

Návrh momentového servopohonu se synchroním strojem s permanentním magnetem pro řízení pohybu soustavy vázaných mechanických těles.

Torque servo actuator with PMSM proposal for bound mechanical bodies system movement control
bodies' system movement control.

Bc. Martin Tomášik

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Tomášik**
Osobní číslo: **A11521**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Návrh momentového servopohonu se synchronním strojem s permanentním magnetem pro řízení pohybu soustavy vázaných mechanických těles**

Zásady pro vypracování:

1. Odvoďte dynamické rovnice PMSM el. stroje v rozlišovací úrovni potřebné pro řízení pohybu hmotných objektů (elektromechanická transformace).
2. Odvoďte modifikaci modelu PMSM umožňující určit způsoby řízení momentu PMSM.
3. V simulačním prostředí pro simulaci s fyzikálními modely mechatronických systémů Dynast vypracujte simulační model momentového servopohonu s PMSM.
4. Uveďte příklady aplikace servomechanismu s PMSM na řízení pohybu hmoty.
5. Vytvořte řízení pohybového systému s jedním stupněm volnosti s momentovým servopohonem s PMSM jako zdrojem řízeného momentu pro polohové řízení kloubů.
6. Uveďte řízení pohybového systému se dvěma stupni volnosti s momentovými servopohony s PMSM jako zdroji řízeného momentu pro autonomní polohové řízení kloubů.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **Úředníček, Z.: Elektromechanické akční členy, Univerzita T. Bati ve Zlíně, Zlín 2009, ISBN 978-80-7318-835-1**
2. **Mann, H., Modeling and Simulation, DynLab, Course on Dynamics of multidisciplinary and controlled Systéme, Computing and Information Centre Czech Technical University in Prague. 2006**
3. **Šolc, F., Václavek, P., Vavřín, P., . Řízení a regulace II, VUT Brno, Fakulta automatizace a měřicí techniky, Skripta, Leden 2011.**
4. **VanAntwerp, J.,G. Braatz, R., D., Sahinidis, N., V., Globally optimal robust control for systems with nonlinear time-varying perturbation. Comp&Chem. Eng., 1977.**

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Zdeněk Úředníček, CSc.
Ústav automatizace a řídicí techniky

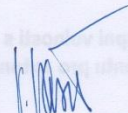
Datum zadání diplomové práce:

7. března 2014

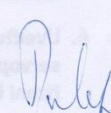
Termín odevzdání diplomové práce:

11. června 2014

Ve Zlíně dne 7. března 2014


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ke řediteli ústavu

ABSTRAKT

Práce sa zaoberá návrhom momentového servopohonu so synchronným strojom s permanentným magnetom (PMSM) pre riadenie pohybu sústavy mechanických telies. Ďalej vytvorením simulačného modelu momentového servopohonu s PMSM v simulačnom prostredí pre simulačné experimenty s fyzikálnymi modelmi mechatronických systémov Dynast.

Výsledný návrh verifikuje použitím vytvorených autonómnych servomechanizmov na riadenie polohy mechanickej sústavy s dvoma stupňami voľnosti, ktorých pohybové rovnice sú použité z inej práce.

Kľúčová slova: PMSM, servopohon, servomechanizmus, Gaussova rovina, riadenie momentu, Dynast

ABSTRACT

The work deals with torque servo - drive design with synchronous machine with permanent magnet (PMSM), for mechanical bodies' system motion control. Thenceforth deals with torque servo - drive simulation model with PMSM creation in simulation environment for simulation experiments with mechatronics systems physical models Dynast.

Resultant proposal verifies by created autonomous servomechanisms using on mechanical system with two freedom degree position control, whose motional equations were applied from other work.

Keywords: PMSM, servo actuator, servomechanism Gauss plane, torque control, Dynast

Chcel by som poďakovať pánovi doc. RNDr. Ing. Zdenkovi Uředníčkovi, Csc., za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri vypracovaní mojej diplomovej práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČASŤ	9
1 SERVOPOHONY SO SYNCHRÓNNYMI MOTORMI S PERMANENTNÝMI MAGNETMI	10
1.1 METODIKA NAVRHOVANIA SERVOPOHONOV	10
1.2 SYSTÉM RIADENIA SERVOPOHONOV	11
1.3 KINEMATIKA SERVOPOHONOV	11
1.4 DYNAMIKA SERVOPOHONOV	12
1.5 SERVOPOHON AKO POLOHOVÝ SERVOMECHANIZMUS.....	14
1.6 MODEL SYNCHRÓNNEHO MOTORU S PERMANENTNÝMI MAGNETMI.....	16
1.7 MODEL SYNCHRÓNNEHO STROJA S PERMANENTNÝMI MAGNETMI (PMSM) V KOMPLEXNEJ ROVINE.	18
2 RIADENIE MOMENTU PMSM	20
2.1 SKALÁRNE RIADENIE.....	23
2.2 PRIAME RIADENIE MOMENTU.....	24
2.3 VEKTOROVÉ RIADENIE.....	25
2.4 MOMENT V KOMPLEXNEJ PREMENEJ.	25
II PRAKTICKÁ ČASŤ	29
3 SIMULAČNÝ MODEL V SIMULAČNOM PROSTREDÍ DYNAST	30
3.1 FYZIKÁLNE SCHÉMY	30
3.1.1 Dvojpóly.....	32
3.1.2 Orientácia veličín prvkov	33
3.1.3 Typy fyzikálnych prvkov	34
3.1.4 Postuláty kontinuity a kompatibility	38
3.2 SIMULAČNÝ MODEL SYNCHRÓNNEHO STROJA S PERMANENTNÝMI MAGNETMI (PMSM) V SIMULAČNOM PROSTREDÍ DYNAST.	39
4 NÁVRH SERVOPOHONOV	41
4.1 SIMULAČNÝ MODEL MOMENTOVÉHO SERVOPOHONU S PMSM.	41
4.1.1 Návrh parametrov regulátora momentu	46
4.2 SIMULAČNÝ MODEL RÝCHLOSTNÉHO SERVOPOHONU S PMSM.	47
4.3 SIMULAČNÝ MODEL POLOHOVÉHO SERVOPOHONU S PMSM.....	50
4.4 POHYBOVÝ SYSTÉM S DVOMA STUPŇAMI VOĽNOSTI S MOMENTOVÝM SERVOPOHONOM S PMSM AKO ZDROJOM RIADENÉHO MOMENTU PRE POLOHOVÉ RIADENIE KLBOV.	52
ZÁVER	61
ZÁVER V ANGLIČTINE	CHYBA! ZÁLOŽKA NIE JE DEFINOVANÁ.
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	63
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A ZKRATIEK	64
ZOZNAM OBRÁZKOV	66
ZOZNAM TABULIEK	68
ZOZNAM PRÍLOH	69

ÚVOD

Počítačové modelovanie a simulácia pomáha technikom lepšie pochopiť a presnejšie predvídať chovanie dynamických sústav. Postupne nadobúda stále väčšej dôležitosti s tým ako rastie zložitosť technických sústav. Počítačové modelovanie a simulácia umožňuje urýchliť a zefektívniť technikom ich prácu. Môžeme obmedziť nákladné a zdĺhavé experimentovanie s reálnymi prototypmi. Simulačné experimenty sú niekedy jedinou možnosťou tam, kde reálne experimentovanie nepripadá do úvahy napríklad kvôli nadmerným finančným nákladom. Dovoľujú zväžiť viac návrhových alternatív pri projektovaní a projekty overiť skôr ako budú zrealizované. Pomocou simulácií je možné predvídať poruchy projektovaných sústav spôsobené nepresnosťou výroby a podobne. Pomáhajú odstraňovať vzniknuté poruchy ale aj zisťovať ich príčinu.

Nevyhnutnou podmienkou pre úspešné použitie týchto simulačných experimentov je správna identifikácia vhodne zvolenej rozlišovacej úrovne modelu, jeho verifikácia a určenie oblasti jeho platnosti.

Veľkým zjednodušením uvedených nevyhnutných etáp tvorby simulačných modelov je použitie princípov fyzikálneho modelovania, ktoré boli použité v tejto práci.

Diplomová práca sa zaoberá riešením návrhu momentového servopohonu s PMSM pre riadenie pohybu sústavy mechanických telies. Je rozdelená na dve časti a to teoretickú a praktickú. V teoretickej časti sa zaoberáme metodikou navrhovania servopohonov, matematickými modelmi PMSM a riadením ich momentu. V praktickej časti práce je vytvorený simulačný model momentového servopohonu s PMSM v simulačnom prostredí pre simuláciu s fyzikálnymi modelmi mechatronických systémov DYNAST a je prevedená analýza vplyvu riadenia autonómneho polohového servopohonu s PMSM na riadení pohybových stavov dvojsového mechanického systému pomocí simulačných experimentov.

Cieľom práce je :

- Odvodiť modifikáciu základného modelu PMSM umožňujúcu určiť spôsoby riadenia momentu PMSM.
- V simulačnom prostredí DYNAST vypracovať simulačný model momentového servopohonu PMSM a polohového servopohonu PMSM.
- Vytvoriť riadenie pohybového systému s dvoma stupňami voľnosti zadaného pohybovými rovnicami s momentovým servopohonom s PMSM ako zdrojom riadeného momentu pre polohové riadenie kĺbov.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 SERVOPOHONY SO SYNCHRÓNNYMI MOTORMI S PERMANENTNÝMI MAGNETMI

1.1 Metodika navrhovania servopohonov

Návrh servopohonov pozostáva z návrhu koncepcie pohonu, t.j. voľby typu pohonu, jeho dimenzovania, návrhu koncepcie a štruktúry regulačných obvodov a z voľby istenia a ochrán. Pre voľbu typu servopohonu je v súčasnej dobe k dispozícii celá rada pohonov : pohon so jednosmerným motorom, najmä s budením permanentnými magnetmi, pohon s elektronicky komutovaným motorom, pohon so synchronným motorom s permanentnými magnetmi na rotore, pohon s asynchronným motorom. Všetky tieto vymenované motory sú v servopohonoch napájané z výkonových tranzistorových meničov. [7]

Dimenzovanie servopohonov vychádza z výpočtu statických a dynamických zaťažovacích momentov a jeho cieľom je určenie typovej veľkosti motorov a priradiť k nim príslušné meniče, spravidla podľa požiadavky prúdovej preťažiteľnosti. [7]

Návrh koncepcie a štruktúry regulačných obvodov obsahuje voľbu snímačov a prevodníkov (polohy, rýchlosti, prípadne i ďalších technologických veličín), rozhodnutie o tom či bude regulácia analógová, digitálna, prípadne hybridná, ďalej návrh regulačných slučiek a ich syntézy, t. z. napr. návrh prenosových funkcií jednotlivých regulátorov. [7]

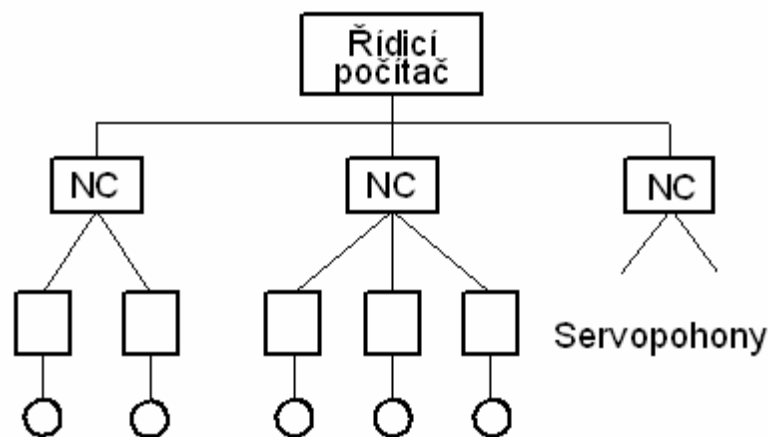
Voľba istení a ochrán je dôležitá z hľadiska bezpečnosti, musí zahrňovať istenie proti skratu a istenie proti nadprúdu, niekedy i ochranu proti prepätiu, prípadne podpätiu. Proti preťaženiu sa používajú teplotné ochrany, čo sú termistory alebo bimetalové relé, zabudované priamo do vinutia elektromotorov a do chladičov výkonových polovodičových prvkov.

Z požiadavkou na reguláciu je treba najskôr zistiť, ktoré veličiny je treba regulovať (moment, silu, rýchlosť, polohu, prípadne i niektorú veličinu technologického procesu, ako je napríklad konštantná rezná rýchlosť pri sústružení s narastajúcim polomerom alebo konštantný ťah pri navíjaní zvitkov), ďalej požadovanú statickú a dynamickú presnosť regulácie, a to absolútnu i relatívnu a pri akých zmenách poruchových veličín, ktorými sú spravidla zaťažovací moment, zmena napätia siete je táto presnosť požadovaná. Statická presnosť sa vzťahuje k ustálenému stavu, dynamická presnosť predstavuje maximálnu odchýlku v priebehu regulovania prechodného deja pri zadanej zmene poruchovej veličiny (napríklad pri skokovej zmene zaťažovacieho momentu z 10% na 100%. [7]

1.2 Systém řízení servopohonů

Najjednoduchšie autonómne servopohony individuálne využívané v pracovných strojoch môžu byť ovládané ručne z ovládacieho panela stroja. Častejší je však prípad, kedy servopohony sú súčasťou rozsiahlejšieho systému riadenia, najčastejšie v hierarchickom usporiadaní: Na najnižšej úrovni (čo znamená najbližšie technologickému procesu) sú servopohony - autonómne silové (momentové), rýchlostné alebo polohové servomechanizmy. Táto úroveň riadenia zaisťuje dynamiku pohybu a spätné diagnostické hlásenia. Strednou úrovňou riadenia je najčastejšie riadiaci počítač (numerický riadiaci systém), ktorý riadi v reálnom čase technologický proces; v prípade servopohonov zadáva žiadanú polohu a rýchlosť pohybu, prípadne krútiaci moment alebo silu potrebnú pre technologický proces. Riadiace počítače jednotlivých pracovných strojov, zaradených do technologických liniek, sú zapojené do lokálnej počítačovej siete a riadené z nadradeného počítača, ktorým je riadený celý technologický cyklus vrátane obslužných funkcií, ako je doprava materiálu a polotovarov, kontrola, testovanie a operatívne plánovanie. Hierarchický systém riadenia vždy predpokladá, že pri poruche vyššej úrovne riadenia je nižšia úroveň schopná autonómnej funkcie (s určitými obmedzeniami). Schéma hierarchického usporiadania je na (Obr.1)

[7]



Obr. 1. Hierarchické riadenie servopohonov

1.3 Kinematika servopohonov

Kinematická schéma mechanickej sústavy, napríklad manipulačného robota, je obvykle tvorená reťazcom kinematických dvojíc s jedným stupňom voľnosti. Poloha koncového efektora je daná šiestimi súradnicami v zvolenej kartézskej súradnicovej sústave, viazanej napríklad na základňu robota: tromi súradnicami posunutia vzhľadom k počiatku súradníc

x, y, z a tromi súradnicami priestorového natočenia vzhľadom k jednotlivým súradnicovým osám $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$. Pohyb efektora a jeho priestorová orientácia sú potom realizované v "robotických" súradniciach, ktorými sú kľbové súradnice jednotlivých stupňov voľnosti $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$, poháňané osovými servopohonmi. Pre riadenie pohybu jednotlivých servopohonov je potrebné poznať vzájomné transformácie medzi oboma súradnicovými systémami. Transformácia kľbových súradníc na kartézské sa nazýva priamou úlohou kinematiky, transformácia kartézskych súradníc na súradnice kľbové je potom inverznou úlohou kinematiky.

1.4 Dynamika servopohonov

Pri riešení dynamiky sústavy hmotných bodov, ktoré sú spolu viazané väzbami, platí Lagrangeova rovnica 2. druhu:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \left(F_{jx} \frac{\partial f_j}{\partial q_i} + F_{jy} \frac{\partial g_j}{\partial q_i} + F_{jz} \frac{\partial h_j}{\partial q_i} \right) \quad (2)$$

q_i je zobecnená súradnica, W_k je kinetická energia sústavy, Q_i je zobecnená sila, ktorá spôsobuje zmenu súradnice q_i . $\vec{Q} = [F_{jx} F_{jy} F_{jz}]$ je vonkajšia sila pôsobiaca na i -tý článok systému. [8]

Kinetická energie funkcií q_1, q_2, \dots, q_n a prípadne času t .

$$\begin{aligned} x_j &= f_j(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \\ y_j &= g_j(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \\ z_j &= h_j(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \end{aligned} \quad (3)$$

Rovnice, popisujúce dynamiku mechatronickej sústavy, možno využiť k simulácii a modelovaniu tejto sústavy a ďalej k dimenzovaniu jednotlivých kľbových servopohonov, t.j. k návrhu menovitých a maximálnych momentov motorov a ich otáčok. [8]

Simulácia pohybu robota vrátane riadenia, s uvažovaním ako dynamiky mechanické časti, tak i dynamiky servopohonov, je dôležitá pre overenie chovania pri polohovaní, lebo skutočná priestorová trajektória vplyvom statických a dynamických chýb môže byť podstatne

odlišná od trajektórie zadávanej, čo môže ovplyvniť technologické parametre robotov, v niektorých prípadoch môže viesť až k havárii. [7]

Robot je mechanizmus s akčnými členmi v každom kĺbe \mathbf{i} , ktoré aplikujú silu alebo moment potrebné k pohybu článku (\mathbf{i}). Robot je zariadenie so snímačmi polohy, rýchlosti a zrýchlenia, ktoré meria kĺbové súradnice. Merané hodnoty sú obyčajne relatívne. Sú kinematickou informáciou o súradnicovej sústave \mathbf{Bi} spojenej s článkom (\mathbf{i}) vzhľadom na súradnicovú sústavu $\mathbf{Bi-1}$ alebo $\mathbf{B0}$. [8]

Aby každý kĺb sledoval požadovaný pohyb, musíme zaistiť generovanie požadovaného žiadaného momentu (sily). Ak predpokladáme, že požadovaný moment umožňujúci robotovi sledovať požadovaný pohyb je určený z rovníc pohybu a je rovný

$$D(\bar{q}_z) \cdot \dot{q}_z + \bar{H}(\bar{q}_z, \dot{q}_z) + \bar{G}(\bar{q}_z) = \bar{Q}_c \quad (4)$$

kde index z znamená „žiadané“ a c riadené (controlled).

Ideálne sa robot chová presne podľa uvedených rovníc a premenné môžu byť merané presne. Potom akčné veličiny akčných členov \bar{Q}_c spôsobia požadované trajektórie \bar{q}_z .

Tento **algoritmus** by bol **pracujúci v otvorenej slučke**, kde riadiace zobecnené sily sú vypočítané na základe rovníc pohybu a známych požadovaných trajektórií. Zobecnené sily sú aplikované v jednotlivých kĺboch. [8]

Algoritmus pracujúci v otvorenej slučke by bol možný pre robota bez akéhokoľvek zanedbania niektorých vplyvov a bez porúch.

Ak predpokladáme, že zisťujeme pohybový stav robota pomocou snímania (merania) kĺbovej kinematiky. V ľubovoľnom okamžiku môžeme zistiť rozdiel medzi aktuálnymi kĺbovými súradnicami a ich požadovanou hodnotou. Tento rozdiel nazývame dynamickou chybou a meriame ju

$$\bar{e}(t) = \bar{q}_z - \bar{q}; \quad \dot{\bar{e}}(t) = \dot{\bar{q}}_z - \dot{\bar{q}} \quad (5)$$

Definujme napr. zákon riadenia a vypočítajme nový vektor zobecnených síl pomocou

$$\bar{Q} = \bar{Q}_c + \bar{k}_D \dot{\bar{e}}(t) + \bar{k}_P \bar{e}(t) \quad (6)$$

kde \bar{k}_D a \bar{k}_P sú regulačné konštanty.

Zákon riadenia porovnáva požadované hodnoty polohy \bar{q}_z a rýchlosti $\dot{\bar{q}}_z$ s hodnotami meranými \bar{q} a $\dot{\bar{q}}$ a generuje proporcionálnu korekciu zobecnených síl. [8]

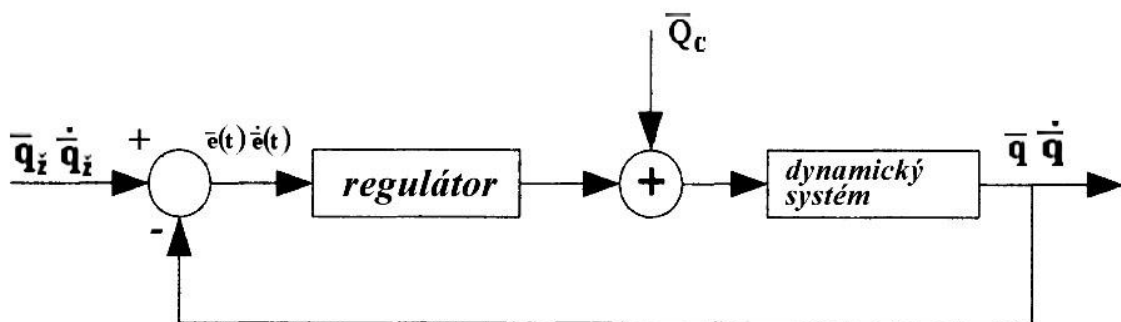
Aplikáciou tohto riadiaceho algoritmu dostaneme

$$D(\bar{q}) \cdot \ddot{\bar{q}} + \bar{H}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + \bar{G}(\bar{q}) = \bar{Q}_c + \bar{k}_D \dot{\bar{e}}(t) + \bar{k}_P \bar{e}(t) \quad (7)$$

Algoritmus riadenia v uzavretej slučke, pri ktorom riadiace príkazy sú porovnané so skutočnými hodnotami. Regulátor tu generuje signál úmerný chybám polohy a rýchlosti. Tento signál pridáme k \bar{Q}_c aby sme kompenzovali poruchy. [8]

Princíp spätnoväzbového riadenia môžeme popísať ako :

Zväčšíme riadiaci príkaz, ak je skutočná hodnota veličiny menšia než požadovaná hodnota a zmenšíme ju, ak je tomu naopak. Jedná sa teda o **zápornú spätnú väzbu- väzbu vyvažujúcu**. [8]

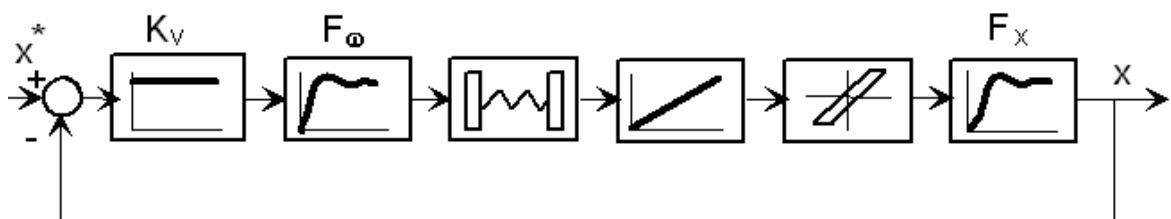


Obr. 2. Bloková schéma uzavretej regulačnej slučky pohybu robota

1.5 Servopohon ako polohový servomechanizmus

Elektrický servopohon je regulačný systém, ktorý má riadiť polohu a jej časové derivácie. Teda elektromechanický pohon sa skladá z elektromotora, výkonového polovodičového meniča pre napájanie a riadenie motora a z regulátora momentu, otáčok, resp. polohy. Súčasťou motora bývajú zvyčajne snímače rýchlosti a polohy. Pohon musí umožňovať štvorkvadrantový chod, tj. oba smery točenia a oba smery momentu. Servopohon pracuje v uzavretej spätnej väzbe. Rýchlostný (otáčkový) servopohon má rýchlostnú spätnú väzbu obvykle s podriadeným riadením momentu a umožňuje rýchle a presné sledovanie zadávanej rýchlosti, pri čom zadávaná rýchlosť môže byť výstupom nadradeného regulátora, kto-

rým môže byť napríklad regulátor polohy alebo technologický regulátor. Polohový servopohon je servomechanizmus pre riadenie polohy - buď uhlu natočenia, alebo prostredníctvom prevodu posuvnej dráhy. Z hľadiska aplikácií sa rozlišujú dva typy polohových regulácií: cieľová a sledovacia. Cieľová regulácia slúži k nastavovaniu polohy; používa sa napríklad pri polohovaní u dierovacích lisov a vŕtačiek, u podávačov plechu pri jeho strihaní nožnicami a u polohovadiel a manipulátorov. Ak je poloha riadená časovo optimálne (na najkratší možný čas), potom riadenie predstavuje polohové premiestnenie v najkratšom možnom čase, to je s využitím maximálne dosiahnuteľného zrýchlenia, pri čom sa požaduje dosiahnutie polohy. Vlečná regulácia sa používa tam, kde je treba sledovať zadávanú trajektóriu. Najčastejšími aplikáciami sú takzvané viac súradnicové systémy, ako napríklad roboty, posuvy obrábacích strojov, súradnicové zapisovače, antény sledovacích radiolokátorov a pod. Generovanie rýchlosti pre jednotlivé osy sa prevádza interpoláciou v riadiacom počítači, ktorý je hierarchicky nadradený servopohonom, riadeným spravidla decentralizovanými mikropočítačmi vo funkcii číslicových regulátorov. Osový servopohon musí byť kvalitným polohovým servomechanizmom, ktorý sleduje pokiaľ možno bez časového omeškania a bez polohovej chyby riadiaci signál - plynule zadávanú hodnotu polohy. [7]



Obr. 3. Bloková schéma servopohonu s pružným spojením a vôľou prevode

Presné riadenie polohy vyžaduje uzavretú polohovú väzbu, ktorej princíp spočíva v porovnaní zadávanej polohy so skutočnou polohou, získanou odmeriavaním. Pre sledovacie servomechanizmy sa najčastejšie používa kaskádna štruktúra regulačných slučiek, v ktorej je polohová slučka nadradená vnútornej otáčkovej slučke. K vyhodnoteniu odchýlky medzi žiadanou a skutočnou polohou sa potom používajú proporcionálne regulátory polohy, ktorých výstupom je žiadaná hodnota rýchlosti. Princíp polohového riadenie je naznačený na obrázku (Obr.3). Ide o polohovú slučku s podriadenou rýchlostnou slučkou, predstavovanou kmitavým členom F_{ω} , mechanická sústava obsahuje pružné spojenie, integrátor (po-

loha je integrálom rýchlosti), vôli v prevode a je charakterizovaná kmitavým členom s najnižším rezonančným kmitočtom F_x . [7]

1.6 Model synchronného motoru s permanentnými magnetmi

Ak neexistuje vinutie **D** a **Q** (rozbehové vinutie synchronného stroja) na rotore a vinutie elektromagnetu rotora tvorí permanentný magnet, potom vzťahy pre elektromagnetické javy možno prepísať na:

$$\begin{aligned}
 R \cdot i_d(t) + L_d \cdot \frac{di_d(t)}{dt} - p_p \cdot \underbrace{L_q \cdot i_q(t)}_{\psi_q(t)} \cdot \omega(t) &= u_d(t) \\
 R \cdot i_q(t) + L_q \cdot \frac{di_q(t)}{dt} + p_p \cdot \underbrace{[L_d \cdot i_d(t) + k_n]}_{\psi_d(t)} \cdot \omega(t) &= u_q(t)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Pre vnútorný elektromagnetický moment platí:

$$m_i(t) = \frac{\partial W}{\partial \vartheta} = p_p \cdot \underbrace{[L_d \cdot i_d(t) + k_n]}_{\psi_d(t)} \cdot i_q(t) - p_p \cdot \underbrace{L_q \cdot i_q(t)}_{\psi_q(t)} \cdot i_d(t) \tag{9}$$

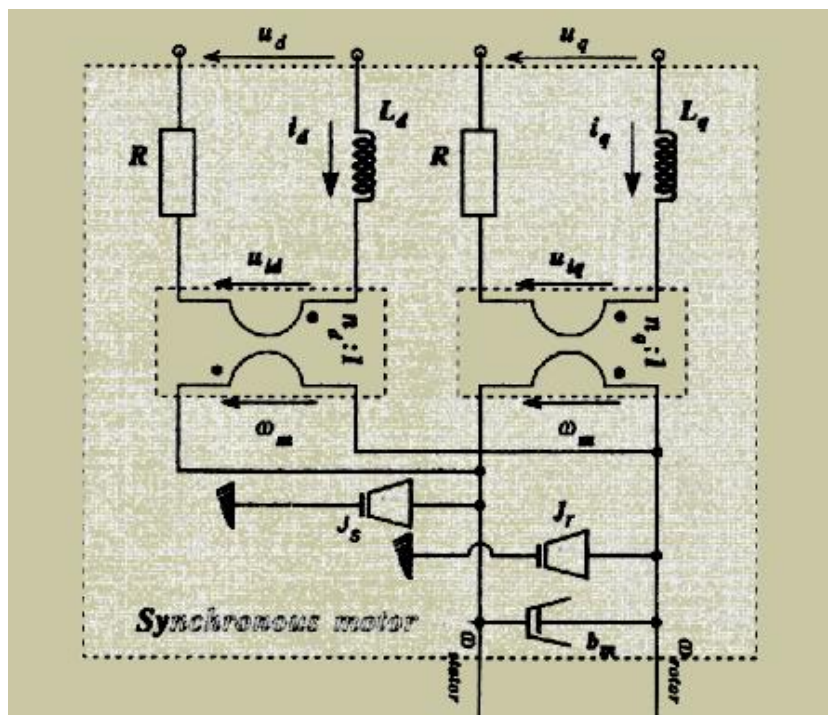
kde

$\vartheta_e(t) = p_p \cdot \vartheta$ je elektrický uhol rotora,

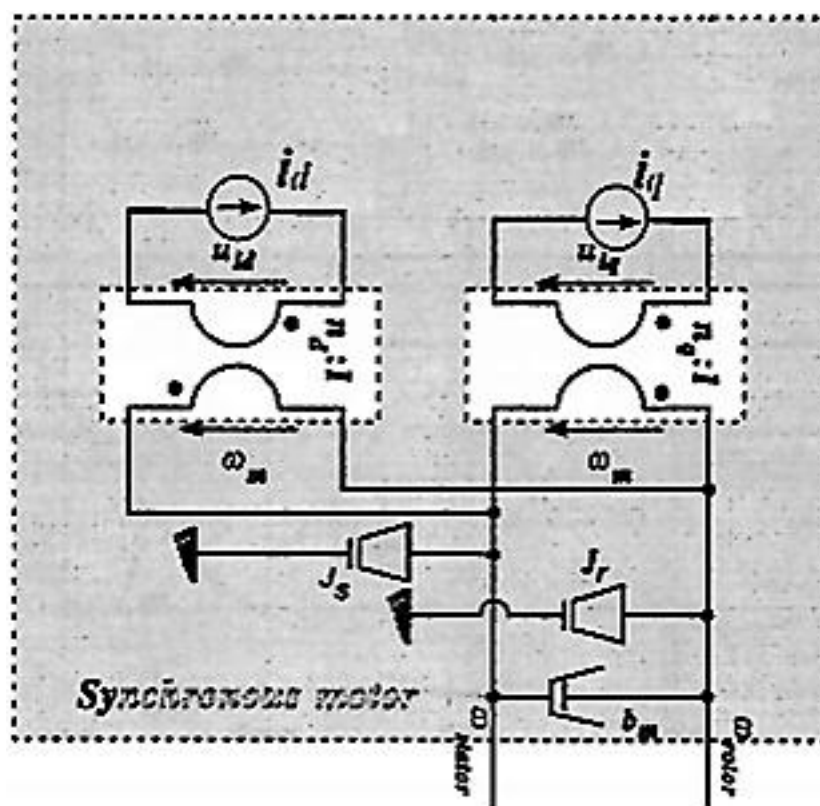
p_p je počet pólových párov stroja,

$\omega_e(t) = \frac{d\vartheta_e}{dt}$ je elektrická rýchlosť otáčania rotoru

k_n je konštanta určená typom materiálu permanentného magnetu a geometrickým usporiadaním. [1]



Obr. 4. Bránové schéma PMSM



Obr. 5. Bránové schéma prúdovo napájaného PMSM

1.7 Model synchronného stroja s permanentnými magnetmi (PMSM) v komplexnej rovine.

Existuje jedno - jednoznačné zobrazenie medzi veličinami v dvojrozmernom ortogonálnom súradnicovom systéme a Gaussovov rovinou komplexných čísel.

Zvedme nasledujúce komplexné veličiny

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{u}}_s(t) &= u_d(t) + i \cdot u_q(t); & \bar{\mathbf{i}}_s(t) &= i_d(t) + i \cdot i_q(t) \\ \bar{\Psi}_s(t) &= L_d \cdot i_d(t) + k_n + i \cdot L_q \cdot i_q(t)\end{aligned} \quad i^2 = -1 \quad (10)$$

Vynásobíme druhú rovnicu popisujúcu PMSM imaginárnou jednotkou i

$$R \cdot i \cdot i_q(t) + L_q \cdot \frac{d[i \cdot i_q(t)]}{dt} + p_p \cdot i \cdot \left[\underbrace{L_d \cdot i_d(t) + k_n}_{\psi_d} \right] \cdot \omega(t) = i \cdot u_q(t) \quad (11)$$

pripočítame ju k prvej

$$R \cdot i_d(t) + L_d \cdot \frac{di_d(t)}{dt} - p_p \cdot \underbrace{L_q \cdot i_q(t)}_{\psi_q} \cdot \omega(t) = u_d(t) \quad (12)$$

dostaneme

$$R \cdot \left[\underbrace{i_d(t) + i \cdot i_q(t)}_{\bar{i}_s(t)} \right] + \frac{d}{dt} \left[\underbrace{L_d \cdot i_d(t) + k_n + i \cdot L_q \cdot i_q(t)}_{\bar{\psi}_s(t)} \right] + p_p \cdot [i \cdot \psi_d(t) - \psi_q(t)] \cdot \omega(t) = \underbrace{u_d(t) + i \cdot u_q(t)}_{\bar{u}_s(t)} \Rightarrow \quad (13)$$

$$\Rightarrow R \cdot \bar{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_s(t) + i \cdot p_p \cdot \left[\psi_d(t) - \frac{\psi_q(t)}{i} \right] \cdot \omega(t) = \bar{u}_s(t) \Rightarrow \quad (14)$$

$$\Rightarrow R \cdot \bar{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_s(t) + i \cdot p_p \cdot \left[\underbrace{\psi_d(t) + i \psi_q(t)}_{\bar{\psi}_s(t)} \right] \cdot \omega(t) = \bar{u}_s(t) \quad (15)$$

Namiesto dvoch rovníc v reálnej premennej dostávame jednu rovnicu v komplexnej premennej. [1]

Z rovnice

$$R \cdot \vec{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s(t) + i \cdot p_p \cdot \vec{\psi}_s(t) \cdot \omega(t) = \vec{u}_s(t) \Rightarrow R \cdot \vec{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \psi_d(t) + i \cdot p_p \cdot \psi_d(t) \cdot \omega(t) = \vec{u}_s(t) \quad (16)$$

Porovnaním reálných a imaginárných částí dostaneme

$$R \cdot \vec{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \psi_d(t) + i \cdot p_p \cdot \psi_d(t) \cdot \omega(t) = \vec{u}_s(t) \Rightarrow \quad (17)$$

$$\Rightarrow R \cdot i_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} = u_d(t) \quad (18)$$

$$R \cdot i_q(t) + p_p [L_d \cdot i_d(t) + k_n] \cdot \omega(t) = u_q(t)$$

$$\begin{aligned} m_i(t) &= -p_p \cdot \text{Im}\{\vec{\psi}_s(t) \cdot \vec{i}_s^*(t)\} = -p_p \cdot \text{Im}\{\psi_d(t) \cdot [i_d(t) - i \cdot i_q(t)]\} = \\ &= p_p \cdot i_q(t) \cdot [L_d \cdot i_d(t) + k_n] \end{aligned} \quad (19)$$

Rovnica pre vnútorný moment v komplexnej premennej, bližšie popísané v kapitole 2.4

[1]

2 RIADENIE MOMENTU PMSM.

Z rovníc pre PSMS vyplýva, že ak je stroj napájaný tromi harmonickými prúdmi tvoriacimi symetrický systém s uhlovou frekvenciou rovnou elektrickej uhlovej rýchlosti rotora, potom stroj vytvára konštantný vnútorný moment. [1]

Potom platí:

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \left[\sin \vartheta \cos \vartheta + \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (20)$$

$$i_q = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \left[\sin^2 \vartheta + \sin^2 \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin^2 \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (21)$$

$$i_0 = \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot I_m \left[\sin \vartheta + \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (22)$$

a teda

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \left[\sin \vartheta \cos \vartheta + \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \cdot \left\{ \sin \vartheta \cos \vartheta + \left[\left(-\frac{1}{2} \sin \vartheta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \vartheta \right) \left(-\frac{1}{2} \cos \vartheta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \vartheta \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left(-\frac{1}{2} \sin \vartheta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \vartheta \right) \left(-\frac{1}{2} \cos \vartheta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \vartheta \right) \right\} = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \cdot \left\{ \sin \vartheta \cos \vartheta + \frac{1}{4} \sin \vartheta \cos \vartheta + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos^2 \vartheta - \frac{\sqrt{3}}{4} \sin^2 \vartheta - \frac{3}{4} \sin \vartheta \cos \vartheta + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} \sin \vartheta \cos \vartheta - \frac{\sqrt{3}}{4} \cos^2 \vartheta + \frac{\sqrt{3}}{4} \sin^2 \vartheta - \frac{3}{4} \sin \vartheta \cos \vartheta \right\} = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
 i_q &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \left[\sin^2 \vartheta + \sin^2 \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin^2 \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] = \\
 &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \left[\sin^2 \vartheta + \left(-\frac{1}{2} \sin \vartheta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \vartheta \right)^2 + \left(-\frac{1}{2} \sin \vartheta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \vartheta \right)^2 \right] = \\
 &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \left(\sin^2 \vartheta + \frac{1}{4} \sin^2 \vartheta + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \vartheta \cos \vartheta + \frac{3}{4} \cos^2 \vartheta + \frac{1}{4} \sin^2 \vartheta - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \vartheta \cos \vartheta + \frac{3}{4} \cos^2 \vartheta \right) = \\
 &= -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_m \left(\frac{3}{2} \sin^2 \vartheta + \frac{3}{2} \cos^2 \vartheta \right) = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_m
 \end{aligned} \tag{24}$$

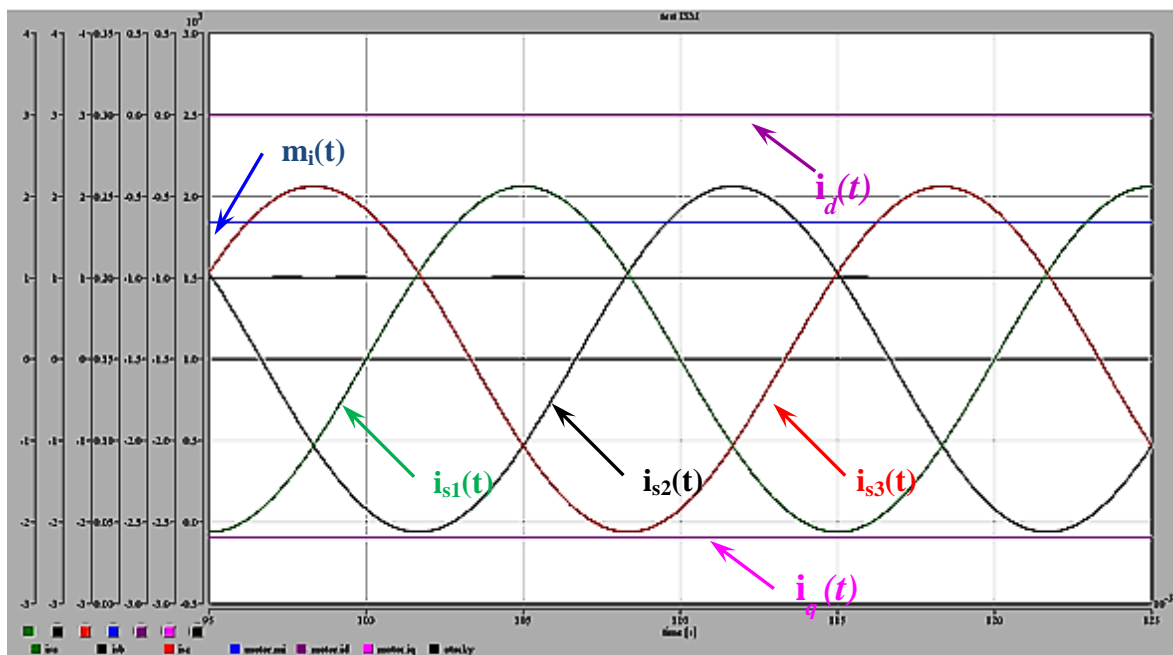
$$\begin{aligned}
 i_0 &= \sqrt{\frac{1}{3}} \left[\sin \vartheta + \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot I_m \left[\sin \vartheta - \frac{1}{2} \sin \vartheta - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \vartheta - \frac{1}{2} \sin \vartheta + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \vartheta \right] = 0
 \end{aligned} \tag{25}$$

Pre moment potom platí:

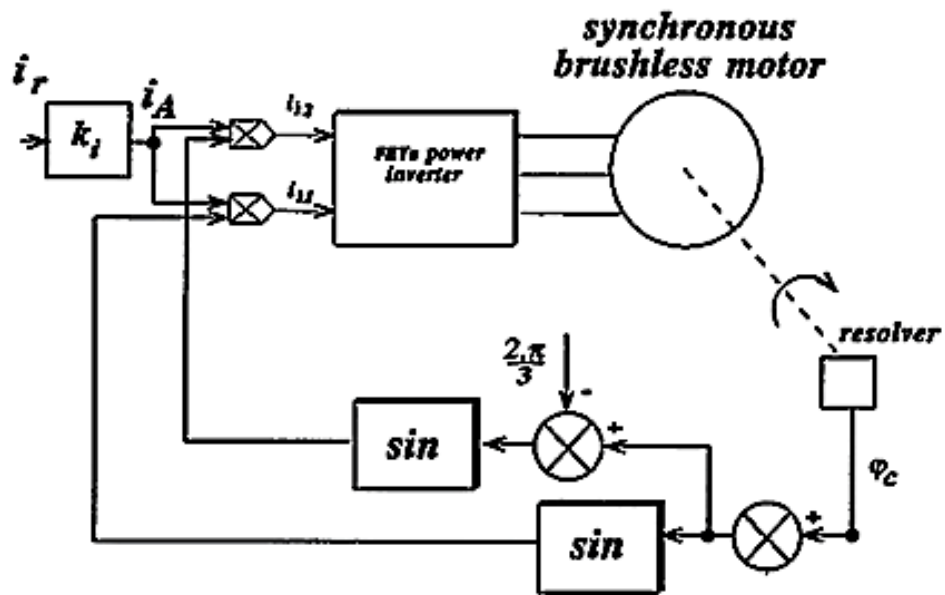
$$m_i(t) = \frac{\partial W}{\partial \vartheta} = p_p \cdot \left[L_d \cdot \overset{=0}{\overline{i_d(t)}} + k_n \right] \cdot i_q(t) - p_p \cdot L_q \cdot i_q(t) \cdot \overset{=0}{\overline{i_d(t)}} = p_p \cdot k_n \cdot i_q(t) = -\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot p_p \cdot I_m \cdot k_n \tag{26}$$

[2]

Na obrázku (Obr.6) je vyššie popísané chovanie PMSM napájaného tromi harmonickými prúdmi, kde $m_i(t)$ je konštantný vnútorný moment i_{s1}, i_{s2}, i_{s3} sú statorové prúdy a i_q, i_d sú prúdy na súradnicových osách d,q. [1]

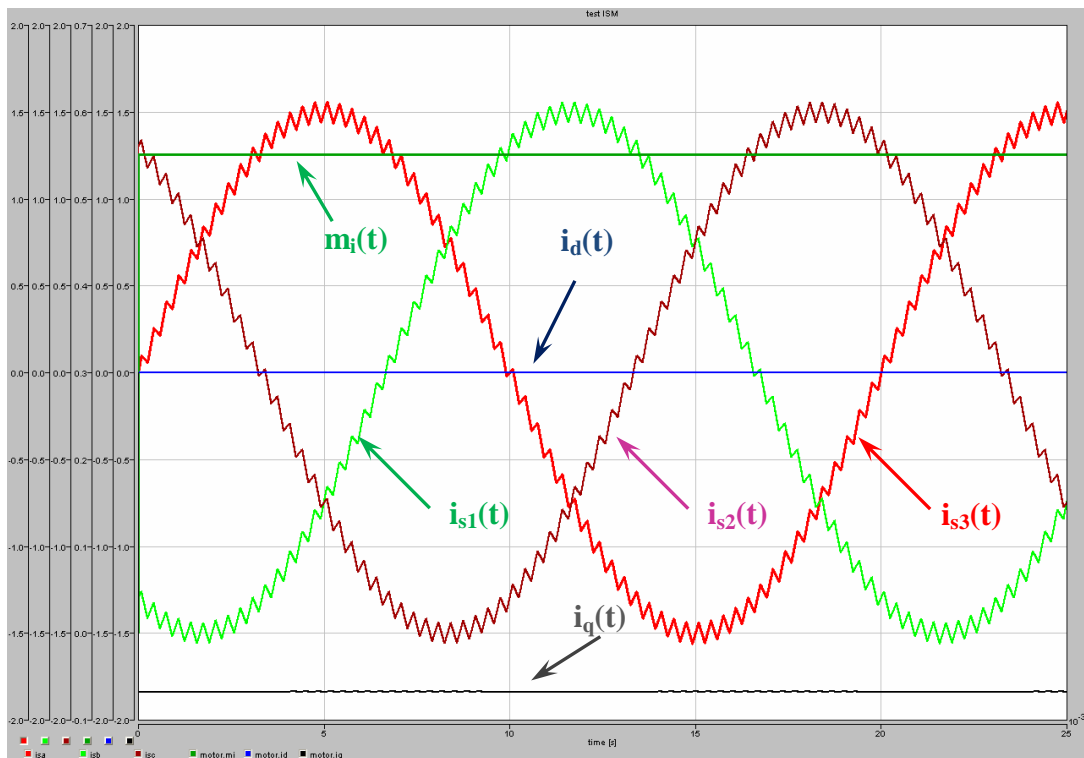


Obr. 6. Prúdovo napájaný PMSM



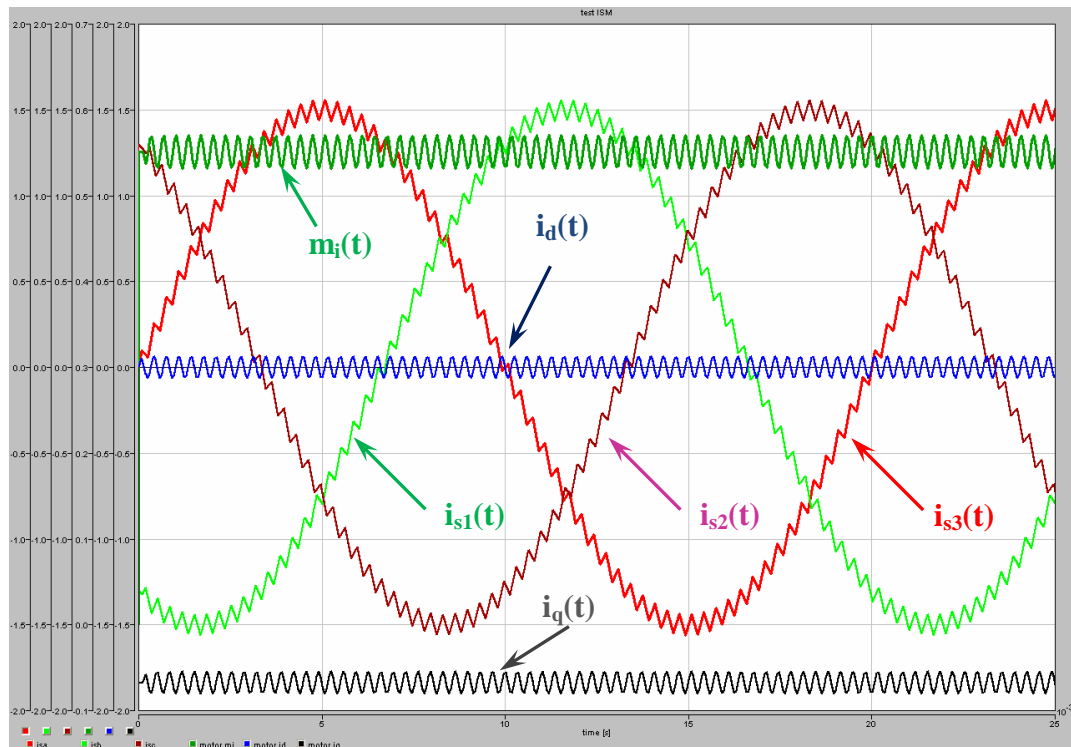
Obr. 7. Princíp riadenia momentu PMSM

Na obrázku (Obr.7) je znázornené zapojenie umožňujúce riadiť moment PMSM stroja. Kde i_r je žiadaná hodnota amplitúdy prúdu fázami, PWM menič generujúci prúdy a resolver (snímač uhlu rotora). Pretože spôsob generovania prúdov satorom je väčšinou pomocou nepriamej dvojpohovej regulácie, prúdy nie sú ideálne harmonické. [1]



Obr.8. Prúdovo napájaný PMSM- prúdy so zvlnením.

Z obrázku (Obr.8) je vidieť, že ak je vo všetkých fázach rovnaké zvlnenie, pokiaľ ide o fázový posun, potom to nemá na moment stroja vplyv. Obrázok (Obr.9) ukazuje vplyv vzájomne posunutých modulácií prúdov fázami. [1]



Obr. 9. Prúdovo napájaný PMSM- prúdy so zvlnením vzájomne posunutým v jednotlivých fázach.

2.1 Skalárne riadenie

Skalárne riadenie je často využívané v asynchrónnych strojoch, je však možné ho použiť aj pre PMSM. Jeho veľkou výhodou je, že sa jedná v podstate o bezsenzorový návrh riadenia, pretože funguje na princípe nespätňoväzbového riadenia. Nevýhodou je potom závislosť rýchlosti na záťažovom momente, horšie dynamické vlastnosti a špatná regulácia momentu. Aj cez zmienené nevýhody toto riadenie obvykle stačí na jednoduchšie aplikácie ako pohon vetráku, čerpadiel alebo klimatizácií. Toto riadenie je tiež označované ako V/f alebo volt/hertz riadenie, pretože regulovanou veličinou je práve pomer napätia a frekvencie. Snahou riadenia je udržať pomer napätia a frekvencie konštantná. Uhlová rýchlosť rotoru môže byť určená nepriamo výpočtom z frekvencie napájacieho napätia. Táto hodnota môže byť považovaná za hodnotu skutočných otáčok stroja, pokiaľ záťažový moment nepresiahne kritickú hodnotu. Pre riadenie ale skutočnú hodnotu otáčok stroja poznať nepotrebujeme, algoritmus totiž pracuje v stručnosti nasledovne: Z požadovaných otáčok sa určí frekvencia f , tá slúži ako referenčný signál pre regulátor. Ten potom riadi

pomer napätia a frekvencie V/f tak, aby bol konštantný. Na jeho výstupe získame amplitúdu napätia V . Riadiace napätie pre PMSM v $\alpha - \beta$ súradniciach je potom v tvare:

$$u_\alpha = V \cos(2\pi ft) \quad (27)$$

$$u_\beta = V \sin(2\pi ft) \quad (28)$$

[6]

2.2 Priame riadenie momentu

Priame riadenie momentu (Direct Torque Control, DTC) sa používa, keď je potrebný vysoký výkon vzhľadom k dynamike momentu. Je riadený priamo moment stroja a základný princíp je nasledujúci: Kruhovú trajektória statorového toku sa rozdelí na šesť symetrických častí. Veľkosti vektoru statorového toku a elektromagnetického momentu v súradniciach $\alpha - \beta$ je potom držaná v dopredu stanovených medziach prostredníctvom vhodného spínania priamo jednej zo šiestich kombinácií na invertore. [6]

Priame riadenie momentu je možné použiť u trakčných pohonov (električky, trolejbusy, vlaky, metra, elektromobily a ďalšie). Vodič zadáva polohou plynového pedálu hodnotu žiadaného momentu rovnako tak jak tomu je u vozu so spaľovacím motorom. DTC je možné doceliť rýchle odozvy na žiadanú hodnotu momentu riadením veľkosti a fáze statorového spráženého magnetického toku. [6]

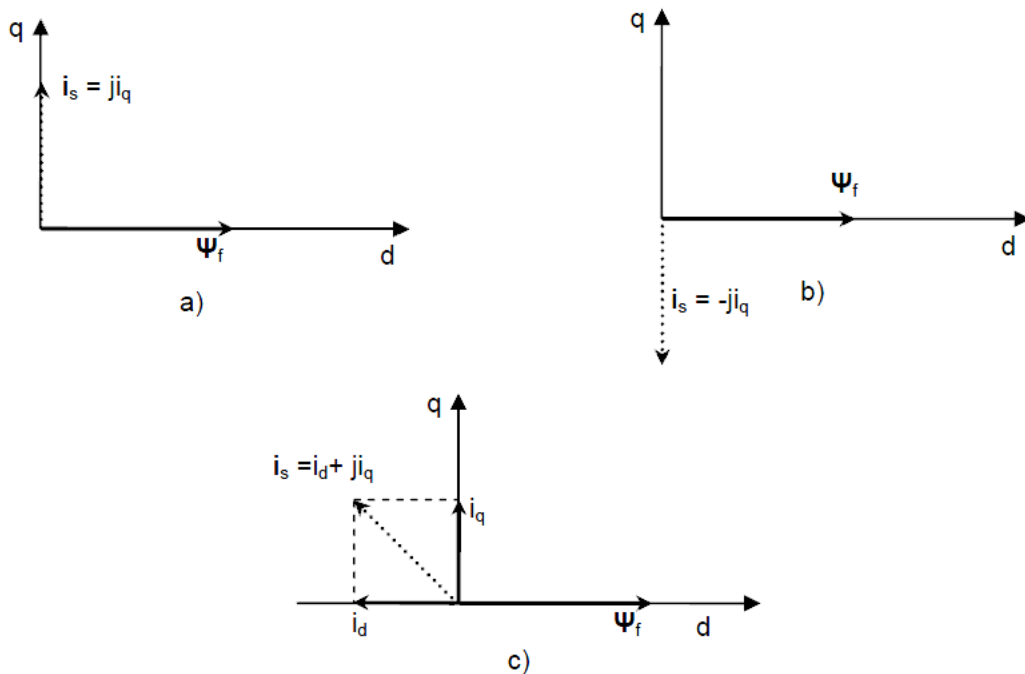
Snímačom prúdu sú snímané okamžité hodnoty dvoch fázových prúdov i_a , i_b . Tie vstupujú do bloku transformácie i_a , i_b / i_α , i_β , ktorý realizuje transformáciu T2/3. Výstupom tohto bloku sú hodnoty i_α , i_β , ktoré sú použité pre výpočet tokov ψ_α , ψ_β podľa rovníc 29 a 30. [6]

$$\Psi_\alpha = \int (u_\alpha - R_s i_\alpha) dt \quad (29)$$

$$\Psi_\beta = \int (u_\beta - R_s i_\beta) dt \quad (30)$$

2.3 Vektorové riadenie

Princíp vektorového riadenia synchronného motora je založený na rozložení priestorového vektoru statorového prúdu na dve navzájom kolmé zložky a nezávislým riadením každej z nich samostatne. Zložky sú natočené do systému rotorových súradníc. Pretože budiaci tok rotora je vytváraný permanentnými magnetmi, je výhodné prevádzať aj reguláciu rýchlosti v systéme rotorových súradníc $[d, q]$. Magnetizačná, - d zložka statorového prúdu ovplyvňujúca magnetizáciu motora nadobúda významu pri prevádzke nad synchronnými otáčkami, kedy vykonáva znižovanie vplyvu PM. Momentotvorná, - q zložka statorového prúdu spoločne s príslušným magnetickým tokom udáva moment motora [6].



Obr. 10. Základná filozofia vektorového riadenia PMSM a) motorický režim b) generátorský režim c) nad synchronná prevádzka

2.4 Moment v komplexnej premennej.

vnútorný moment

$$p_p \cdot \text{Im} \left\{ \vec{\psi}_s(t) \cdot \vec{i}_s^*(t) \right\} \quad (31)$$

kde

$\bar{\psi}_s(t)$ súčin dvoch komplexných čísel

číslo komplexne združené k číslu $\bar{i}_s(t)$

$$\begin{aligned}\bar{\psi}_s(t) \cdot \bar{i}_s(t) &= [\psi_d(t) + i \cdot \psi_q(t)] \cdot [i_d(t) - i \cdot i_q(t)] = \\ &= \psi_d(t) \cdot i_d(t) + \psi_q(t) \cdot i_q(t) + i \cdot [\psi_q(t) \cdot i_d(t) - \psi_d(t) \cdot i_q(t)] \Rightarrow \\ \Rightarrow m_i(t) &= p_p \cdot \underbrace{[L_d \cdot i_d(t) + k_n]}_{\psi_d(t)} \cdot i_q(t) - p_p \cdot \underbrace{L_q \cdot i_q(t)}_{\psi_q(t)} \cdot i_d(t) = \\ &= -p_p \cdot \text{Im} \left\{ \bar{\psi}_s(t) \cdot \bar{i}_s(t) \right\}\end{aligned}\quad (32)$$

Predpokladajme, že reálna osa Gaussovej súradnicovej sústavy (otáčajúcej sa rýchlosťou ω_e) je spojenia s vektorom toku statoru. [1]

Teda platí stále

$$\bar{\Psi}_s(t) = \text{Re} \left\{ \bar{\Psi}_s(t) \right\} = \psi_d(t) \quad (33)$$

potom z rovnice

$$R \cdot \bar{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_s(t) + i \cdot p_p \cdot \bar{\psi}_s(t) \cdot \omega(t) = \bar{u}_s(t) \Rightarrow R \cdot \bar{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \psi_d(t) + i \cdot p_p \cdot \psi_d(t) \cdot \omega(t) = \bar{u}_s(t) \quad (34)$$

porovnaním reálnych a imaginárnych častí dostaneme

$$\begin{aligned}R \cdot \bar{i}_s(t) + \frac{d}{dt} \psi_d(t) + i \cdot p_p \cdot \psi_d(t) \cdot \omega(t) &= \bar{u}_s(t) \Rightarrow \\ \Rightarrow R \cdot i_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} &= u_d(t) \\ R \cdot i_q(t) + p_p [L_d \cdot i_d(t) + k_n] \cdot \omega(t) &= u_q(t) \\ m_i(t) = -p_p \cdot \text{Im} \left\{ \bar{\psi}_s(t) \cdot \bar{i}_s(t) \right\} &= -p_p \cdot \text{Im} \left\{ \psi_d(t) \cdot [i_d(t) - i \cdot i_q(t)] \right\} = \\ &= p_p \cdot i_q(t) \cdot [L_d \cdot i_d(t) + k_n]\end{aligned}\quad (35)$$

Pri takto zvolenej orientácii súradnicovej sústavy je

- časť prúdu tvoriaci magnetický tok je tvorená len prúdom $\mathbf{i}_d(\mathbf{t})$ (pomocou sústavy prvého rádu s parametrami rotorového obvodu
- riaditeľný moment ind. stroja je tvorený potom súčinom „tokotvorného“ prúdu $\mathbf{i}_d(\mathbf{t})$ a „momentotvorného“ prúdu $\mathbf{i}_q(\mathbf{t})$. [1]

V základnej pohybovej rovnici (rovnica mechanického pohybu) jednosmerného el. stroje s mechanickým alebo elektrickým komutátorom vystupuje vnútorný mechanický krútiaci moment:

$$m_i(t) = \frac{p_p \cdot N_v}{a \cdot \pi} \cdot L_{bk} \cdot i_b(t) \cdot i_k(t) \quad (m) \quad (36)$$

kde

$i_b(t)$ je el. prúd v budiacom vinutí stroja (riaditeľný elektronicky pomocou napätia $u_b(t)$), pretože preň platí dynamická rovnica

$$\frac{u_b(t)}{R_b} = \tau_b \cdot \frac{di_b(t)}{dt} + i_b(t) \quad (37)$$

$u_b(t)$ je el. napätie na budiacich svorkách stroja.

$i_k(t)$ je el. prúd vo vinutí rotora stroja (riaditeľný elektronicky pomocou napätia $u_k(t)$), pretože preň platí dynamická rovnica

$$\frac{u_k(t)}{R_k} = \tau_k \cdot \frac{di_k(t)}{dt} + \frac{p_p \cdot N_v}{R_k \cdot a \cdot \pi} \cdot \omega(t) + i_k(t) \quad (38)$$

$u_k(t)$ je el. napätie na svorkách rotora stroja

$\omega(t)$ je vzájomná uhlová rýchlosť rotora vzhľadom na stator

$\frac{p_p \cdot N_v}{a \cdot \pi} \cdot L_{bk}$ je racionálna lomená funkcia zložená z konštantných (pri danej rozlišovacej

úrovni modelu) parametrov stroja, R_b , R_k sú el. odpory, teda konštanty.

Pomocou zapojenia výkonového elektronického systému možno rôznym typom kvantovania vstupnej elektrickej energie vytvoreným spínaním jednotlivých tranzistorov dosiahnuť riadenie oboch prúdov $i_b(t)$ a $i_k(t)$, teda podľa rovnice (m) riadenia **vnútorného elektromagnetického momentu stroja**. [1]

V základnej pohybovej rovnici (rovnica mechanického pohybu) synchronného stroja s rotorom z perm. magnetov vystupuje vnútorný mechanický krútiaci moment:

$$m_i(t) = p_p \cdot i_q(t) \cdot [L_d \cdot i_d(t) + k_n] \quad (m1) \quad (39)$$

kde $i_d(t)$ je el. prúd vytvárajúci magnetický tok stroja (riaditeľný elektronicky pomocou napätia $u_d(t)$), pretože preň platí dynamická rovnica

$$R \cdot i_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} = u_d(t) \quad (40)$$

$i_q(t)$ je elektrický prúd po transformácii do d-q osí a vytvára magnetický tok stroja. Platí preň rovnica

$$R \cdot i_q(t) + p_p [L_d \cdot i_d(t) + k_n] \cdot \omega(t) = u_q(t) \quad (41)$$

ω = rýchlosť otáčania fázora statorového magnetického toku a rýchlosť otáčania rotora..

Pomocou zapojenia výkonového elektronického systému možno rôznym typom kvantovania vstupnej elektrickej energie vytvoreným spínaním jednotlivých tranzistorov dosiahnuť riadenie oboch prúdov $i_d(t)$ a $i_q(t)$, teda podľa rovnice (m1) riadenia vnútorného elektromagnetického momentu stroja. [3]

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

3 SIMULAČNÝ MODEL V SIMULAČNOM PROSTREDÍ DYNAST.

Cieľom počítačovej simulácie dynamických sústav je napodobňovanie chovania týchto sústav. Chovaním dynamických sústav rozumieme priebehy veličín týchto sústav v závislosti na čase a vonkajších podnetoch. Žiaducim výsledkom simulácie sú teda časové priebehy rôznych veličín sústav podobné priebehom na sústavách reálnych.

Fyzikálne modelovanie, ktorého výsledkom sú modely topológie sústav uvažujúcich interakcie medzi časťami v podobe toku energie alebo hmoty. Tieto modely je možné veľmi ľahko znázorňovať pomocou fyzikálnych schém. Tieto schémy možno jednoducho poskladať stavebnicovým spôsobom z grafických značiek jednotlivých častí sústav obdobným spôsobom, akým sú tieto sústavy zostavené z reálnych častí. Simulácie riadenia servopohonu je dôležitá pre overenie chovania napríklad pri polohovaní lebo skutočná priestorová trajektória môže byť vplyvom dynamických chýb odlišná od trajektórie zadávanej a to môže ovplyvniť technologické parametre stroja (robota) v ktorom servopohon použijeme. V diplomovej práci sme použili simulačné prostredie DYNAST. Dokáže simulovať a analyzovať nelineárne dynamické sústavy. V našom prípade chovanie momentového servopohonu s PMSM.

DYNAST Shell je voľne šíriteľný program umožňujúci pohodlné využívanie simulačného systému DYNAST pod MS Windows. Je navrhnutý tak, aby vyhovoval začiatočníkom, tak aj skúseným používateľom. DYNAST Shell je určený ako pre prípravu simulačných úloh a ich odoslanie do riešiča DYNAST Solver aj k interpretácii výsledkov riešení. Umožňuje systematickú správu súborov, s nimi pracuje systém DYNAST. [5]

3.1 Fyzikálne schémy

Fyzikálne schémy sú grafickým zobrazením mnohopólových modelov. Tieto modely reprezentujú chovanie reálnych sústav podmienené

- tokom energie a hmoty medzi sústavami a ich okolím
- akumulácii energie či hmoty a zmenou ich formy vo vnútri sústavy

Mnohopólové modely vychádzajú z predstavy, že modelovaná reálna sústava je rozdelená myslennými uzavretými plochami na disjunktné časti takým spôsobom, že ani energie, ani hmota sa v priestore medzi týmito časťami neakumuluje a ani nemení svoju formu. Tvar a poloha uvedených plôch sa však meniť môže. Vo vnútri jednotlivých častí sústavy energie

aj hmota môže svoju formu meniť, alebo tu môže byť akumulovaná a neskoršie vrátená nazad do sústavy. Energia môže byť odtiaľto tiež rozptyľovaná mimo sústavu v podobe tepla. [5]

Modelovanie pomocou mnohopólových modelov je založené na nasledujúcich aproximačných predpokladoch:

- K toku energie alebo hmoty do alebo z jednotlivých častí sústavy dochádza v **ko-nečnom počte miest** (tvorenom napríklad elektrickými alebo tekutinovými prívodmi, mechanickými prírubami a podobne).
- Navzájom priliehajúce miesta interakcie rôznych častí sústavy, medzi ktorými dochádza k energetickej interakcii, vytvárajú styk podsystémov.
- Tok energie alebo hmoty medzi jednotlivými podsystémami sústavy možno vyjadriť ako súčin dvojice komplementárnych výkonových veličín.
- Mnohopólový model častí má toľko pólov, koľko dvojica výkonových veličín je treba k vyjadreniu ich interakcií s inými časťami alebo s okolím sústavy.
- Výkonové veličiny v sústave vyhovujú postulátom kontinuity a kompatibility.

ENERGETICKÁ DOMÉNA	VÝKONOVÉ VELIČINY		ENERGETICKÉ VELIČINY	
	PRÚTOK i	SPÁD v	PRÚTOK $q = \int i dt$	SPÁD $\lambda = \int v dt$
elektrická	elektrický proud [A]	elektrické napětí [V]	elektrický náboj [C]	spřažený tok [V.s]
magnetická	časová změna magnet. toku [Wb/s]	magnetické napětí [A]	magnetický tok [Wb]	
tekutinová či akustická	objemový průtok [m ³ /s]	tlak [N/m ²]	objem [m ³]	impulz tlaku [N.s/m ²]
mechanická přímočará	síla [N]	rychlost [m/s]	impulz síly [N.s]	výchylka [m]
mechanická rotační	moment síly [N.m]	úhlová rychlost [rad/s]	impulz momentu [N.m.s]	úhlová výchylka [rad]

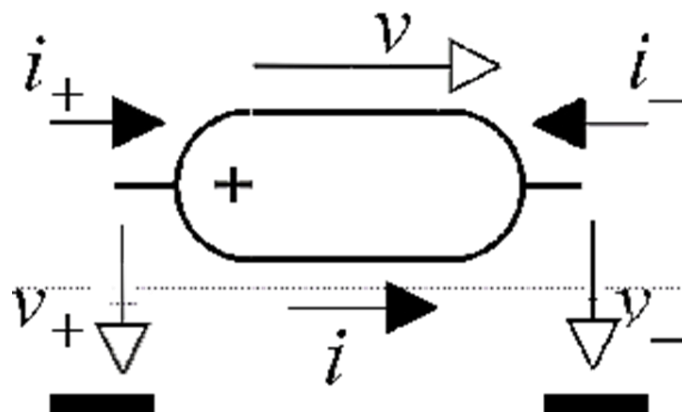
Obr. 11. Příklady dvojíc výkonových fyzikálních veličin

Prietokové a spádové veličiny vytvárajúce páry výkonových veličín uvedené na obrázku (Obr.11) sa navzájom líšia spôsobom svojho merania. [5]

Ak chceme merať priamym spôsobom určitú prietokovú veličinu medzi niektorou časťou a sústavou, musíme medzi stykový bod časti a stykový bod sústavy zapojiť príslušný merací prístroj. Spádové veličiny sa merajú medzi dvoma rôznymi stykmi sústavy bez zásahu do sústavy. Obrázok uvádza tiež páry energetických veličín, tj. časové integrály výkonových veličín. [5]

3.1.1 Dvojpóly

Dvojpóly sú modely charakterizujúce chovanie reálnych častí k ich modelovaniu stačí uvažovať iba dva vtoky a dve dvojice výkonových veličín. V fyzikálnej schéme predstavujúcej model sústavy sú jednotlivé dvojpóly graficky znázornené grafickými značkami. Každý z vtokov modelovanej časti predstavujúcej pól príslušného modelu, je v schéme reprezentovaný úsečkou vyčnievajúcou z obrysu značky modelu. [5]



Obr. 12. Univerzálna značka obecného dvojpólu




Miesta v ktorých dochádza k vzájomným energetickým interakciám medzi časťami, predstavujú uzly mnohopólového modelu sústavy. Aby zo schémy bolo vidieť, medzi ktorými vtokmi v určitom styku dochádza k interakcii, uzol predstavujúci tento styk je prepojený s pólmi odpovedajúcim príslušným vtokom čiarami. Tieto spojovacie čiary predstavujú ideálne spoje, ktoré môžu prenášať energiu oboma smermi, bez toho aby pritom dochádzalo k jej strate či akumulácii alebo k jej akejkoľvek premene. [5]

Každému uzlu prislúcha spádová veličina uzlu. Jeden z uzlov sústavy je vždy považovaný za vzťažný uzol a jeho spádová veličina za nulovú.

Vztažný uzel v

- elektrickej doméne obvykle predstavuje uzemnenie,
- v tekutinovej doméne voľné prostredie,
- v mechanickej doméne bod alebo rám považovaný za pevný.

Na obrázku (Obr.13) sú príklady značiek vztažných uzlov používané vo fyzikálnych schémach.

ENERGETICKÁ DOMÉNA	VZTAŽNÝ UZEL	ZNAČKA
elektrická	elektrické uzemnění	
tekutinová či akustická	volná atmosféra	
mechanická	vztažný rám	

Obr. 13. príklady značiek vztažných uzlov

3.1.2 Orientácia veličín prvkov

Aby sme mohli jednoznačne určiť orientáciu veličín dvojpólu (Obr.13), jeho polarita je tu vyznačená znamienkom + v blízkosti jedného z pólov. Tento pól budeme označovať ako + pól a druhý ako - pól. [5]

Spádové veličiny pólov $v+$ a $v-$ sú uvažované vzhľadom k vztažnému uzlu modelu sústavy, $i+$ a $i-$ sú prietokové veličiny pólov. Šípky na obrázku ukazujú predpokladanú kladnú orientáciu týchto veličín. Ďalej zavedieme pojem prietokovej veličiny dvojpólu:

$$i = i+ = -i- \quad (42)$$

a spádové veličiny dvojpólu:

$$v = v+ - v- \quad (43)$$

Príkion dvojpólu je teda daný vzťahom

$$P(t) = i(t) \cdot v(t) \quad (44)$$

Na ideálny spoj môžeme pozerat' ako na zvláštny prípad dvojpólu, pre ktorý platí

$$i_+ = -i_-, v_+ - v_- = 0 \text{ a } P(t) = 0 \quad (45)$$

V nemechanických doménach ideálne spoje predstavujú

- ideálne elektrické vodiče,
- ideálne potrubie s nestlačiteľnou tekutinou a podobne.

V mechanickej translačnej doméne ideálny spoj predstavuje **absolútne pevnú nehmotnú tyč** o konštantnej dĺžke, ktorá prenáša silu z jedného konca na druhý bez akejkoľvek zmeny. Oba konce tejto tyče majú rovnakú rýchlosť, ale dĺžka tyče nieje definovaná.

V prípade mechanickej rotačnej domény ideálny spoj predstavuje **absolútne pevný nehmotný hriadel'**, ktorý prenáša bez zmeny moment sily, oba jeho konce majú rovnakú uhlovú rýchlosť, ale jeho konce sú navzájom pootočené o konštantný, avšak nedefinovaný uhol. [5]

3.1.3 Typy fyzikálnych prvkov

Fyzikálne prvky (Obr.14) tvoria ucelenú stavebnicu dvojpólových modelov, z ktorých je možné zostavovať širokú triedu modelov chovania najrôznejších fyzikálnych sústav. Sú označované za rýdze modely v tom zmysle, že každý z nich predstavuje základy fyzikálny jav charakterizovaný jedinou vlastnosťou. [5]

TYP	G	R	C	L
NEMECHANICKÉ	KONDUKTOR	REZISTOR	KAPACITOR	INDUKTOR
elektrické				
magnetické				
tekutinové či akustické				
MECHANICKÉ	TLUMIČ		INERTOR	PRUŽINA
přímočaré				
rotační				
KONSTITUČNÍ VZTAH	$i = p \cdot v$	$v = p \cdot i$	$i = p \frac{dv}{dt}$	$v = p \frac{di}{dt}$


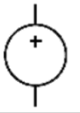




Obr. 14. fyzikálne prvky

Tieto vlastnosti sú uvedené v nasledujúcom obrázku (Obr.15) aj s ich fyzikálnymi roz-
 mermi. Fyzikálne prvky sa týmito svojimi vlastnosťami navzájom dopĺňujú. Len dvojice
 rezistora a konduktora zo zhodnej domény predstavuje ten istý fyzikálny jav, napriek tomu
 sú oba tieto prvky pri modelovaní užitočné. [5]

ENERGETICKÁ DOMÉNA	KONDUKTOR ČI TLUMIČ	REZISTOR	KAPACITOR ČI INERTOR	INDUKTOR ČI PRUŽINA
	$p = \frac{i}{v}$	$p = \frac{v}{i}$	$p = \frac{i}{dv/dt}$	$p = \frac{v}{di/dt}$
elektrická	elektrická vodivost [S]	elektrický odpor [Ω]	elektrická kapacita [F]	elektrická indukčnost [H]
magnetická	magnetická vodivost [Ω]	reluktance [S]	permeance [H]	
tekutinová nebo akustická	tekutinová vodivost [m ³ /(Pa.s)]	tekutinový odpor [Pa.s/m ³]	tekutinová kapacita [m ³ /Pa]	inertance [Pa.s ² /m ³]
mechanická translační	tlumení [N.s/m]		hmotnost [kg]	poddajnost [m/N]
mechanická rotační	torzní tlumení [N.m.s/rad]		moment setrvačnosti [m ² kg/rad]	torzní poddajnost [rad/(N.m)]

Obr.15. vlastnosti fyzikálních prvků

K mnohopólovému modelování chování systémů jsou rovnako důležité fyzikální prvky představující zdroje energie (Obr.16).

TYP	J	E
Univerzální	zdroj průtokové veličiny 	zdroj spádové veličiny 
Mechanické translační	zdroj síly 	zdroj rychlosti 
Mechanické rotační	zdroj momentu síly 	zdroj úhlové rychlosti 
Konstituční vztah	$i = p$	$v = p$

Obr. 16. zdroje energie

REÁLNÉ SOUSTAVY		MODELÝ SOUSTAV	
Číslo	<i>Reálné části</i>	<i>Fyzikální prvky</i>	
1	elektrická baterie	zdroj elektrického napětí	
2	elektrický kondenzátor	elektrický kapacitor	
3	cívka	elektrický induktor	
4	elektrický odporník	elektrický rezistor	
Číslo	<i>Reálné části</i>	<i>Fyzikální prvky</i>	
1	pumpa poháněná motorem	zdroj objemového průtoku	
2	otevřená nádrž	tekutinový kapacitor	
3	dlouhé potrubí	tekutinový induktor	
4	výpust'	tekutinový rezistor	
Číslo	<i>Reálné části</i>	<i>Fyzikální prvky</i>	
1	motor auta	zdroj síly	
2	hmota auta	inertor	
3	dlouhé lano	pružina	
4	padák	tlumič	
Číslo	<i>Reálné části</i>	<i>Fyzikální prvky</i>	
1	motor	zdroj momentu síly	
2	setrvačnick	rotační inertor	
3	dlouhý hřidel	torzní pružina	
4	ventilátor	rotační tlumič	

Obr. 17. Příklady jednoduchých systémů a jejich fyzikálních schém s dvojpólymi

V ľavom stĺpci (Obr.17) sú náčrty jednoduchých reálnych sústav z rôznych energetických domén, v pravom stĺpci sú modely týchto sústav znázornené fyzikálnymi schémami.

3.1.4 Postuláty kontinuity a kompatibility

Mnohopólové modelovanie je rovnako založené na predpoklade, že veličiny zúčastňujúce sa vzájomnej energetickej interakcie reálnych častí sú navzájom viazané postuláty kontinuity a kompatibility. [5]

Interpretáciu týchto postulátov v podobe fyzikálnych zákonov uplatňovaných v jednotlivých energetických doménach ukazuje nasledujúci obrázok (Obr.18).

ENERGETICKÁ DOMÉNA	POSTULÁT KONTINUIITY	POSTULÁT KOMPATIBILITY
elektrická	Kirchhoffův zákon proudů	Kirchhoffův zákon napětí
magnetická	kontinuita magnet. toku	Ampérův zákon smyček
tekutinová a akustická	princip zachování hmoty	princip skládání tlaků
mechanická přímočará	dynamická rovnováha sil	princip skládání pohybů
mechanická rotační	dyn. rovnováha momentů sil	princip skládání rot. pohybů

Obr. 18. fyzikálne zákony uplatňované v jednotlivých energetických doménach

Uvedené postuláty nemožno dokázať, ale v obore klasickej nerelativistickej fyziky neboli pozorované žiadne kvazistatické javy, ktoré by im odporovali. [5]

Podľa postulátu kontinuity platí vzťah

$$\sum i_k = 0 \quad (46)$$

kde i_k sú prietokové veličiny „vtekajúce“ do uzlu.

Podľa postulátu kompatibility platí

$$v_{jk} = v_j - v_k \quad (47)$$

kde v_j a v_k sú absolútne spádové veličiny dvoch uzlov schémy a v_{jk} je relatívna spádová veličina medzi týmito uzlami.

Pritom v_j , v_k i v_{jk} patria do tej istej energetickej domény. [5]

3.2 Simulačný model synchronného stroja s permanentnými magnetmi (PMSM) v simulačnom prostredí DYNAST.

V grafickom editore programu DYNAST sme vytvorili bránovú schému (PMSM) uvedenú v prílohe PI. Túto schému použijeme pri návrhu servopohonov. Postupne budeme navrhovať momentový, rýchlostný a polohový servopohon. Rovnice popisujúce dynamickú konverziu riadenej elektrickej energie na riadenú mechanickú energiu boli uvedené v teoretickej časti diplomovej práce. Pretože praktické overenie našich návrhov neoverujeme na reálnom objekte, všetky naše návrhy budú overované a vyhodnocované pomocou **bránových (multiportových) modelov fyzikálneho modelovania**.

Štruktúra textových súborov (PMSM) má nasledujúcu podobu:

```
: I_PMSM
:: model proudově napájeného PMSM
I_PMSM
sa,
sb,
sc,
wr,
ws/
Is=7e-3, Jmr=4.9e-4, Jms=7e-4, Ibb=1.0, pp=1, Period=2e-3;
:
kd = sqrt(2/3); kq = sqrt(2/3);
BS1 nad = kd*cos(fi_e);
BS2 nbd = kd*cos(fi_e-2pi/3);
BS3 ncd = kd*cos(fi_e+2pi/3);
:
BS4 naq = kq*sin(fi_e);
BS5 nbq = kq*sin(fi_e-2pi/3);
BS6 ncq = kq*sin(fi_e+2pi/3);
:
E1 sa-1 = nad*ud-naq*uq;
E2 sb-2 = nbd*ud-nbq*uq;
E3 sc-3 = -(v.E1+v.E2);
Rs1 1 = 0;
Rs2 2 = 0;
Rs3 3 = 0;
:
J_d 0-4 = nad*i.Rs1+nbd*i.Rs2+ncd*i.Rs3;
```

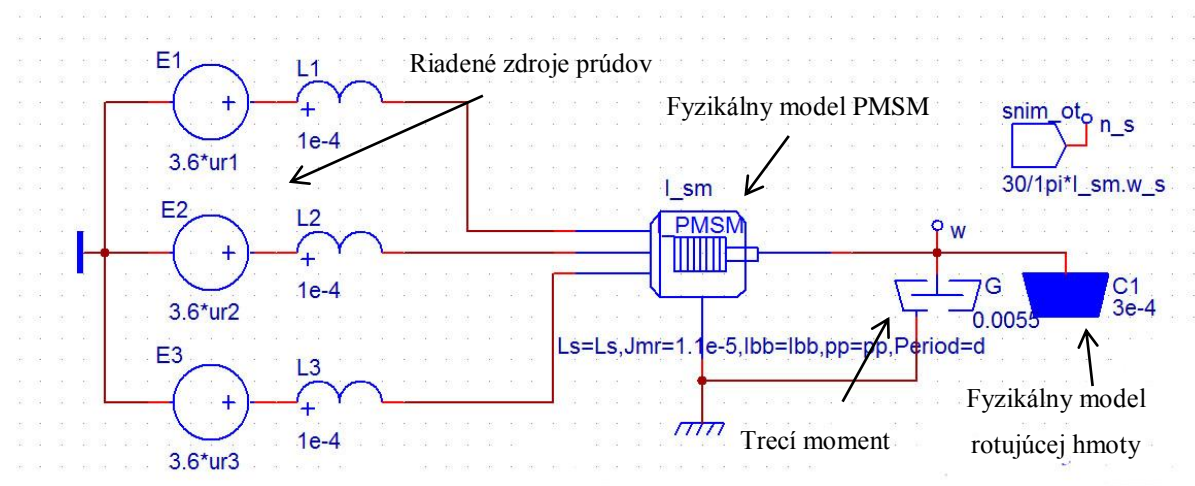
```
J_q 0-5 = -naq*i.Rs1-nbq*i.Rs2-ncq*i.Rs3;
R1 4 = 0;
R2 5 = 0;
:
N_d > J 0-6 = pp*(Ls*i.R2);
N_q > J 0-7 = pp*(Ls*i.R1+ibb);
R3 6 = 0;
R4 7 = 0;
moment > J ws-wr = i.R4*i.R2-i.R3*i.R1;
:
E4 ud = -i.R3*(wr-ws);
E5 uq = i.R4*(wr-ws);
:
J_rot > C wr = Jmr;
J_stat > C ws = Jms;
G_frict wr-ws = 1.5e-6;
:
ID1 > @Intdiff wr,ws,fi_e / pp;
:
AD1 > @AD 8,9 / B=15,RANGE=2pi/4;
BH1 > @SampleHold 9,fi_s / Period=Period;
N_der1 > @N_der 9,w_s / 1/4*Period;
ID2 > @Intdiff wr,ws,8;
EO@;
```

4 NÁVRH SERVOPOHONOV

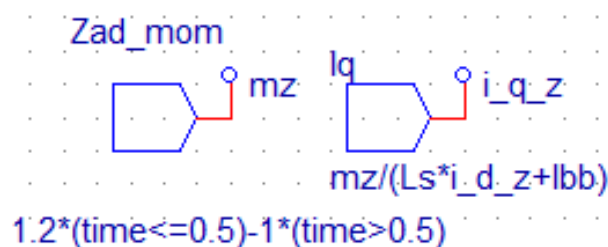
4.1 Simulačný model momentového servopohonu s PMSM.

Pri servopohone sa používajú snímače pre odčítanie polohy, rýchlosti či momentu. Signál snímačov sa používa k ďalšiemu riadeniu servopohonu.

Žiadané prúdy určujeme pomocou žiadaného momentu. Volíme i_d a z neho a žiadaného momentu určíme žiadaný i_q . Spätnou transformáciou určíme pomocou snímania uhlu otočenia rotoru žiadané prúdy vo fázach statoru. V prílohe PII je vytvorená schéma riadenia momentu prúdovo napájaného PMSM. Princíp riadenia momentu je popísaný v podkapitolách 2.2, 2.3, 2.4.

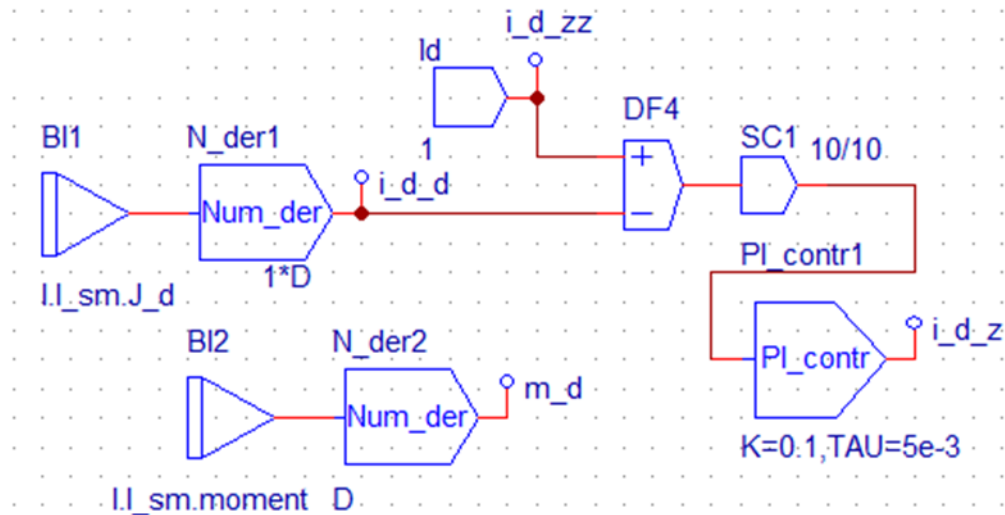


Obr. 19. Základné zobrazenie riadenej sústavy



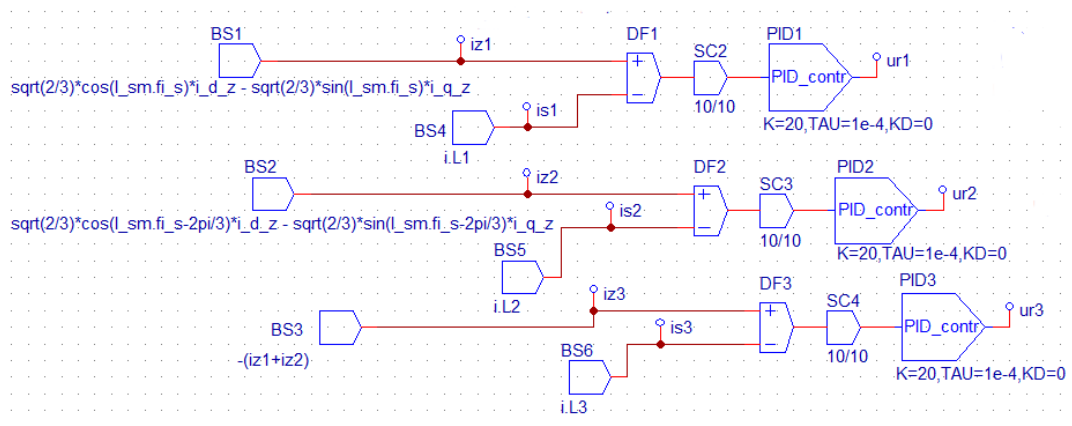
Obr. 20. Blokova schéma prvku pre výpočet

i_q žiadaný zo žiadaného momentu

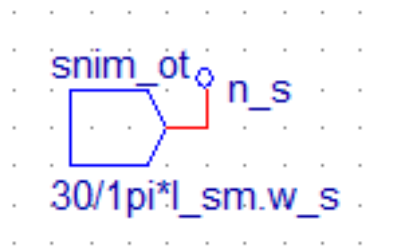


Obr. 21. Regulácia žiadaného i_d

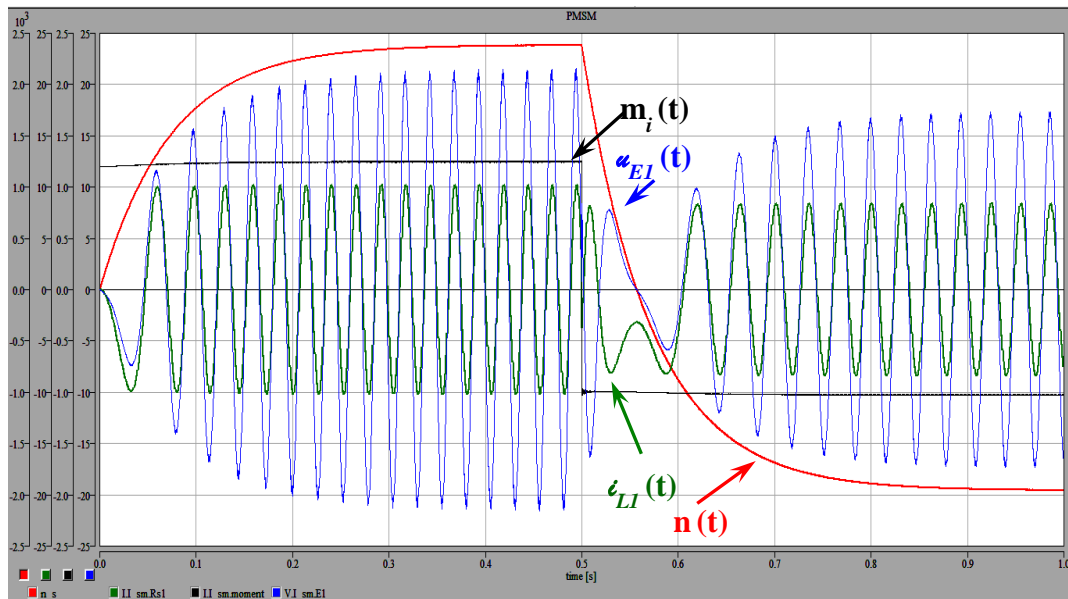
Na obrázku (Obr.22) je schéma pre výpočet žiadaných fázových prúdov. Porovnané žiadané prúdy BS1 až BS3 vypočítané zo žiadaného momentu pomocou blokového zapojenia pre výpočet žiadaného i_q obrázok (Obr.20) a regulovaného žiadaného I_d obrázok (Obr.21) so skutočnými prúdmi v BS4 až BS6 sú privedené na regulátor PID1 až PID3, výstupom z regulátorov sú žiadané fázové prúdy. Tieto sú privádzané na riadený zdroj prúdov.



Obr. 22. Výpočet žiadaných fázových prúdov zo žiadaných i_d a i_q

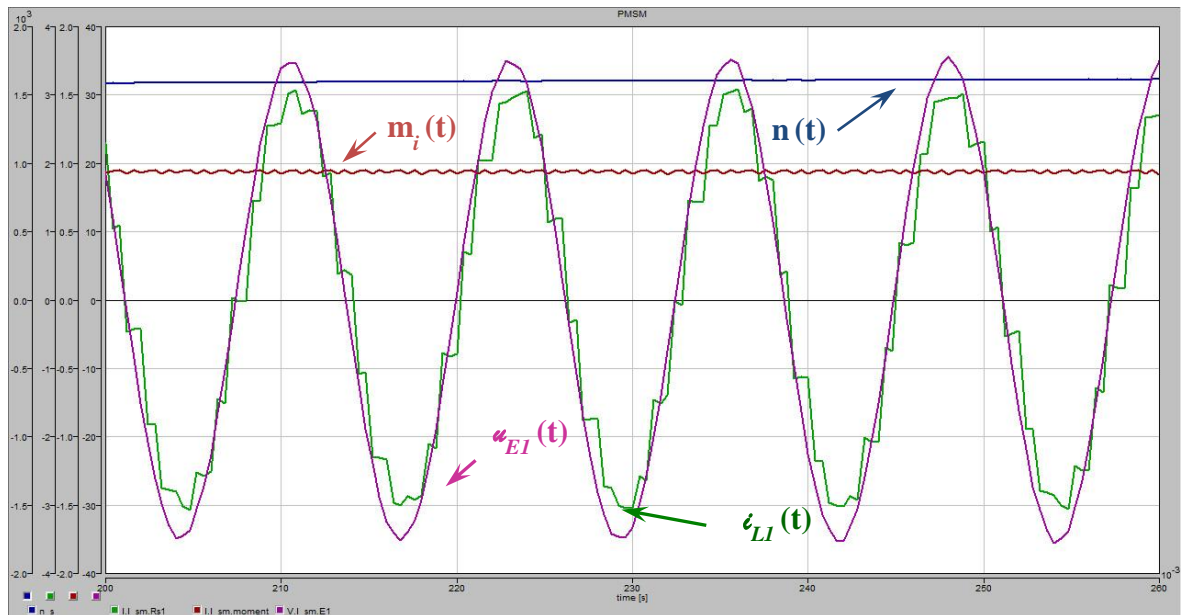


Obr. 23. snímač uhlu rotoru



Obr. 24. Chovanie prúdovo napájaného PMSM stroja so snímačom polohy rotora pri rozbehu a reverzácii momentu

Na obrázku (Obr.24) je zobrazené chovanie prúdovo napájaného PMSM stroja so snímačom polohy rotora pri rozbehu a zmene smeru (reverzácii) momentu. Kde $\mathbf{m}_i(t)$ je okamžitá hodnota vnútorného momentu v stroji. Červená čiara $n(t)$ znázorňuje otáčky rotora. u_{e1} je indukované napätie pôsobiace proti vstupným prúdom i_{L1} . Regulátory prúdu sa dostávajú v amplitúde indukovaného napätia na hranicu udržania žiadaného prúdu (Obr.25).



Obr. 25. indukované napätie pôsobiace proti vstupným prúdom

Po prekročení maximálnej hodnoty momentu záťaže, synchronizačné sily už nebudú schopné udržať motor v synchronných otáčkach a motor vypadne zo synchronizmu.

Štruktúra textových súborov má nasledujúcu podobu:

```

*: PMSM
*SYSTEM;
:
D=1/1e3;Ls = 1.3e-3;Ibb=0.085;pp = 3;
:
Zad_mom > BS mz = 0.95*(time<=0.5)-0.95*(time>0.5);
Id > BS i_d_zz = 0;
DF4 > @Difference i_d_zz,i_d_d,15;
SC1 > @Scalor 15,16 / 10/10;
PI_contr1 > @PI_contr 16,i_d_z / K=0.1,TAU=5e-3;
:
Iq > BS i_q_z = mz/(pp*(Ls*i_d_z+Ibb));
:
BS1 iz1 = sqrt(2/3)*cos(pp*I_sm.fi_s)*i_d_z - sqrt(2/3)*
    sin(pp*I_sm.fi_s)*i_q_z;
BS2 iz2 = sqrt(2/3)*cos(pp*I_sm.fi_s-2pi/3)*i_d_z - sqrt(2/
    3)*sin(pp*I_sm.fi_s-2pi/3)*i_q_z;
BS3 iz3 = -(iz1+iz2);

```

```

:
BS4 is1 = i.L1;
BS5 is2 = i.L2;
BS6 is3 = i.L3;
:
DF1 > @Difference iz1,is1,8;
DF2 > @Difference iz2,is2,9;
DF3 > @Difference iz3,is3,10;
:
SC2 > @Scalor 8,11 / 10/10;
SC3 > @Scalor 9,12 / 10/10;
SC4 > @Scalor 10,13 / 10/10;
:
PID1 > @PID_ja 12,ur2 / K=20,TAU=1e-4,KD=0;
PID2 > @PID_ja 13,ur3 / K=20,TAU=1e-4,KD=0;
PID3 > @PID_ja 11,ur1 / K=20,TAU=1e-4,KD=0;
:
E1 5 = 3.6*ur1;
E2 6 = 3.6*ur2;
E3 7 = 3.6*ur3;
L1 5-1 = 1e-4;
L2 6-2 = 1e-4;
L3 7-3 = 1e-4;
I_sm > @I_PMSM 1,2,3,w,0 / Ls=Ls,Jmr=1.1e-5,Ibb=Ibb,pp=pp,
    Period=d;
:
C1 w = 3e-4;
G w = 0.0055;
:
BI1 4 = I.I_sm.J_d;
N_der1 > @N_der 4,i_d_d / 1*D;
:
BI2 14 = I.I_sm.moment;
N_der2 > @N_der 14,m_d / D;
:
snim_ot > BS n_s = 30/1pi*I_sm.w_s;
:
*TR;
TR 0 2;
PRINT(5001) n_s, I.I_sm.Rs1, I.I_sm.moment, m_d, I.I_sm.J_d,
    i_d_z, I.I_sm.J_q, V.I_sm.E1, V.E1, I_sm.fi_s, w, i_d_zz,

```



```
i_q_z;
RUN EPS=1e-4, MAX=4e5, MIN=1e6, WPRINT=1000;
*END;
```

4.1.1 Návrh parametrov regulátora momentu

Pre návrh parametrov regulátora použijeme metódu kritického zosilnenia Ziegler-Nichols

Prenos PID regulátora je

$$G_{PI}(s) = r_0 + \frac{1}{\tau \cdot s} + r_1 \cdot s = r_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{\underbrace{r_0 \cdot \tau \cdot s}_{T_i}} + \frac{\overbrace{r_1}^{T_d}}{r_0} \cdot s \right) = \quad (48)$$

$$= r_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right)$$

$$G_{PI}(s) = r_0 + \frac{1}{\tau \cdot s} \quad (49)$$

Pre náš PI regulátor platí

$$\tau = \frac{T_i}{r_0} \quad (50)$$

Pri tejto metóde musíme priviesť regulačný obvod na hranicu stability, pričom regulátor pracuje iba s proporcionálnou zložkou. Teda integračná a derivačná zložka sú vyradené nastavením. To znamená že $T_i \rightarrow \infty$, $T_d \rightarrow 0$

Hodnotu kritického zosilnenia $r_0 = r_{0k}$ a periódu kritického zosilnenia T_k zistíme pri odstránení derivačnej a integračnej zložky PID regulátora, zvyšujeme zosilnenie proporcionálnej zložky r_0 do okamihu keď regulačný obvod kmitá netlmene. Na hranici stability kmitá obvod netlmenými kmitmi o konštantnej amplitúde a dôležité je zmerať práve dobu týchto kmitov čo je vlastne kritická perióda T_k . Na základe znalostí týchto dvoch parametrov r_{0k} a T_k zistíme z nasledujúceho obrázku (Obr.26) optimálne parametre pre akýkoľvek typ regulátora.

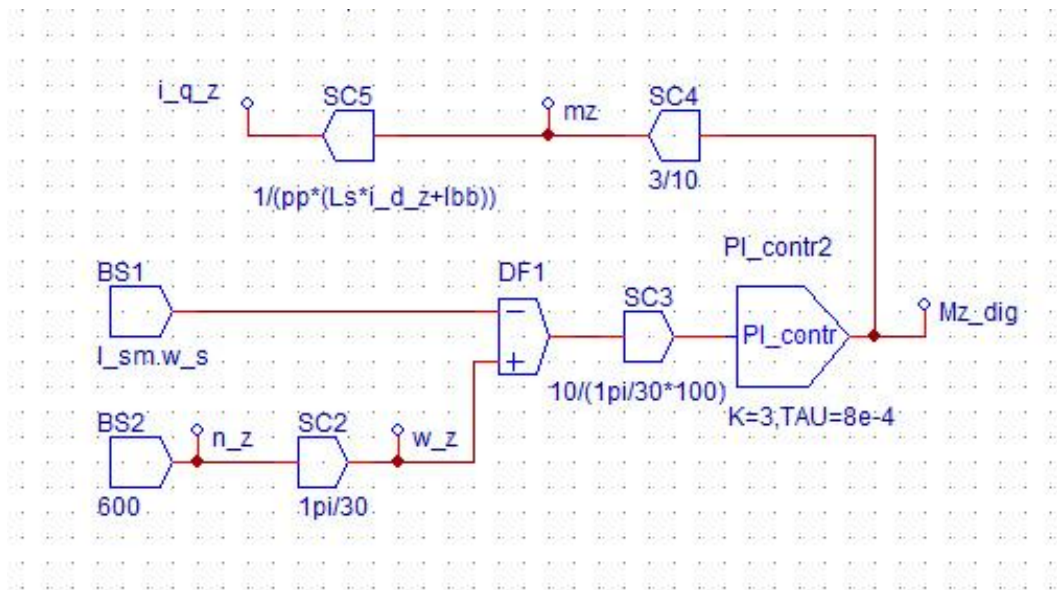
typ reg.	r_0	T_i	T_d
P	$0,5 r_{0k}$	-	-
PI	$0,45 r_{0k}$	$0,83 T_k$	-
PD	$0,4 r_{0k}$	-	$0,05 T_k$
PID	$0,6 r_{0k}$	$0,5 T_k$	$0,12 T_k$
I *)	-	$2 T_{ik}$	-

Obr.26. Nastavenie koeficientov metódou
Zieglera – Nicholse

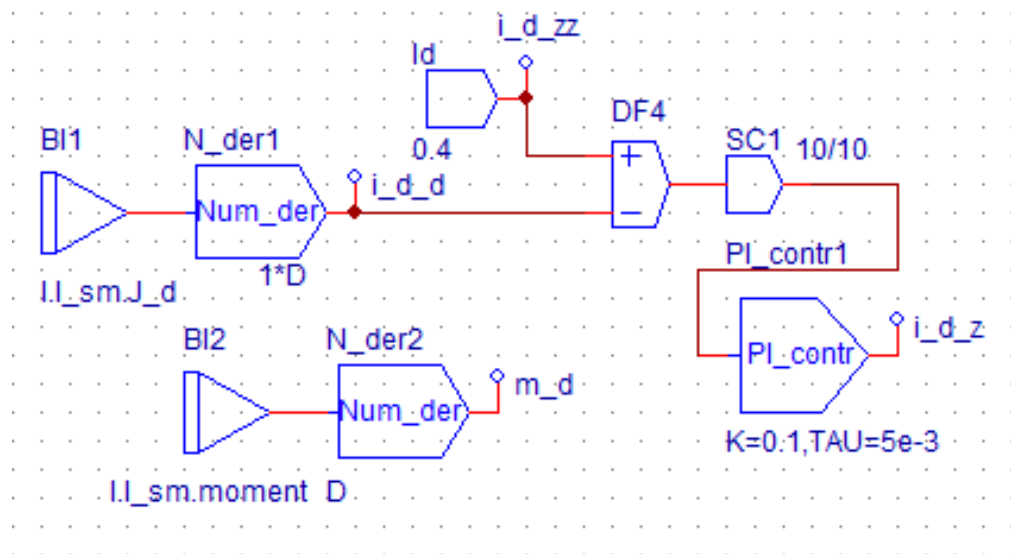
Pri integračnom regulátore sa obvod dostane do kritického stavu (na hranicu stability) zmenou integračnej konštanty regulátoru T_i , pričom túto kritickú hodnotu označíme T_{ik} . Z nej sa potom odvodzuje optimálne nastavenie I regulátora.

4.2 Simulačný model rýchlostného servopohonu s PMSM.

Rýchlostný servopohon má otáčkovú spätnú väzbu a umožňuje rýchle a presné sledovanie zadávanej rýchlosti (otáčok). Pre optimálne nastavenie regulátora otáčok môžeme použiť viacero metód. Najčastejšie používanou, je experimentálna metóda Ziegler-Nicholsa, Chiena, Hronesa, Reswicka, alebo metóda „pokus omyl“. Z globálnych metód je to metóda relatívneho tlmenia, metóda optimálneho modulu alebo metóda požadovaného modelu. Pri globálnych metódach ale musíme poznať prenos sústavy. Ako regulátor otáčok môžeme použiť PI alebo PID regulátor. V našom prípade sme použili PI regulátor. V prílohe PIII je vytvorená schéma rýchlostného servopohonu s PMSM v simulačnom prostredí DYNAST.



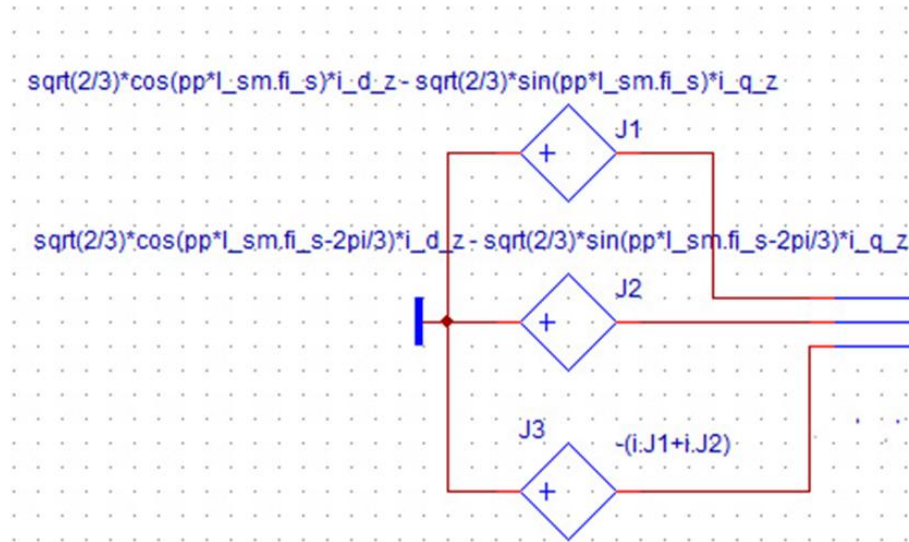
Obr. 27. Riadenie rýchlosti servopohonu v DYNAST



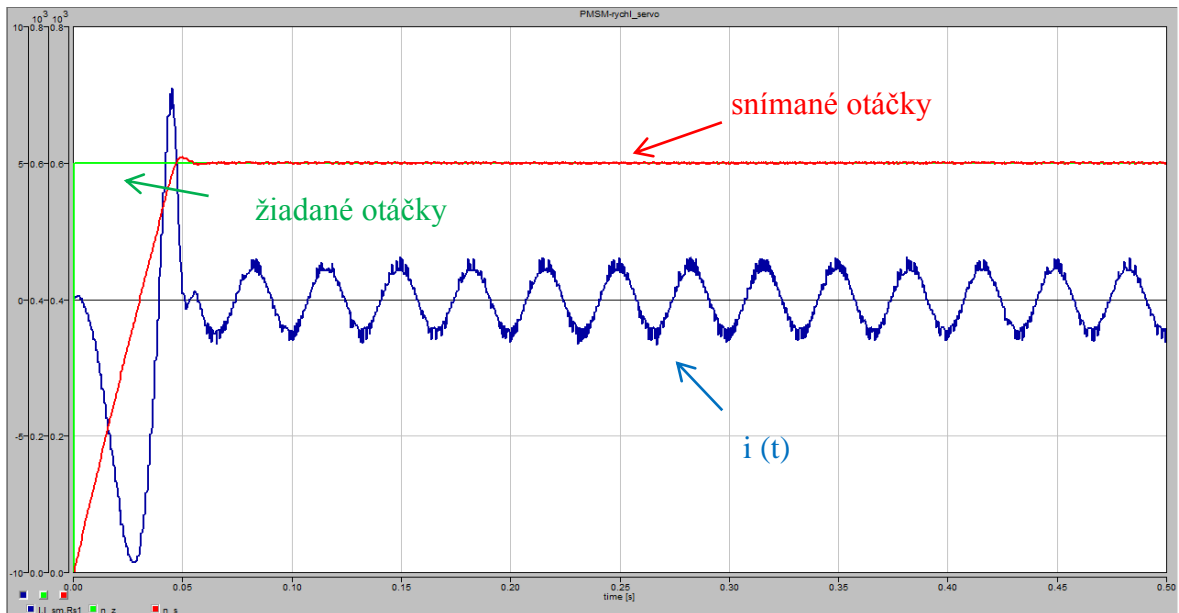
Obr. 28. Bloková schéma pre výpočet i_{dz}

Na obrázku (Obr.27) je schéma riadenia rýchlosti servopohonu. Pomocou snímaných otáčok a žiadaných otáčok sa vypočíta i_{qz} . V našom prípade sme žiadali 600 otáčok. Do regulátoru označeného v schéme ako PI_contr2 sú privedené odčítané snímané otáčky s prvku BS1 a žiadané otáčky s prvku BS2. Po prepočítaní na prvkoch SC4 a SC5 dostaneme i_{qz} . Získané i_{dz} z blokového zapojenia na obrázku (Obr.28) a i_{qz} sú privedené na po inverznej

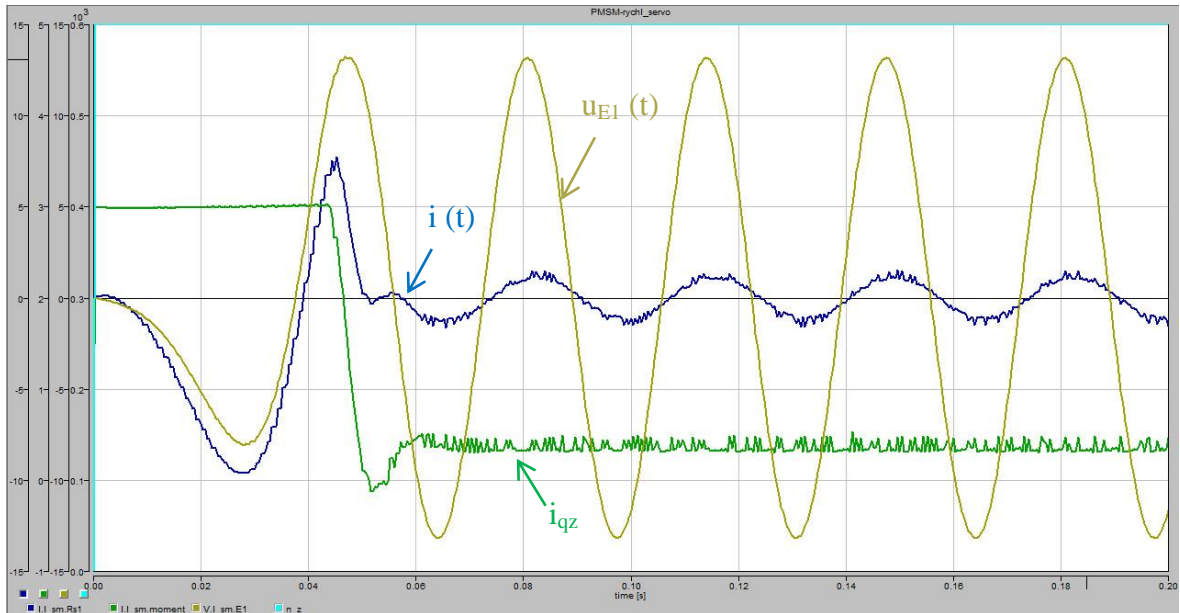
transformácii ako žiadanej hodnoty prúdu pre zdroje napájania rýchlostného servopohonu obrázkov (Obr.29).



Obr. 29. Bloková schéma zdroja rýchlostného servopohonu

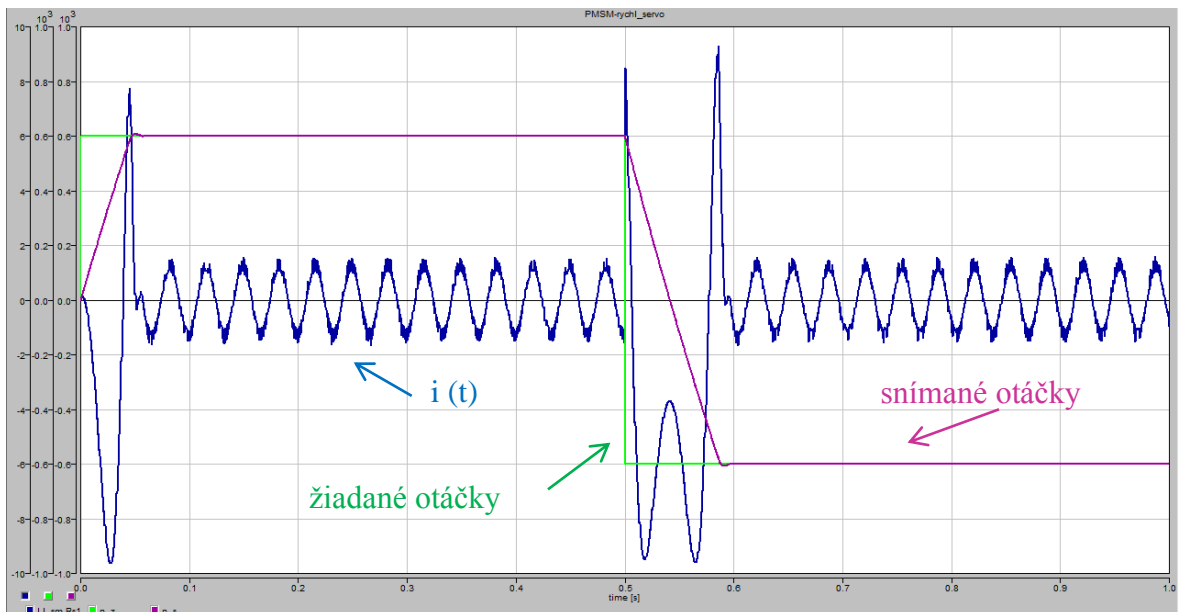


Obr. 30. Žiadané a snímané otáčky



Obr. 31. Chovanie rýchlostného servopohonu s PMSM

Na obrázku (Obr.31) sú znázornené vstupné prúdy $i(t)$, žiadaný i_{qz} a indukované napätie u_{E1} .

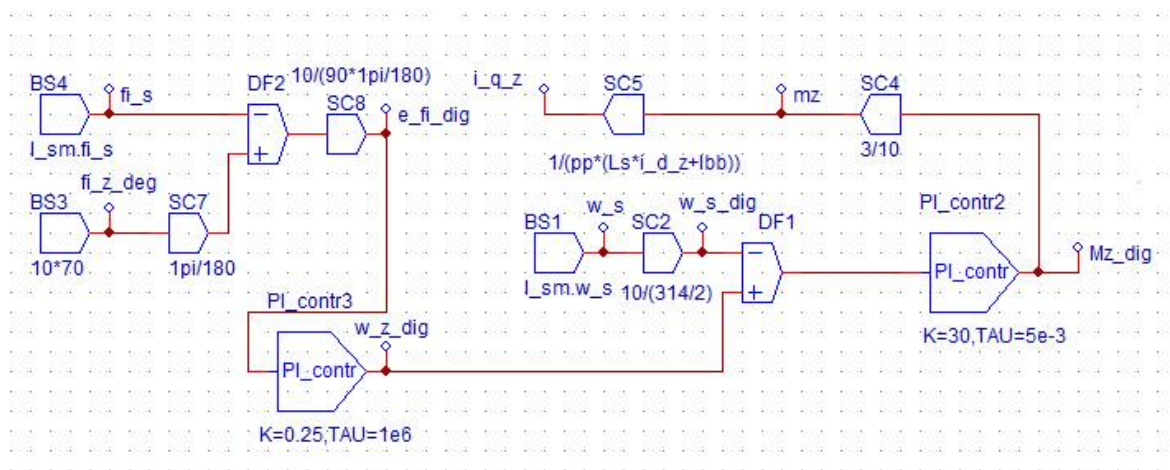


Obr. 32. Chovanie rýchlostného servopohonu s PMSM pri reverzácii otáčok

4.3 Simulačný model polohového servopohonu s PMSM.

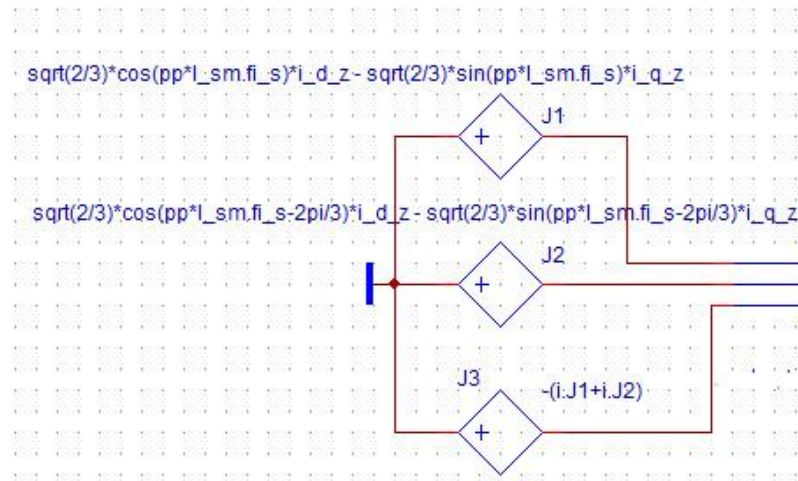
Polohový servopohon je servomechanismus pre riadenie polohy (uhlu natočenia). Presné riadenie polohy vyžaduje uzavretú polohovou väzbu, spočíva v porovnávaní zadávanej polohy so skutočnou polohou. K upraveniu odchýlky medzi žiadanou a skutočnou polohou

sa používa regulátor polohy. Vzhľadom na požadovaný rozdiel medzi charakterom a veľkosťou otáčok a momentu stroja a požadovanou rýchlosťou a momentom sú využívané rôzne typy prevodov. Najčastejšie sa pri riadení polohy používajú viacstupňové prevodovky s pevným prevodovým pomerom. Pre presné polohové riadenie je potrebné používať prevodovky s minimálnou vôľou. V prílohe PIV je vytvorená schéma polohového servopohonu s PMSM v simulačnom prostredí DYNAST.

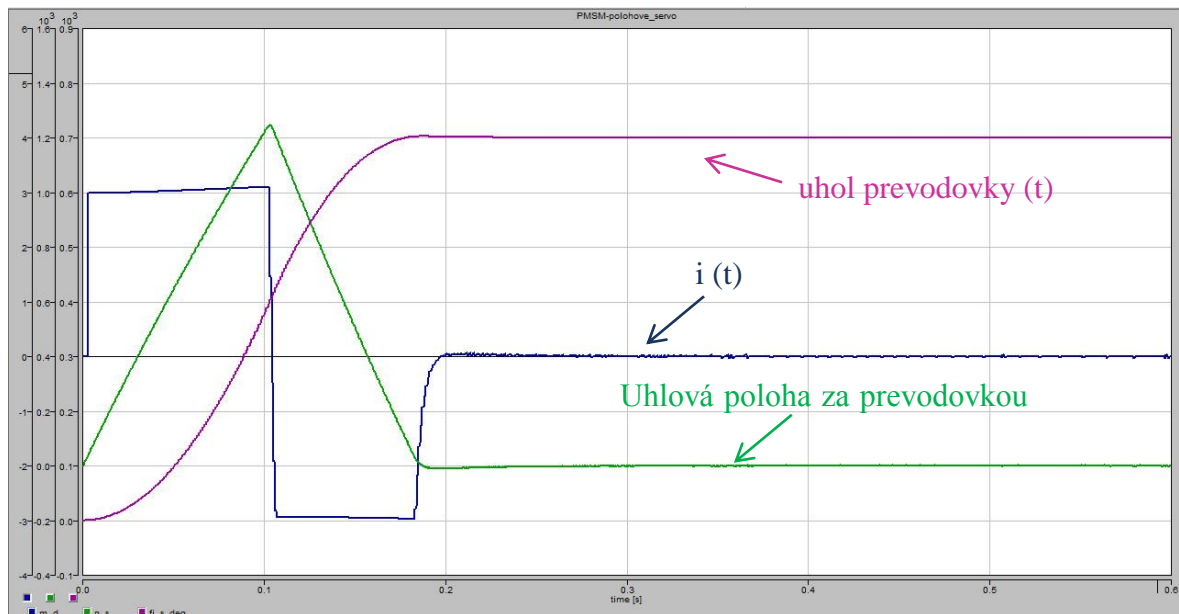


Obr. 33. Schéma riadenia polohy servopohonu v DYNAST

Na obrázku (Obr.33) je schéma riadenia polohy servopohonu. Odčítaná hodnota snímaného uhlu otočenia BS4 a žiadaného uhlu otočenia BS3 je privedená na PI regulátor označený ako PI_control3. Výstupná hodnota z regulátora je porovnaná s BS1 a privedená na regulátor označený ako PI_contr2 a tento regulátor nám vytvára i_{qz} . Rovnako ako v predchádzajúcom servopohone aj pri polohovom servopohone je vypočítané i_{dz} a i_{qz} privedené na zdroj (obr. 34).



Obr. 34. schéma zdroja polohového servopohonu v DYNAST



Obr. 35. Chovanie polohového servopohonu

4.4 Pohybový systém s dvoma stupňami voľnosti s momentovým servopohonom s PMSM ako zdrojom riadeného momentu pre polohové riadenie kĺbov.

Na obrázku (Obr. 36) je znázornený model takzvaného Cardanova usporiadania azimut – elevácie. Indexy x_0, y_0, z_0 zobrazujú globálnu sústavu súradníc, indexy x_1, y_1, z_1 je sústava súradníc spojená s azimutom a umiestnená do výšky h . Indexy označené ako x_2, y_2, z_2 sú v sústave súradníc, ktorá je spojená s eleváciou modelu a sú tiež umiestnené vo výške h . Posledná sústava súradníc, ktorá je na modeli zobrazená, je spojená s efektorom mo-

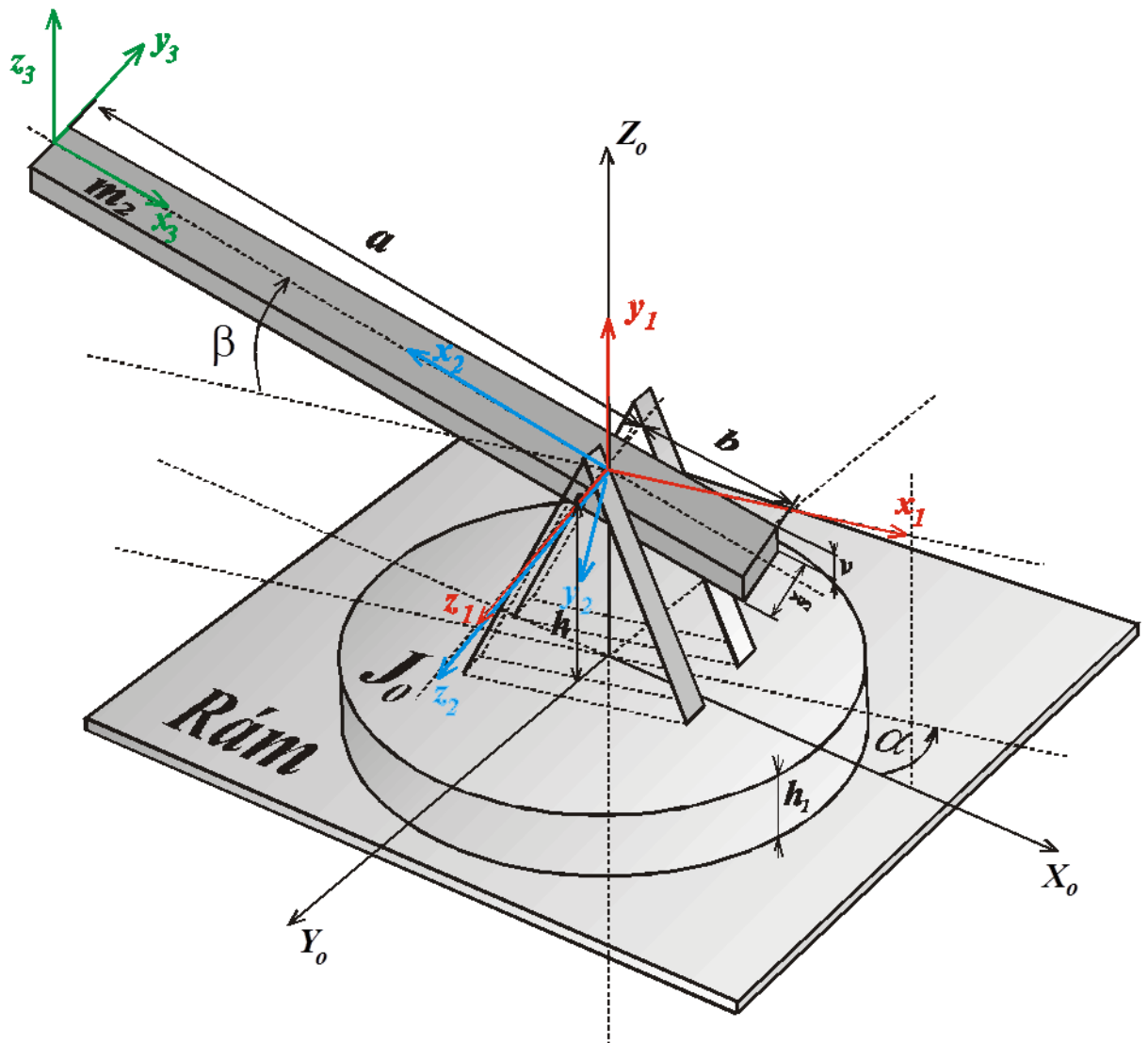
delu a je označená indexmi x_3, y_3, z_3 , pomocou tejto sústavy možno zadávať požadovaný pohyb koncového efektora. [8]

Pre zistenie požadovaných súradníc, určujúcich polohu oboch telies pre koncovú polohu námeru, na ktorom je umiestnený efektor, je pre daný model potrebné odvodiť Denavit-Hartenbergovu sústavu súradníc, ktorá je vyjadrená štyrmi parametrami:

- a_i – dĺžka článku
- α_i – skrútenie článku
- θ_i - uhol článku
- d_i - vzdialenosť kĺbu

Tabuľka 1: DH parametre pre zavedenie manipulátora

parametr čísla čl.	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	90°	$h+h_1$	α
2	0	0°	0	$180^\circ-\beta$
3	-a	-90°	0	-180°



Obr. 36. Model manipulátora so sústavou súradnicových systémov

Pohybové rovnice systému s dvoma stupňami voľnosti m_α a m_β majú tvar.

pre m_α

$$\Rightarrow m_\alpha = \left\{ J_0 + \frac{1}{3} m \cdot [(a-b)^2 + ab] \cdot \cos^2 \beta \right\} \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} - \left\{ \frac{1}{3} m \cdot [(a-b)^2 + ab] \cdot \sin 2\beta \right\} \cdot \dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \quad (51)$$

Rovnicu (51) môžeme rozdeliť na tri základné časti, kde nám každá časť reprezentuje inú podstatu pohybu.

$$J_0 + \frac{1}{3} m \cdot [(a-b)^2 + ab] \cdot \cos^2 \beta \quad (52)$$

Prvá časť je koeficient v časti rovnice predstavujúci premenný moment zotrvačnosti v odmere. Je závislý na kvadráte kosínusu uhlu β . Ak je tento uhol β rovný nule, je tento moment zotrvačnosti najväčší. Pre $\beta = \pm \frac{\pi}{2}$ bude tento moment zotrvačnosti najmenší a zároveň je rovný J_0 . [9]

$$\left\{ \frac{1}{3} m \cdot [(a-b)^2 + ab] \cdot \sin 2\beta \right\} \quad (53)$$

Toto je koeficient v časti rovnice predstavujúci zobernenú silu (moment) Coriolisovho typu a vyjadruje vzájomnú interakciu medzi pohybujúcimi sa telesami, vzniknutou súčinnom ich rýchlostí:

$$\dot{\alpha} \cdot \dot{\beta} \quad (54)$$

Touto časťou vyjadríme uhlovú rýchlosť uhlov α a β . Táto časť rovnice je teda koeficient u

$$\left(\frac{d\alpha}{dt} \right) \cdot \left(\frac{d\beta}{dt} \right) \quad (55)$$

Pohybová rovnica pre m_β

$$\Rightarrow m_\beta = \frac{1}{3} m \cdot [(a-b)^2 + ab] \cdot \frac{d^2\beta}{dt^2} + \frac{1}{6} m \cdot [(a-b)^2 + ab] \cdot \sin 2\beta \cdot \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 + m \cdot g \cdot \left(\frac{a-b}{2} \right) \cdot \cos \beta \quad (56)$$

Podobne rovnicu m_β rozdelíme na tri časti, ktoré reprezentujú jednotlivé vplyvy pohybu:

$$\frac{1}{3} m \cdot [(a-b)^2 + ab] \quad (57)$$

Prvá časť je koeficient v časti rovnice predstavujúci konštantný moment zotrvačnosti námerových častí.

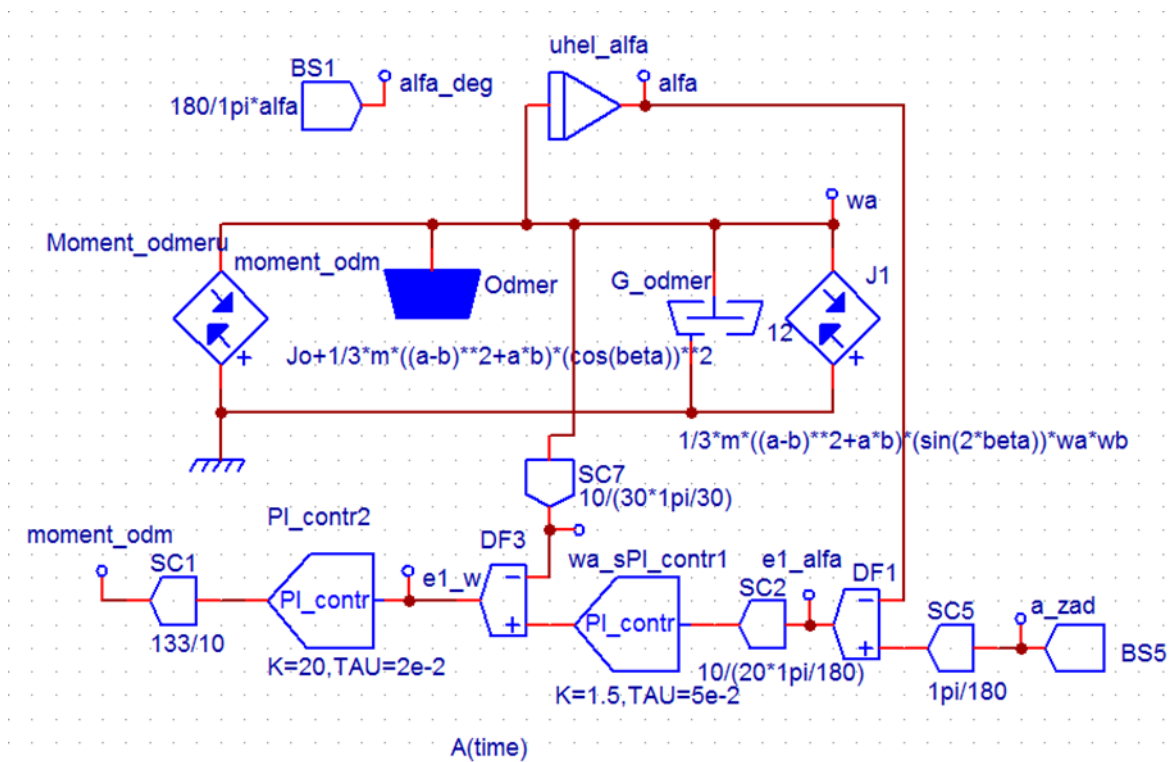
$$\frac{1}{6} m \cdot [(a-b)^2 + ab] \quad (58)$$

Druhá časť nám ukazuje koeficient u $\left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2$ a predstavuje koeficient u odstredivej sily, ktorá pôsobí na hmotný bod smerom od stredu krivosti trajektórie.

$$m \cdot g \cdot \left(\frac{a-b}{2} \right) \cdot \cos \beta \quad (59)$$

Posledná časť rovnice určuje vplyv gravitácie a prejavuje sa v nej vplyv nevyváženosti námerových častí manipulátora. [9]

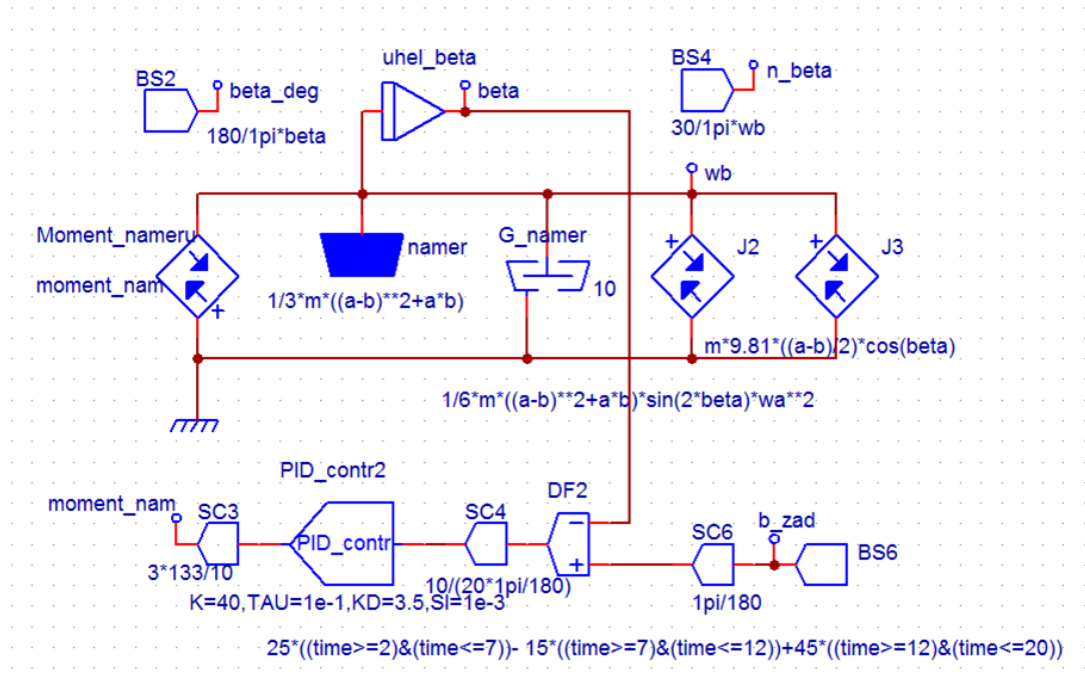
Rovnice sme použili pri zostavení modelu pohybového systému s dvoma stupňami voľnosti s momentovým servopohonom s PMSM ako zdrojom riadeného momentu pre polohové riadenie kĺbov.



Obr. 37. Bloková schéma momentu odmeru manipulátora

Zobrazenie (Obr. 37) blokového zapojenia, predstavuje pohybovú rovnicu odmeru budenú momentom m_a , ktorá je tu vyjadrená do dvoch blokov navzájom prepojených. Jedna časť rovnice, označená ako premenný moment zotrvačnosti v odmere, je v tejto schéme predstavená ako blok označený **Odmer**. Moment Coriolisovho typu, ktorý je vyjadrený rovnicou v bloku označenom ako **J1**. [9]

K tomuto usporiadaniu zapojenia pohybových rovníc je pripojená informačná časť riadenia regulačná zložka s regulátorom PID, do ktorého je privedený blok žiadanej hodnoty **BS5**, ktorý ju nastavuje tak, aby vo výslednom grafe boli zobrazené skokové funkcie. Tieto skoky sú vyjadrené uhlom α , prevedeným na stupne pomocou bloku **SC5** a porovnané v bloku **DF1**. Tieto vyhodnotenú hodnoty sú privedené do regulátora PID a cez tento regulačný člen je vyhodnotený moment zotrvačnosti odmeru. [9]



Obr. 38. Bloková schéma momentu námeru manipulátora

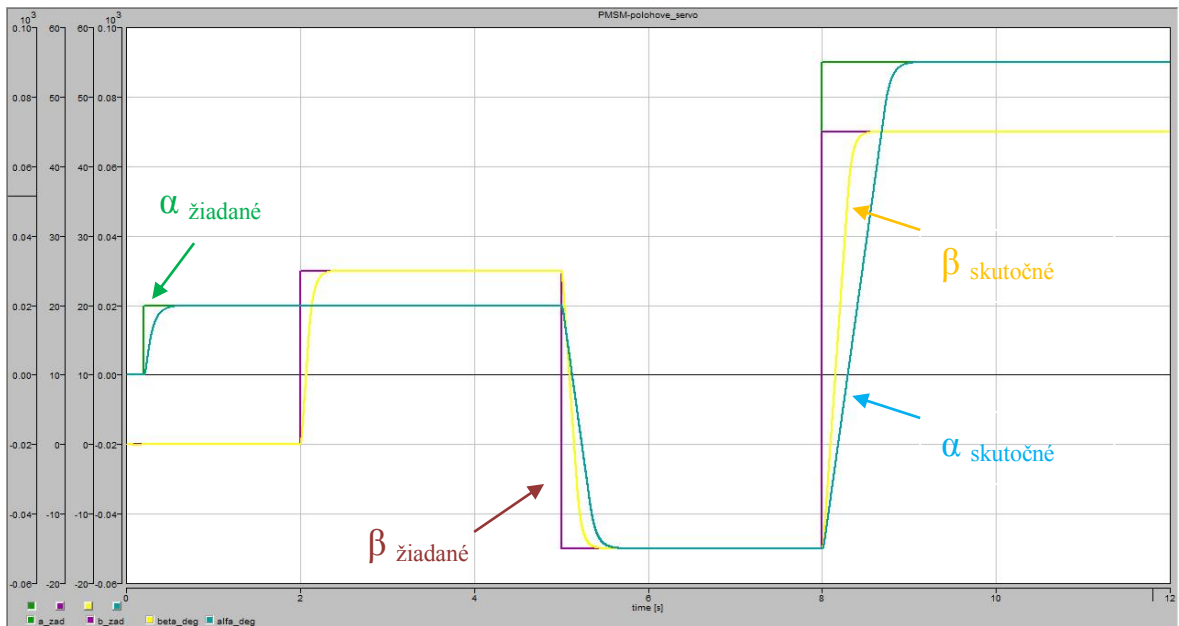
Na obrázku (Obr.38) je blokovo vyjadrená pohybová rovnica pre námer, budená momentom m_p , označeným v blokovej schéme ako **moment_nameru**.

Blok označený ako **namer**, predstavuje časť pohybovej rovnice, ktorú sme označili ako moment zotrvačnosti námerových častí. **J2** predstavuje veľkosť odstredivého momentu a prvok označený ako **J3** je moment vplyvu gravitačnej zložky na nevyváženú námerovú časť manipulátora. [9]

Na obe časti (Obr.37) aj (Obr.38) je pripojená regulačná časť s regulátorom PID, ktorým sa riadi chovanie celého zapojenia manipulátora. Blok **BS6** predstavuje zadanie žiadaných uhlov námeru. [9]

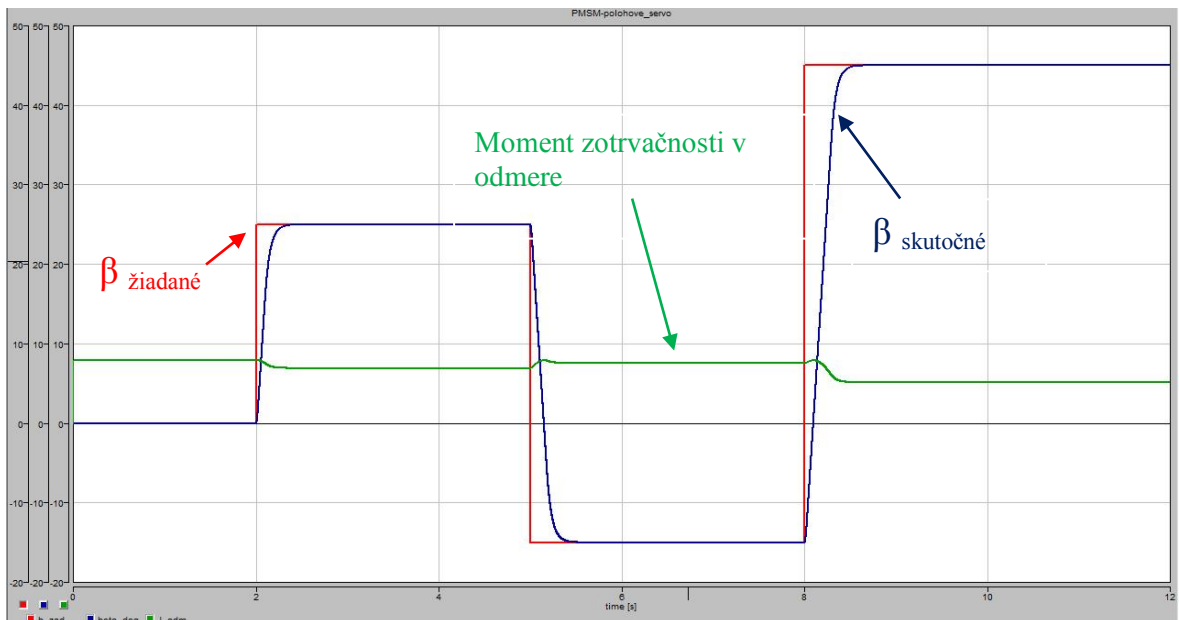
Pre zavedenie servopohonu do uvedeného manipulátora sme použili na miesto bloku momentu odmeru (Obr.37) a momentu námeru (Obr.38) polohový servopohon. Schémy sú jednotlivých častí sú v prílohách PVI, PVII a celá schéma zapojenia manipulátora je zobrazená v prílohe PVIII.

Na obrázku (Obr.39) si môžeme pozrieť takmer žiadaný priebeh zmien uhlov α a β skutočných a zmien veľkostí uhlov pre α a β žiadané.



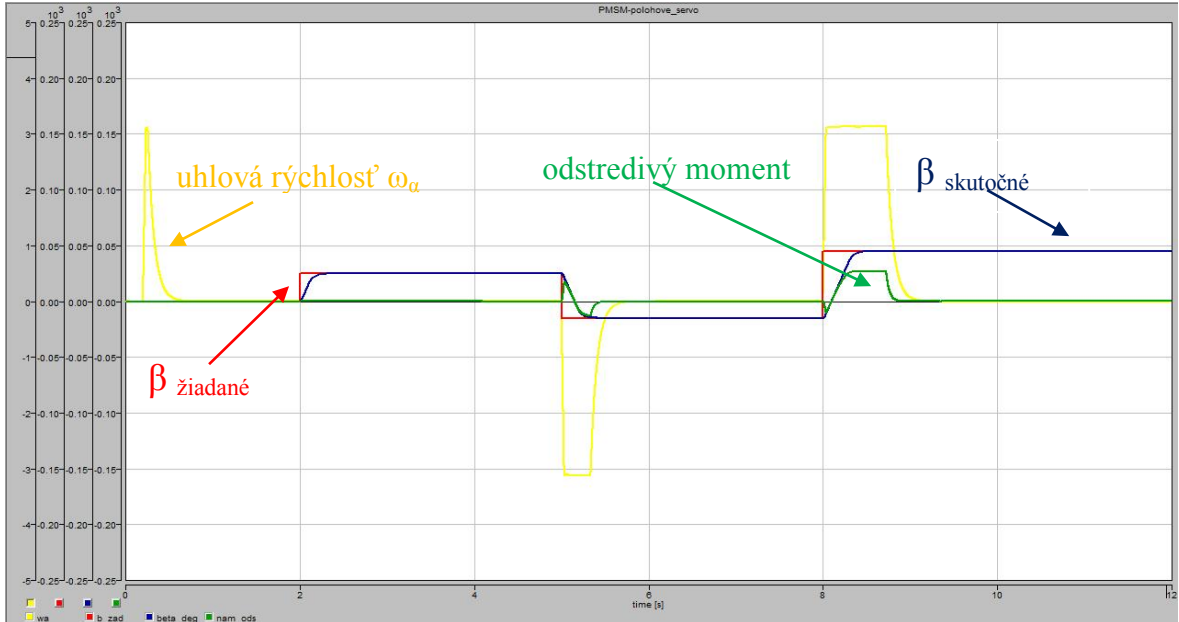
Obr. 39. Žiadané a skutočné priebehy pre zmenu uhlov α a β

Na nasledujúcom grafe (Obr. 40) je znázornený priebeh momentu zotrvačnosti v odmere ktorý ako je vidieť reaguje len pri zmenách pohybu manipulátora teda pri zmenách uhlu beta.



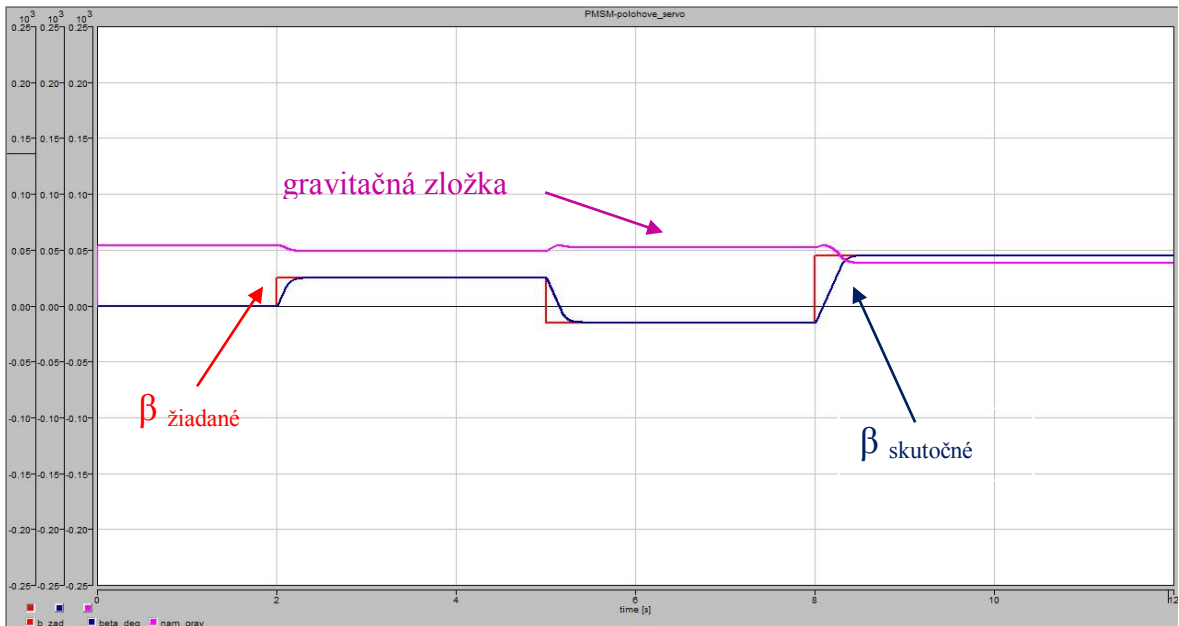
Obr.40. Priebeh momentu zotrvačnosti v odmere

Priebeh odstredivého momentu (Obr. 41) znázornený zelenou farbou. Tento moment je závislý na uhlovej rýchlosti ω_α , kde pri veľkej zmene uhlovej rýchlosti sa prejaví veľká zmena odstredivého momentu v námere.



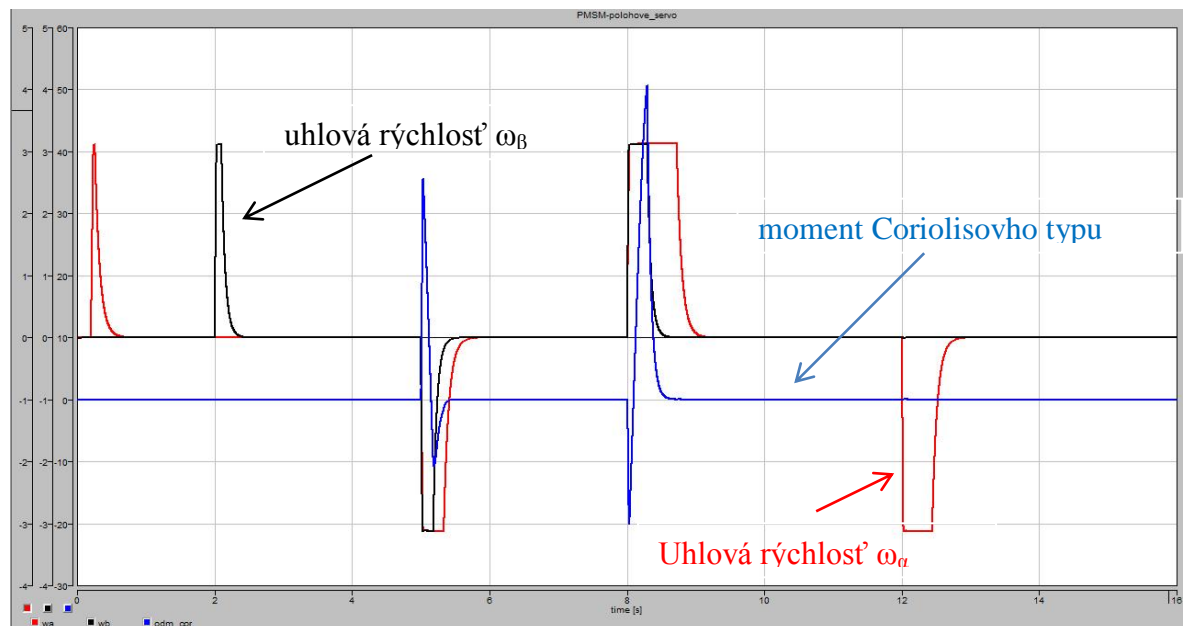
Obr. 41. Priebeh odstredivého momentu v námere

Gravitačná zložka reaguje na zmenu uhlu beta v námere, je znázornená na nasledujúcom grafe (Obr.42).



Obr. 42 Pôsobenie gravitačnej zložky v námere

Moment Coriolisovho typu je závislý na zmene uhlovej rýchlosti ω_α i ω_β . Z grafu vyplýva, že tento moment reaguje na zmeny pohybu manipulátora. Zmeny sú vyvolané veľkosťou uhlových rýchlostí súčasne. Teda je vyvolaný len pri zmene oboch uhlových rýchlostí ω_α a ω_β v rovnakom časovom okamžiku. Keď bude nenulová len jedna z uhlových rýchlostí ω_α alebo ω_β , Coriolisov moment zostane nulový. Graf s Coriolisovým momentom je na nasledujúcom obrázku (Obr. 43).



Obr.43. Moment Coriolisovho typu

ZÁVER

V diplomovej práci sme uviedli a použili teóriu priamej elektromagneticko - mechanickej riadenej premeny energie na vytvorenie momentového servopohonu s PMSM a použili sme ju k vytvoreniu servopohonu rýchlostného a polohového. Vytvorili sme simulačný model momentového servopohonu s PMSM v simulačnom prostredí pre simuláciu s fyzikálnymi modelmi mechatronických systémov DYNAST. V teoretickej časti diplomovej práce sme popísali metodiku navrhovania servopohonov a dôležitosť počítačového modelovania a simulácie pre pomoc technikom lepšie pochopiť a presnejšie predvídať chovanie dynamických sústav. Počítačové modelovanie a simulácia umožňuje urýchliť a zefektívniť technikom ich prácu. Môžeme obmedziť nákladné a zdĺhavé experimentovanie s reálnymi prototypmi. Simulačné experimenty sú niekedy jedinou možnosťou tam, kde reálne experimentovanie nepripadá do úvahy napríklad kvôli nadmerným finančným nákladom. Postupne nadobúda stále väčšej dôležitosti s tým ako rastie zložitosť technických sústav. Popisu riadenia servopohonov, matematickému odvodeniu PMSM a jeho riadenie momentu. Popísali sme matematický model PMSM ako aj model v komplexnej premennej. Odvodili sme modifikáciu modelu PMSM umožňujúcu určiť spôsoby riadenia momentu PMSM, čo bolo jedným z cieľov diplomovej práce.

V praktickej časti diplomovej práce sme sa venovali návrhom servomechanizmov v simulačnom prostredí DYNAST. Postupne sme pomocou jednotlivých blokov zostavili momentový, rýchlostný a polohový servomechanizmus. Schémy sú uvedené v prílohách práce PI až PIV. Popísali sme princíp a chovanie týchto servomechanizmov.

Posledným cieľom tejto práce bolo vytvoriť riadenie pohybového systému s dvoma stupňami voľnosti s momentovým servopohonom s PMSM ako zdrojom riadeného momentu pre polohové riadenie kĺbov. Použili sme navrhnuté riešenie pre pohyb manipulátora uvedená schéma je v prílohe PV. Zpracovali sme do nej navrhnutý polohový servomechanizmus. Výsledkom práce je úspešné sprevádzkovanie robotického manipulátora, ktorý dokáže ramenom „efektovom“ pohybovať po žiadanej trajektórii.

Záverom tejto práce môžeme konštatovať, že ciele diplomovej práce boli splnené a zrealizované v plnom rozsahu.

Conclusion

The diploma paper presents the theory of direct conversion of electromagnetic to mechanic energy achieved in a controlled manner and applies the theory to create a torque actuator (a.k.a. servo-drive) with a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) and, subsequently, to construct a speed and positioning actuator. A model of the torque actuator with PMSM was built and used for simulation experiments with physical models of the DYNAST mechatronic systems.

The theoretical section of the paper describes the methodology employed to design the actuators, and it stresses the importance that computer-aided models and simulations may have for engineers in their effort to get a better insight into dynamic systems and to improve the systems' predictability. The computer-aided models and simulations may help the engineers cope with their tasks in faster and more efficient ways, and they can reduce costs entailed by lengthy experimenting with real prototypes. The simulations may represent the only viable option where the real-life experiments prove to be prohibitively costly. As the technical systems become more and more complex, this method assumes greater importance. The section describes the ways in which the actuators are controlled; gives the mathematic background for PMSM and its torque control; submits the mathematical model of PMSM and also a model rendered as the complex variable. Moreover, the section offers a modified model of PMSM where through the methods of PMSM torque control can be determined - which was one of the paper's objectives.

The practical section of the paper is dedicated to servomechanisms designed in the DYNAST simulation environment. Using separate building blocks, the authors gradually put together the torque, speed and positioning servomechanisms. For the related diagrams see Annexes PI through PIV. Described in this section you will find the principles and behavior of such servomechanisms.

Finally, the paper aimed to create an actuating system with two degrees of freedom, to be equipped with a PMSM-driven torque actuator and used for the position control of articulated joints. The suggested solution was applied to control movement of a manipulating robot (for the diagram see Annex PV) wherein the proposed positioning servomechanism was included. The job resulted in successful operation of the robot, whose "effector" arm was able to follow the required trajectory. Consequently, the paper's objectives can be evaluated as fully accomplished.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY

- [1] Úředníček, Z.: *Elektromechanické akční členy*, Univerzita T. Bati ve Zlíně, Zlín 2009, ISBN 978-80-7318-835-1.
- [2] Mann, H.: *Modeling and Simulation, DynLab, Course on Dynamics of multidisciplinary and controlled Systéme, Computing and Information Centre Czech Technical University in Prague*. 2006.
- [3] Šolc, F., Václavek, P., Vavřín, P.: *Řízení a regulace II, VUT Brno, Fakulta automatizace a měřící techniky*, Skripta, Leden 2011.
- [4] VanAntwerp, J.,G. Braatz, R., D., Sahinidis, N., V.: *Globally optimal robust control for systems with nonlinear time-varying perturbation*. Comp&Chem. Eng., 1977.
- [5] Mann, H., Ševčenko, M.: *Příručka k internetovému kurzu a simulačnímu systému DYNAST*, Praha 2008.
- [6] Kule, L.: *Technika elektrických pohonů*. Technický průvodce 50, SNTL Praha 1981.
- [7] Skalický, J.: *Elektrické regulované pohony*, Vysokého učení technického v Brně, Brno 2007.
- [8] Úředníček, Z.: *Robotika*, Univerzita T. Bati ve Zlíně, Zlín 2012, ISBN 978-80-7454-223-7.
- [9] Kratochvíl, L.: *Určení pohybových rovnic mechanické soustavy se dvěma stupni volnosti*, Univerzita T. Bati ve Zlíně, Diplomová práce, Zlín 2014.

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A ZKRATIEK

SMPM	synchrónny motor s permanentnými magnetmi
PM	permanentné magnety
J	moment zotrvačnosti
R	odpor
L	indukčnosť
j	imaginárna jednotka
i_d, i_q	zložky vektora statorového prúdu v d,q súradniciach
i_α, i_β	zložky statorového prúdu v sústave α, β
M	moment
m_i	vnútorný mechanický krútiaci moment
m_z	žiadaný moment
m_m	záťažový moment
Ψ_α	spražený mag. tok statorového vinutia v ose a
Ψ_b	spražený mag. tok statorového vinutia v ose b
Ψ_d	spražený mag. tok v ose d
Ψ_q	spražený mag. tok v ose q
ω	uhlová rýchlosť rotora
P_p	Počet pólových párov stroja
k_n	konštanta určená typom materiálu permanentného magnetu a geometrickým usporiadaním
ϑ	uhol rotora
ϑ_e	elektrický uhol rotora
u_b	el. napätie na budiacich svorkách
i_k	el. prúd vo vinutí rotora
u_k	el. napätie na svorkách

i_q	el. proud po transformácii do d – q osí
i_d	el. proud vytvárajúci magnetický tok stroja
i_b	el. proud v budiacom vinutí stroja
i_z	žiadaný proud
$F\omega$	Kmitavý člen
F_x	rezonančný kmitočet

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1. Hierarchické riadenie servopohonov</i>	11
<i>Obr. 2. Blokovaná schéma uzavretej regulačnej slučky pohybu robota.....</i>	14
<i>Obr. 3. Blokovaná schéma servopohonu s pružným spojením a vôľou prevode</i>	15
<i>Obr. 4. Bránové schéma PMSM</i>	17
<i>Obr. 5. Bránové schéma prúdovo napájaného PMSM.....</i>	17
<i>Obr. 6. Prúdovo napájaný PMSM</i>	21
<i>Obr. 7. Princíp riadenia momentu PMSM.....</i>	22
<i>Obr.8. Prúdovo napájaný PMSM- prúdy so zvlnením.....</i>	22
<i>Obr. 9. Prúdovo napájaný PMSM- prúdy so zvlnením vzájomne.....</i>	23
<i>Obr. 10. Základná filozofia vektorového riadenia PMSM a) motorický režim b) generátorický režim c) nad synchronna prevádzka.....</i>	25
<i>Obr. 11. Príklady dvojíc výkonových fyzikálnych veličín</i>	31
<i>Obr. 12. Univerzálna značka obecného dvojpólu.....</i>	32
<i>Obr. 13. príklady značiek vzťahných uzlov</i>	33
<i>Obr. 14. fyzikálne prvky.....</i>	35
<i>Obr.15. vlastnosti fyzikálnych prvkov.....</i>	36
<i>Obr. 16. zdroje energie</i>	36
<i>Obr. 17. Príklady jednoduchých sústav a ich fyzikálnych schém s dvojpólmi.....</i>	37
<i>Obr. 18. fyzikálne zákony uplatňované v jednotlivých energetických doménach.....</i>	38
<i>Obr. 19. Základné zobrazenie riadenej sústavy.....</i>	41
<i>Obr. 20. Blokovaná schéma prvku pre výpočet</i>	41
<i>Obr. 21. Regulácia žiadaného i_d.....</i>	42
<i>Obr. 22. Výpočet žiadaných fázových prúdov zo žiadaných i_d a i_q.....</i>	42
<i>Obr. 23. snímač uhlu rotoru</i>	43
<i>Obr. 24. Chovanie prúdovo napájaného PMSM stroja so snímačom polohy</i>	43
<i>Obr. 25. indukované napätie pôsobiace proti vstupným prúdom</i>	44
<i>Obr.26. Nastavenie koeficientov metódou</i>	47
<i>Obr. 27. Riadenie rýchlosti servopohonu v DYNAST.....</i>	48
<i>Obr. 28. Blokovaná schéma pre výpočet i_{dz}.....</i>	48
<i>Obr. 29. Blokovaná schéma zdroja rýchlostného servopohonu</i>	49
<i>Obr. 30. Žiadané a snímané otáčky</i>	49
<i>Obr. 31. Chovanie rýchlostného servopohonu s PMSM.....</i>	50

<i>Obr. 32. Chovanie rýchlostného servopohonu s PMSM pri reverzácii otáčok</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 33. Schéma riadenia polohy servopohonu v DYNAST</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 34. schéma zdroja polohového servopohonu v DYNAST</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 35. Chovanie polohového servopohonu</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 36. Model manipulátora so sústavou súradnicových systémov.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 37. Blokovaná schéma momentu odmeru manipulátora</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 38. Blokovaná schéma momentu námeru manipulátora</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 39. Žiadané a skutočné priebehy pre zmenu uhlov α a β</i>	<i>58</i>
<i>Obr.40. Priebeh momentu zotrvačnosti v odmere</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 41. Priebeh odstredivého momentu v námere</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 42 Pôsobenie gravitačnej zložky v námere.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr.43. Moment Coriolisovho typu</i>	<i>60</i>

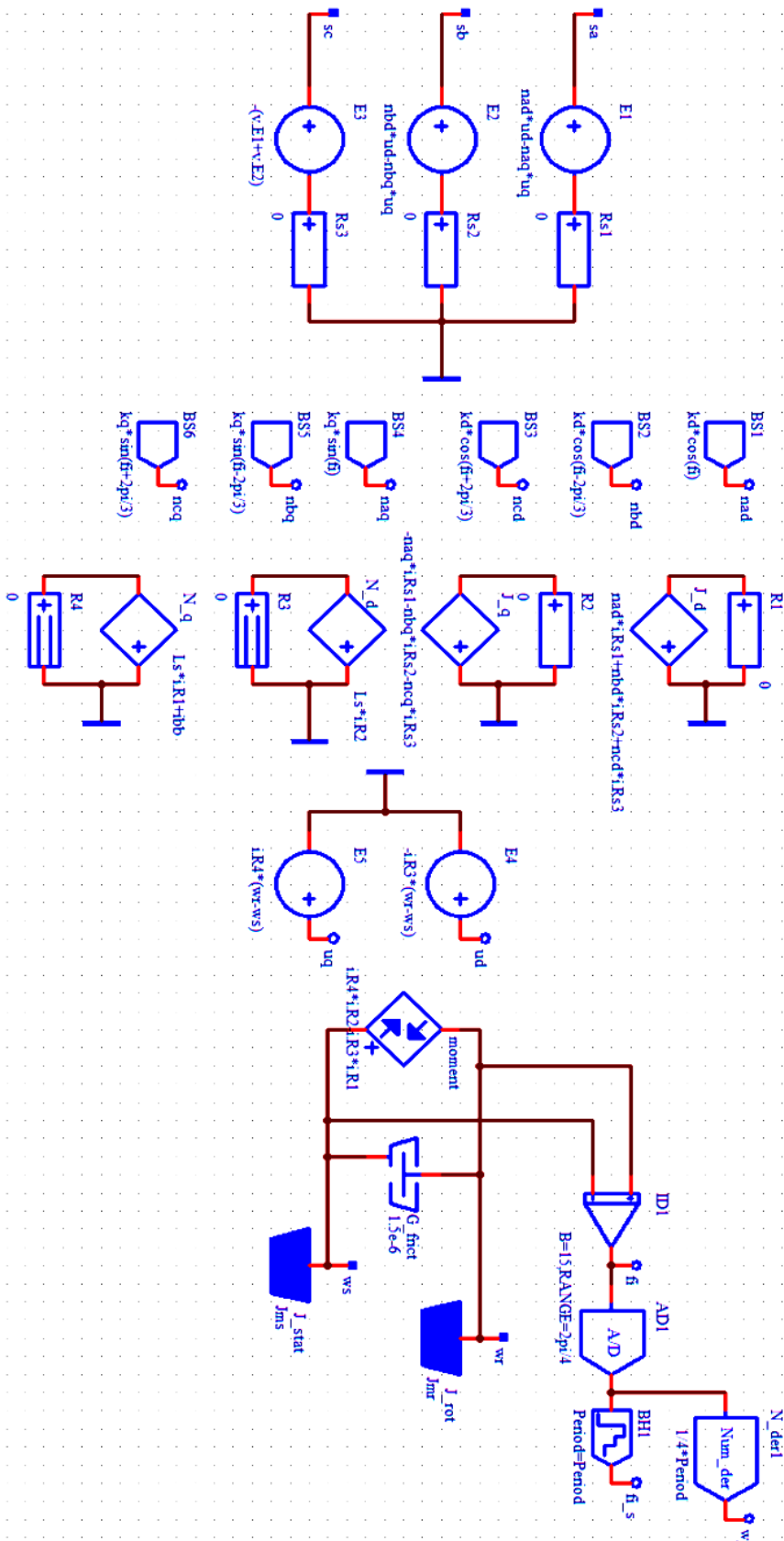
ZOZNAM TABULIEK

<i>Tabuľka 1: DH parametre pre zavedenie manipulátora</i>	<i>53</i>
---	-----------

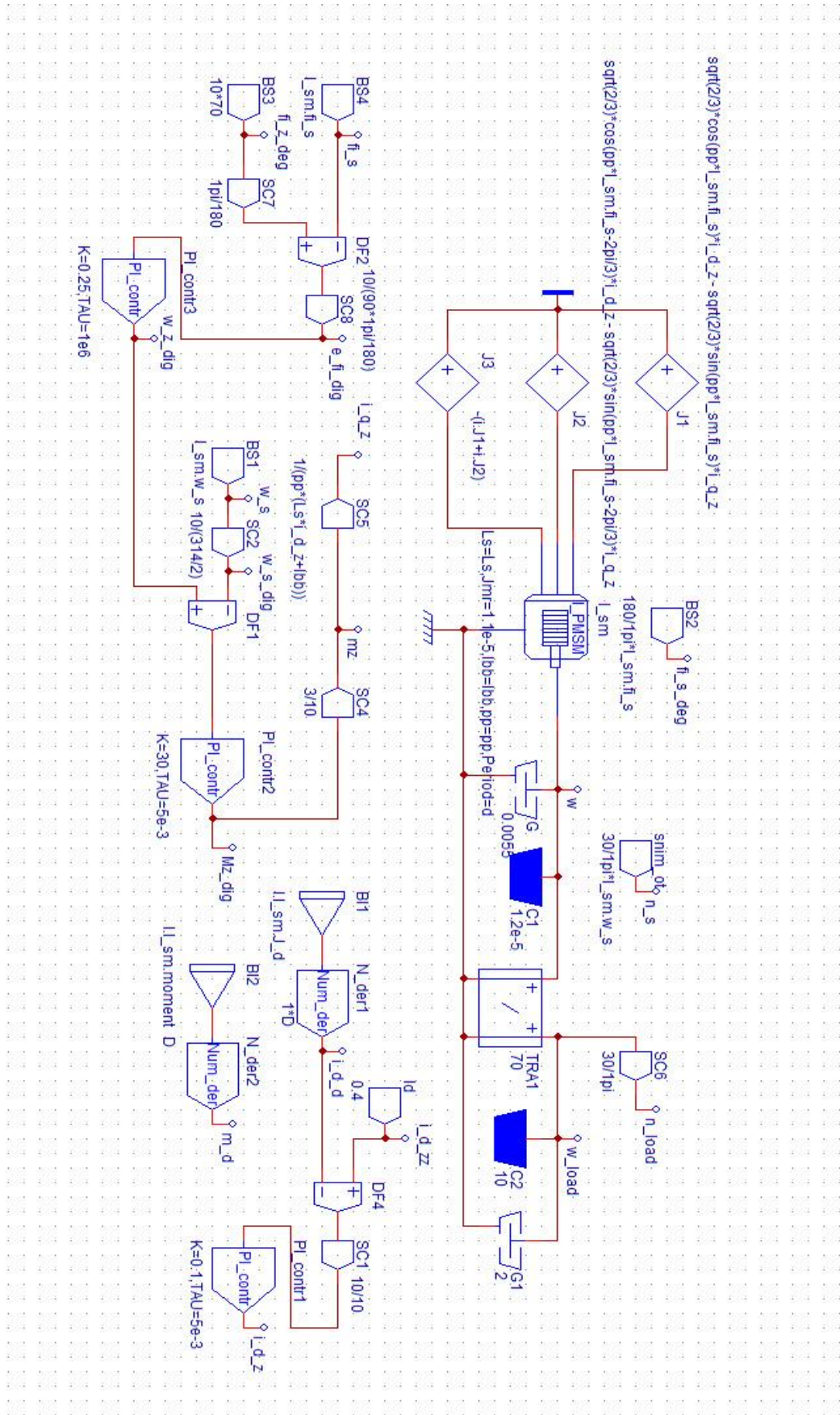
ZOZNAM PRÍLOH

- PI: Schéma prúdovo napájaného PMSM
- PII: Schéma momentového servopohonu
- PII: Schéma rýchlostného servopohonu
- PIV: Schéma polohového servopohonu
- PV: Schéma zapojenia manipulátora s regulátormi PI
- PVI: Schéma spojenia servopohonu s časťou odmeru manipulátora
- PVII: Schéma spojenia servopohonu s časťou námeru manipulátora
- PVII: Schéma spojenia servopohonu so schémou manipulátora

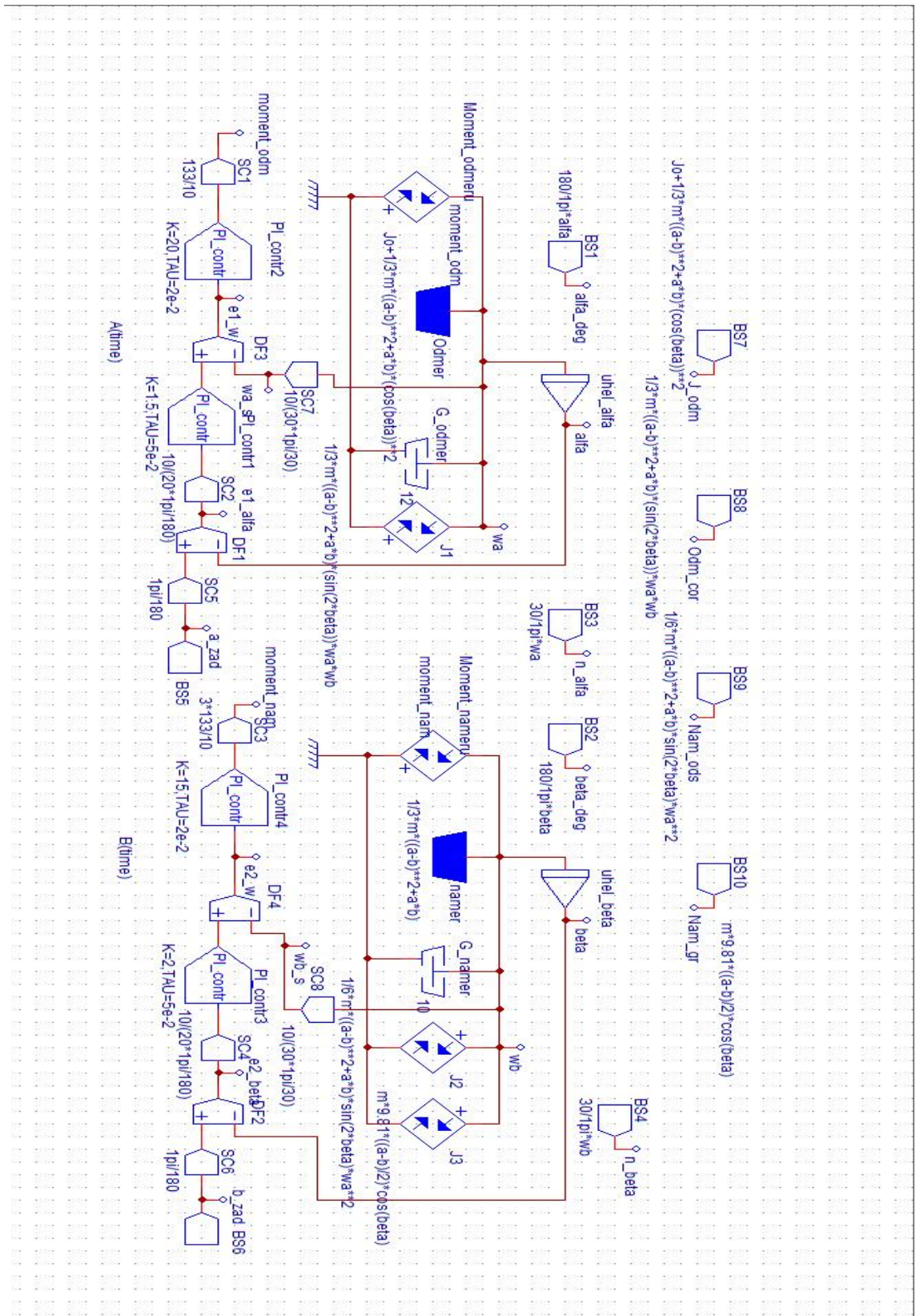
PRÍLOHA P I: SCHÉMA PRÚDOVO NAPÁJANÉHO PMSM



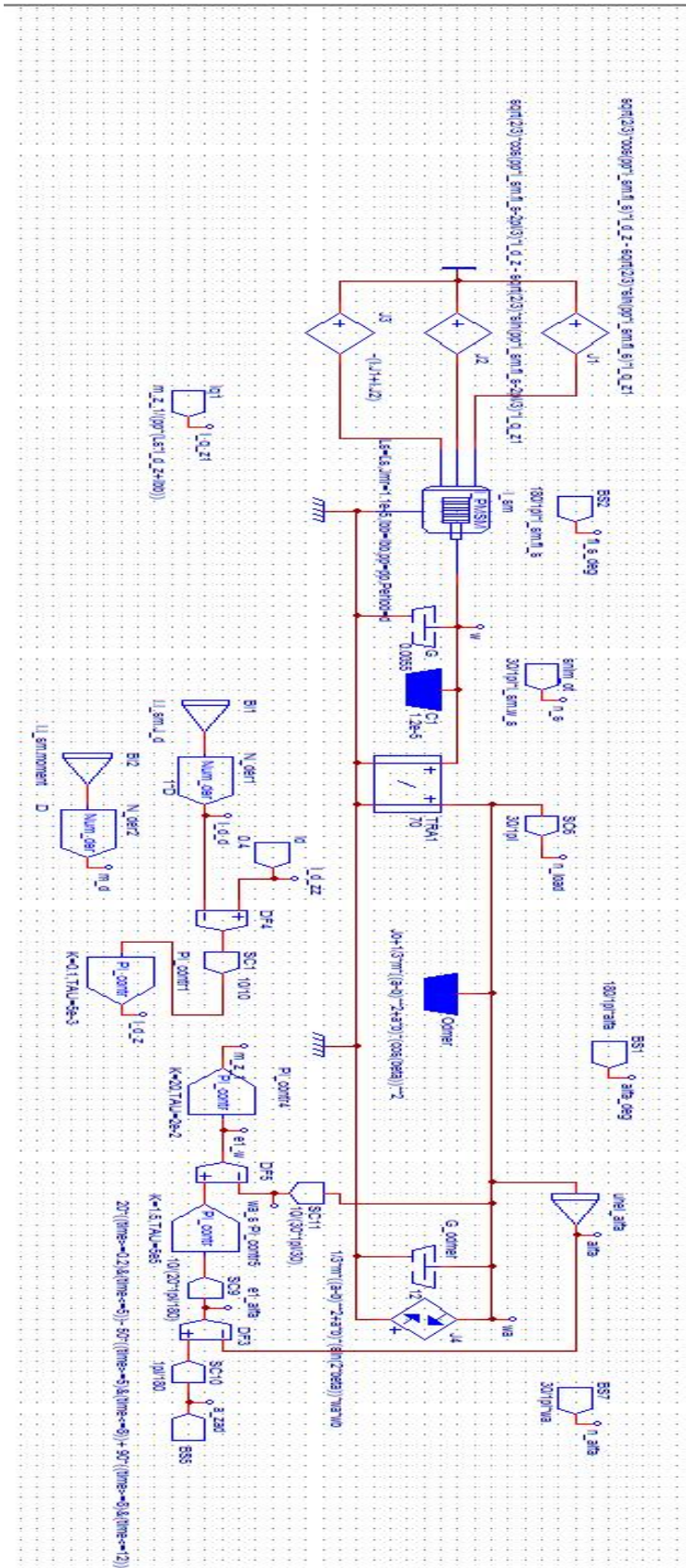
PRÍLOHA P IV: SCHEMA POLOHOVÉHO SERVOPOHONU



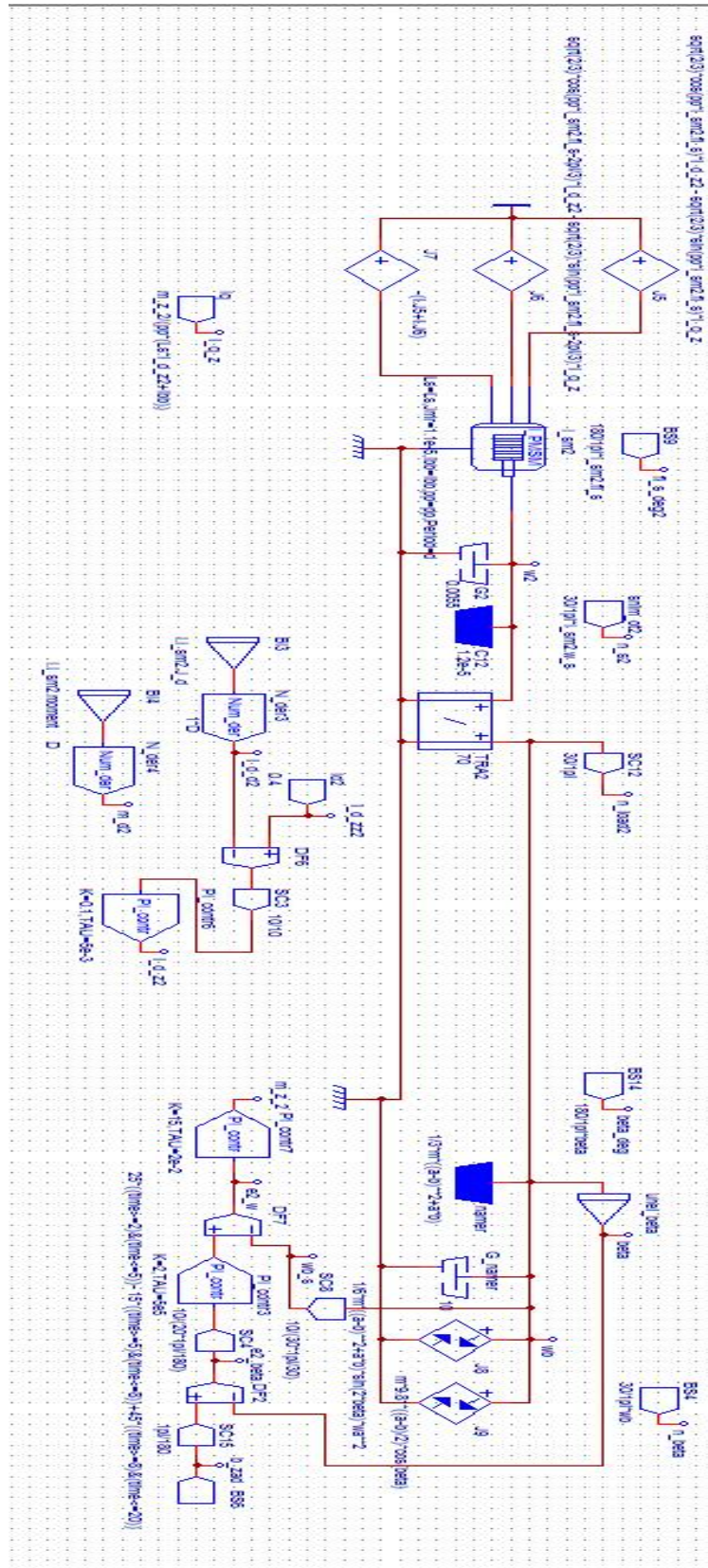
PRÍLOHA P V: SCHÉMA ZAPOJENIA MANIPULÁTORA S REGULÁTORMI PI



PRÍLOHA P VI: SCHÉMA SPOJENIA SERVOPOHONU S ČASŤOU ODMERU MANIPULÁTORU



PRÍLOHA P VII: SCHÉMA SPOJENIA SERVOPOHONU S ČASŤOU NÁMERU MANIPULÁTORU



PRÍLOHA P VIII: SCHÉMA SPOJENIA SERVOPOHONU SO SCHÉMOV MANIPULÁTORU

