost regulátoru. Technicky řečeno, regulátor pracuje se zpětnou vazbou a zajišťuje potřebnou přesnost a dynamiku regulačního procesu.“ [5]

Kritériem výběru regulátorů je požadavek regulované úlohy, který bude regulátor vykonávat. Může to být regulace na konstantní hodnotu, vlečná regulace, anebo programová regulace.

„Regulace na konstantní hodnotu udržuje regulovanou veličinu konstantní na velikosti, která je dána velikostí žádané hodnoty. V elektrických pohonech je tento typ regulace používán nejčastěji.

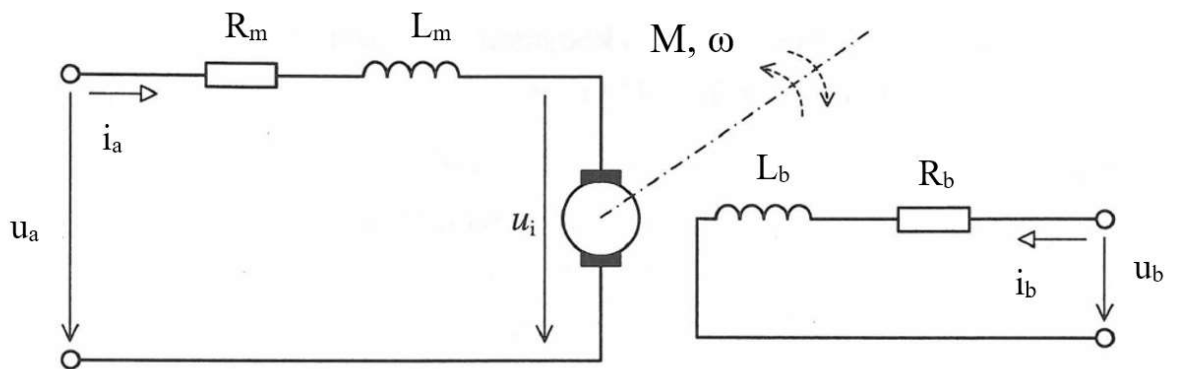
Vlečná regulace je charakterizována tím, že se u ní regulovaná veličina mění v závislosti na jiné fyzikální veličině. Měníme-li např. magnetický tok asynchronního motoru v závislosti na jeho zatěžovacím proudu, získá tím pohon charakteristiku stejnosměrného motoru se sériovým buzením.

Programová regulace je zvláštním případem vlečné regulace, kdy je žádaná hodnota dána předem zadanou závislostí, která je většinou určena potřebami technologického procesu.“ [5]

1.4 Způsoby regulace stejnosměrných cize buzených motorů

Jak již bylo napsáno v předchozích kapitolách, cize buzený stejnosměrný motor má dva galvanicky oddělené napájecí obvody (Obr. 1.4). Obvod kotvy je napájen z vnějšího zdroje u_a a protéká jím proud i_a . Obvod buzení je napájen zdrojem u_b a protéká jím budící proud i_b . Proud i_b tak v budícím vinutí statoru budí magnetický tok ϕ . Během otáčení rotoru v tomto magnetickém poli ϕ se do rotorového vinutí indukují napětí u_i . Vzájemným působením ϕ a proudu kotvy i_b vznikne elektromagnetický moment M , který rotor urychluje.

Pro potřeby simulace se využívá zjednodušeného náhradního schématu (Obr. 1.4) ve kterém je zanedbáno vzájemné transformační působení vinutí, vliv vířivých proudů v magnetickém, úbytků napětí na kartáčích atd. [5][4]



Obr. 1.4: Obvodové schéma stejnosměrného cize buzeného motoru [5]

Motor je dále popsán soustavou rovnic:

Napěťová rovnice pro obvod kotvy:

$$u_a = R_m i_a + L_m \frac{di_a}{dt} + u_i \quad (1.2)$$

Napěťová rovnice pro obvod statoru:

$$u_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} \quad (1.3)$$

Rovnice indukovaného napětí na kotvě:

$$u_i = k\phi\omega = \xi\omega \quad (1.4)$$

Rovnice pro elektromagnetický moment:

$$M = k\phi i_a = \xi i_a \quad (1.5)$$

Z těchto rovnic vyplívají možnosti regulace stejnosměrného cize buzeného motoru. U motoru regulací rozumíme převážně rozběh, brždění a změnu rychlosti otáček.[4][5]

1.4.1 Rozběh a brždění stejnosměrného cize buzeného motoru

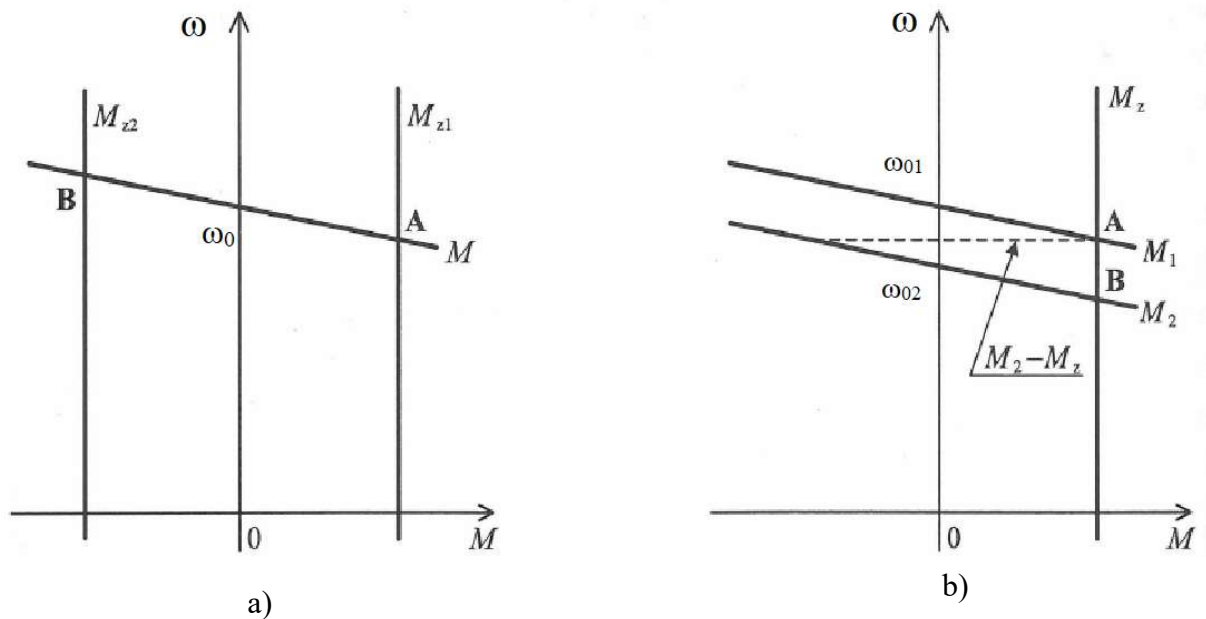
Rozběh motoru - uvedení motoru z nulových otáček do otáček požadovaných – provozních. Jedná se o kvaziustálý stav tedy o pomalý přechodový děj, při kterém se neuplatní indukčnosti elektrických obvodů. Kvůli velkým záběrným proudům a momentům, které by mohly poškodit komutátor se nikdy stejnosměrný cize buzený motor nepřipojuje na přímo na plný napájecí zdroj. Spouštění se proto provádí buď plynulou změnou napětí na kotvě, nebo pomocí odporového spouštěče.[5]

Elektrické brždění - stejnosměrného cize buzeného motoru může být dvojího typu. Odporové nebo rekuperační.

Při odporovém brždění se motor odpojí od napájecího napětí v obvodu kotvy a do obvodu kotvy se připojí odpor. Díky setrvačnosti se motor dále otáčí a z motoru se stává dynamo, které mění kinetickou energii na elektrickou, která se vyzáří na odporech v podobě tepla. Dále může být stroj odporově bržděn protiproudem. Toto brždění však není hojně využíváno.

Rekupační brždění je typ brždění kdy se kinetická energie mění zpět na elektrickou a ta se následně vrací do zdroje napětí. Motor je jako v předchozím případě v dynamo stavu.

U cize buzeného motoru existují dva způsoby jak toho stavu dosáhnout. Jednou z cest je změna polaroty zátěžného momentu M_z , zdroj musí být schopen vrácenou energii přijmout, aby nedošlo k jeho poškození. Druhou cestou je snížením napájecího napětí U_a (Obr. 1.5). [5]



Obr. 1.5 Brždění motoru rekuperací a) pomocí změny zátěžového momentu b) změny velikosti napětí v obvodu kotvy

1.4.2 Způsoby řízení rychlosti cize buzeného stejnosměrného motoru

Po úpravě napěťových rovnic dojdeme ke vztahu:

$$n = \frac{U_a - R_a I_a}{k\phi} \quad (1.6)$$

A z tohoto vztahu viditelné tři základní způsoby řízení otáček.

Změnou napětí v obvodu kotvy - Jedná se o nejpoužívanější způsob řízení rychlosti otáček stejnosměrného motoru. Nejčastěji je realizován použitím fázově řízeného usměrňovače. Pro možnost řízení v motoru obou směrech je antiparalelně připojen s druhým usměrňovačem. Změnou řídicího úhlu α fázově řízeného usměrňovače lze plynule řídit střední hodnotu výstupního napětí usměrňovače, které je totožné s napětím na kotvě motoru. Další možností je

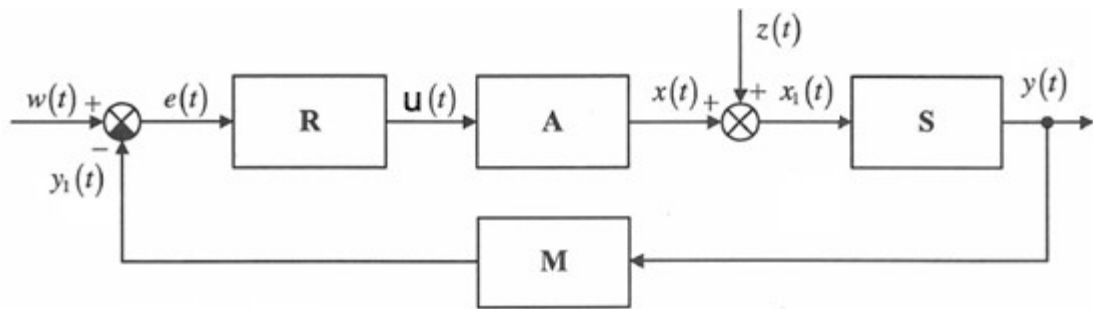
použití pulzního měniče, který se využívá převážně tam, kde je k dispozici stejnosměrná napájecí síť. Princip pulzního měniče bude dále dovysvětlen.

Změnou magnetického toku v buzení - Tento způsob řízení se volí v případě požadování vyšších otáček, než jsou otáčky jmenovité. Jak vyplývá z předešlého vztahu, při postupném zmenšování magnetického toku stoupají otáčky motoru. Motor však ztrácí moment stroje. Dalším problémem tohoto řízení je úplné odbuzení kdy se motor teoreticky roztočí až k nekonečným otáčkám. V praxi by došlo k jeho poškození.

Změnou odporu obvodu kotvy R_a - Do obvodu kotvy motoru je vložen proměnný odpor R_s změnou tohoto odporu lze řídit rychlost motoru. Pokud bude odpor R_s nulový, rychlost rotoru bude shodná, jako u motoru s cizím buzením. Tento přístup je obdobou odporového spouštění a má i stejné nevýhody. Energie se v odporu mění v teplo, které se musí někde vyzářit a je i značně neekonomický. [5]

1.5 Spojité řízení

Obecné schéma spojitého regulačního řízení se skládá ze čtyř hlavních bloků a dvou sčítacích členů (Obr. 1.6).



Obr. 1.6: Obecné schéma spojitého regulačního řízení [5]

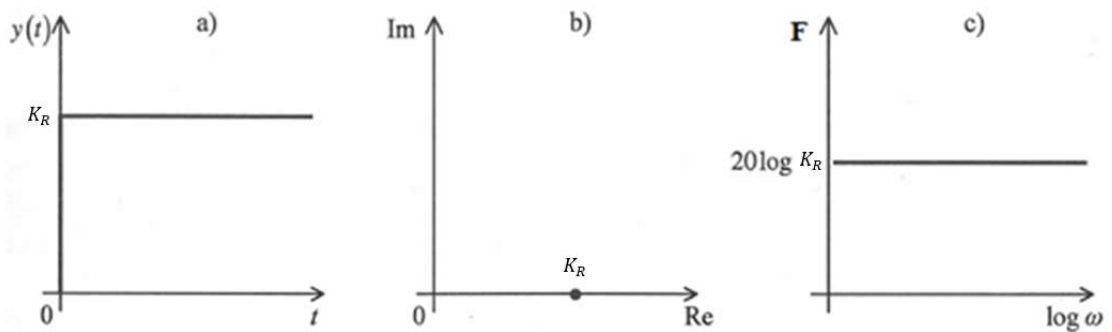
Při pohledu na schéma (Obr. 1.6) zprava je první sčítací člen, jehož funkce je vypočítávat rozdíl mezi žádanou veličinou $w(t)$ a skutečnou naměřenou veličinou $y_1(t)$ výsledkem této operace je regulační odchylka $e(t)$ vstupující do bloku regulátoru R . Výstup regulátoru $u(t)$ je dále vstupem pro akční člen A . Výstup z akčního členu $x(t)$ se ve druhém sčítacím členu sečte s možnou vnější poruchou $z(t)$ a konečným výsledkem je vstupní veličina bloku regulované soustavy $x_1(t)$ která působí na blok regulované soustavy S – tj. zařízení které je regulováno.

Výstupem tohoto bloku je výstupní regulovaná veličina $y(t)$ která je měřena pomocí bloku měření M . Pro případ elektrických pohonů je nejčastěji regulovanou veličinou otáčivá rychlost, poloha nebo moment respektive proud kotvy. [4] [5] [14]

1.5.1 Použité funkční bloky řízení

Proporcionální člen – blok jehož výstupní signál $y(t)$ je přímo úměrný vstupnímu signálu $u(t)$ a změna signálu na vstupu se přenese na výstup bez zpoždění. Nevýhodou proporcionálního členu je nedosažení nulové regulační odchylky. Je popsán následujícími rovnicemi:

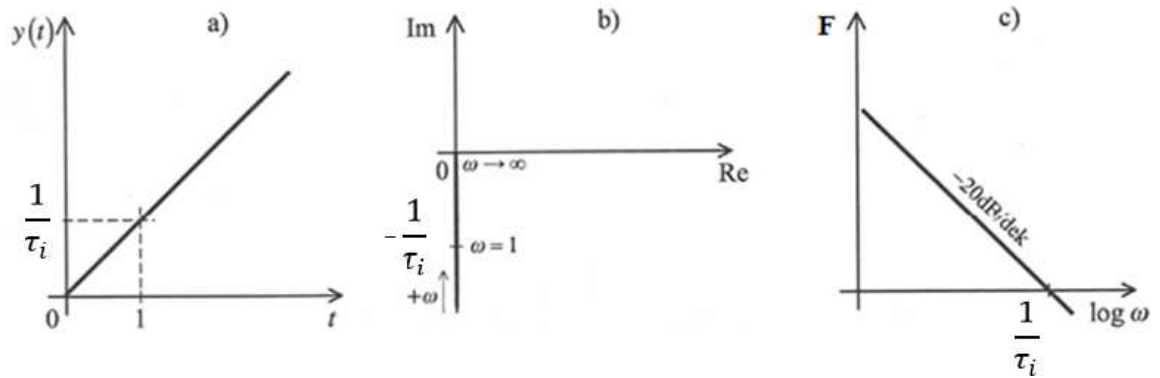
$$y(t) = K_R u(t) \quad F(p) = K_R \quad (1.7)$$



Obr. 1.7: Charakteristiky proporcionálního členu a) přechodová charakteristika, b) Nynquistův diagram, c) Bodeho diagram [5]

Integrační člen – blok, jehož výstupní signál $y(t)$, reaguje na skok postupným narůstáním akčního zásahu dle integrace regulační odchylky. Oproti proporcionálnímu členu dokáže úplně eliminovat regulační odchylku, ale výměnou za zhoršení dynamiky a stability systému. Je popsán rovnicemi:

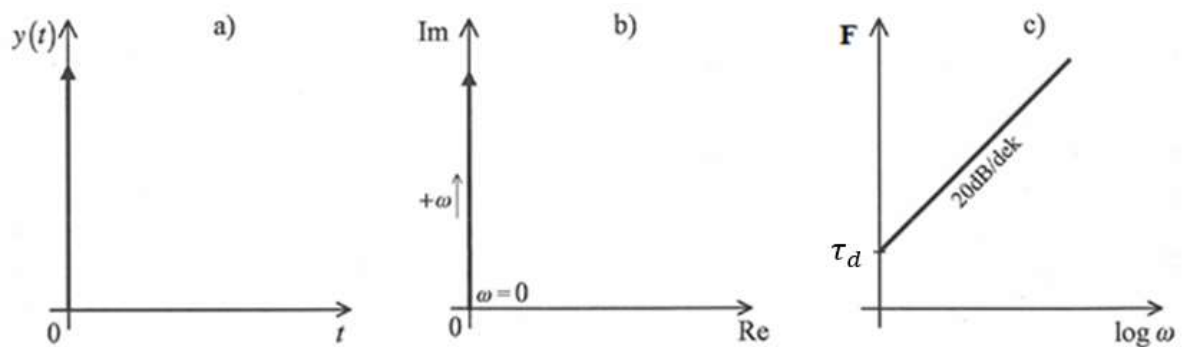
$$\tau_i \frac{dy(t)}{dt} = u(t) \quad F(p) = \frac{1}{p\tau_i} \quad (1.8)$$



Obr. 1.8: Charakteristiky integračního členu a) přechodová charakteristika, b) Nynquistův diagram, c) Bodeho diagram [5]

Derivační člen (předstihový) – blok, který má akční veličinu přímo úměrnou derivaci regulační odchylky. Použití tohoto bloku může zlepšit rychlost regulace, ale i stabilitu. Derivace signálu udává informaci o trendu chování soustavy, avšak v zarušených soustavách má negativní vliv na stabilitu. Derivační blok není nikdy realizován samostatně, ale pouze v kombinaci např. PD, PID. Blok je popsán rovnicemi:

$$y(t) = \tau_d \frac{du(t)}{dt} \quad F(p) = p\tau_d \quad (1.9)$$



Obr. 1.9: Charakteristiky derivačního členu a) přechodová charakteristika, b) Nynquistův diagram, c) Bodeho diagram [5]

1.6 Výběr regulátoru

V aplikacích se používají kombinace prvků PID. V závislosti na zabezpečení akceptovatelného chování regulovaného obvodu. Může být použit například regulátor typu P, pokud je velikost trvalé regulační odchylky v přijatelné toleranci. Pokud je potřeba odchylku zmenšit nebo odstranit je použit regulátor typu PI, ale jak bylo napsáno výše, zavedení

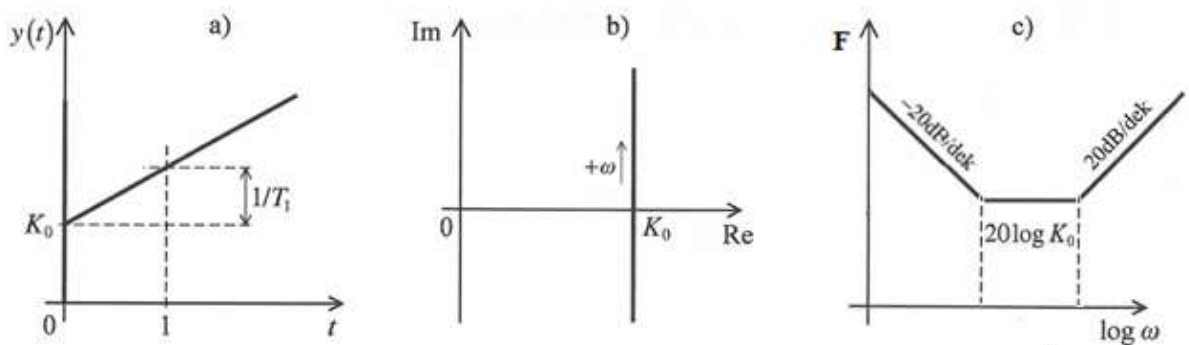
integrační složky může zvýšit nestabilitu. Pro zlepšení vlastností PI regulátorů máme několik možností, s ohledem na téma práce budou popsány dále. [4][5][7][14]

1.6.1 Použití derivační složky v regulátoru

Derivační složku zavádíme do PI regulátoru především z důvodu zvýšení stability uzavřené regulační smyčky. Derivace signálu udává informaci o trendu chování soustavy a regulátor tak může reagovat na budoucí vývoj regulační odchylky.

$$y(t) = K_0 u(t) + \frac{1}{\tau_{RI}} \int_0^{t_1} u(t) dt + \tau_{RD} \frac{du(t)}{dt} \quad (1.10)$$

$$F(p) = K_R \left(1 + \frac{1}{p\tau_{RI}} + p\tau_{RD} \right) \quad (1.11)$$

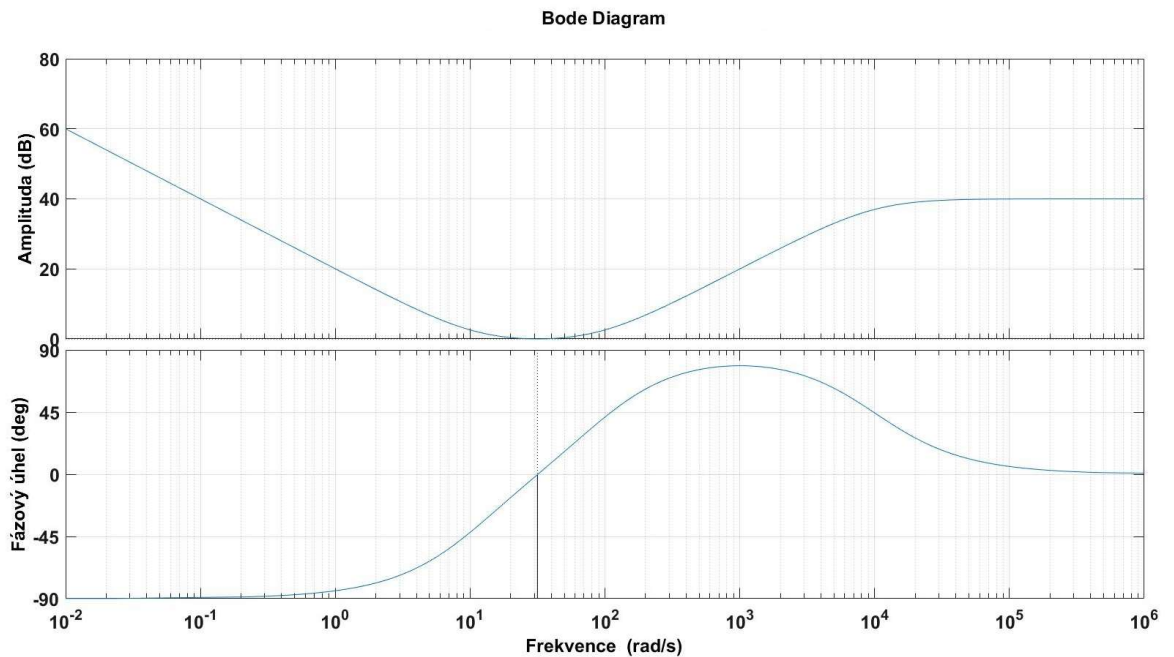


Obr 1.10: Charakteristiky PID členu a) přechodová charakteristika, b) Nynquistův diagram, c) Bodeho diagram[5]

Má však i své nevýhody. Ideální PID regulátor v praxi nelze použít kvůli přítomnosti šumu. Pro odstranění šumu lze do regulační smyčky derivačního členu zařadit vysokofrekvenční filtr, který rušení minimalizuje, ale za cenu zpoždění a tím omezení účinku derivační složky. Přenosová funkce PID s filtrem bude:

$$F(p) = K_R \left(1 + \frac{1}{p\tau_{RI}} + \frac{p\tau_{RD}}{\frac{\tau_{RD}}{N}s + 1} \right) \quad (1.12)$$

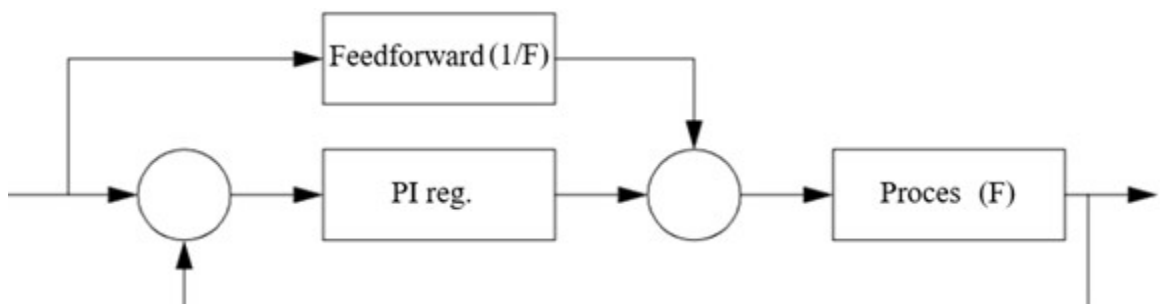
Kde N je parametr určující časovou konstantu T_D/N filtru. Pokud je nastavena malá hodnota parametru N pak se PID regulátor chová jako regulátor typu PI. [16] [14]



Obr. 1.11: Příklad frekvenční charakteristiky PID regulátoru s filtrací D složky / Bode diagram

1.6.2 Použití dopředné vazby (feedforward)

Zavedením dopředné vazby, pokud bude správně sestavena, můžeme odstranit hlavní nevýhodu PI regulátoru. PI regulátor reaguje se zpožděním na regulační odchylku, akčním zásahem. Kombinací obou způsobů (Obr. 1.12), zpětnovazebního a dopředného, můžeme získat regulační systém s velmi dobrou stabilitou a rychlostí a může překonat svými vlastnostmi i regulátor PID. Podmínkou je však dobrá znalost bloku regulované soustavy a jeho přenosové funkce, protože přenosová funkce dopředné vazby je inverzní funkcí regulované soustavy. [15]



Obr. 1.12: Použití feedforward

2 Praktická část

2.1 Analýza daného stejnosměrného motoru

Motor, který sloužil jako základ analýzy je od firmy MEZ Brno. Jedná se o kus vyrobený již v roce 1974. Jeho štítkové hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 1: Štítkové hodnoty* a na fotografii (*Obr. 2.1*).



Obr. 2.1: Štítek motoru

2.1.1 Štítkové hodnoty motoru a výpočet předpokládaných parametrů

Tab. 1: Štítkové hodnoty

U_N [V]	I_N [A]	P_N [W]	n_N [min^{-1}]	IP
440	4,7	1700	1400	23

Jelikož motor slouží jako učební pomůcka, není připojen ke štítkovému napětí. Byly pro něj zadány a vypočteny následující hodnoty, viz *Tab. 2*.

Tab. 2: Skutečné hodnoty

U_N [V]	I_N [A]	U_{bud} [V]	R [Ω]	L [H]	$k\Phi$ [V·s]	J [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]
150	4,7	70	8,3	0,083	1.740	0.163

2.2 Sestavení simulačního modelu regulace rychlosti

Simulační model regulace rychlosti daného motoru se sestává ze tří částí. První níže uvedenou částí je blokové schéma modelu motoru, dále následuje sestavení akčního bloku a navržení regulačních smyček (vnitřní proudová, nadřazená rychlostní). Programy jednotlivých simulací jsou vypsány v přílohách této práce.

2.2.1 Blokové schéma modelu motoru

Pro vytvoření blokového schématu (modelu motoru) vycházíme z náhradního schématu (Obr. 1.4) a soustavy rovnic (1.2),(1.3),(1.4),(1.5) pro daný stejnosměrný cize buzený motor, na kterých byla provedena Laplaceova transformace. Laplaceova transformace umožňuje popsat regulační soustavu pomocí přenosových funkcí bloků regulačního schématu. A z těchto bloků dále vypočítat přenos celé regulační soustavy. [5]

Dostáváme tedy výsledné rovnice pro proud kotvy i_a :

$$i_a = \frac{U_a - U_{In}}{R_m + pL_m} \quad (2.1)$$

Přenos motoru F_m :

$$F_m = \frac{1/R_m}{1 + pL_m/R_m} = \frac{K_m}{1 + p\tau_m} \quad (2.2)$$

Moment motoru M :

$$M = k\phi i_a \quad (2.3)$$

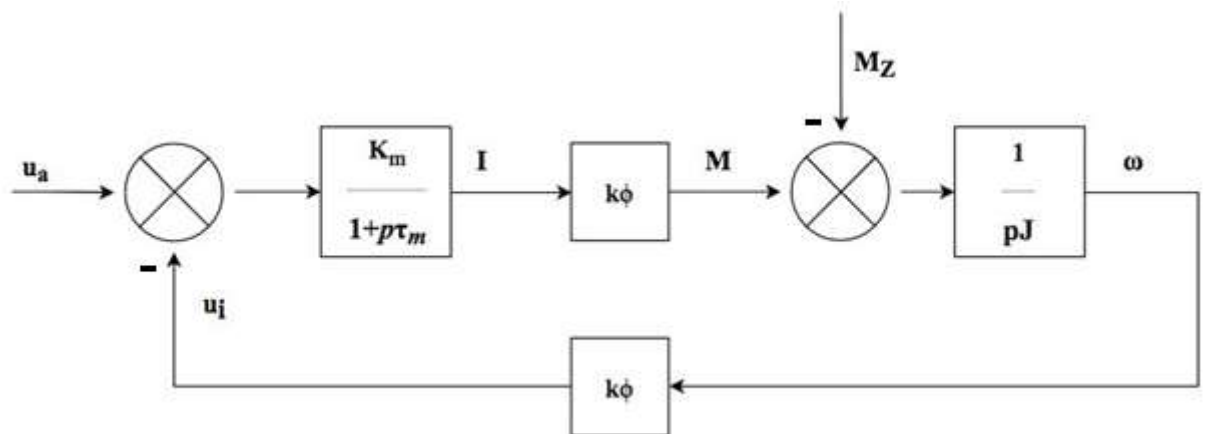
Rychlost motoru ω :

$$\omega = \frac{1}{pJ} (M - M_z) \quad (2.4)$$

A pro indukované napětí u_i :

$$u_i = k\phi\omega \quad (2.5)$$

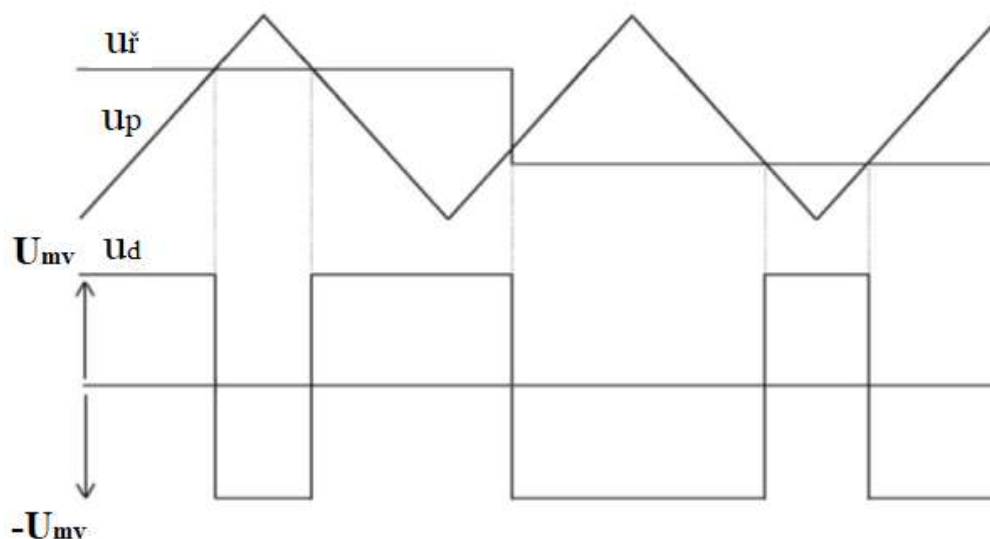
Na základě těchto rovnic lze sestavit model stejnosměrného cize buzeného motoru (Obr. 2.2).



Obr. 2.2: Model stejnosměrného cize buzeného motoru

2.2.2 Sestrojení akčního bloku

Dalším blokem v náhradním schématu řízení stejnosměrného motoru, který musí být použit, je akční člen. V našem případě 4 kvadrantový tranzistorový pulzní měnič. Jehož dynamiku lze charakterizovat, jako dopravní zpoždění s hodnotou pohybující se od 0 do periody T pulzní šířkové modulace PWM. PWM realizujeme tím, že požadovaný průběh u_f porovnáváme s pilovým signálem u_p (Obr. 2.3). Přepínání tranzistorů dochází v případě protnutí u_f a u_p .



Obr. 2.3: Spínání PWM

Nastavení maximální řídicího napětí by v ideálním případě mělo odpovídat velikosti maximálního napětí pilového. Tímto nastavením, dosáhneme velikost výstupního napětí na výstupu měniče U_{mv} , které se bude pohybovat v rozmezí hodnot $< -U_{mv} ; U_{mv} >$. [9]
Matematicky:

$$\frac{u_r}{U_{rmax}} = \frac{U_d}{U_c} \quad (2.6)$$

U_d je zde střední hodnotou napětí na výstupu pulzního měniče. Pomocí vztahu (2.6) určíme napěťový přenos měniče.

$$K_u = \frac{U_d}{U_{rmax}} \quad (2.7)$$

Pro náš případ bude použito napětí 150V a řídicí napětí bude 100%.

$$K_u = \frac{150}{1}$$

Protože změna napětí se projeví až při další setkání průběhů napětí u_f a u_p dochází k dopravnímu zpoždění, které po zjednodušení vypočteme vztahem:

$$\tau_u = \frac{1}{2f_s} \quad (2.8)$$

f_s je spínací frekvence měniče a pro náš případ je její hodnota 5kHz.

$$\tau_u = \frac{1}{2 \cdot 5000} = 0.0001$$

Výsledná rovnice přenosové funkce měniče:

$$F_u(p) = K_u \cdot e^{-p\tau_u} = \frac{K_u}{1 + p\tau_u} \quad (2.9)$$

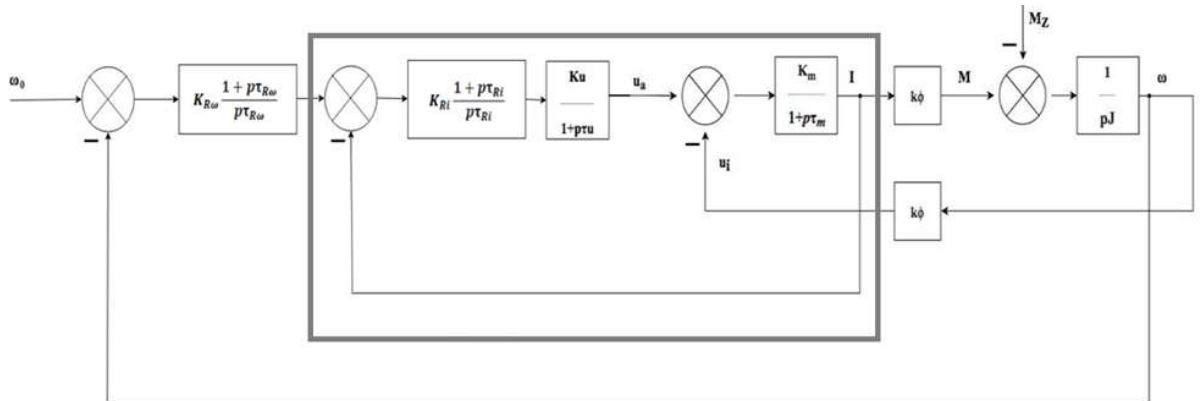
$$F_u(p) = \frac{150}{1 + 0.0001p}$$

2.2.3 Kaskádní regulace stejnosměrného motoru

Pro návrh otáčkového a proudového regulátoru cize buzeného motoru je vhodné rozdělit regulační schéma. Vzniknou tedy dvě regulační smyčky - vnitřní proudová a její nadřazená rychlostní. Tyto regulační smyčky budou následně sestaveny s regulátory PI, PID a PI s dopřednou vazbou. [12]

2.3 Simulační model regulace vnitřní proudové smyčky

Jak bylo řečeno výše, rozdělíme návrh regulátoru na dvě smyčky. A nejprve navrhne vnitřní regulační smyčku proudu (Obr. 2.4).



Obr. 2.4: Blokové schéma PI regulátoru s vyznačenou proudovou smyčkou

Pokud je regulátor správně navržen můžeme si dovolit určitá zjednodušení. V tomto okamžiku můžeme zanedbat vliv zpětné vazby indukovaného napětí u_i , neboť změny signálu této veličin jsou proti změnám navržené vnitřní proudové smyčky relativně pomalé.

Pro návrh použijeme frekvenční metody, které mají za cíl modifikovat frekvenční charakteristiku otevřené smyčky $L_{(j\omega)}$ tak, aby výsledná frekvenční charakteristika uzavřené smyčky $T_{(j\omega)}$ měla požadovaný průběh. Mezi $L_{(j\omega)}$ a $T_{(j\omega)}$ existuje jednoznačný vztah: [16]

$$T_{(j\omega)} = \frac{L_{(j\omega)}}{1 + L_{(j\omega)}} \quad (2.10)$$

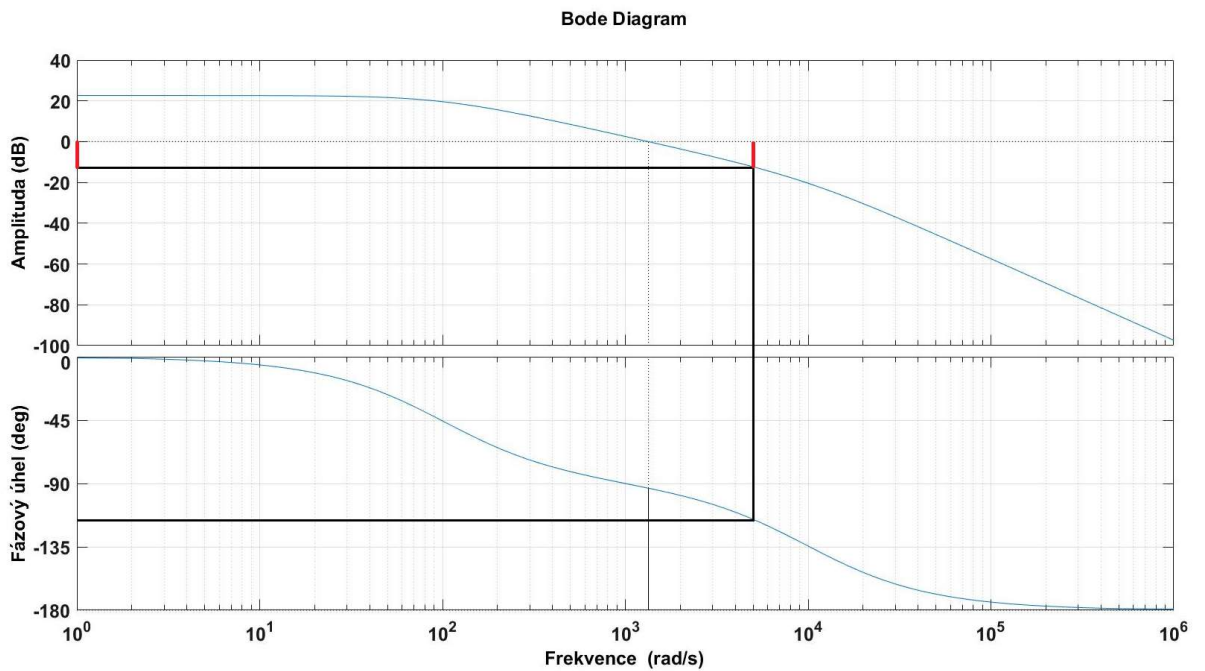
Pro návrh nejprve použijeme otevřené smyčky a pouze regulátor typu P. Odpojíme zpětnou vazbu od čidla proudu a regulátor nastavíme na hodnotu $K_{Ri} = 1$ a $\tau_{Ri} \rightarrow \infty$.

Po těchto úpravách dostáváme přenosovou rovnicí otevřené smyčky F_{oi} :

$$F_{oi} = 1 \cdot \frac{K_u}{1 + p\tau_u} \cdot \frac{1}{R} \quad (2.11)$$

$$F_{oi} = 1 \cdot \frac{150}{1 + 0.0001p} \cdot \frac{0.12}{1 + 0.01p} = \frac{18}{(1 + 0.0001p) \cdot (1 + 0.0101p)}$$

A z této rovnice sestrojíme amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristiku otevřené proudové smyčky F_{O_i} (Obr. 2.5).



Obr. 2.5: Amplitudová a fázově logaritmicky frekvenční charakteristika otevřené proudové smyčky F_{O_i}

2.3.1 Simulační model regulace vnitřní proudové smyčky PI

Pro reálné proudové zesílení K_{RI} vyjdeme z charakteristik a zvolíme si bezpečnost ve fázi $\varphi_b=60^\circ$, jelikož tato bezpečnost odpovídá regulaci bez překmitu nebo s minimálním překmitem. Velikost zesílení určíme pomocí určení kmitočtu řezu pro $\varphi_b=60^\circ$ a do tohoto kmitočtu posuneme amplitudovou a fázovou logaritmickou frekvenční charakteristiku smyčky F_{O_i} .

Matematicky tedy:

$$20 \log K_{RI} = \pm x \text{ [dB]}$$

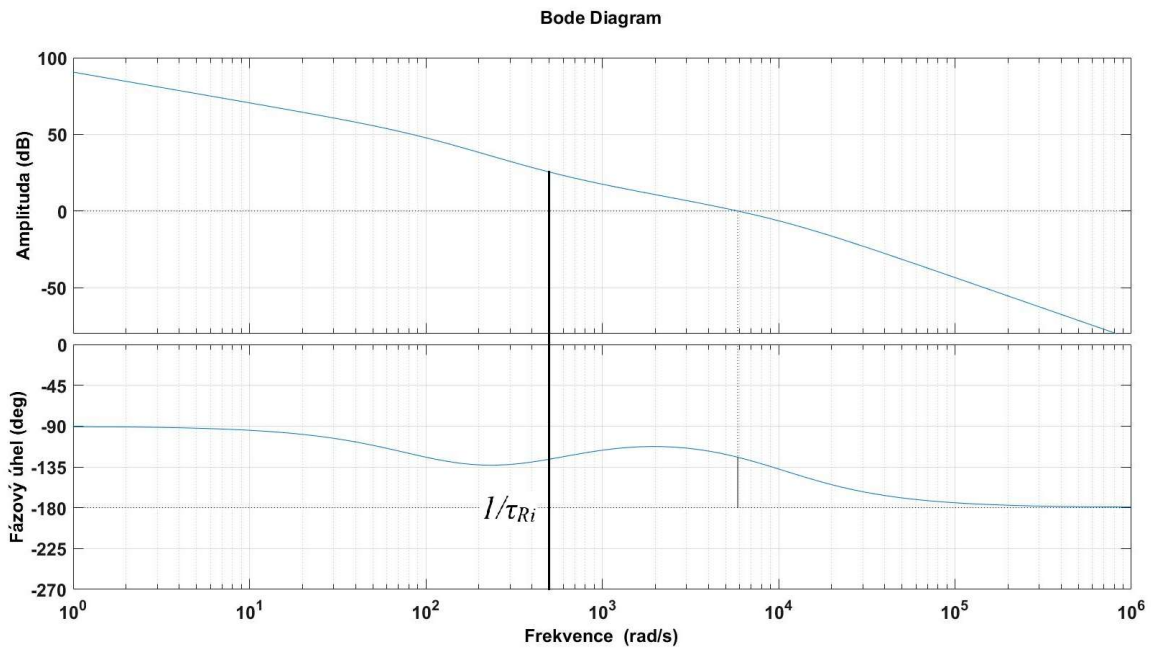
$$\log K_{RI} = \pm \frac{x}{20} \text{ [dB]}$$

$$K_{RI} = 10^{\pm \frac{x}{20}}$$

V našem případě proudové zesílení K_{RI} :

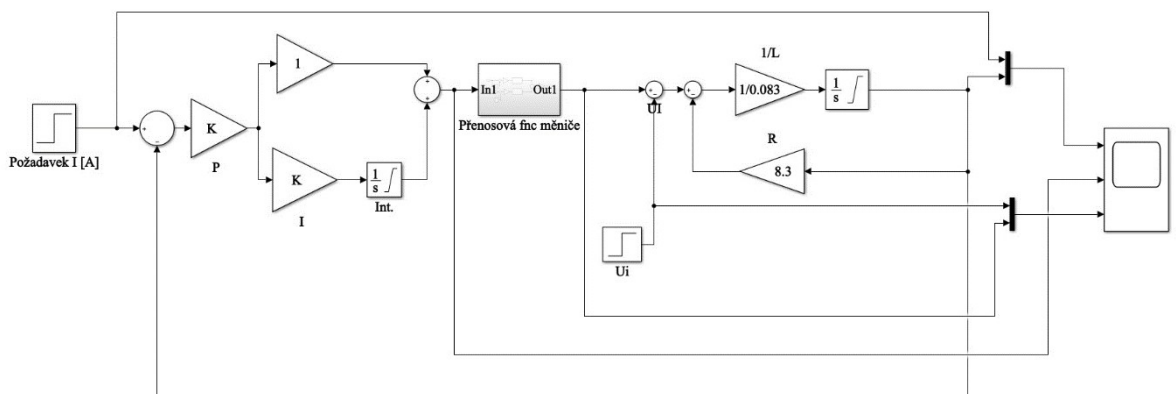
$$K_{RI} = 10^{\frac{12}{20}} = 4 \text{ [dB]}$$

Abychom zachovali bezpečnost ve fázi, respektive abychom ji co nejméně změnili, volíme konstantu integračního členu τ_{RI} co nejkratší a minimálně o dekádu nižší než je zlom bloku tranzistorového pulzního měniče. Následně ji upřesníme dle simulačního modelu. [13]



Obr. 2.6: Amplitudová a fázově logaritmicky frekvenční charakteristika otevřené proudové smyčky s parametry K_{RI} a $1/\tau_{RI}$

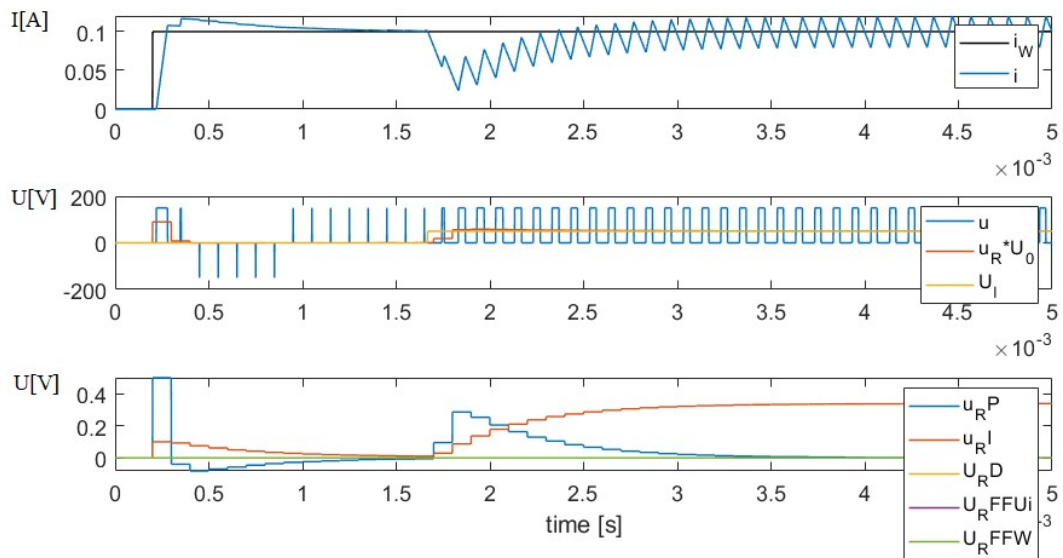
Pro simulování použijeme program Matlab, kde sestojíme model vnitřní proudové smyčky s PI regulátorem proudu dle schématu Obr. 2.7. Provedeme simulaci a následnou korekci hodnot členů regulátoru.



Obr. 2.7 Vnitřní proudová smyčka s PI regulátorem

V simulačním modelu jsou zavedeny dva požadavky. První na vstupu, který odpovídá požadované hodnotě proudu a druhý na výstupu, jenž odpovídá poruše, kterou představuje indukované napětí U_i , jenž má v simulacích hodnotu 50 V. Konstanta regulátoru PI pro proudovou smyčku byla odečtena z Bodeho charakteristiky: $K_{RI} = 4$ a $\tau_{Ri} = 0.002$ je to prvotní odhad, který byl na základě simulací změněn na $K_{RI} = 4$ a $\tau_{Rii} = 0.0005$.

Na obrázcích ze simulací vnitřní proudové smyčky (Obr. 2.8, 2.10, 2.12, 2.14) jsou vždy zobrazeny 3 grafy. Na prvním grafu je znázorněna požadovaná a reálná hodnota proudu. Na druhém grafu je znázorněna okamžitá hodnota napětí měniče, průměrná hodnota napětí a porucha U_i . Na posledním grafu jsou zobrazeny zásahy jednotlivých bloků regulátoru.



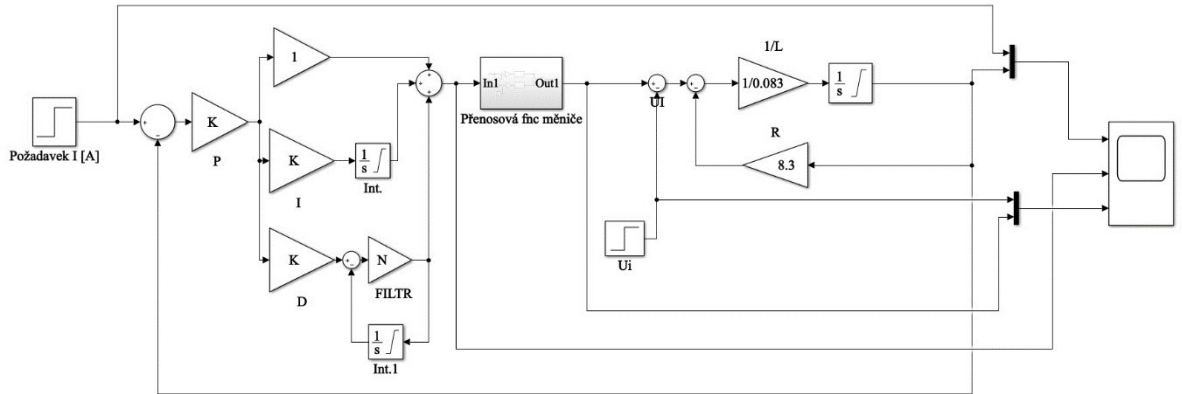
Obr. 2.8: Proudová smyčka s PI regulátorem s upravenými hodnotami

V přenosové charakteristice Obr. 2.8 vidíme náběh na požadovanou hodnotu proudu s překmitem. Následně dochází k ustálení okolo požadované hodnoty a k reakci na poruchu reprezentovanou indukovaným napětím U_i . Reálný proud klesá a následně se po 0.0015 s vrací na požadovanou hodnotu.

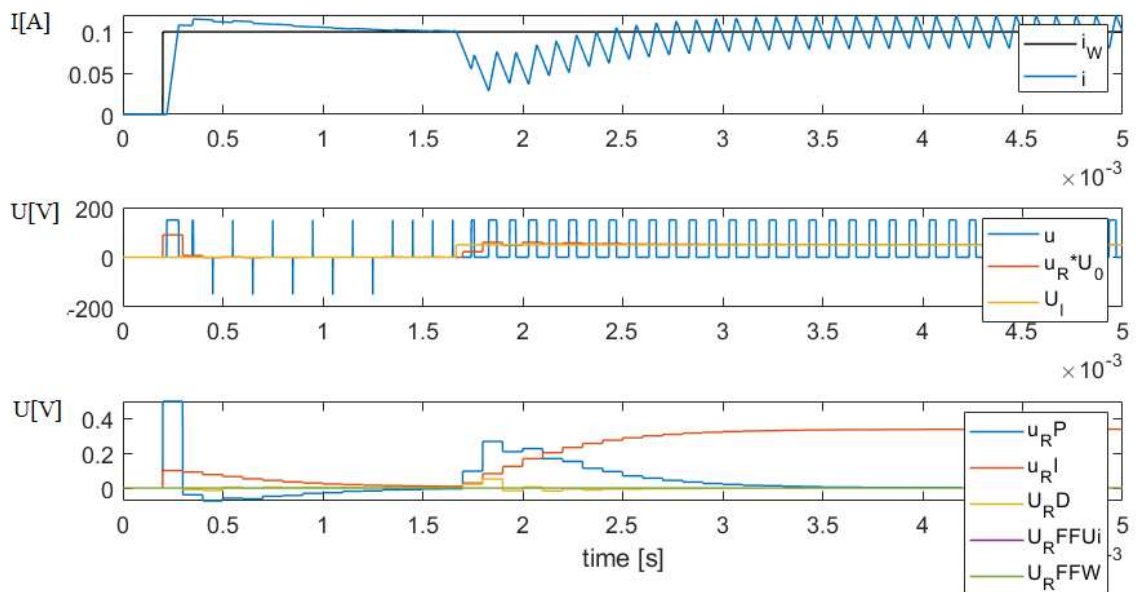
2.3.2 Simulační model regulace vnitřní proudové smyčky PID

Pro sestavení regulátoru PID vnitřní proudové smyčky vyjdeme ze stejné Bodeho charakteristiky jako v případě navrhování PI regulátoru (Obr. 2.5). Pro prvotní odhad dosadíme hodnotu $1/\tau_{Rid}$ o dekádu nižší než je hodnota zlomu bloku tranzistorového pulzního měniče,

hodnotu zesílení $K_{RI} = 4$ a $\tau_{RI} = 0.0005$ zachováme z předchozí simulace. Konečná hodnota τ_{RI} bude na základě předchozího odhadu a simulací $\tau_{RI} = 0,00003$ a velikost časové konstanty filtru $1/3 \tau_{RI}$.



Obr. 2.9: Vnitřní proudová smyčka s PID regulátorem



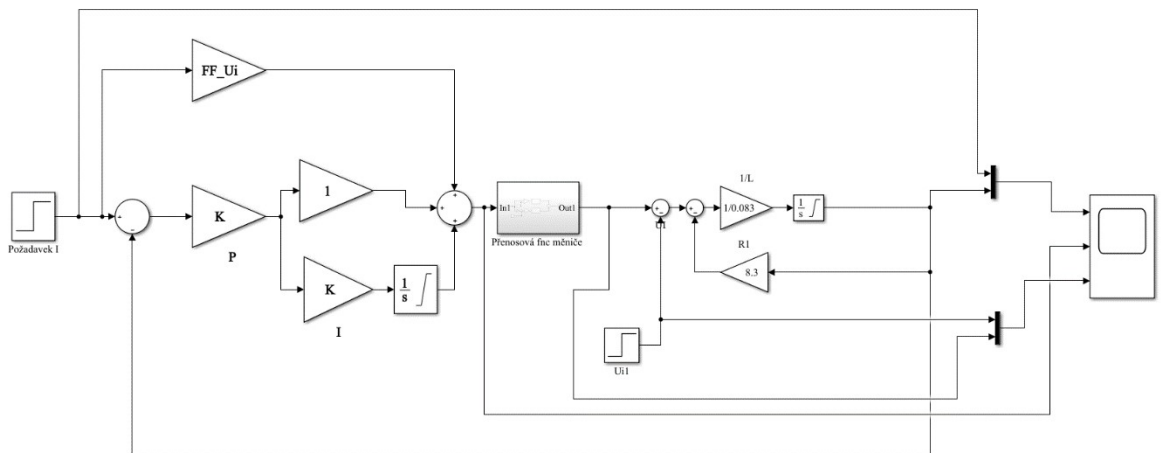
Obr. 2.10: Proudová smyčka s PID regulátorem

V přenosové charakteristice (Obr. 2.10) vidíme rychlost regulace s překmitem. Po sléze se ustálí okolo požadované hodnoty. U reakce na poruchu reprezentovanou indukovaným napětím U_I můžeme vidět drobné zlepšení, kde zásah derivační složky nenechá výstupní proud klesnout o takovou hodnotu jako v případě bez derivační složky. Nicméně změna je to velmi malá.

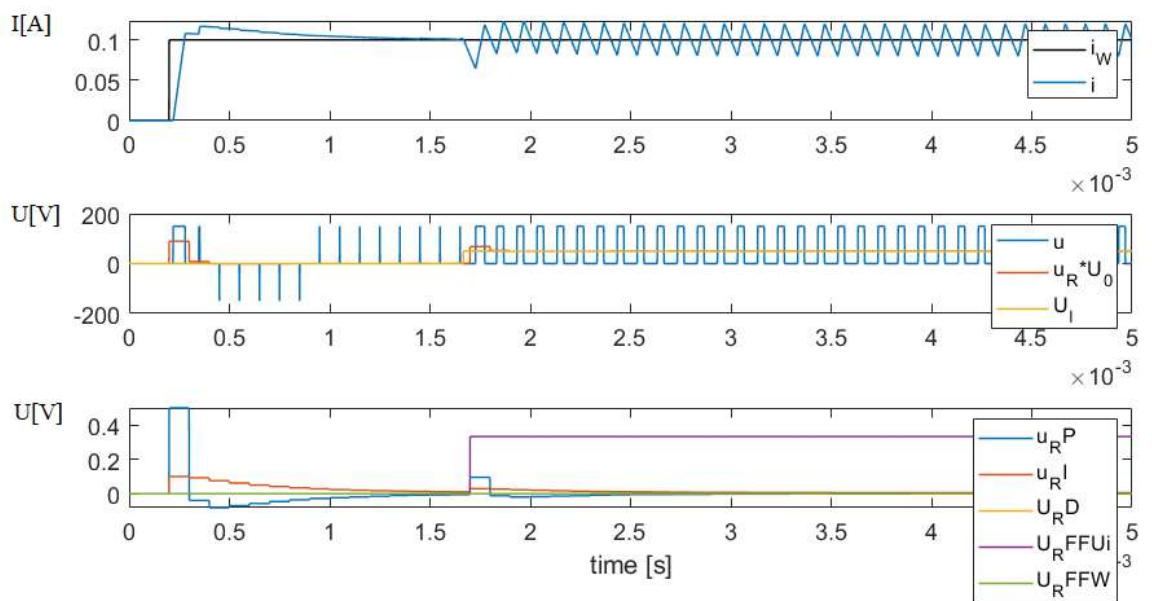
2.3.3 Simulační model regulace vnitřní proudové smyčky PI_FF

Pro návrh regulátoru PI s dopřednou vazbou vyjdeme z již navrženého regulátoru PI s hodnotami $K_{RI} = 4$ a $\tau_{RI} = 0.0005$ a ze znalosti přechodových charakteristik regulované soustavy. Kde blok dopředné vazby můžeme sestavit buď to pro poruchu U_I (Obr. 2.11), nebo pro celý systém měniče a kotvy (Obr. 2.14). Pro poruchu U_I bude hodnota dopředné vazby:

$$FF_{ui} = \frac{1}{Ku} \cdot R$$



Obr. 2.11: Vnitřní proudová smyčka s PI_FF regulátorem pro poruchu U_I

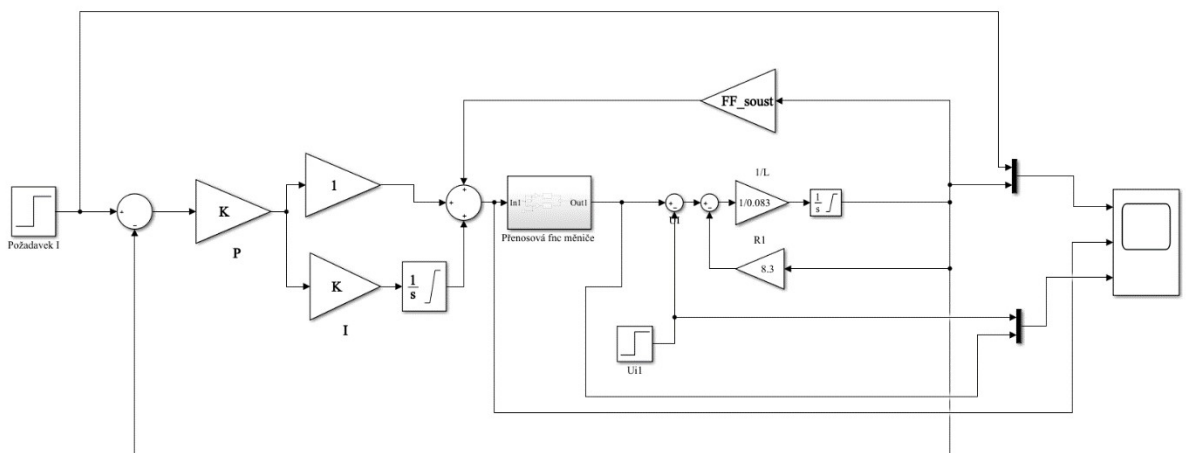


Obr. 2.12 Proudová smyčka s PI_FF regulátorem pro U_I

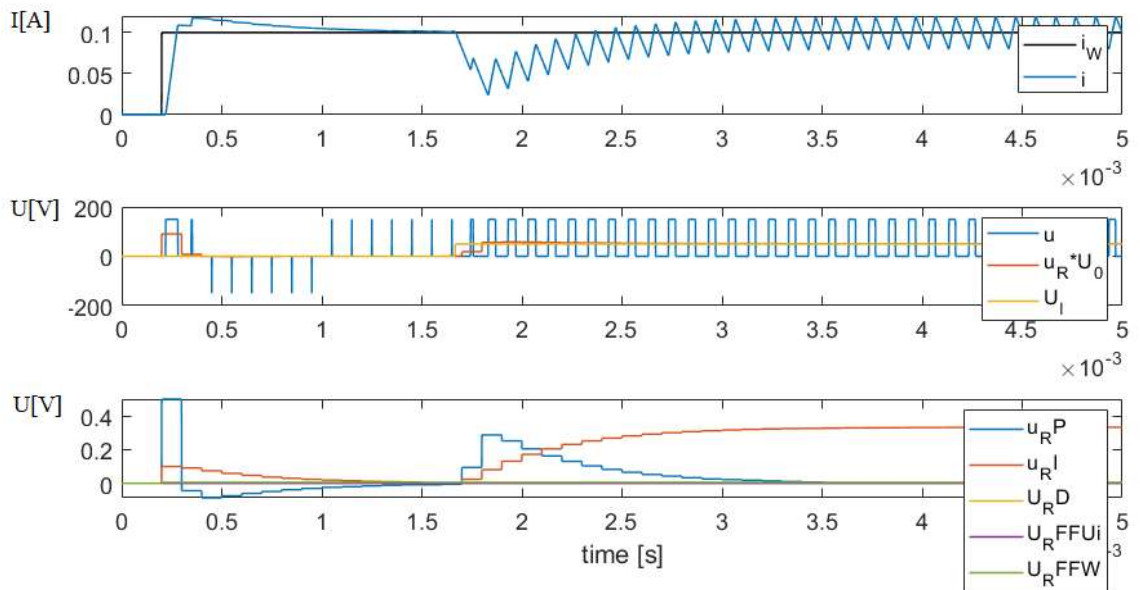
V přenosové charakteristice (Obr. 2.12) vidíme rychlost regulace s překmitem a ustálení se na požadované hodnotě. U reakce na poruchu reprezentovanou indukovaným napětím U_I můžeme vidět velké zlepšení, neboť regulátor s dopřednou vazbou téměř nenechá klesnout skutečný proud a okamžitě reaguje.

Pro celý systém regulátoru a obvodu kotvy bude hodnota dopředné vazby rovna:

$$FF_{soust} = \frac{k\Phi}{Ku}$$



Obr. 2.13: Vnitřní proudová smyčka s PI_{FF} regulátorem pro soustavu měniče a kotvy

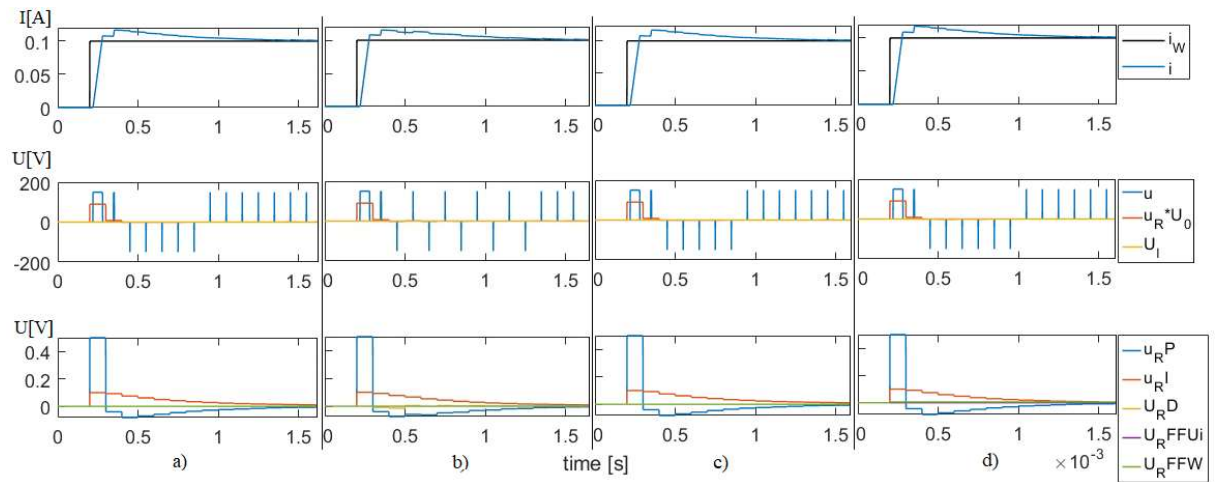


Obr. 2.14: Proudová smyčka s PI_{FF} regulátorem pro soustavu měniče a kotvy

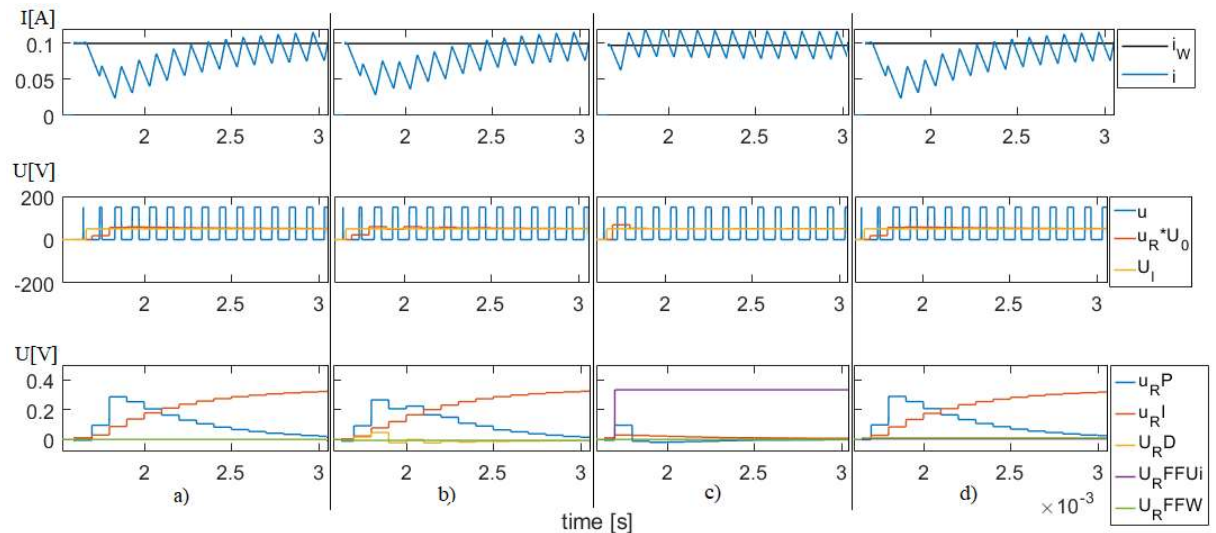
V přenosové charakteristice (Obr. 2.12) vidíme rychlost regulace s překmitem a ustálení se na požadované hodnotě. Reakce na poruchu reprezentovanou indukovaným napětím U_I se téměř neprojeví a je obdobná jako u regulátorů typu PI a PID.

2.3.4 Porovnání vnitřních proudových smyček

Pro porovnání regulátorů proudové smyčky si postavíme vedle sebe odpověď regulátorů na skokovou změnu (Obr. 2.15) a odpověď na poruchu (Obr. 2.16).



Obr. 2.15 Porovnání regulátorů na skokovou změnu: a) PI, b) PID c) $PI_FF_{U_i}$ d) PI_FF_{soust}



Obr. 2.16: Porovnání regulátorů na poruchu U_i změnu. a) PI, b) PID c) $PI_FF_{U_i}$ d) PI_FF_{soust}

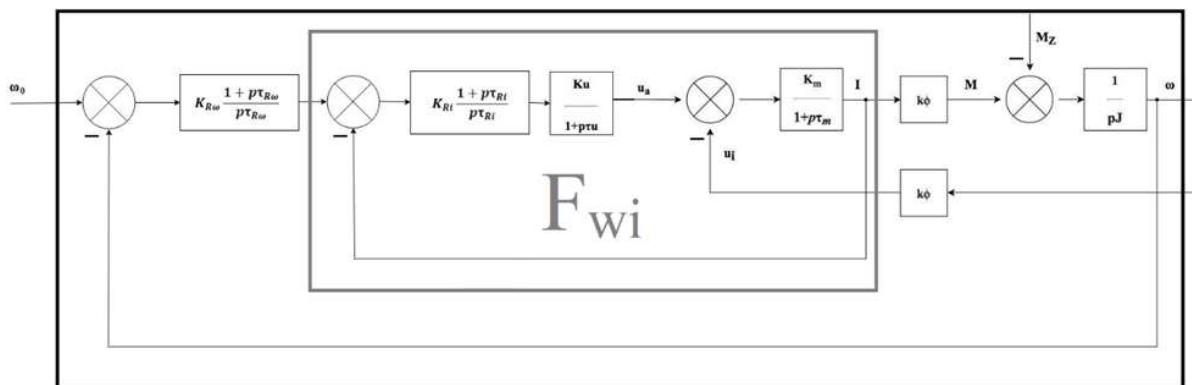
Jak bylo popsáno výše a jak je z porovnání patrné všechny simulované regulátory dokáží v proudové smyčce reagovat velmi rychle jak na skokovou změnu, tak na poruchu

reprezentovanou indukovaným napětím U_i . Nejlepších výsledků dosáhl regulátor PI_FF U_i s dopřednou vazbou a proto bude použit i do následných simulací nadřazené rychlostní smyčky.

2.4 Navržení nadřazené rychlostní smyčky

Pro návrh nadřazeného regulátoru rychlosti použijeme obdobný postup jako při návrhu proudového regulátoru. Pro vnitřní proudovou smyčku použijeme regulátor typu PI s dopřednou vazbou, jenž měl nejlepší výsledky. Nami vypočtenou regulační smyčku upravíme, abychom získali přenos uzavřené proudové smyčky F_{wi} (Obr. 2.17). Pro kterou platí rovnice odvozena ze vztahu (2.10):

$$F_{wi}(p) = \frac{F_{iO}}{1 + F_{iO}} \quad (2.12)$$

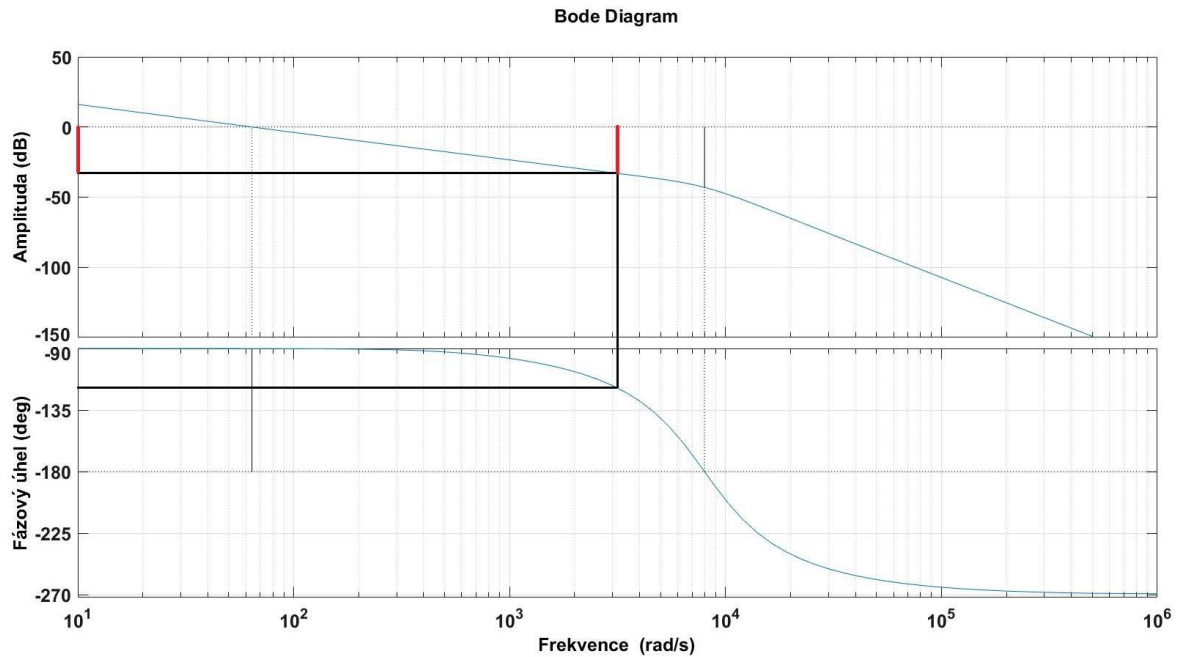


Obr. 2.17: Blokové schéma PI regulátoru s vyznačenou otáčkovou smyčkou

Nejprve, jako v přechozím případě pro proudovou regulační smyčku, sestavíme otevřenou smyčku a budeme uvažovat otáčkový regulátor jako regulátor typu P s přenosem $F_{\omega O} = K_{R\omega}$. S předpokladem $K_{R\omega} = 1$ a $\tau_{R\omega i} \rightarrow \infty$. Po těchto úpravách dostáváme přenosovou rovnici otevřené smyčky $F_{\omega O}$:

$$F_{\omega O} = F_{wi} \cdot k\phi \cdot \frac{1}{pJ} \quad (2.13)$$

Dále sestrojíme z této rovnice amplitudovou a fázovou logaritmickou frekvenční charakteristiku smyčky $F_{\omega O}$ (Obr. 2.18). Stejně jako v předchozím případě zvolíme bezpečnost ve fázi $\phi_b = 60^\circ$ a určíme zesílení regulátoru $K_{R\omega}$ a konstantu $\tau_{R\omega i}$. [13]



Obr. 2.18: Amplitudová a fázově logaritmičsky frekvenční charakteristika otevřené proudové smyčky $F_{\omega O}$

$$20 \log K_{R\omega} = \pm x \text{ [dB]}$$

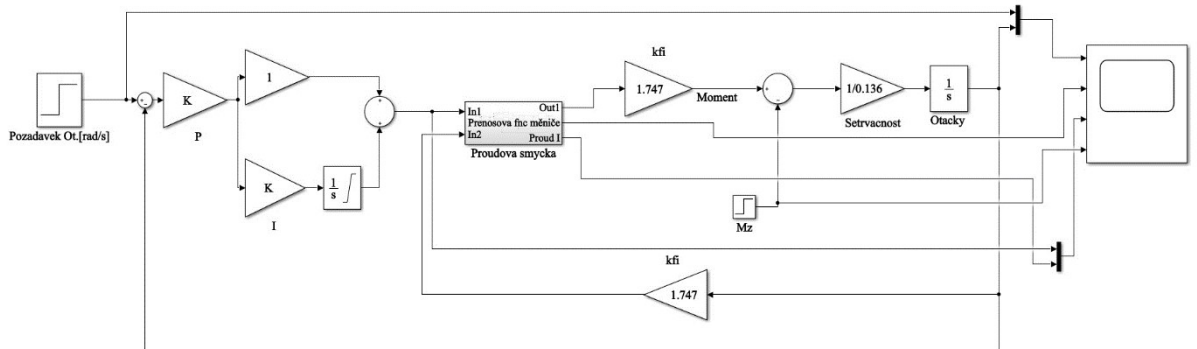
$$\log K_{R\omega} = \pm \frac{x}{20} \text{ [dB]}$$

$$K_{R\omega} = 10^{\frac{34}{20}} = 50.1$$

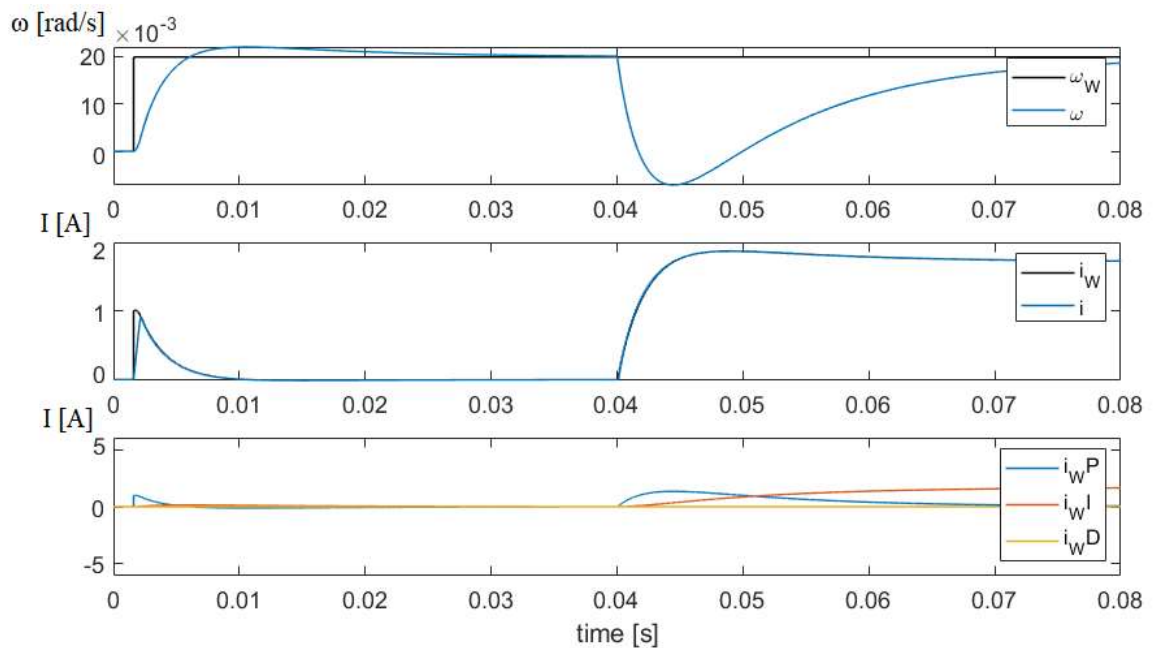
2.4.1 Navržení nadřazené rychlostní smyčky PI

Pro modelování opět použijeme program matlab, ve kterém sestrojíme model nadřazené rychlostní smyčky s PI regulátorem otáček dle schématu Obr. 2.19. V simulačním modelu jsou opět zavedeny dva požadavky. První na vstupu, který odpovídá požadované hodnotě otáček a druhý na výstupu, jenž odpovídá poruše, kterou představuje zátěžný moment M_Z se simulovanou hodnotou $3 \text{ N}\cdot\text{m}$. Hodnoty PI regulátoru po výpočtu a simulacích byly nastaveny na $K_{R\omega} = 50$ a $\tau_{R\omega i} = 0.013$. Dále pro lepší názornost byly vybrány dva požadavky na skok otáček. Velikost prvního malého skoku otáček je 0.02 rad/s . Velikost druhého skoku otáček, byla nastavena na 1 rad/s .

Na obrázcích ze simulací nadřazené rychlostní smyčky (Obr. 2.20, 2.21, 2.23, 2.24, 2.26, 2.27) jsou zobrazeny vždy 3 grafy. Na prvním grafu je znázorněna požadovaná a reálná hodnota otáček. Na druhém grafu je znázorněna požadovaná a reálná hodnota proudu kotvy. Na posledním grafu lze vidět zásahy jednotlivých bloků regulátoru.

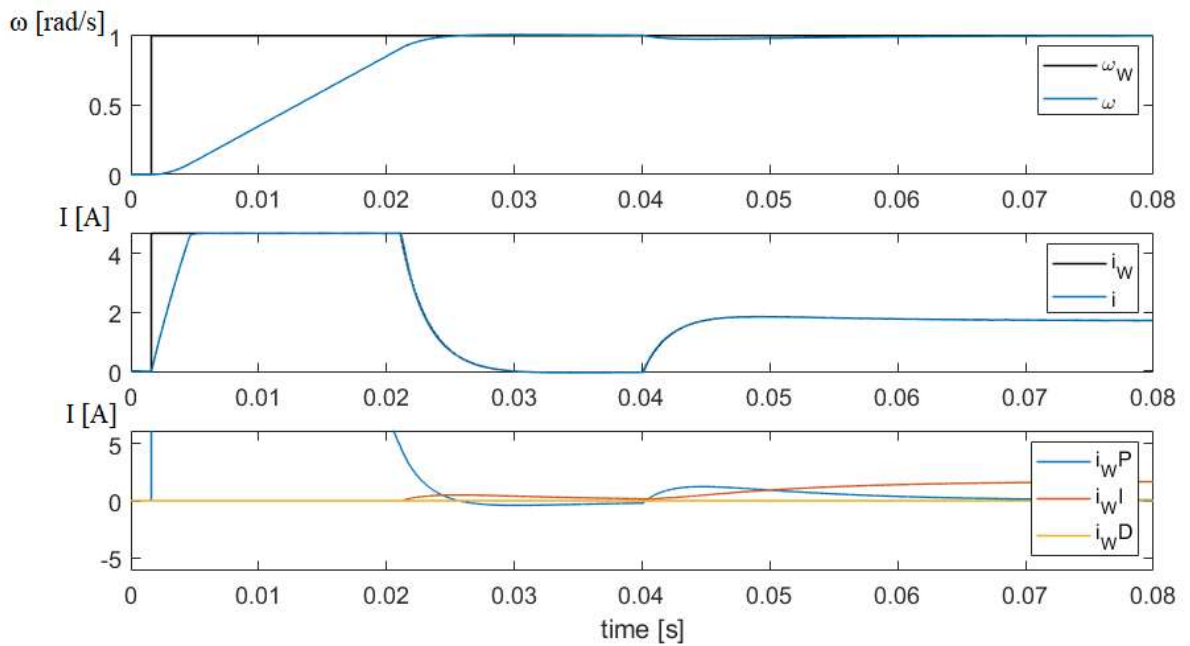


Obr. 2.19 Nadřazená rychlostní smyčka PI regulátorem



Obr. 2.20: Rychlostní smyčka s PI regulátorem pro malý skok

Na grafu (Obr. 2.20) můžeme vidět skutečnou rychlost s překmitem nad požadovanou hodnotou asi o 2 %. Po té se ustálí na požadované hodnotě. Na poruchu systém reaguje a během 0.04 s ji doreguluje na požadovanou hodnotu.

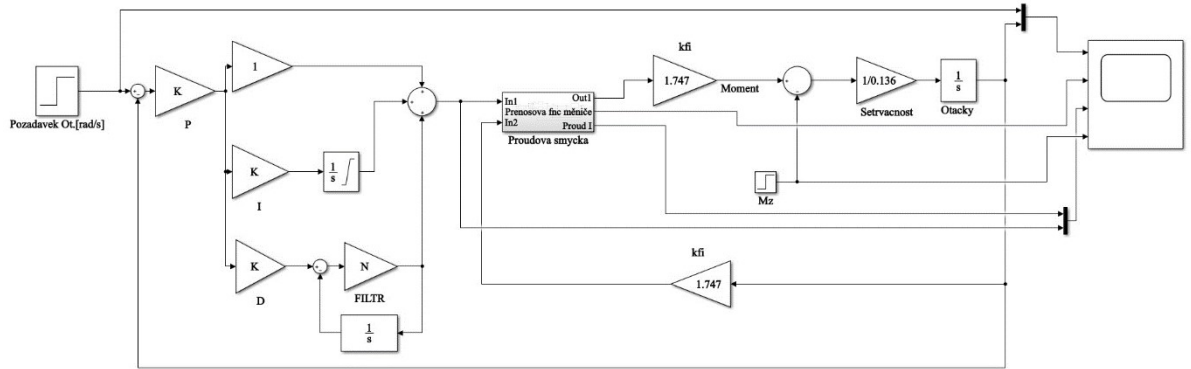


Obr. 2.21: Rychlostní smyčka s PI regulátorem pro skok - 1 [rad/s]

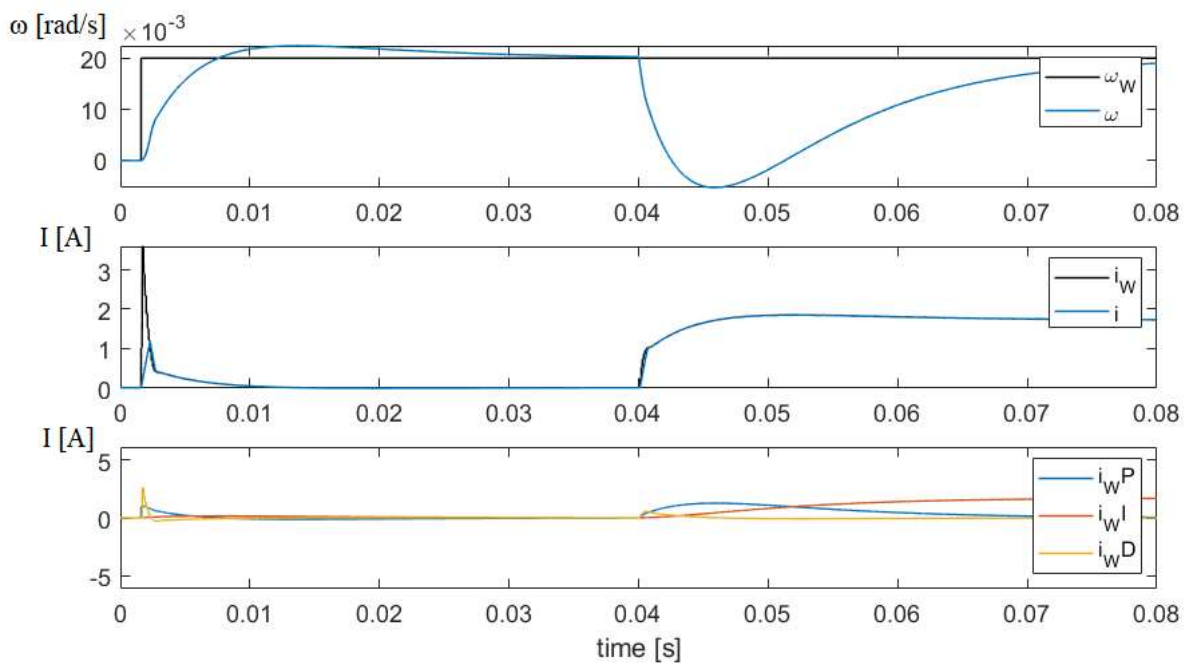
U požadavku s velikostí 1 rad/s můžeme vidět, že se systém dostal do proudového omezení a náběh na požadovanou hodnotu je pomalejší.

2.4.2 Navržení nadřazené proudové smyčky PID

Pro sestavení regulátoru PID nadřazené rychlostní smyčky vyjdeme ze stejné Bodeho charakteristiky jako v případě navrhování PI regulátoru (Obr. 2.18). Pro prvotní odhad dosadíme hodnotu $1/\tau_{Rd\omega}$ o dekádu nižší než je hodnota zlomu bloku tranzistorového pulzního měniče hodnotu zesílení $K_{R\omega} = 50$ a $\tau_{R\omega i} = 0.013$ zachováme z předchozí simulace. Konečná $\tau_{R\omega d}$ hodnota na základě předchozího odhadu a simulací bude $\tau_{R\omega d} = 0,003$ a velikost časové konstanty filtru $1/3 \tau_{Rid}$. Dále sestojíme opět simulační model (Obr. 2.22) s vypočtenými hodnotami a provedeme simulaci (Obr. 2.23).

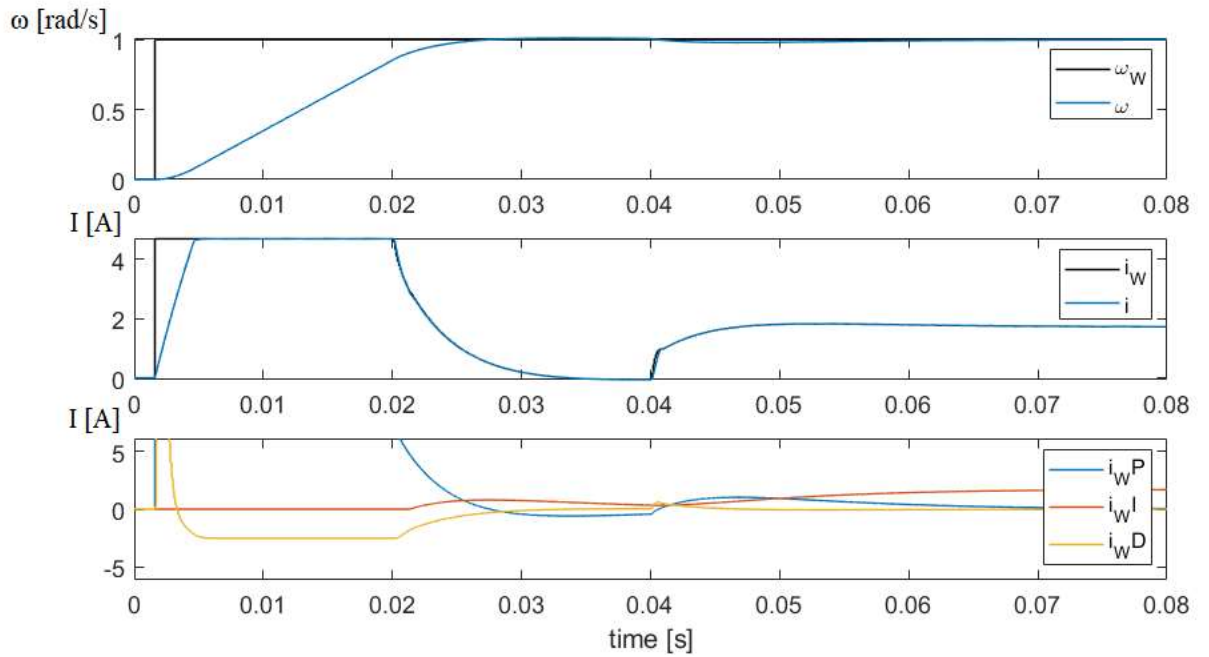


Obr. 2.22 Nadřazená rychlostní smyčka s PID regulátorem



Obr. 2.23: Rychlostní smyčka s PID regulátorem pro malý skok

Na grafu (Obr. 2.23) můžeme vidět skutečnou rychlost s překmitem nad požadovanou hodnotou přibližně o 2 %. Po té se ustálí na požadované hodnotě. Na poruchu systém reaguje, ale o něco pomaleji než s regulátorem PI.

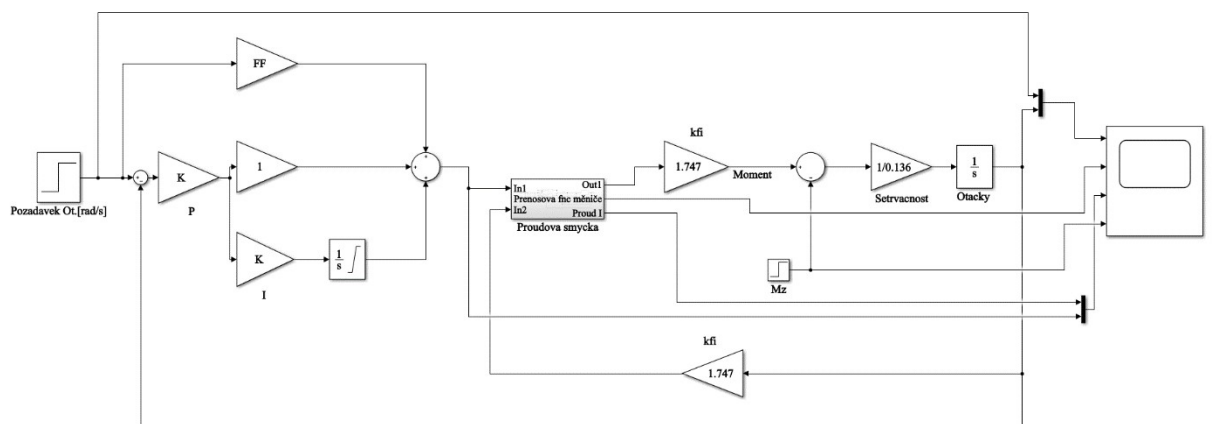


Obr. 2.24: Rychlostní smyčka s PID regulátorem pro skok - 1 [rad/s]

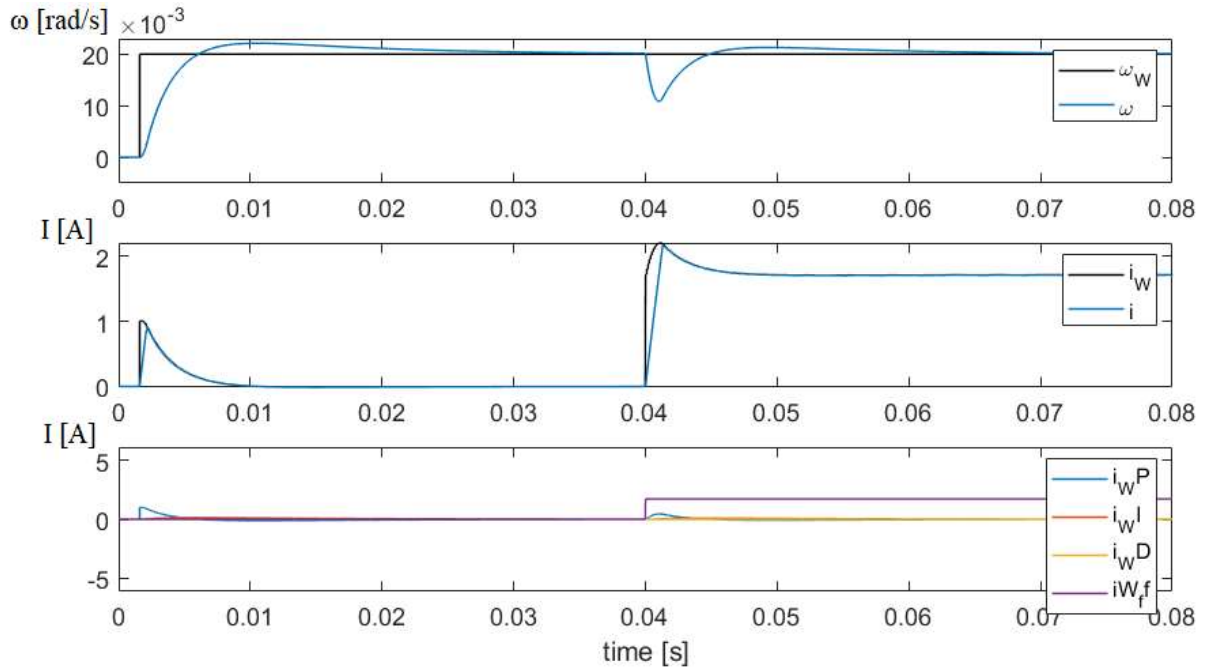
U požadavku s velikostí 1 rad/s vidíme podobné výsledky jako u regulátoru PI. Na spodním grafu jsou vidět zásahy derivačního modulu regulátoru PID.

2.4.3 Navržení nadřazené otáčkové smyčky PI_FF

Pro návrh regulátoru PI s dopřednou vazbou vyjdeme z již navrženého regulátoru PI s hodnotami $K_{R\omega} = 50$ a $\tau_{R\omega i} = 0.013$ a ze znalosti přechodových charakteristik regulované soustavy. Blok dopředné vazby, pak sestavíme pro poruchu reprezentovanou momentem M_z .

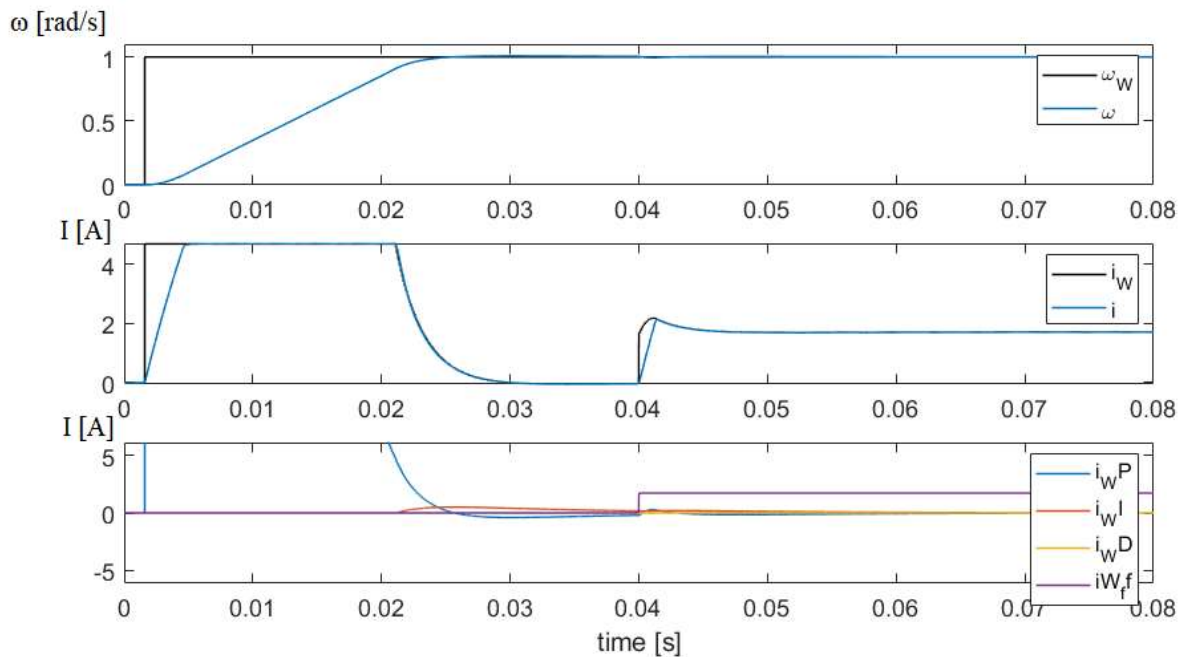


Obr. 2.25: Nadřazená rychlostní smyčka s PI_FF regulátorem



Obr. 2.26: Rychlostní smyčka s PI_FF regulátorem pro malý skok

Na grafu (Obr. 2.26) můžeme vidět skutečnou rychlost s překmitem nad požadovanou hodnotou přibližně o 2 % tak jako u předcházejících dvou typů regulátorů. Po té se ustálí na požadované hodnotě. Na poruchu však systém reaguje velmi rychle a dokáže ji doregulovat během 0.01 s.

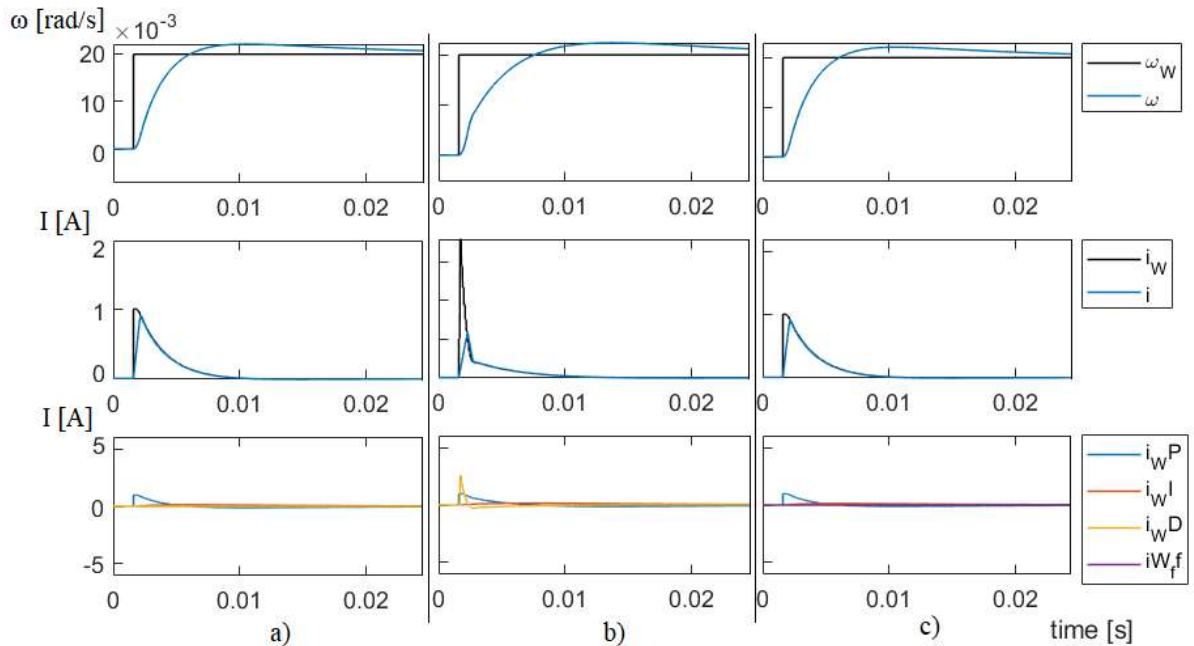


Obr. 2.27: Rychlostní smyčka s PI_FF regulátorem pro skok - 1 [rad/s]

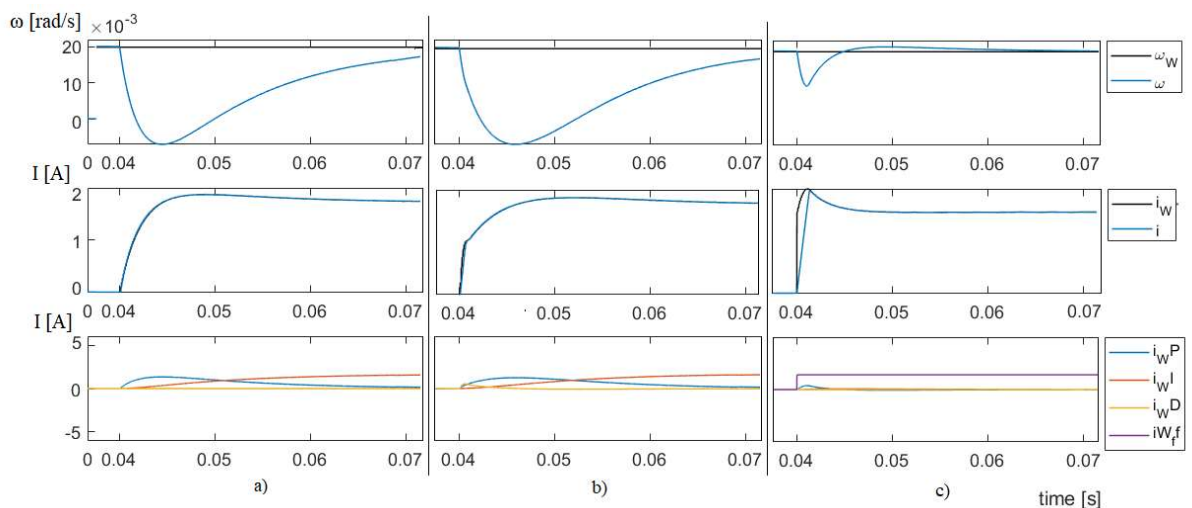
U požadavku s velikostí 1 rad/s vidíme podobné výsledky jako u regulátoru PI a PID. Porucha M_Z však je téměř nepostřehnutelná.

2.5 Porovnání regulátorů PI, PID a PI_FF pro stejnosměrný motor

Pro porovnání regulátorů nadřazené rychlostní smyčky si postavíme opět vedle sebe odpověď regulátorů na skokovou změnu (Obr. 2.28) a odpověď na poruchu (Obr. 2.29).



Obr. 2.28: Porovnání regulátorů na skokovou změnu: a) PI, b) PID c) PI_FF



Obr. 2.29 Porovnání regulátorů na poruchu M_Z změnu. a) PI, b) PID c) PI_FF

Jak bylo ukázáno, všechny simulované regulátory dokáží systém správně a rychle regulovat. Jako nejlepší se jeví použití regulátoru s dopřednou vazbou. Pro tento regulátor je však nutné

znát velmi dobře regulovanou soustavu nebo poruchu, která může v systému nastat. Mezi regulátory typu PI a PID nebyl při simulacích příliš viditelný rozdíl.

Závěr

Předložená práce je zaměřena na problematiku regulace stejnosměrného motoru. Na první část, která se zabývá stručným teoretickým rozbohem dané problematiky navazuje praktická a zároveň hlavní část práce.

Na základě teoretických předpokladů a měření reálných hodnot daného motoru byl sestaven zjednodušený simulační model regulace rychlosti stejnosměrného cize buzeného motoru. Pro tento model byla zároveň navržena regulace vnitřní proudové a vnější rychlostní smyčky s regulátory typu PI, PID a PI s dopřednou vazbou. Dále bylo pomocí programu Matlab nasimulováno chování jednotlivých regulátorů na námi definovanou poruchu, rychlost jejich reakce a dobu ustálení na požadované hodnotě.

Z provedených simulací a získaných hodnot jednotlivých parametrů vyplývá, že jsou všechny tři navrhované regulátory vhodné pro řízení stejnosměrného motoru. Ze simulací dále vyplynulo, že použití PID regulátoru s tranzistorovým měničem napětí je možné a simulovaný systém nezaznamenal problémy s derivační složkou. Jako nejvhodnější se jevil regulátor s dopřednou vazbou, ale jak bylo popsáno, je velmi citlivý na nastavení správné hodnoty dopředné vazby.

Vzhledem k nepříliš výraznému přínosu derivační složky při provedených simulacích pomocí PID regulátoru je patrné, že tento systém není nejvhodnější jako pomůcka při výuce regulační techniky. Je rovněž vhodné dodat, že z hlediska praktického využití stejnosměrného motoru, například v oblasti průmyslu, nemívá derivační složka velkého využití.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, V. a SKALA, B.: Měření na elektrických strojích. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 109 s. ISBN 80-7082-896-X
- [2] BARTOŠ, V.: Teorie elektrických strojů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7
- [3] PITTERMANN, M.: Elektrické pohony – základy. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-729-2
- [4] NOSKIEVIČ, P.: Modelování a identifikace systémů. Montex a.s., Ostrava, 1999. ISBN 80-7225-030-2
- [5] KOBRLE, P. a PAVELKA, J.: Elektrické pohony a jejich řízení. Praha: České vysoké učení technické, 2017. ISBN 978-80-0106-007-0
- [6] MathWorks. Product Documentation. [online]. Poslední změna 10.8.2011. [Cit. 20.5.2018]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.html>
- [7] ASTRÖM, K.J a HÄGGLUND, T.: PID controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, U.S.A. 1995
- [8] DC motor, field structure, and armature assembly. [online]. Poslední změna 14.7.2012. Dostupné z: <http://emadrlc.blogspot.cz/2012/07/dc-motor-field-structure-and-armature.html>
- [9] ANDRLOVÁ, E., Regulátor stejnosměrného elektromotoru, Bakalářská práce, Plzeň, Plzeň 2012
- [10] Hlavní druhy stejnosměrných strojů [online]. Poslední změna 5.5.2009. [Cit. 20.5.2018] Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/hlavni-druhy-stejnosmernych-stroju/view>
- [11] KLÁN, P. Metody zlepšení PI regulace [online]. Poslední změna 12.2001. [Cit. 10.4.2018]
- [12] KREJČÍ, A., Pokročilé techniky řízení pohybu pro mechatrické aplikace, Diplomová
- [13] EDUCON – Výukový systém ZČU – FEL/KEV [online] Poslední změna 10.8.2011. [Cit. 20.5.2018]. Dostupné z: <http://educon.zcu.cz/view.php?cislomodulu=2006041406>
- [14] SCHLEGEL M., Průmyslové PID regulátory: Tutorial [online]. Poslední změna 2001. [Cit. 20.5.2018] Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Milos_Schlegel2/publication

- [15] YOUNKIN G.W., Current Feedforward control [online]. Poslední změna 2012. [Cit.20.5.2018].Dostupné z: <http://support.ctc-control.com/customer/elearning/younkinn/currentFeedForward.pdf>
- [16] BUBLA, P., Návrh PID regulátorů frekvenčními metodami, Bakalářská práce, Praha, Praha 2012

Přílohy

Příloha 1 – Zadávání parametrů

%Parametry motoru

fp=5000; %frekvence nosne pily, Hz
urmax=0.98; %rozsah ridiciho napeti mustku
wmax=1400/60*2*pi;
imax=4.7; %maximální proud [A]
U=150; %napajeci napeti [V]
R=8.3; %odpor vinuti [Ohm]
L=0.083; %indukcnost vinuti [H]
J=0.163; %setrvačnost
kfi=1.747; %2.735*70/110;

Příloha 2 – Simulace proudové smyčky

```
%Simulace proudove smyc.
```

```
dt=1e-7;%[s]
```

```
tkonec=0.005;% cas konce
```

```
tZap=1e-6; %perioda zapisovani vysledku
```

```
ikonec=floor(tkonec/dt);
```

```
%parametry regulatoru
```

```
krI=5;
```

```
TaurI=5e-4;
```

```
TaurID=3e-5;
```

```
TaurID2=TaurID/3;
```

```
%pocatecni podminky
```

```
t=0;i=0;sumI=0;sumW=0;ur=0;otw=0;ot=0;
```

```
u=0;Ui=0;Mz=0;urOld=0;M=0;iW=0;ewf=0;ewfOld=0;eif=0;eifOld=0;
```

```
ur_p=0;ur_i=0;ur_d=0;ur_ffui=0;ur_ffw=0;
```

```
iZap=1;
```

```
vys=zeros(17,floor(tkonec/tZap));
```

```
pila=-1;
```

```
dpila=4*fp;
```

```
dt2=1/fp/2; %vzorkovani regulatoru,pulka pily
```

```
%vlastni vypocetni smycka
```

```
for icas=1:ikonec
```

```
    t=(icas-1)*dt;
```

```
    %definovani prubehu poruchy
```

```
    if t>tkonec*1/3
```

```
        Ui=50;
```

```
    end;
```

```
    %modulace pred pilou, tj. tVypoctu=Tvz
```

```
    if ur>=pila
```

```
        u10=U/2;
```

```
    else
```

```
        u10=-U/2;
```

```
    end;
```

```
    if -ur>=pila
```

```
        u20=U/2;
```

```
    else
```

```
        u20=-U/2;
```

```
    end;
```

```
    u=u10-u20;
```

```
    pila=pila+dpila*dt;
```

```
    ew=otw-ot; %regulacni odchylka
```

```
    ei=iW-i;
```

```
    eif=eif+dt/TaurID2*(ei-eif);
```

```
    if abs(pila)>1
```

```
        if (abs(krW*ew)<imax)&&(abs(iW)<imax)
```

```
            sumW=sumW+1/TaurW*ew*dt2;
```

```
end
iW=krW*(ew+sumW);
if iW>imax iW=imax; end
if iW<-imax iW=-imax; end

if t>1e-4
    iW=0.1;
else
    iW=0;
end
%PI (P) regulator proudu
ei=iW-i;
if (abs(krI*ei)<urmax)&&(abs(ur)<urmax)
    sumI=sumI+1/TaurI*ei/fp/2; %integrace reg. odchylky.
end
ur_p=krI*ei; % proporcionalni
ur_i=krI*sumI; % integracni
ur_d=krI*(+eif-eifOld)*fp*2*TaurID; % derivacni
%ur_ffui=Ui/U; %ff napeti
%ur_ffw=iW/U*R; %ff soustava
ur=ur_p;
ur=ur+ur_i;
ur=ur+ur_d;
ur=ur+ur_ffui;
ur=ur+ur_ffw;

if ur>urmax ur=urmax; end
if ur<-urmax ur=-urmax; end
eifOld=eif;

dpila=-dpila;
if pila>1 pila=1; end;
if pila<-1 pila=-1; end;
end

% vypočet diference proudu (z rovnice  $u=R*i+L*di/dt$ )
di_dt=1/L*(u-R*i-Ui);

% numerická integrace Eulerovou metodou

i=i+di_dt*dt;

% zapis vysledku do pole
if t >= tZap*iZap
    iZap = iZap + 1;
    vys(:,iZap) = [t,otw,ur,u,Ui,ot,Mz,i,iW,ur_p,ur_i,ur_d,ur_ffui,ur_ffw,ei,eif,eifOld]';
end

end;

coKreslit='id';
Simulace_Motor_kresleni
```

Příloha 3 – Simulace rychlostní smyčky

```
%Simulace Ot. Smyc.

dt=1e-8;%[s]
tkonec=0.08;
tZap=1e-6; %perioda zapisovani vysledku

ikonec=floor(tkonec/dt);

%parametry I regulatoru
krI=5;
TaurI=5e-4;
TaurID=3e-5;
TaurID2=TaurID/3;

%parametry ot regulatoru
krW=50;
TaurW=0.013;
TaurWD=1e-3;
TaurWD2=TaurWD/3;

%pocatecni podminky
t=0;i=0;sumI=0;sumW=0;ur=0;otw=0;ot=0;
u=0;Ui=0;Mz=0;urOld=0;M=0;iW=0;ewf=0;ewfOld=0;eif=0;eifOld=0;
    ur_p=0;ur_i=0;ur_d=0;ur_ffui=0;ur_ffw=0;
    iW_p=0;iW_i=0;iW_d=0;iW_ff=0;otOld=0;Mzz=0;
iZap=1;
vys=zeros(18,floor(tkonec/tZap));
pila=-1;
dpila=4*fp;
dt2=1/fp/2; %vzorkovani regulatoru pulka pily

%vlastni vypocetni smycka
for icas=1:ikonec
    t=(icas-1)*dt;
    %definovani pozadovaneho prubehu otacek
    if t>tkonec/50 otw=0.02; end;
    %definovani prubehu poruchy
    if t>tkonec/2
        Mz=3; % velikost poruchy
    end;

    %modulace pred pilou
    if ur>=pila
        u10=U/2;
    else
        u10=-U/2;
    end;

    if -ur>=pila
        u20=U/2;
    else
        u20=-U/2;
    end;

    u=u10-u20;
```

```

pila=pila+dpila*dt;
ew=otw-ot; %regulacni odchylka
ei=iW-i;
eif=eif+dt/TaurID2*(ei-eif);

if abs(pila)>1

    if (abs(krW*ew)<imax)&&(abs(iW)<imax)
        sumW=sumW+1/TaurW*ew*dt2;
    end
    iW_p=krW*ew;
    iW_i=krW*sumW;
    iW_d=krW*(+ewf-ewfOld)*fp*2*TaurWD;
    %iW_ff=Mz/kfi;

    iW=iW_p;
    iW=iW+iW_i;
    iW=iW+iW_d;
    iW=iW+iW_ff;

    if iW>imax iW=imax; end
    if iW<-imax iW=-imax; end
    ewfOld=ewf;
    otOld=ot;

    % Regulator proudu
    ei=iW-i;
    if (abs(krI*ei)<urmax)&&(abs(ur)<urmax)
        sumI=sumI+1/TaurI*ei/fp/2; %integrace reg. odchylky.
    end
    ur_p=krI*ei;
    ur_i=krI*sumI;
    %ur_d=krI*(+eif-eifOld)*fp*2*TaurID;
    ur_ffui=Ui/U;
    %ur_ffw=iW/U*R;
    ur=ur_p;
    ur=ur+ur_i;
    ur=ur+ur_d;
    ur=ur+ur_ffui;
    ur=ur+ur_ffw;

    if ur>urmax ur=urmax; end
    if ur<-urmax ur=-urmax; end
    eifOld=eif;

    dpila=-dpila;
    if pila>1 pila=1; end;
    if pila<-1 pila=-1; end;
end

% vypocet difference proudu (z rovnice u=R*i+L*di/dt)
di_dt=1/L*(u-R*i-Ui);
dot=1/J*(M-Mz);

% numericka integrace Eulerovou metodou
i=i+di_dt*dt;
M=kfi*i;
ot=ot+dot*dt;
Ui=kfi*ot;

```

```
% zapis vysledku do pole
if t >= tZap*iZap
    iZap = iZap + 1;
    vys(:,iZap) = [t,otw,ur,u,Ui,ot,Mz,i,iW,ur_p,ur_i,ur_d,ur_ffui,ur_ffw,iW_p,iW_i,iW_d,Mzz];
end

end;

coKreslit='wd';
Simulace_Motor_kresleni
```

Příloha 4 – Vykreslení grafu

```
pismo=13;

if coKreslit=='i' %kresleni proudove

    subplot(2,1,1)
    plot(vys(1,:),vys(9,:),'k','LineWidth',1);
    hold on
    plot(vys(1,:),vys(8,:),'LineWidth',1);
    hold off
    legend('i_W','i');
    set(gca,'FontName','Helvetica','FontSize',pismo);

    subplot(2,1,2)
    plot(vys(1,:),[vys(4,:);vys(3,)*U;vys(5,)],'LineWidth',1);
    legend('u','u_R*U_0','U_I');
    set(gca,'FontName','Helvetica','FontSize',pismo);

    xlabel('time [s]');

end% konec i bez fwd

if coKreslit=='id' %kresleni proudove

    subplot(3,1,1)
    plot(vys(1,:),vys(9,:),'k','LineWidth',1);
    hold on
    plot(vys(1,:),vys(8,:),'LineWidth',1);
    hold off
    legend('i_W','i');
    set(gca,'FontName','Helvetica','FontSize',pismo);

    subplot(3,1,2)
    plot(vys(1,:),[vys(4,:);vys(3,)*U;vys(5,)],'LineWidth',1);
    legend('u','u_R*U_0','U_I');
    set(gca,'FontName','Helvetica','FontSize',pismo);

    subplot(3,1,3)
    plot(vys(1,:),[vys(10:14,)],'LineWidth',1);
    legend('u_RP','u_RI','U_RD','U_RFFUi','U_RFFW');
    set(gca,'FontName','Helvetica','FontSize',pismo);

    xlabel('time [s]');

end% konec proudove

if coKreslit=='wd' %kresleni otackove

    subplot(3,1,1)
    plot(vys(1,:),vys(2,:),'k','LineWidth',1);
    hold on
    plot(vys(1,:),vys(6,:),'LineWidth',1);
    hold off
    legend('\omega_W','\omega');
    set(gca,'XTickMode','auto','XTickLabelMode','auto')
    set(gca,'FontName','Helvetica','FontSize',pismo);
```

```
subplot(3,1,2)
plot(vys(1,:),vys(9,:),'k','LineWidth',1);
hold on
plot(vys(1,:),vys(8,:),'LineWidth',1);
hold off
legend('i_W','i');
set(gca,'FontName','Helvetica','FontSize',pismo);

subplot(3,1,3)
plot(vys(1,:),[vys(15:17,:)],'LineWidth',1);
set(gca,'ylim',1.3*[-imax,imax])
legend('i_WP','i_WI','i_WD');
set(gca,'FontName','Helvetica','FontSize',pismo);

xlabel('time [s]');

end%

fig = gcf;
fig.PaperUnits = 'inches';
fig.PaperPosition = [0 0 10 5];
print('prechodova','-dpng','-r100')
```