



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

VIRTUÁLNÍ PROTOTYP ELEKTRICKÝCH STROJŮ V ADAMS

VIRTUAL PROTOTYPE OF ELECTRICAL MACHINES IN ADAMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN LYSÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN VETIŠKA

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Lysák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Virtuální prototyp elektrických strojů v ADAMS

v anglickém jazyce:

Virtual Prototype of Electrical Machines in ADAMS

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvoření virtuálního prototypu mechatronické soustavy v prostředích ADAMS a SIMULINK, která obsahuje jednotlivé modely elektrických strojů jako jsou stejnosměrné, synchronní a asynchronní motory.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše elektrických strojů a jejich modelování.
2. Vytvoření modelů jednotlivých elektrických strojů.
3. Vytvoření co-simulačního propojení s Matlab/SIMULINK a simulace zvolené řídicí strategie.

Seznam odborné literatury:

Janocha, H.: Adaptronics and Smart Structures, Springer, 1999.

Edward J Haug: Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems, Allyn and Bacon, 1989.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Vetiška

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Práce se zabývá metodikou mechatronického návrhu systémů za použití virtuálních prototypů. Virtuální prototyp obsahuje počítačový simulační model, který svým chováním reprezentuje fyzický prototyp soustavy. Tento přístup umožňuje získat znalosti o chování vyvíjeného výrobku ještě před jeho vyrobením. Dochází tak ke zkrácení inovačního cyklu nového produktu a ke snižování nákladů na inovace. První část práce obsahuje stručnou rešeršní studii elektrických strojů a popis virtuálního prototypování. Dále jsou vytvořeny virtuální prototypy elektrických pohonů, které se dají následně implementovat do složitějších strojních soustav. Součástí je i realizace co-simulace a návrh řízení pro jeden z pohonů.

Klíčová slova

Mechatronický přístup, virtuální prototyp, elektrický stroj, MSC.Adams, co-simulace.

Abstract

The following thesis deals with the methodology of mechatronic systems design using virtual prototypes. Virtual prototype contains a computer simulation model, whose behaviour represents a physical prototype system. This approach allows to obtain knowledge about the behavior of the developed product before it's manufacturing. This leads to shortening new product innovation cycle and lowering the cost of innovation. The first part contains a brief search study of electrical machinery and description of the virtual prototyping. Then the prototypes of electric drives are created, that can be implemented into the more complex machine systems. The work also includes the realization of co-simulation and control design for one of the drives.

Key words

Mechatronic approach, virtual prototype, electrical machine, MSC.Adams, co-simulation.

Bibliografická citace

LYSÁK, J. *Virtuální prototyp elektrických strojů v ADAMS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vetiška.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma *Virtuální prototypy elektrických strojů v ADAMS* jsem vypracoval samostatně, pod vedením svého vedoucího bakalářské práce a s pomocí odborné literatury, kterou jsem citoval v seznamu použité literatury.

.....
Jan Lysák

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu práce, panu Ing. Janu Vetiškovi, za odborné vedení, cenné náměty a připomínky, za čas, který mi věnoval při konzultacích v průběhu psaní mé bakalářské práce.

Obsah

1 Úvod.....	6
2 Cíle práce	7
3 Mechatronický přístup	8
4 Modelování elektromechanických soustav	9
4.1 Nástroje pro modelování mechatronických soustav.....	10
4.2 Nástroj pro návrh řízení Matlab/Simulink	10
4.3 Nástroj pro simulaci vícehmotných soustav - software MSC.Adams.....	10
4.4 Co-simulace MSC.Adams s Matlab/Simulink	11
5 Elektromechanická přeměna energie.....	12
6 Elektrické stroje	13
6.1 Stejnoseměrný stroj	13
6.1.1 Fyzikální model - náhradní schéma	13
6.1.2 Matematický model SSPM.....	14
6.2 Synchronní stroj	15
6.2.1 Fyzikální model - náhradní schéma	15
6.2.2 Matematický model SMPM	16
6.3 Asynchronní stroj	17
6.3.1 Fyzikální model - náhradní schéma	17
6.3.2 Matematický model ASM	18
7 Vytvoření virtuálních prototypů	20
7.1 Virtuální prototyp stejnosměrného stroje	20
7.1.1 Sestavení modelu v nástroji MSC.Adams.....	20
7.1.2 Ověření správnosti modelu.....	22
7.1.3 Co-simulace Matlab/Simulink – MSC.Adams.....	23
7.1.4 Návrh řízení.....	24
7.2 Virtuální prototyp synchronního stroje	27
7.2.1 Sestavení modelu SMPM v nástroji MSC.Adams	27
7.2.2 Ověření správnosti modelu.....	28
7.3 Virtuální prototyp asynchronního stroje	30
7.3.1 Sestavení modelu v nástroji MSC.Adams.....	30
7.3.2 Ověření správnosti modelu.....	31
8 Závěr	33
9 Citovaná literatura.....	34
10 Seznam symbolů a použitých zkratk	35
11 Seznam obrázků	36

1 Úvod

Požadavky, které dnešní svět klade na vývoj nových a stále více komplexnějších výrobků, nutí výrobce snižovat vývojový čas nového produktu a jeho finanční a energetickou náročnost. Tyto produkty do sebe integrují mnoho hardwarových a softwarových členů sestávajících se z mechanických, elektronických a řídicích soustav. Tento problém vhodně řeší rozvíjející se odvětví mechatroniky. Ta se snaží najít optimální cestu návrhu skrze mezioborové vnímání problému za účelem dosažení synergického efektu, tedy zvýšení přidané hodnoty při návrhu touto cestou.

Řešení, jak snížit tyto požadavky, bylo nalezeno právě ve vývoji tzv. virtuálních prototypů, které umožňují s dostatečnou přesností za pomoci simulačního modelování analyzovat chování nově vyvíjeného produktu ještě před vyrobením reálných prototypů. Proto se virtuální prototypy stávají nedílnou součástí vývojového procesu. Pod pojmem simulace se rozumí napodobení reálné soustavy za různých stavů a parametrů za účelem získání vědomostí vhodných k posouzení reálného výrobku.

Pro vytváření virtuálních prototypů existuje celá řada nástrojů, které jsou většinou určeny pro rozdílné aplikace. Propojováním těchto nástrojů a kooperativním předáváním dat, často uváděno jako co-simulace, vede k přesnějšímu napodobení reálné soustavy.

V této práci se budeme zabývat vytvořením části virtuálního prototypu pohonů v nástroji pro multi-body systémy MSC.Adams řízeného přes co-simulační propojení se Simulinkem, jenž je součástí nástroje Matlab. Vytvořené virtuální prototypy se pak mohou zahrnout do modelů složitějších soustav, ve kterých se vyskytují. Součástí práce je i stručná rešeršní studie elektrických strojů a jejich modelování (pro lepší představu a porozumění).

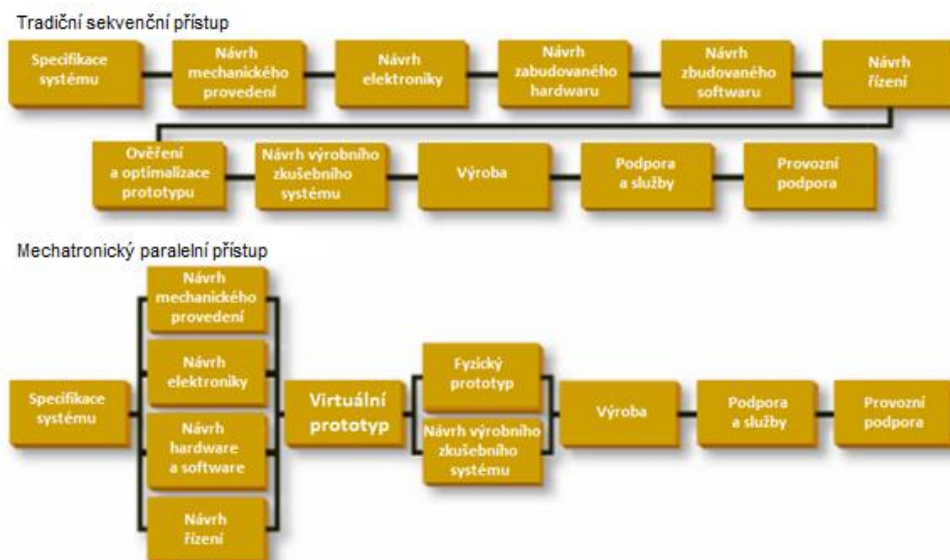
2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je vytvoření virtuálního prototypu mechatronické soustavy v prostředích MSC.ADAMS a SIMULINK, která obsahuje jednotlivé modely elektrických strojů, jako jsou stejnosměrné, synchronní a asynchronní motory. Z uvedené formulace problému vyplívají tyto podcíle:

- Rešerše elektrických strojů a jejich modelování.
- Vytvoření modelu jednotlivých elektrických strojů.
- Vytvoření co-simulačního propojení s Matlab/Simulink a simulace zvolené řídicí taktiky.

3 Mechatronický přístup

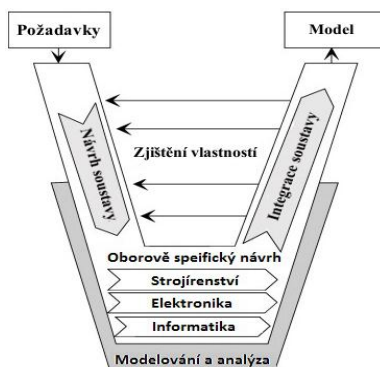
Spočívá v kombinaci znalostí ze strojírenství, elektroniky, řízení a umělé inteligence. Sloučením těchto víceoborových znalostí a optimálním poměrem mezi nimi je snaha dosáhnout co nejlepšího synergického efektu, který vede ke zlepšení funkčnosti navrhovaného výrobku oproti návrhu klasickou sekvenční koncepcí (obr. 1). Taktéž snižuje rizika spojená s navrhováním strojů, urychluje proces navrhování a optimalizuje proces vylad'ování. [1] [2]



Obr. 1: Tradiční a mechatronický přístup k modelování soustav [17]

Celý návrh mechatronického systému je založen na cyklu návrhu na makroúrovni, tzv. V-MODEL (obr. 2). Ten je reprezentován jednotlivými mechatronickými prvky a vztahy mezi nimi. Kompletní mechatronický výrobek není obecně vytvořen během jednoho makrocyklu, ale se zvyšující se konkrétností v dalších cyklech se transformuje od virtuálního prototypu přes funkční vzorek až k finálnímu výrobku.[1]

Při vytváření modelu soustavy v popisovaném návrhu jsou do modelování zahrnuty všechny obory, které určují chování, strukturu a tvar modelu, a tedy i konečného výrobku. Takto vytvořený model se často označuje jako virtuální prototyp a simulací umožňuje optimalizaci parametrů a úpravu vzhledu výrobku ještě před samotnou výrobou. Šetří tak čas a finance určené pro testování fyzického prototypu.



Obr. 2: Návrh pomocí V-MODELU

4 Modelování elektromechanických soustav

Modelování je nejčastějším přístupem k řešení většiny inženýrských úloh. Základem je vytvoření co nejuhodnějšího modelu reálné soustavy, tedy již zmiňovaného virtuálního prototypu, u kterého se uvažují jen ideální objekty (indukčnosti, odpory, tuhá tělesa), jež dokážou vědní disciplíny jako matematika a fyzika spolehlivě popsat. Hloubka, s jakou je virtuální prototyp popsán, se musí vhodně zvolit s ohledem na čas a míru důležitosti popisu v počítačovém modelu.[4] [1]

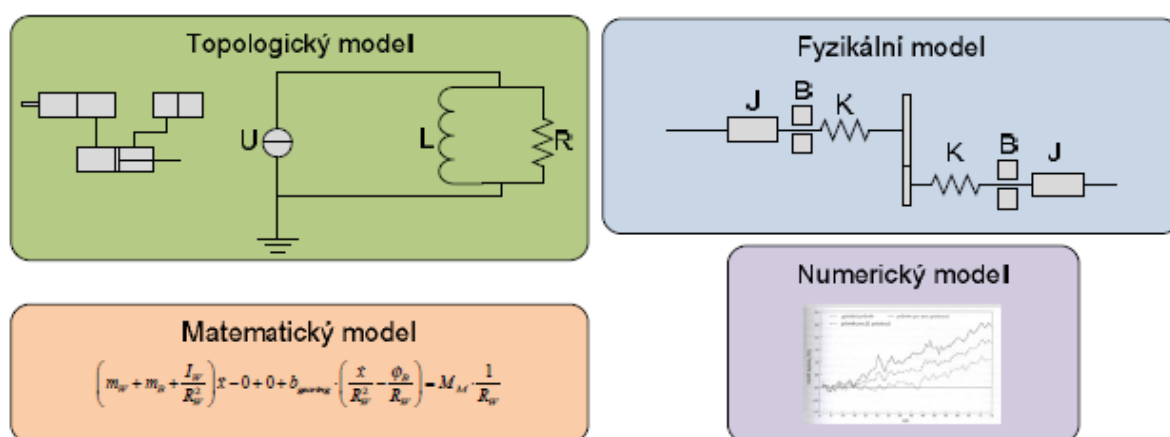
Podle přesnosti chování, která se požaduje od abstraktního prototypu, je zvolena úroveň abstrakce, jež se dělí na:

Topologický model: Popisuje propojení a uspořádání funkčních prvků a tak i míru podrobnosti popisu reálného objektu. Topologický model často reprezentuje CAD model.

Fyzikální model: V mechanice tzv. Mechanický model. Vychází z topologického modelu. Popisuje model v oborově-specifické formě odpovídajícími ideálními objekty. U elektrických soustav je to například odpor, indukčnost. V mechanice pak hmotnost, moment setrvačnosti, délka či druhy vazeb. To zahrnuje modelování v programech jako MSC.Adams nebo v toolboxu Matlab/Simulink SimMechanics.

Matematický model: Fyzikální model je určen fyzikálními zákony a principy mechaniky, které jsou vyjádřeny ve formě matematického popisu. To tvoří základ pro popis chování systému a obvykle má tvar soustavy diferenciálních rovnic.

Upravením matematického modelu získáme vhodný tvar pro další řešení a výpočty na počítači, tzv. **numerický model**. Podle toho, do jaké hloubky je model popsán, použité metody řešení a matematického modelu, závisí složitost celého numerického řešení. Pro matematické modelování se používají nástroje jako Matlab, Simulink, Maple apod. [1] [2] [4]



Obr. 3: Úrovně modelování mechatronické soustavy [2]

4.1 Nástroje pro modelování mechatronických soustav

K modelování mechatronických soustav se používá řada metod podporovaných velkým množstvím nástrojů, jelikož řeší zaraz problematiku několika fyzikálních oborů. To má za následek vznik mnoha rozličných vývojových nástrojů, které se snaží dovést vývojový proces reálného výrobku co nejdál pouze za použití počítačů. Každý nástroj slouží pro jiný model a daný problém, jejich vzájemné propojení reprezentuje mechatronickou soustavu jako celek.[1]

Nástroje pro modelování a simulaci mechatronických soustav se dělí do mnoha tříd, z nichž nejvíce používané jsou následující:

- CAD nástroje - objemový model (Catia, ProEngineer, SolidWorks)
- FEM a BEM nástroje - model mechaniky těles (Ansys, Nastran)
- MBS nástroje - model vícehmotných systémů (**MSC.Adams**, Pro/Mechanica)
- CFD nástroje - model mechaniky proudění tekutin (Ansys)
- Nástroje pro návrh modelu a řízení - řídicí model (**Matlab/Simulink**, LabVIEW)
- Nástroje pro návrh elektroniky a elektrotechniky - elektrický model (SimElectronics)
- Pro ověřování výrobku v reálném prostředí a jiné.

4.2 Nástroj pro návrh řízení Matlab/Simulink

Matlab (Matrix Laboratory) je výpočetní software od společnosti Math-Works určen pro vědecké a technické výpočty, jejichž základ spočívá v maticových výpočtech. Jeho součástí je velké množství toolboxů s přednastavenými funkcemi, a tak poskytuje velké množství výpočetních nástrojů pro realizaci řízení, identifikaci systémů a provádění nejrůznějších inženýrských výpočtů. Obsahuje i grafické prostředí Simulink. [3]

Simulink dokáže simulovat nejrůznější dynamické děje za přítomnosti blokového grafického rozhraní, což zaručuje lepší komfort a více intuitivní prostředí při návrhu i méně zkušeným uživatelům. Nicméně pokročilejší funkce nelze provádět bez znalosti jazyka Matlab. Při návrhu elektrotechnických soustav a jejich řízení je Simulink v kombinaci s Matlabem nezbytným softwarovým nástrojem. [1]

4.3 Nástroj pro simulaci vícehmotných soustav MBS software MSC.Adams

MSC.Adams je výpočtový systém pro modelování, analyzování a optimalizování mechanických soustav, tzv. MBS (multi-body system), který podporuje statické, kinematické a dynamické analýzy modelu. Díky nutnosti tvorby virtuálních prototypů s malými finančními a časovými nároky je nezbytným softwarem většiny dnešních výrobců v automobilovém, letadlovém, lodním průmyslu a mechatronických zařízeních. Uspokojuje přes 50% poptávky na celém světě v tomto odvětví. [4] [5]

Jelikož je jeho použití napříč veškerým průmyslem, obsahuje velké množství přídavných modulů, které jsou o to více přizpůsobeny pro různá odvětví. Pro modelování virtuálního prototypu a jeho analyzování slouží univerzální modul Adams/view. Za pomoci pružných či tuhých těles, v různých souřadnicových systémech (tzv. Markerech) vzájemně propojených pohyblivými, nebo pevnými vazbami, je simulováno řešení kinematiky a dynamiky těles. Pro přesnější popis soustavy lze do modulu také vkládat a slučovat 3D-CAD modely s přesnou

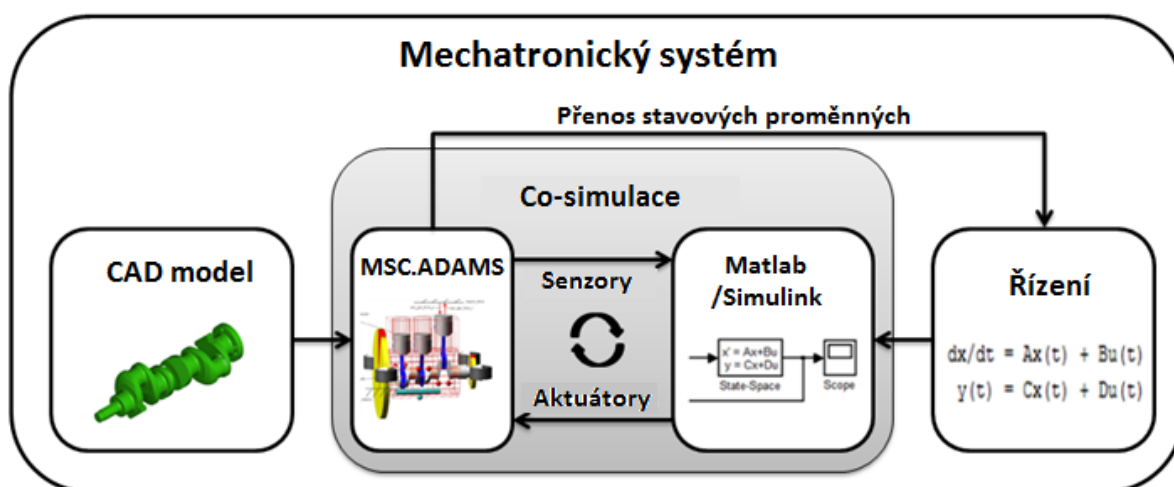
geometrií. Z dynamické analýzy lze pak určit funkčnost dorazů a pohybujících se částí. Ke zpracování výsledků analýzy do grafů, animací a tabulek slouží modul MSC.Adams/Postprocessing. Zajištění spolupráce se Simulinkem a jinými nástroji je docíleno přes modul MSC.Adams/Control. Toto spojování se nazývá co-simulace.

4.4 Co-simulace MSC.Adams s Matlab/Simulink

Jestliže je soustava z hlediska mechaniky nadefinována, je třeba přistoupit k jejímu řízení. Nástroj MSC.Adams obsahuje pouze základní řídicí toolbox pro nastavení PID regulátoru a pro složitější návrhy řízení je nutné mít externí řídicí software, který obstará řízení soustavy v reálném čase. K eliminaci tohoto problému nástroj MSC.Adams uživateli nabízí možnost kooperativního propojení s těmito externími nástroji pro řízení soustav. Takovému propojení se říká co-simulace (obr. 4). [12]

Pro řízení mechatronické soustavy lze vybrat z celé řady nástrojů, např. Matlab, LabView, MSC.Easy5 apod. V této práci je použit grafický nástroj pro návrh řízení Matlab/Simulink. Komunikace se Simulinkem je docílena přes modul MSC.Adams/Control.

Velkou výhodou softwaru MSC.Adams je autonomní vytvoření stavových rovnic navrženého virtuálního prototypu a jejich následný převod do maticového tvaru. Stavby těchto rovnic jsou popsány tzv. stavovými proměnnými, které určují dynamickou odezvu celé soustavy na jednotkový skok. Na uživateli už je jen zvolení a doladění řídicí taktiky. [13]



Obr. 4: Schéma co-simulace [12]

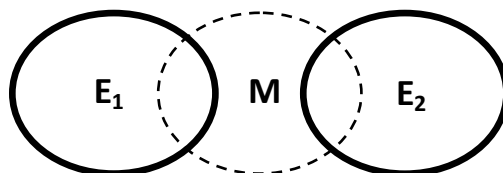
5 Elektromechanická přeměna energie

V dnešním elektrifikovaném světě se elektromechanická přeměna stala neodmyslitelnou složkou lidstva, jelikož elektrické stroje mají zásadní postavení napříč veškerým průmyslem.

Elektrické stroje tedy pracují na principu elektromechanické přeměny energie mezi pevnou částí stroje (statoru) a pohyblivou (rotoru) a jejich vzájemnou interakcí skrze vytvořené magnetické pole. Základní elektrické části každého elektrického stroje pak jsou:

- primární elektrický obvod E_1 ,
- magnetický obvod M ,
- sekundární elektrický obvod E_2 ,

kdy elektrické obvody E_1 a E_2 jsou navzájem svázané magnetickým polem M (obr. 5). [6] Jejich vzájemné chování a propojení mezi těmito obvody pak předurčuje matematický model, který je složen ze soustavy elektrických diferenciálních rovnic, doplněný o pohybovou rovnici pohyblivé části stroje.



Obr. 5: Definice elektrického stroje

Základní rozdělení elektrických strojů je na stroje točivé, netočivé a lineární. Nejznámějším typem netočivého elektrického stroje je zejména transformátor a slouží k přenosu elektrické energie z jednoho obvodu do jiného pomocí vzájemné elektromagnetické indukce. Točivý stroj je zařízení, které má část pro vykonání relativního točivého pohybu a je určen pro elektromechanickou přeměnu energie, a to buď z elektrické energie na mechanickou (motor), nebo naopak (generátor). Nejvýznamnější dělení elektrických strojů představuje systematizaci dle druhu napájecího napětí a jejich provedení: [7]

- **stejnoseměrné** - provedení buzení - stroje s permanentními magnety, s buzenými póly (s cizím buzením, sériové buzení, kompaudním buzením atd.)
- **střídavé** - dělí se podle principu funkce na:
 - **asynchronní** - další dělení podle počtu fází/vinutí, podle provedení rotoru
 - **synchrónní** - provedení rotoru (s vyniklými póly, s hladkým rotorem) - provedení buzení (permanentními magnety, přes kroužky)
 - **komutátorové**
- **speciální** – krokové motory, rotační měniče [9]

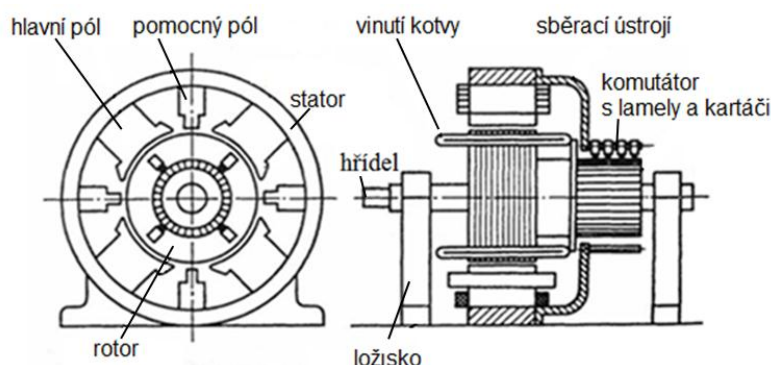
Uvedené rozřídění je určeno pouze pro utvoření si základní představy o rozmanitosti provedení točivých elektrických strojů. Pro zařazení elektrických strojů, o kterých pojednává tato práce, je to ale dostačující.

6 Elektrické stroje

6.1 Stejnosměrný stroj

Jedná se o nejstarší elektrický stroj, ale i dnes hojně používaný pro své výhodné regulační vlastnosti, malé rozměry, hmotnost a velké záběrné momenty při malých otáčkách. Proto se často užívá pro pohon těžkých a velkých strojů. Za velký nedostatek se považuje nutnost komutace proudu z důvodu rušení a poruch. [7] [9]

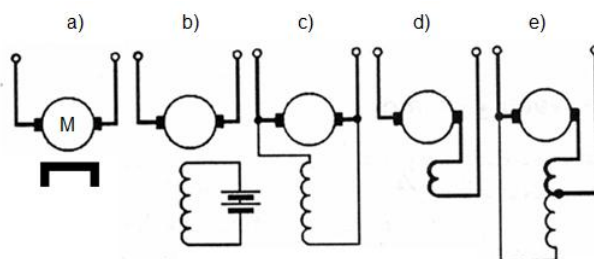
Skládá ze tří hlavních částí. Z pevné části, statoru, pohyblivé části, rotoru a komutátoru. Provedení celé soustavy zachycuje obr. 6.



Obr. 6: Principiální uspořádání stejnosměrného stroje [10]

Podle způsobu zapojení vinutí statoru a rotoru rozlišujeme stejnosměrný stroj s permanentním magnetem, cizím, derivačním, sériovým a kompaundním buzením (obr. 7) Každé zapojení má odlišné vlastnosti a je vhodné pro určitou aplikaci.

Pro virtuální prototyp stejnosměrného stroje je zvoleno nejjednodušší provedení s permanentním magnetem na statoru (SSMPM) v motorickém režimu (obr. 7a).

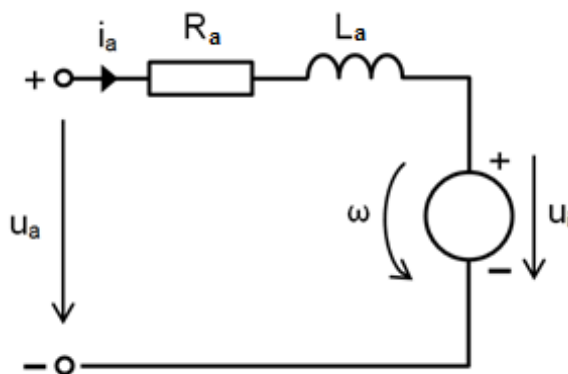


Obr. 7: Zapojení stejnosměrného stroje s a) permanentním magnetem b) cizím buzením c) derivačním buzením d) sériové e) kompaundní buzení [9]

Princip činnosti stejnosměrného stroje a jeho podrobnější popis lze dohledat např. v níže uvedené literatuře [7] [9].

6.1.1 Fyzikální model - náhradní schéma

Schéma vychází z fyzikální podstaty stejnosměrného stroje s permanentním magnetem a je složeno z idealizovaných elektronických prvků, které se řídí danými fyzikálními zákony. Dohromady tvoří elektronický obvod, který transformuje celý reálný stroj do tvaru, který lze popsat vhodným matematickým aparátem.



Obr. 8: Náhradní schéma SSMPM

- R_a [Ω] - odpor vinutí rotoru
- L_a [H] - indukčnost rotorového vinutí
- u_a [V] - napětí na výstupních svorkách
- u_i [V] - napětí indukované v rotoru vlivem otáčení ω
- i_a [A] - proud protékající vinutím rotoru
- ω [rad/s] - mechanická úhlová rychlost

6.1.2 Matematický model SSPM

Matematický model je odvozen z náhradního schéma (fyzikálního modelu) motoru a skládá se ze dvou diferenciálních rovnic. První je pohybová diferenciální rovnice 6.1.1, která popisuje momentovou rovnováhu rotoru, a druhou rovnicí 6.1.3 je diferenciální elektrická rovnice popisující elektrické chování motoru. Pro snazší vložení do nástroje MSC.Adams je parciální derivace rovnice 6.1.3 vyjádřena na levou stranu. Obě rovnice jsou sloučeny skrze mechanické otáčky ω .

- Mechanická (pohybová) rovnice:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_i \quad (6.1.1)$$

$$\text{Platí: } M_i = K_T \cdot i_a \quad (6.1.2)$$

kde: J [kg.m²] - moment setrvačnosti rotoru
 M_i [N.m] - vnitřní moment motoru
 K_T [N.m/A] - momentová konstanta

- Elektrická (napěťová) rovnice:

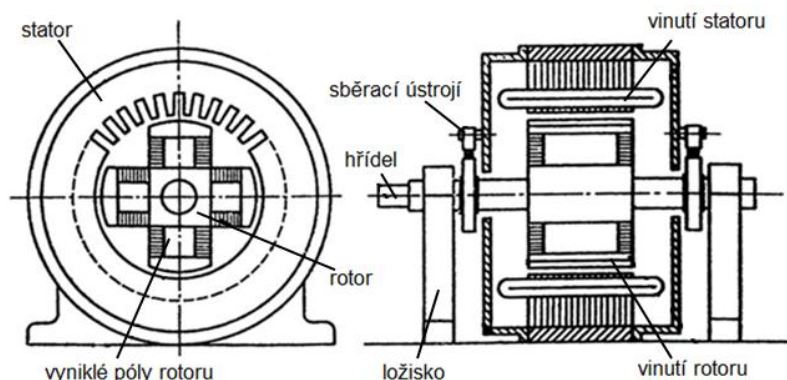
$$\frac{di_a}{dt} = \frac{u_a - R_a \cdot i_a - K_T \cdot \omega}{L_a} \quad (6.1.3)$$

Uvedené diferenciální rovnice se aplikují v kapitole 7.1.1 na vytvořený mechanický model v nástroji MSC.Adams, a tak získáme dynamické chování modelu.

6.2 Synchronní stroj

V dnešní době se řadí mezi majoritní stroje pro výrobu elektrické energie vysokých výkonů a jako zdroje elektrické energie u automobilů, letadel. Souhrnně jsou nazývány synchronními generátory/alternátory. Synchronní motory jsou méně rozšířené, jelikož se nedokáží samovolně rozběhnout z klidového stavu. Díky rozvoji polovodičů jsou však v dnešní době hojně rozšířené tzv. střídavé servopohony. Jsou to synchronní motory s permanentními magnety na rotoru, třífázovým vinutím ve statoru a polohovým regulátorem. Název synchronní vychází z faktu, že se rotor otáčí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole statoru. [7]

Skládá se ze statoru a rotoru obdobně jako jiné točivé stroje. Provedení celé soustavy zachycuje obr 9.



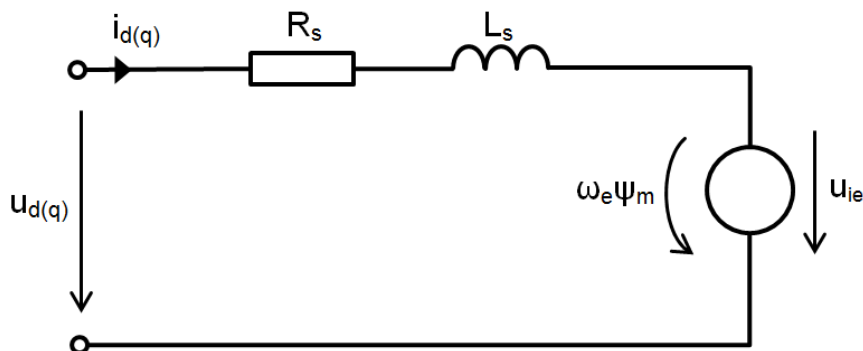
Obr. 9: Principiální uspořádání synchronního stroje [10]

Pro modelování virtuálního prototypu synchronního stroje v MSC.Adams je zvolen synchronní servomotor s permanentním magnetem na rotoru (SMPM).

Princip činnosti stejnosměrného stroje a jeho podrobnější popis lze dohledat, např. v níže uvedené literatuře [7].

6.2.1 Fyzikální model - náhradní schéma

Vychází z fyzikální podstaty synchronního stroje s permanentními magnety na rotoru a je složeno z idealizovaných elektronických prvků. Dohromady tvoří elektronický obvod, který transformuje celý reálný stroj do tvaru, který lze popsat vhodným matematickým aparátem. Schéma znázorňuje jednu fázi statoru stroje, odvozenou z rotorových souřadnic stroje $d-q$.



Obr. 10: Náhradní schéma SMPM v $d-q$ souřadnicích

- R_S [Ω] - odpor statorového vinutí
- L_S [H] - indukčnost statorového vinutí
- Ψ_m [Wb] - sprážený magnetický tok
- u_d, u_q [V] - napájecí statorová napětí
- u_{ie} [V] - napětí indukované na statoru vlivem otáčení rotoru ω
- i_d, i_q [A] - proud protékající vinutím statoru
- ω_e [rad/s] - elektrická úhlová rychlost

6.2.2 Matematický model SMPM

Matematický model je odvozen z náhradního schéma (fyzikálního modelu) motoru. Tento model zahrnuje několik zjednodušujících předpokladů a složitými transformacemi je přepočten z obecných do tzv. rotorových d - q souřadnic. Tím dostaneme matematický model motoru, který lze jednodušeji popsat, jelikož zmizí všechny periodické koeficienty stroje vzniklé při otáčení rotoru v obecných souřadnicích. Postup odvození, transformace a zavedená zjednodušení lze dohledat např. v literatuře [4] nebo [8]. Po transformaci získáme dvě elektrické diferenciální rovnice 6.2.5 a 6.2.6 popisující elektrické chování motoru, doplněny o pohybovou diferenciální rovnici 6.2.1, která definuje momentovou rovnováhu rotoru. Pro snazší vložení do nástroje MSC.Adams jsou parciální derivace elektrických rovnic vyjádřeny na levou stranu. Rovnice jsou sloučeny skrze mechanickou úhlovou rychlost ω .

- Mechanická (pohybová) rovnice:

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_i \quad (6.2.1)$$

$$\text{Platí: } M_i = \frac{3}{2} \cdot P_p \cdot \Psi_m \cdot i_q \quad ; \quad \omega = \omega_s = \frac{\omega_e}{P_p} \quad (6.2.2) ; (6.2.3)$$

$$\Psi_m = \frac{K_T}{P_p} \cdot \frac{2}{3 \cdot \sqrt{2}} \quad (6.2.4)$$

kde: K_T [N.m/A] - momentová konstanta
 M_i [N.m] - vnitřní moment motoru
 P_p [-] - počet pól párů budícího vinutí
 J [kg.m²] - moment setrvačnosti rotoru
 ω_s [rad/s] - synchronní úhlová rychlost

- Elektrické (napěťové) rovnice uvažované v d - q rotorových souřadnicích:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{u_d - R_S \cdot i_d - P_p \cdot \omega \cdot L_S \cdot i_q}{L_S} \quad (6.2.5)$$

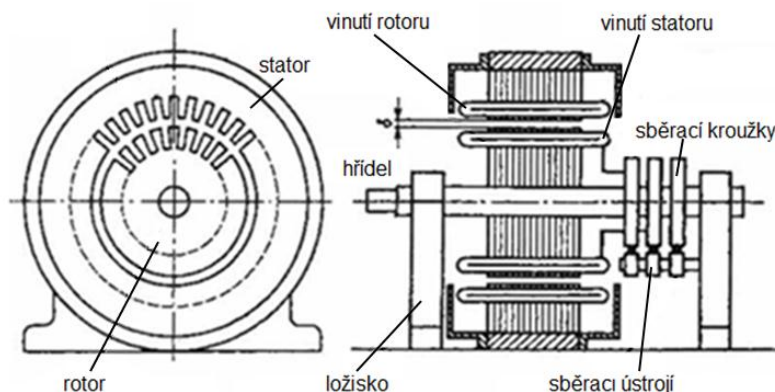
$$\frac{di_q}{dt} = \frac{u_q - R_S \cdot i_q - P_p \cdot L_S \cdot \omega \cdot i_d - P_p \cdot \omega \cdot \Psi_m}{L_S} \quad (6.2.6)$$

Odvozené diferenciální rovnice se aplikují v kapitole 7.2.1 na vytvořený mechanický model v nástroji MSC.Adams, a tak získáme dynamické chování modelu.

6.3 Asynchronní stroj

Díky jednoduché konstrukci a relativně nízké ceně oproti ostatním elektrickým strojům se řadí mezi nejrozšířenější elektrické stroje a s výhodou jsou implementovány do nejrůznějších pohonů. Jsou rovněž provozně nejspolehlivější a nevyžadují velkou údržbu. Jejich využití je velmi pestré a pohání zařízení jako například obráběcí stroje, čerpadla, ventilátory, pásové dopravníky, kompresory, jeřáby, výtahy a jiné. [9] [7]

Skládá se z dvou hlavních částí. Z pevné části (statoru), pohyblivé části (rotoru) a mnoha dalších částí, které dohromady tvoří jediný celek (obr. 11).



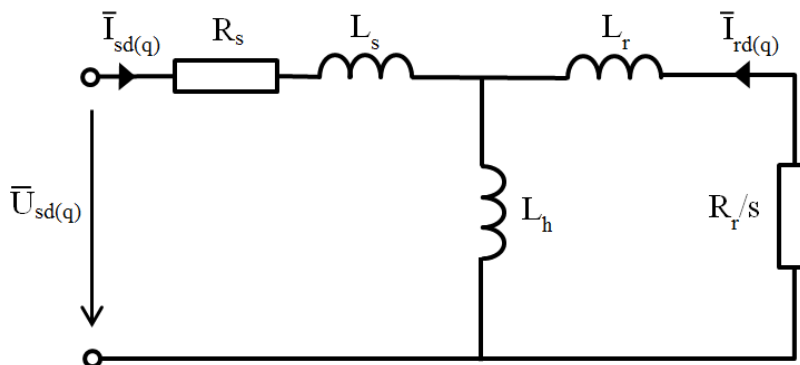
Obr. 11: Principiální uspořádání asynchronního kroužkového stroje [10]

Pro vytvoření virtuálního prototypu asynchronního stroje v MSC.Adams je zvolen asynchronní motor s kotvou nakrátko (ASM).

Princip činnosti stejnosměrného stroje a jeho podrobnější popis lze dohledat např. v níže uvedené literatuře [7].

6.3.1 Fyzikální model - náhradní schéma

Vychází z fyzikální podstaty stroje a je složeno z idealizovaných elektronických prvků, které se řídí platnými fyzikálními zákony. Dohromady tvoří elektronický obvod, který transformuje celý reálný motor do tvaru, který lze popsat vhodným matematickým aparátem. Schéma znázorňuje jednu fázi statoru stroje, odvozenou z rotorových souřadnic stroje $d-q$.



Obr. 12: Náhradní schéma ASM v $d-q$ souřadnicích tzv. T-článek

- R_s [Ω] - odpor statorového vinutí
- R_r [Ω] - odpor rotorového vinutí
- L_s [H] - indukčnost statorového vinutí spolu s vlivem všech fází statoru
- L_r [H] - indukčnost rotorového vinutí spolu s vlivem všech fází rotoru
- L_h [H] - hlavní (magnetizační) indukčnost
- $U_{sd(q)}$ [V] - napájecí statorová napětí
- $I_{sd(q)}$ [A] - proud procházející vinutím statoru
- $I_{rd(q)}$ [A] - proud procházející vinutím rotoru
- s [-] - poměrný rozdíl otáček statorového mag. pole a rotoru, tzv. skluz

6.3.2 Matematický model ASM

Matematický model je odvozen z náhradního schéma (fyzikálního modelu) motoru. Tento model zahrnuje několik zjednodušujících předpokladů a složitými transformacemi je přepočten z obecných do tzv. rotorových d - q souřadnic. Vychází se pak ze zjednodušeného náhradního schéma, tzv. T-článku (obr. 15). Tím dostaneme matematický model motoru, který lze jednodušeji popsat, jelikož zmizí všechny periodické koeficienty stroje, vzniklé při otáčení rotoru v obecných souřadnicích. Postup odvození, transformace a zavedená zjednodušení lze dohledat např. v literatuře [11] nebo [8]. Po transformaci získáme čtyři elektrické diferenciální rovnice 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5, 6.3.6 popisující elektrické chování motoru, doplněny o pohybovou diferenciální rovnici 6.3.1, která definuje momentovou rovnováhu rotoru. Pro snazší vložení do nástroje MSC.Adams jsou parciální derivace elektrických rovnic vyjádřeny na levou stranu. Všechny rovnice jsou sloučeny mechanickou úhlovou rychlostí ω .

- Mechanická (pohybová) rovnice:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_i \quad (6.3.1)$$

$$\text{Platí: } M_i = \frac{3}{2} \cdot P_p \cdot \text{Im}[\bar{\Psi}_s \cdot \bar{I}_s] \quad (6.3.2)$$

kde: M_i [N.m] - vnitřní moment motoru

P_p [-] - počet pól párů budícího vinutí

Ψ_s [Wb] - celkový magnetizační tok fáze statorového vinutí

J [kg.m³] - moment setrvačnosti rotoru

- Elektrické (napět'ové) rovnice uvažované v d - q rotorových souřadnicích:

$$\bar{U}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_s \cdot \bar{\psi}_s \quad (6.3.3)$$

$$\bar{U}_r = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_s - \omega) \cdot \bar{\psi}_r \quad (6.3.4)$$

$$\text{Platí: } \omega_s = \frac{\omega_e}{P_p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{P_p} \quad (6.3.5)$$

$$\overline{\psi}_s = L_s \cdot \overline{I}_s + L_h \cdot \overline{I}_r \quad (6.3.6)$$

$$\overline{\psi}_r = L_r \cdot \overline{I}_r + L_h \cdot \overline{I}_s \quad (5.3.7)$$

kde: Ψ_r [Wb] - celkový magnetizační tok fáze rotorového vinutí
 f [Hz] - frekvence napájecího napětí
 ω [rad/s] - mechanická úhlová rychlost
 ω_e [rad/s] - elektrická úhlová rychlost
 ω_s [rad/s] - synchronní úhlová rychlost

Po dosazení magnetických toků z rovnic 5.3.6-7 do rovnic 5.3.3-4, rozepsáním reálných a imaginárních složek komplexních čísel do d-q souřadnic a upravením jsou získány rovnice 6.1-6.5 s explicitně vyjádřenými parciálními derivacemi pro vložení do nástroje MSC.Adams. Ty byly převzaty z modelu ASM v Simulinku uvedeného v literatuře [18].

$$\frac{dI_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s + L_h} \cdot \left[U_{sd} - R_s \cdot I_{sd} - L_h \cdot \frac{dI_{rd}}{dt} + \omega_s \cdot (I_{rq} \cdot L_h + I_{sq} \cdot (L_s + L_h)) \right] \quad (6.1)$$

$$\frac{dI_{rd}}{dt} = \frac{1}{L_r + L_h} \cdot \left[U_{rd} - R_r \cdot I_{rd} - L_h \cdot \frac{dI_{sd}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot (I_{sq} \cdot L_h + I_{rq} \cdot (L_r + L_h)) \right] \quad (6.2)$$

$$\frac{dI_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s + L_h} \cdot \left[U_{sq} - R_s \cdot I_{sq} - L_h \cdot \frac{dI_{rq}}{dt} + \omega_s \cdot (I_{rd} \cdot L_h + I_{sd} \cdot (L_s + L_h)) \right] \quad (6.3)$$

$$\frac{dI_{rq}}{dt} = \frac{1}{L_r + L_h} \cdot \left[U_{rq} - R_r \cdot I_{rq} - L_h \cdot \frac{dI_{sq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot (I_{sd} \cdot L_h + I_{rd} \cdot (L_r + L_h)) \right] \quad (6.4)$$

$$M_i = \frac{3}{2} \cdot P_p \cdot \left[(I_{sd} \cdot (L_s + L_h) + I_{rd} \cdot L_h) \cdot I_{sq} - (I_{sq} \cdot (L_s + L_h) + I_{rq} \cdot L_h) \cdot I_{sd} \right] \quad (6.5)$$

Odvozené diferenciální rovnice se aplikují v kapitole 7.3.1 na vytvořený mechanický model v nástroji MSC.Adams, a tak získáme dynamické chování modelu.

7 Vytvoření virtuálních prototypů

V této části práce jsou modelovány virtuální prototypy elektrických strojů, které většinou bývají součástí virtuálních prototypů složitějších strojů a slouží v nich pro pohon dílčích částí. Vytvoření prototypů zahrnuje sestavení mechanického modelu, jeho popis z hlediska dynamického chování a ověření, zda je systém korektní v porovnání s realitou.

7.1 Virtuální prototyp stejnosměrného stroje

7.1.1 Sestavení modelu v nástroji MSC.Adams

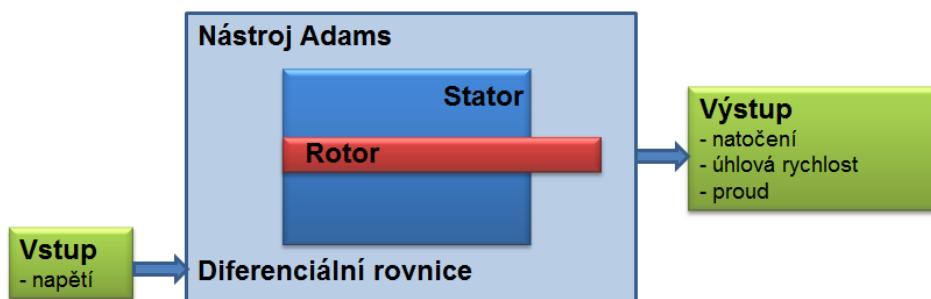
Každý elektromechanický točivý stroj se skládá z popisu mechanické struktury a popisu elektrického chování. Mechanickou strukturu modelujeme pomocí nástroje pro multi-body MSC.Adams a elektrické chování popisujeme pomocí diferenciálních rovnic uvedených v kapitole 6.1, které jsou skrze tento nástroj vloženy do modelu mechanického.

Modelovanou soustavou je stejnosměrný motor MAXON RE 35 s typovým označením 273754 s parametry uvedenými v tabulce 1.

Stejnosemny motor MAXON RE 35		
Nominální napětí	U [V]	42
Odpor vinutí rotoru	R [Ω]	2,07
Indukčnost vinutí rotoru	L [mH]	0,62
Momentová konstanta	K_T [mN.m/A]	52,5
Moment setrvačnosti rotoru	J [g.cm ²]	69,6

Tabulka 1: Parametry stejnosměrného motoru MAXON RE35 [14]

Na obr. 13 je schéma, jak bude celý model vypadat, co bude obsahovat a jakými vstupy a výstupy bude disponovat. Vstupem je stejnosměrné napětí přivedené na rotor a výstupem otáčky, natočení a proud rotorem. Vzájemné působení mezi statorem a rotorem je dáno soustavou diferenciálních rovnic popsané v kapitole 6.1.2, které se aplikují na vytvořený mechanický model.



Obr. 13: Schéma principielního uspořádání modelu SSMPM v nástroji Adams

První možnost, jak vytvořit mechanickou část modelu, je exportovat již hotový 3D CAD model s přesnými konstrukčními rozměry a dorazy. V našem případě však stačí vytvořit zjednodušený model mechanické struktury za pomoci toolboxů, které nástroj MSC.Adams nabízí, jelikož vytvořený virtuální prototyp zatím neimplementujeme do přesně zadané soustavy, kde je zapotřebí znát všechny konstrukční rozměry.

Postup pro vytvoření mechanické části:

- Nastavení pracovního prostředí:

Create a new model >> Model name: DC_motor >> Units: MKS - m,kg,N,s,deg

Setting >> interface style >> Classic

>> working grid >> Spacing X: 10mm ; Y: 10mm

- Vytvoření těles:

Vytvoření těles s reálnými rozměry a hmotností. Nastavení momentu setrvačnosti rotoru.

Stator - MTB >> Rigid Body: Cylinder >> Length: 10cm, Radius: 2.5cm >> Rename: stator

Rotor - MTB >> Rigid Body: Cylinder >> Length: 11cm, Radius: 0.5cm >> Rename: rotor

- Modify >> Define Mass By: User Input, moment setrvačnosti $I_{zz}=J=6.96E-005$

- Utvoření geometrických vazeb:

Jednoznačné uložení soustavy v prostoru a vzájemné působení ostatních těles.

Vazba stator-ground - MTB >> Joint: Fixed

Vazba stator-rotor - MTB >> Joint: revolute

- Kinematické vazby:

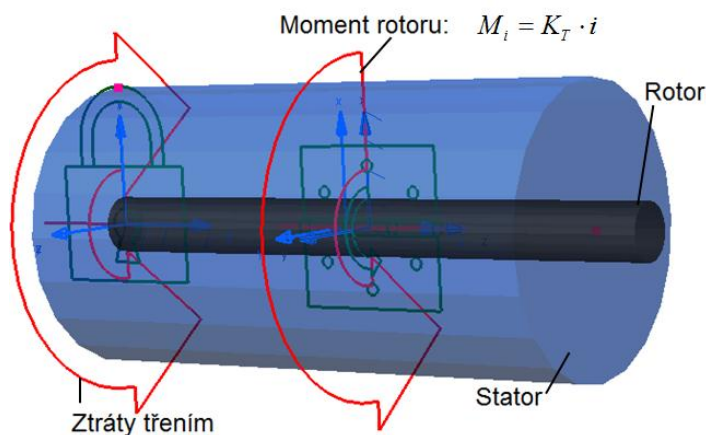
Vytvoření silových působení na soustavu.

Moment rotoru - MTB >> Forces >> Torque; Rename >> moment_rotoru,

- Modify >> Function: $K_T \cdot (DIF(i_dot))$ viz rovnice 6.1.2.

Moment vlivem tření - MTB >> Forces >> Torsion spring >> $CT=1.07E-7$

- Rename >> ztraty_trenim



Obr. 14: Model stejnosměrného motoru v MSC.Adams

Aby bylo možné do mechanického modelu implementovat model elektrický, je zapotřebí nejprve definovat parametry motoru vystupující v rovnici 6.1.3 a 6.1.2. Pro jejich vytvoření je opakovaně použit příkaz:

Build >> *Design Variable* >> *New*. Postupně tak vytvoříme konstanty z tabulky 1,
 $Kt = 5.25E-002$, $L = 6.2E-004$, $R = 2.07$, $U = 42$.

Diferenciální rovnice elektrické části se do modelu vloží příkazem:

Build >> *System Elements* >> *Differential Equation* >> *New* >> *Name: i_dot* >> *Type: Explicit* >> $y' = -(R/L) * (DIF(i_dot)) - (Kt/L) * WX(MARKER_4, MARKER_3) + (U/L)$

Do soustavy se tak zadá explicitně vyjádřená rovnice 6.1.3, kde příkaz $WX(MARKER_4, MARKER_3)$ představuje mechanickou úhlovou rychlost rotoru ω , skrze které dojde ke sloučení s mechanickou částí určenou rovnicí 6.1.1.

7.1.2 Ověření správnosti modelu

Jakmile je elektromechanický model stroje kompletní, je zapotřebí ověřit, zda je správně nadefinován a zda jeho chování odpovídá realitě. Pro tento účel lze v nástroji MSC.Adams nastavit a spustit simulaci příkazem:

MTB >> *Interactive simulate control* >> *end time: 0.3* >> *step size: 500*

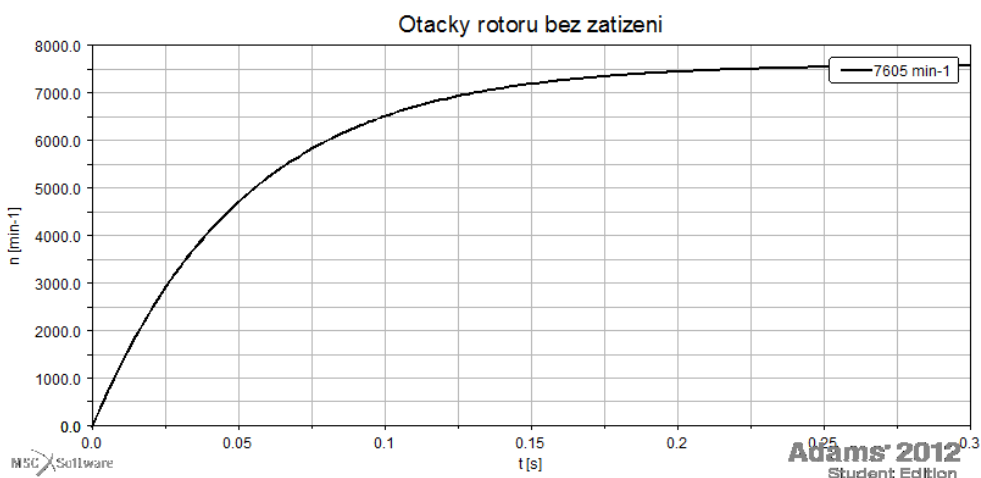
Před spuštěním samotné simulace jsou nastaveny měřidla pro veličiny, které potřebujeme kontrolovat s katalogovými hodnotami, a to příkazem:

Build >> *Mesasure* >> *Function* >> *New* >> *Create a function measure*.

Po odsimulování soustavy se vykreslí grafy funkcí vstupního proudu $DIF(i_dot)$ a otáček rotoru $30 * WX(MARKER_4, MARKER_3) / \pi$ (obr. 15,16). Pro lepší práci s grafy slouží toolbox Adams/View (klávesová zkratka F8).

-	Katalog	Model
Otáčky bez zatížení [min^{-1}]	7530	7604
Proud bez zatížení [mA]	93	93
Rozběhový proud [A]	20,3	19,82

Tabulka 2: Srovnání katalogových hodnot s měřením



Obr. 15: Průběh otáček rotoru SSMPM bez zatížení



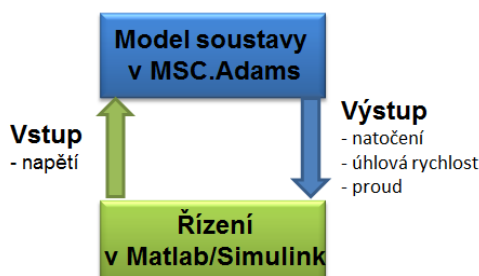
Obr. 16: Průběh proudu rotorem SSMPM bez zatížení

Tabulková hodnota proudu bez zatížení je nastavena vyladěním hodnoty tření mezi rotorem a státorem, která není zadána, a proto se musela experimentálně určit, tak aby tomuto proudu odpovídala, viz vytvoření kinematické vazby v kapitole 7.1.1. Z tabulky 2 je pak zřejmé, že hodnota otáček rotoru bez zatížení a v ustáleném stavu se mírně liší od hodnoty z katalogu. Chyba vzniká na základě uvažování zjednodušeného popisu motoru a také parametry katalogu jsou navíc pouze informativního charakteru. Každý motor se pohybuje v určité toleranci kolem těchto hodnot. Z obr. 16 lze odečíst, že maximální špička proudu při rozběhu rotoru dosahuje 19,82 A. Tento údaj lze srovnat s hodnotou katalogu 20,3 A. Na základě těchto údajů lze model a jeho chování považovat za korektní a odpovídající realitě.

7.1.3 Co-simulace Matlab/Simulink – MSC.Adams

Je nutné podotknout, že základem úspěšného propojení mezi oběma nástroji je zapotřebí disponovat kompatibilními verzemi, a to buď v 32, nebo 64 bitové podobě. Smysl a princip použití co-simulace byl popsán v kapitole 4.4.

Kompletní řízení modelu probíhá souběžnou simulací Adams-Matlab/Simulink. Je proto nezbytné nadefinovat vstupy a výstupy, mezi kterými si nástroje budou předávat data. Protože chování dynamického systému nejlépe popisuje stavový prostor, probíhá vyhodnocování zapomocí stavových proměnných, které budou našimi vstupy a výstupy do celé soustavy. Pro řízení stejnosměrného stroje potřebujeme natočení, úhlovou rychlost nebo proud rotorem. Tyto tři stavy definují výstup řízení napětím vstupujícím do systému (obr. 17).



Obr. 17: Schéma co-simulace pro SSMPM

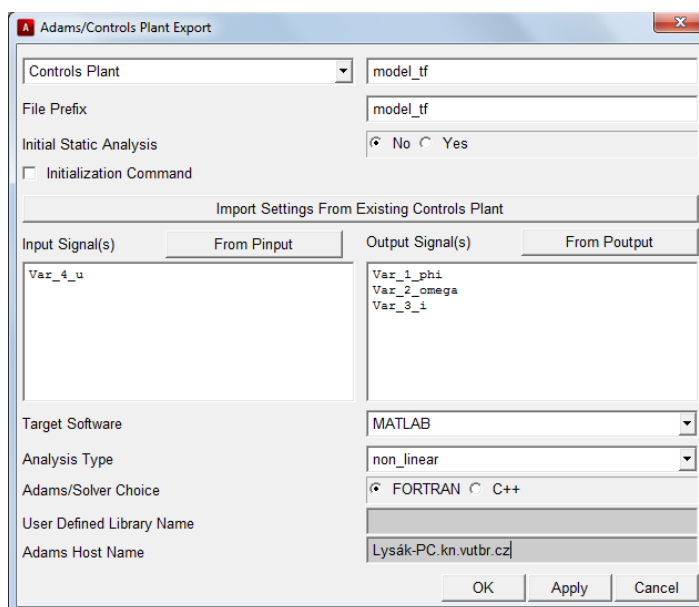
Pro vytvoření uvedených vstupních a výstupních proměnných je v MSC.Adams příkaz: *Build >> System elements >> State Variable >> New.*

Postupně jsou tak vytvořeny proměnné *Var_1_phi*, *Var_2_omega*, *Var_3_i*, *Var_4_u* pro natočení, úhlovou rychlost, proud a napětí, dané časovými závislostmi *AZ(MARKER_4,MARKER_3)*, *WX(MARKER_4, MARKER_3)*, *DIF(i_dot)*, 42. Aby elektrická diferenciální rovnice pracovala s vytvořenými proměnnými, musí se místo napětí *U* doplnit funkce *Varval(Var_4_u)*, to zajistí správné vyhodnocení stavových proměnných.

*Build >> System Elements >> Differential Equation >> Modify >> i_dot >> T >> y'=- (R/L) *(DIF(i_dot))-(Kt/L*WX(MARKER_4, MARKER_3)+ +(Varval(Var_4_u)*

Poté se celý nelineární model exportuje do Matlabu příkazem: *Controls >> Plant export.* Nastavení exportu pro řízení v Matlabu je znázorněno na obr. 18.

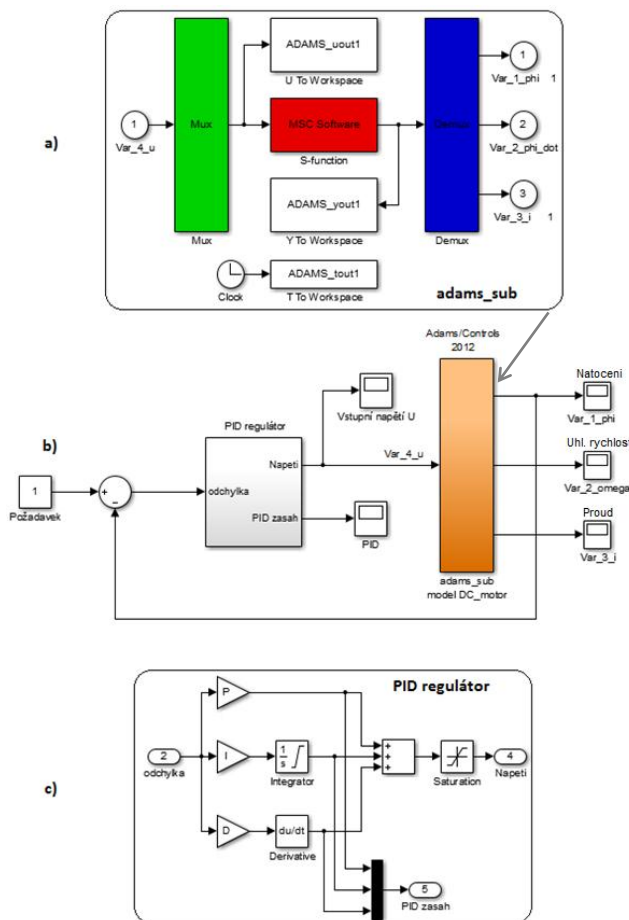
Jakmile je export dokončen, je zapotřebí vzniklý soubor, v našem případě *model_tf.m*, otevřít a spustit v Matlabu. Po zadání příkazu *adams_sys* v příkazovém okně se vytvoří model stejnosměrného motoru v Simulinku se vstupy a výstupy, které byli nedefinovány, v bloku pod názvem *adams_sub*. Základ tohoto bloku tvoří S-funkce reprezentující vytvořený nelineární model v nástroji MSC.Adams (obr. 19a). Model lze exportovat také jako lineární. Získáme tak přímo matice pro popis stavového prostoru A,B,C,D, potřebné pro zpětnovazební stavové řízení soustavy.



Obr. 18: Nastavení pro export soustavy do Matlabu

7.1.4 Návrh řízení

Řízení je realizováno za pomoci PID regulátoru a probíhá v regulační polohové smyčce. Ta obsahuje exportovaný model motoru v bloku *adams_sub* (obr. 19a), zpětnou vazbu a PID regulátor, který provádí akční zásahy do soustavy skrze řídicí napětí *Var_4_u* (obr. 19b). Struktura PID regulátoru je znázorněna na obr.19c. Saturační člen v regulátoru slouží pro omezení řídicího napětí, a to na nominální naměti motoru $U=42V$. Správným manuálním nastavením jednotlivých členů PID regulátoru lze dosáhnout požadovaného chování na skokovou změnu řízené veličiny.



Obr. 19: Regulační smyčka pro řízení SSMPM motoru PID regulátorem

Pro návrh seřízení PID regulátoru se používá celá řada metod. Velmi jednoduchý způsob, jak odhadnout parametry regulátor, nabízí Ziegler-Nicholsova metoda. Základní myšlenkou je přivést regulovanou soustavu na hranici své stability, ze které se dá odvodit teoreticky optimální nastavení. Této hranice je docíleno vyřazením integrační a derivační složky PID regulátoru a nastavení takového kritického zesílení r_{0k} , při kterém soustava kmitá netlumenými kmity s konstantní amplitudou a tzv. kritickou periodou T_k . Postup seřízení regulátoru je tedy následující:

- Vyřazení integrační a derivační složky regulátoru $I=0, D=0$.
- Zesílení regulátoru r_0 (P) je postupně zvýšeno až na hranici stability, odečteme kritické zesílení $r_{0k}=67$ a změříme kritickou dobu kmitu $T_k=0.04$.
- Ze získaných hodnot jsou z tabulky 3 určeny optimální parametry PID regulátoru, které jsou již přepočítané na posledním řádku tabulky 3.

Typ regulátoru	P	I	D
PID	$0,6r_{0k}$	$0,5T_k$	$0,12T_k$
	40,8	0,02	0,0048

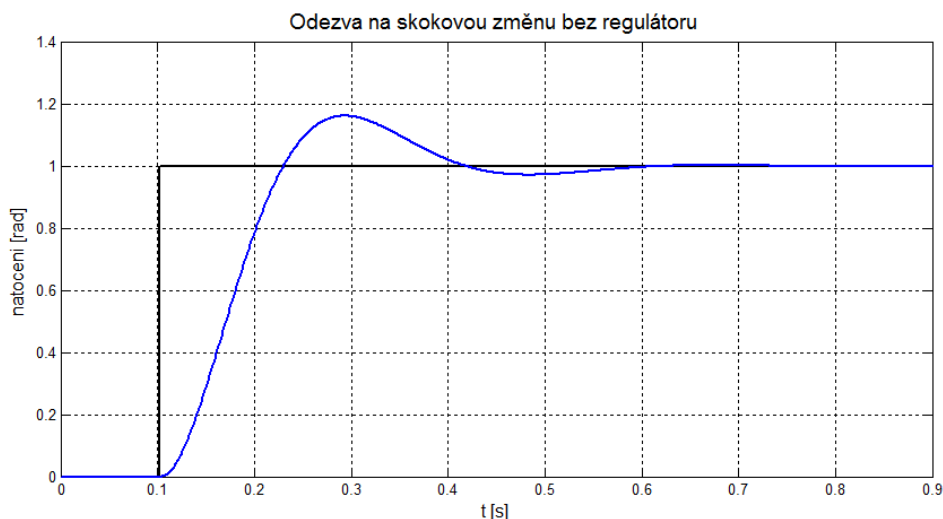
Tabulka 3: Seřízení regulátoru metodou Ziegler-Nichols [15]

Pro požadovaný průběh regulované veličiny je nutné tyto získané parametry následně experimentálně doladit přímo dle požadavků řízení žádané veličiny. Nelze tedy tvrdit, že seřízení PID regulátoru skrze Ziegler-Nicholsou metodou je optimální. Metoda slouží tedy pouze pro první odhad parametrů.

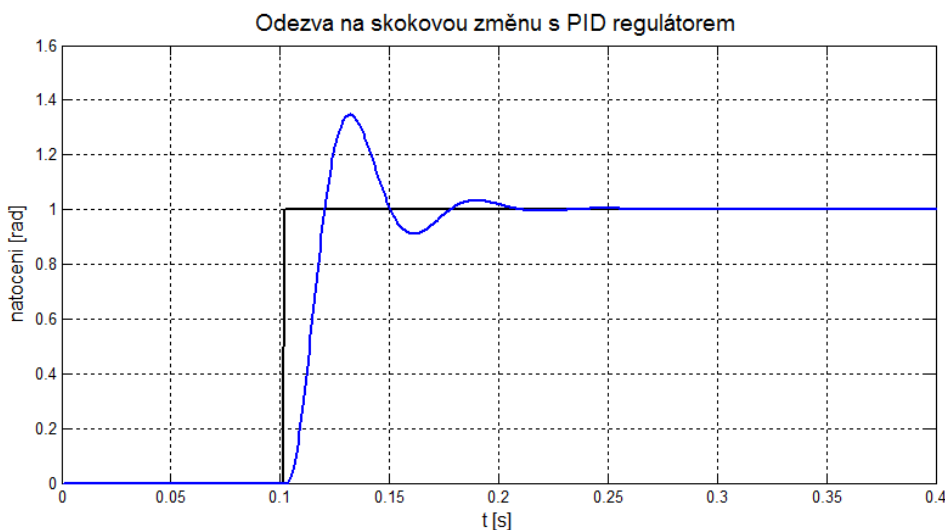
Pro skokovou změnu natočení o 1 radián a požadavku co nejrychlejšího dosažení této hodnoty nezávisle na překmitu, jsou parametry regulátoru experimentálně doladěny na hodnoty:

$$P=15, I=0.8, D=0.4$$

Na obrázku 21 je odezva soustavy na skokovou změnu žádané veličiny, regulované nastaveným PID regulátorem. Lze pozorovat, že pomocí regulátoru řízená veličina dosáhne požadované hodnoty za 0,1 s, to je pětikrát rychleji oproti stavu bez regulátoru. Jelikož nebyly zadány přísnější požadavky na řízení, můžeme tento stav považovat dostačující pro ukázkou regulace virtuálního prototypu.



Obr. 20: Odezva soustavy na skokovou změnu bez regulace



Obr. 21: Regulace polohy PID regulátorem

7.2 Virtuální prototyp synchronního stroje

7.2.1 Sestavení modelu SMPM v nástroji MSC.Adams

Postup vytvoření prototypu je obdobný jako v kapitole 7.1, proto následující kapitola popisuje pouze ty části modelování, které se liší od modelu SSMPM, s odkazem podrobnějšího popisu na předešlou kapitolu.

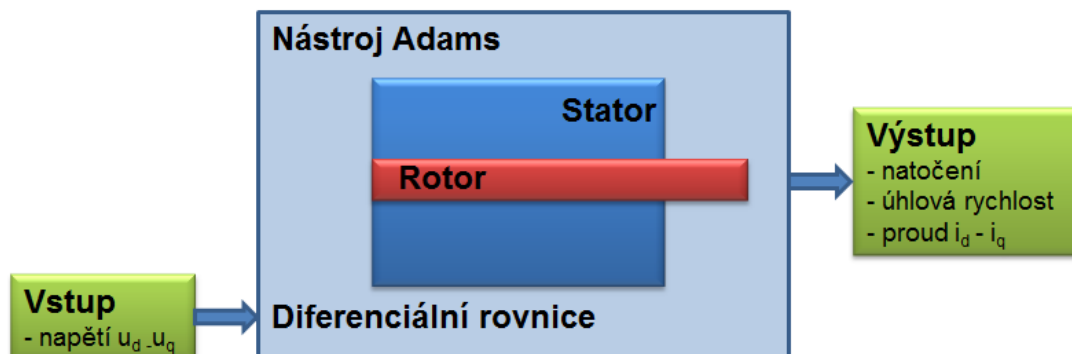
Pro vytvoření virtuálního prototypu je zapotřebí opět sloučit mechanickou strukturu a elektrický popis, daný diferenciálními rovnicemi. Mechanickou strukturu modelujeme pomocí nástroje pro multi-body MSC.Adams a elektrické chování popisujeme pomocí diferenciálních rovnic uvedených v kapitole 6.2, které jsou skrze tento nástroj vloženy do modelu mechanického.

Modelovanou soustavou je synchronní servomotor TGT3-0130 s parametry uvedenými v tabulce 4.

Synchronní servomotor TGT3-0130		
Nominální napětí	U [V]	320
Odpor vinutí statoru	R [Ω]	4,2
Indukčnost vinutí statoru	L [mH]	7,2
Počet pólů vinutí	P [-]	6
Moment setrvačnosti rotoru	J [kg.cm ²]	0,65
Momentová konstanta	K _T [N.m/A]	0,45

Tabulka 4: Parametry synchronního servomotoru TGT3-0130 [16]

Pro lepší orientaci v modelu je vytvořeno schéma (obr. 22), co bude obsahovat a jakými vstupy a výstupy bude disponovat. Vstupem je napětí v osách d-q přivedené na stator a výstupem úhlová rychlost rotoru, natočení a proud statoru v osách d-q. Vzájemné působení mezi statoru a rotorem je dáno soustavou diferenciálních rovnic popsané v kapitole 6.2.2, které se aplikují na vytvořený mechanický model.



Obr. 22: Schéma principiálního uspořádání modelu SMPM

Postup pro vytvoření mechanické části SMPM je obdobný jako v kapitole 7.1.1 při vytváření modelu SSMPM. Rozdíl je pouze v rozměrech mechanických částí, ve velikosti momentu setrvačnosti rotoru a funkce popisující moment motoru:

Rotor - Modify >> Define Mass By: User Input, moment setrvačnosti $I_{zz}=J=6.5E-005$

*Moment rotoru - Modify >> Function: (Kt/sqrt(2))*DIF(i_d_dot)* - viz rovnice 6.2.2.

Pro vložení elektrických diferenciálních rovnic do modelu je zapotřebí nejprve definovat parametry, které v nich vystupují. Pro jejich vytvoření je opakovaně použit příkaz:

Build >> Design Variable >> New. Postupně tak vytvoříme konstanty z tabulky 4:

$Kt=0.45$, $L=7.2E-003$, $Pp=P/2=6/2=3$, $R=4.2$, $ud=uq=320$

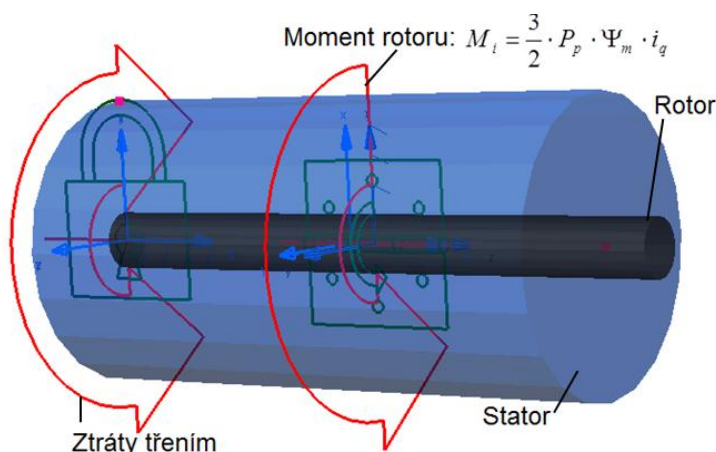
Poté se již může přistoupit k zapsání elektrických diferenciálních rovnic pro osu d a q zvlášť pomocí příkazu:

Build >> System Elements >> Differential Equation >> New >> Name:

i_{q_dot} >> *Type: Explicit >> $y'=1/L*(ud-R*DIF(i_d_dot)+Pp*WX(MARKER_4, MARKER_3)*L*DIF(i_q_dot))$*

i_{d_dot} >> *Type: Explicit >> $y'=1/L*(uq-R*DIF(i_q_dot)-Pp*WX(MARKER_4, MARKER_3)*L*DIF(i_d_dot)-Pp*WX(MARKER_4, MARKER_3)*K_t*2/3*sqrt(2)*Pp)$*

Zadáme tak do soustavy explicitně vyjádřené rovnice 6.2.5 a 6.2.6, kde příkaz $WX(MARKER_4, MARKER_3)$ představuje mechanickou úhlovou rychlost rotoru ω , skrze které dojde ke sloučení s mechanickou částí určenou rovnicí 6.3.1.



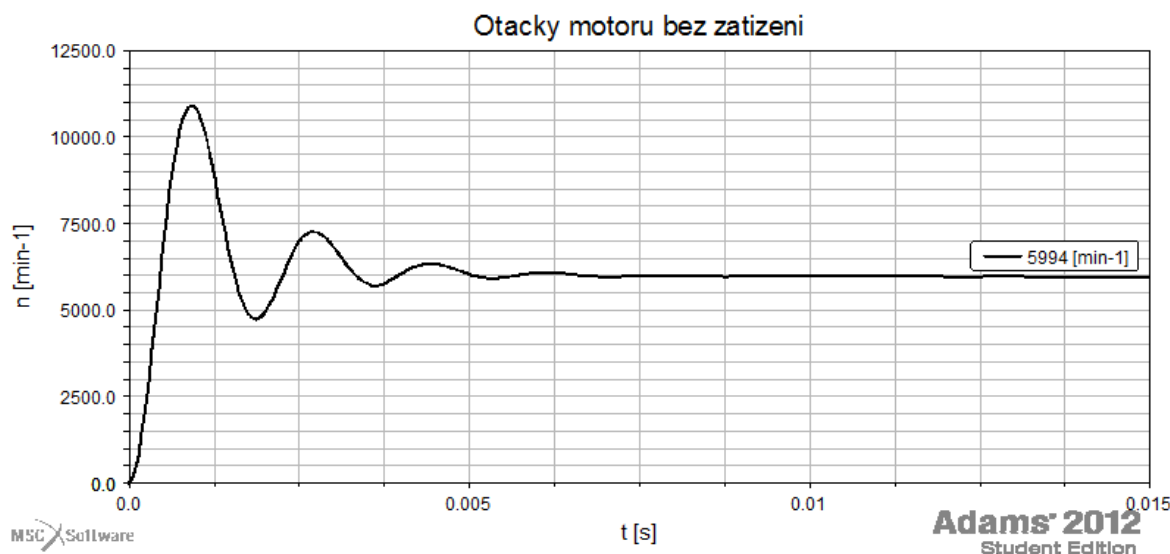
Obr. 23: Model SMPM v MSC.Adams

7.2.2 Ověření správnosti modelu

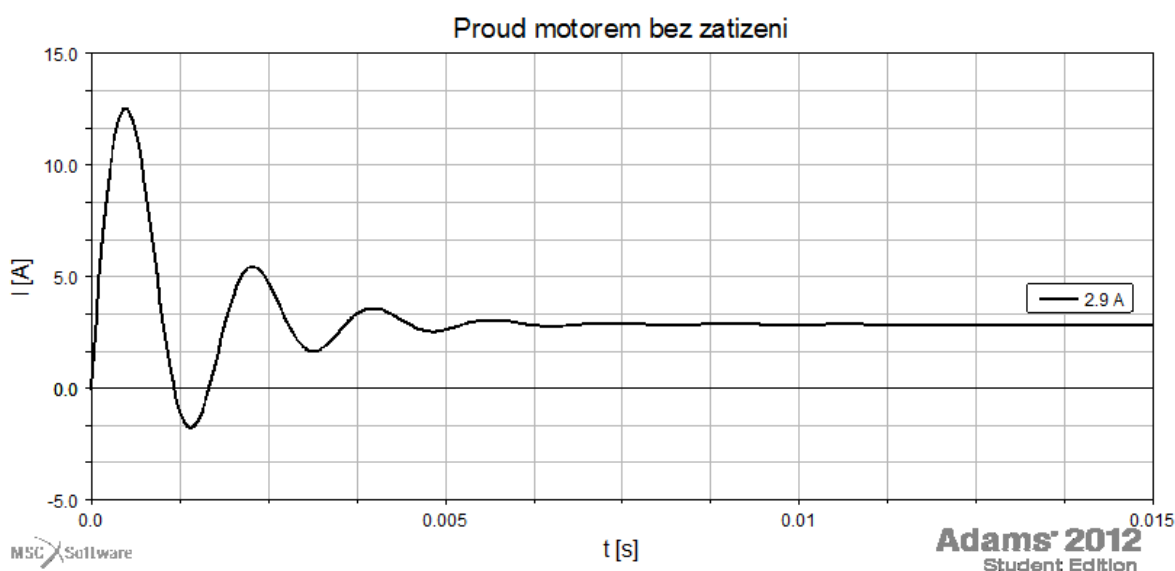
Postup při ověření správnosti modelu je stejný jako v kapitole 7.1.2. Po spuštění simulace se nyní do grafu vykreslí grafy vstupního proudu $DIF(i_q_dot)$ a otáček rotoru bez zatížení $30*WX(MARKER_4, MARKER_3)/pi$ (obr. 24, 25).

-	Katalog	Model
Otáčky bez zatížení [min^{-1}]	6000	5994
Proud bez zatížení [A]	2,9	2,9
Rozběhový proud [A]	12,5	12,4

Tabulka 5: Srovnání katalogových hodnot s měřením



Obr. 24: Průběh otáček rotoru SMPM bez zatížení



Obr. 25: Průběh proudu motorem SMPM bez zatížení

Jednou z možností, jak ověřit chování modelu je srovnat naměřené hodnoty s hodnotami katalogu. Z tabulky 3 je zřejmé, že hodnoty proudu a otáček motoru bez zatížení v ustáleném stavu odpovídají hodnotám z katalogu. Jelikož uvažujeme zjednodušený popis motoru, je zde přijatelná chyba. Z obr. 29 lze odečíst, že maximální špička proudu při rozběhu rotoru dosahuje 12.4 A a proud v ustáleném stavu 2.9 A, což odpovídá hodnotám z katalogu. Na základě těchto hodnot lze tedy model považovat za korektní. Pro plynulý rozběh synchronních motorů je však zapotřebí vhodného řídicího aparátu, jelikož se nedokáže samovolně rozběhnout a je nutné, aby nedocházelo k tak rychlému nárůstu proudu.

Postup při propojení co-simulace a exportování stavových proměnných do nástroje pro řízení Matlab je stejný jako v kapitole 7.1.

Pro návrh řízení je zpracováno mnoho metod pro různé aplikace, existuje tedy celá řada publikací, kde jsou tyto metody popsány. Například v literatuře [4] lze dohledat kompletní návrh vektorového řízení.

7.3 Virtuální prototyp asynchronního stroje

7.3.1 Sestavení modelu v nástroji MSC.Adams

Postup vytvoření prototypu je obdobný jako v kapitole 7.1, proto následující kapitola popisuje pouze ty části modelování, které se liší od modelu SSMPM, s odkazem podrobnějšího popisu na tuto kapitolu.

Pro vytvoření virtuálního prototypu je zapotřebí opět sloučit mechanickou strukturu a elektrický popis daný diferenciálními rovnicemi. Mechanickou strukturu modelujeme pomocí nástroje pro multi-body MSC.Adams a elektrické chování popisujeme pomocí diferenciálních rovnic uvedených v kapitole 6.3, které jsou skrze tento nástroj vloženy do modelu mechanického.

Modelovanou soustavou je asynchronní motor s parametry uvedenými v tabulce 6.

Asynchronní motor		
Nominální napětí	U [V]	380
Frekvence napájecího napětí	f [Hz]	50
Odpor vinutí rotoru	R_r [Ω]	1,264
Odpor vinutí statoru	R_s [Ω]	0,838
Celková indukčnost vinutí statoru	L_s [mH]	9,7
Celková indukčnost vinutí rotoru	L_r [mH]	9,58
Hlavní magnetizační indukčnost	L_h [H]	0,234
Počet pólů vinutí	P [-]	4
Moment setrvačnosti rotoru	J [kg.m ²]	0,02

Tabulka 6: Parametry asynchronního motoru [18]

Schéma principiálního uspořádání modelu ASM a jeho popis je stejný jako pro SMPM v kapitole 7.2.1. Postup při tvorbě mechanické části ASM je obdobný jako v kapitole 7.1.1 při vytváření modelu SSMPM. Rozdíl je pouze v rozměrech mechanických částí, ve velikosti momentu setrvačnosti rotoru a funkce popisující moment motoru:

Rotor - Modify >> Define Mass By: User Input, moment setrvačnosti $I_{zz}=J=0.02$

*Moment rotoru - Modify >> Function: $3/2 * P_p * ((DIF(Is_d) * (L_s + L_h) + DIF(Ir_d) * L_h) * DIF(Is_q) - (DIF(Is_q) * (L_s + L_h) + DIF(Ir_q) * L_h) * DIF(Is_d))$* – viz rovnice 6.5.

Pro vložení elektrických diferenciálních rovnic do modelu je zapotřebí nejprve definovat parametry, které v této rovnici vystupují. Pro jejich vytvoření je opakovaně použit příkaz: *Build >> Design Variable >> New*. Postupně tak vytvoříme konstanty:

$$L_s = 9.7E-003, L_r = 9.58E-003, L_h = 0.234, R_s = 1.264, R_r = 0.838, U_{r_d} = U_{r_q} = 0, \\ U_{s_d} = U_{s_q} = 380, f = 50, P_p = P/2 = 4/2 = 2$$

Následně se již může přistoupit k zapsání elektrických diferenciálních rovnic pro osu d a q zvlášť pomocí příkazu:

Build >> System Elements >> Differential Equation >> New >> Name:

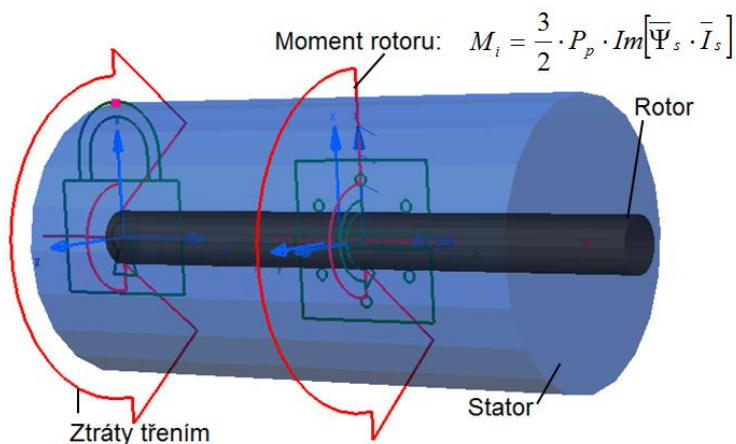
Is_d_dot >> Type: Explicit >> y'=(1/(Ls+Lh))(Us_d-Rs*DIF(Is_d)-Lh*DIF(Ir_d)+2*pi*f*(DIF(Ir_q)*Lh+DIF(Is_q)*(Ls+Lh)))*

Is_q_dot >> Type: Explicit >> y'=(1/(Ls+Lh))(Us_q-Rs*DIF(Is_q)-Lh*DIF(Ir_q)+2*pi*f*(DIF(Ir_d)*Lh+DIF(Is_d)*(Ls+Lh)))*

Ir_d_dot >> Type: Explicit >> y'=(1/(Lr+Lh))(Ur_d-Rr*DIF(Ir_d)Lh*DIF(Is_d)+ (2*pi*f/Pp-WX(MARKER_4,MARKER_3))*(DIF(Is_q)*Lh+DIF(Ir_q)*(Lr+Lh)))*

Ir_q_dot >> Type: Explicit >> y'=(1/(Lr+Lh))(Ur_q-Rr*DIF(Ir_q)-Lh*DIF(Is_q)- (2*pi*f/Pp-WX(MARKER_4,MARKER_3))*(DIF(Is_d)*Lh+DIF(Ir_d)*(Lr+Lh)))*

Zadáme tak do soustavy rovnice 6.1, 6.2, 6.3, 6.4, kde příkaz $WX(MARKER_4, MARKER_3)$ představuje mechanickou úhlovou rychlost rotoru ω .



Obr. 26: Model asynchronního motoru v MSC.Adams

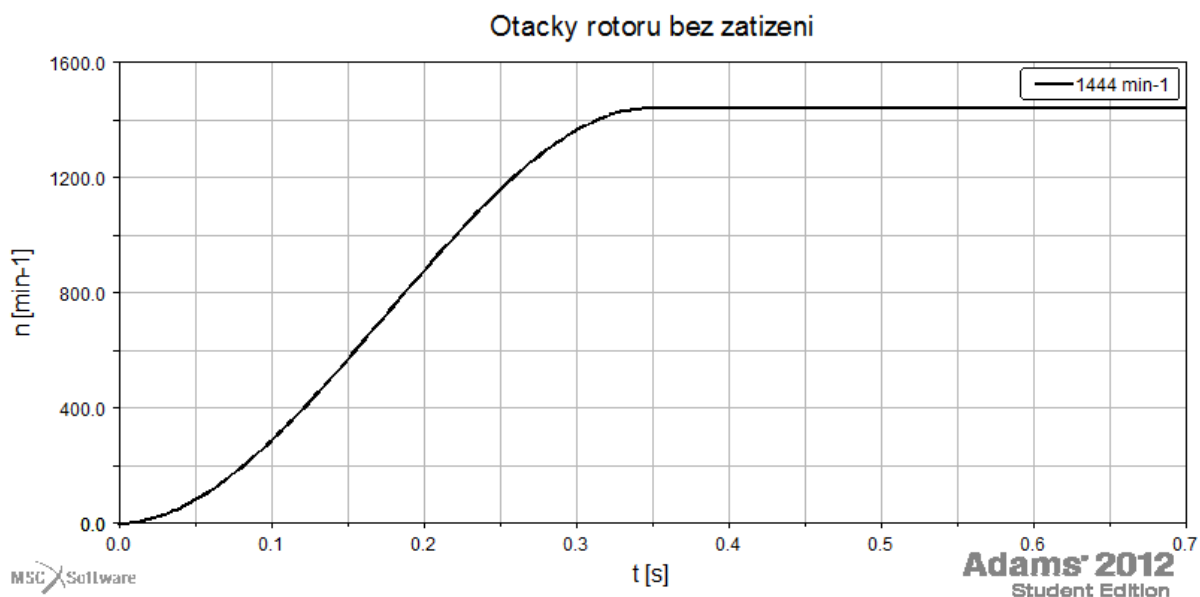
7.3.2 Ověření správnosti modelu

Postup při ověření správnosti modelu je stejný jako v kapitole 7.1.2. Po spuštění simulace se nyní do grafu vykreslí grafy funkcí vstupního proudu $DIF(Is_q_dot)$ a otáček rotoru $30*WX(MARKER_4,MARKER_3)/pi$ (obr. 20,21).

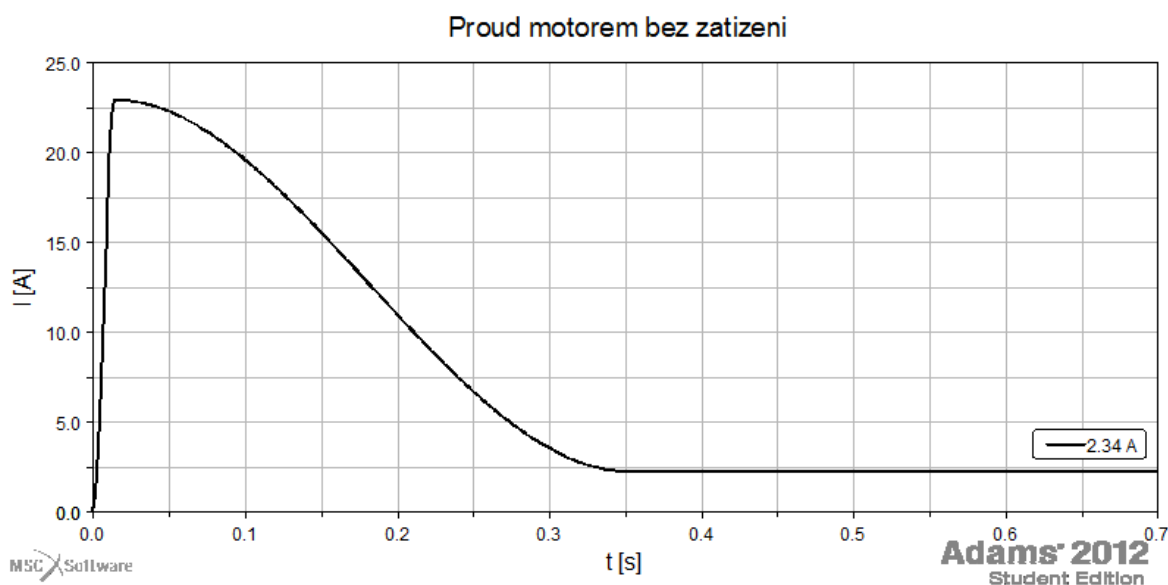
-	Katalog	Model
Otáčky [min^{-1}]	1445	1444
Rozběhový proud [A]	22	22.96

Tabulka 7: Srovnání katalogových hodnot s měřením

Z obrázků 27, 28 a tabulky 7 je zřejmé, že hodnoty proudu a otáček motoru bez zatížení v stáleném stavu odpovídají hodnotám z katalogu. Jelikož uvažujeme zjednodušený popis motoru, je zde přijatelná chyba. Model a jeho chování lze tedy považovat za korektní.



Obr. 27: Průběh otáček rotoru ASM bez zatížení



Obr. 28: Průběh proudu motorem ASM bez zatížení

Postup propojení co-simulace a exportování stavových proměnných do nástroje pro řízení Matlab je stejný jako v kapitole 7.1.

Pro návrh řízení se používá mnoho metod, každá pro jinou aplikaci, existuje tedy celá řada publikací, kde jsou tyto metody popsány, např. v níže uvedené literatuře [11].

8 Závěr

Modelování mechatronických soustav slučuje modely elektrické a mechanické části do jednoho celku za účelem využití synergického efektu. Takto vytvořené modely umožňují testování vyvíjených soustav bez použití reálného prototypu, což snižuje časové a finanční nároky na vyvíjený produkt. Jednou ze součástí těchto virtuálních prototypů jsou elektrické pohony, jejichž modelováním se zabývá tato práce.

V bakalářské práci jsou vytvořeny modely stejnosměrného motoru s permanentním magnetem, synchronního motoru s permanentním magnetem a asynchronního motoru s kotvou nakrátko. Ještě před tím, než byly tyto modely vytvořeny, bylo nutné provést krátkou rešerši jejich modelování, základních principů a popisu matematického vyjádření, aby bylo možné tyto znalosti uplatnit při jejich tvorbě a následném posouzení, zda svým chováním odpovídají reálné soustavě.

Při modelování virtuálních prototypů se vycházelo z nejjednoduššího popisu točivého elektrického stroje, a to ze stejnosměrného motoru s permanentním magnetem na rotoru. Ten je základem pro pochopení komplexnějších zapojení s ním, nebo jiných typů elektrických strojů. Vytvořením modelu stejnosměrného motoru v MSC.Adams a následnou co-simulací s externím nástrojem pro řízení Matlab/Simulink bylo skrze naladěný PID regulátor docíleno požadovaného chování. Takto vytvořený model se tedy nabízí pro další využití. Zvláště při jeho implementaci do složitějších modelů systémů, které tento stroj obsahují a vyžadují přesné dynamické chování, docílené vhodným návrhem řízení. Prokázalo se tak, že při modelování mechatronických soustav a jejich řízení je MSC.Adams v kombinaci s Matlabem/Simulink vysoce efektivním nástrojem pro vývoj nových produktů.

V další části byly vytvořeny modely strojů s nestacionárním magnetickým tokem ve vzduchové mezeře, tedy modely synchronního a asynchronního motoru. Jelikož je jejich matematický popis složitější, bylo nutné zavést mnohá zjednodušení. Následnými transformacemi do rotorových souřadnic byl získán zjednodušený tvar popisu, který byl vložen do mechanického modelu. Vzniklé virtuální prototypy lze opět slučovat se složitějšími modely soustav a doplnit skrze co-simulaci vhodným řídicím algoritmem, vyhovující pro specifické aplikace.

Lze tedy konstatovat, že všechny body této práce byly splněny. Modelování elektrických strojů je však dosti obsáhlé téma a lze ho jen obtížně shrnout do jedné bakalářské práce. Přichází tedy v úvahu možnost jejího dalšího rozšíření o podrobnější popisy, či návrh řídicích algoritmů, např. v podobě diplomové práce.

9 Citovaná literatura

- [1] MAIXNER, L.: *Mechatronika*. 2006, p. 280.
- [2] J. FRIDRICHOVSKÝ, J.: *Modelování a řízení mechatronických soustav v Solidworks a Labview*, Vysoké učení technické Brno, 2009.
- [3] MATLAB. [Online]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/MATLAB>.
- [4] FORIŠKA, A.: *Simulační modelování mechatronické soustavy manipulátoru v Adams*, Vysoké učení technické Brno, 2012.
- [5] PALČÁK, F., Hók, V.: *Authorized Training Center for MSC.ADAMS*, Bratislava.
- [6] KONEČNÁ, E., RICHTER, A.: *Elektrické stroje*, Technická univerzita Liberec, 2000.
- [7] ONDRUŠEK, Č.: *Elektrické stroje*, Vysoké učení technické Brno, 2007.
- [8] MĚŘIČKA, J., ZOUBEK, Z.: *Elektrické stroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1992.
- [9] BARTOŠ, V.: *Elektrické stroje*. Plzeň, 2006.
- [10] ROUBÍČEK, O.: *Elektrické motory a pohony*. Praha: Technická literatura BEN, 2004, p. 191.
- [11] KADANÍK, P.: *Řízení asynchronního motoru bez použití snímače rychlosti*. Disertační práce. Praha: FEL ČVUT v Praze, 2004.
- [12] HADAŠ, Z.: *Model based design*, FSI VUT Brno, 2012, p. 29.
- [13] PŘÍLESKÝ, L.: *Robot virtual prototype in Adams*, Vysoké učení technické Brno, 2012.
- [14] Maxon motor katalog. [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog>
- [15] ŠVARC, I.: *Automatické řízení*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 324 s. ISBN 978-80-214-3491-2.
- [16] TG-drivers motor katalog. [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.tgdrives.cz/servomotory/servomotory-rady-tgt/tgt3/>
- [17] *Mechatronics-fide design challenges and solutions for machine builders*. [online]. Dostupné z: <http://zone.ni.com/devzone/cda/pub/p/id/145>
- [18] THÖNDEL, E.: *Simulační model asynchronního stroje, FEL ČVUT v Praze, 2008*.

10 Seznam symbolů a použitých zkratek

ASM	asynchronní motor
BEM	boundary element method
CAD	computer-aided design
CFD	computational fluid dynamics
f	frekvence napájecího napětí
FEM	finite element method
i_a	proud protékající vinutím rotoru
i_d, i_q	proudy protékající vinutím statoru
$I_{rd(q)}$	proudy protékající vinutím rotoru
$I_{sd(q)}$	proudy protékající vinutím statoru
J	moment setrvačnosti rotoru
K_T	momentová konstanta
L_a	indukčnost vinutí rotoru
L_h	hlavní (magnetizační) indukčnost
L_r	indukčnost rotorového vinutí spolu s vlivem všech fází rotoru
L_s	indukčnost statorového vinutí spolu s vlivem všech fází statoru
L_S	indukčnost vinutí statoru
MBS	multi-body systém
M_i	vnitřní moment motoru
MSC	MacNeal-Schwendler Corporation
MTB	main toolbox
P	počet pólů statorového vinutí
R_a	odpor vinutí rotoru
R_r	odpor rotorového vinutí
R_s	odpor statorového vinutí
s	poměrný rozdíl otáček statorového mag. pole a rotoru, tzv. skluz
SMPM	synchronní motor s permanentním magnetem
SSMPM	stejnoseměrný motor s permanentním magnetem
u_a	výstupní napětí
u_d, u_q	napájecí statorová napětí
u_i	indukované napětí v kotvě vlivem otáčení ω
u_{ie}	napětí indukované na statoru vlivem otáčení magnetického toku ω_e
$U_{sd(q)}$	napájecí statorová napětí
Ψ_m	spražený magnetický tok
Ψ_r	celkový magnetizační tok fáze rotorového vinutí
Ψ_s	celkový magnetizační tok fáze statorového vinutí
ω	mechanická úhlová rychlost
ω_e	elektrická úhlová rychlost
ω_s	synchronní úhlová rychlost

11 Seznam obrázků

Obr. 1: Tradiční a mechatronický přístup k modelování soustav.....	8
Obr. 2: Návrh pomocí V-MODELU.....	8
Obr. 3: Úrovně modelování mechatronické soustavy.....	9
Obr. 4: Schéma co-simulace	11
Obr. 5: Definice elektrického stroje.....	12
Obr. 6: Principielní uspořádání stejnosměrného stroje	13
Obr. 7: Zapojení stejnosměrného stroje.....	13
Obr. 8: Náhradní schéma SSMPM	14
Obr. 9: Principielní uspořádání synchronního stroje	15
Obr. 10: Náhradní schéma SMPM v d-q souřadnicích.....	15
Obr. 11: Principielní uspořádání asynchronního kroužkového stroje	17
Obr. 12: Náhradní schéma ASM v d-q souřadnicích tzv. T-článek.....	17
Obr. 13: Schéma principielního uspořádání modelu SSMPM v nástroji Adams	20
Obr. 14: Model stejnosměrného motoru v MSC.Adams	21
Obr. 15: Průběh otáček rotoru SSMPM bez zatížení.....	22
Obr. 16: Průběh proudu rotorem SSMPM bez zatížení	23
Obr. 17: Schéma co-simulace pro SSMPM	23
Obr. 18: Nastavení pro export soustavy do Matlabu	24
Obr. 19: Regulační smyčka pro řízení SSMPM motoru PID regulátorem.....	25
Obr. 20: Odezva soustavy na skokovou změnu bez regulace.....	26
Obr. 21: Regulace polohy PID regulátorem	26
Obr. 22: Schéma principielního uspořádání modelu SMPM	27
Obr. 23: Model SMPM v MSC.Adams	28
Obr. 24: Průběh otáček rotoru SMPM bez zatížení	29
Obr. 25: Průběh proudu motorem SMPM bez zatížení	29
Obr. 26: Model asynchronního motoru v MSC.Adams.....	31
Obr. 27: Průběh otáček rotoru ASM bez zatížení.....	32
Obr. 28: Průběh proudu motorem ASM bez zatížení	32