

# Vývojové práce v elektrických pohonech

Pavel Komárek

ČVUT Praha, Fakulta elektrotechnická, K 314 Katedra elektrických pohonů a trakce  
Technická 2, 166 27 Praha 6-Dejvice

## Konference MATLAB 2001

### Abstrakt

Při návrhu pohonů a příslušných regulačních obvodů se neobejdeme bez simulačních nástrojů. Samotný MATLAB ale i Simulink jsou velice vhodný vývojový nástroj. Simulace elektrických strojů a jejich řídicích obvodů však znamená pouze významný dílčí krok ve vývoji skutečných aplikací. V současné době se při prezentování teoretické studie vyžaduje návaznost na praktické experimenty. Porovnání naměřených výsledků s výsledky teoretických simulací se stává samozřejmou součástí každé prezentace.

Na Katedře elektrických pohonů a trakce FEL ČVUT Praha se jako simulační nástroj používá převážně MATLAB a MATLAB/Simulink. Proto jsme se v minulém roce rozhodli zakoupit vybavení od firmy dSPACE - DS1103 podporované tímto simulačním nástrojem, abychom urychlili ověřování teoretických studií a také vývoj. V dalším se seznámíme s některými realizovanými experimenty.

### Slovo úvodem

Úvodem bych se chtěl zmínit o nákupu příslušenství pro vývojové pracoviště.

Jako příslušenství můžeme považovat počítač. Doporučení parametrů počítače pro jednodeskové systémy lze brát jako minimální nároky. Rozhodně se vyplatí k vývojovým nástrojům této kategorie zakoupit kvalitní a výkonný počítač, ušetří se tak spousta zbytečných problémů a čas. Vybírá-li se toto vybavení pro experimenty na několika různých místech, vyplatí se volit přenosný průmyslový počítač; opět parametrů vyšší třídy.

Další neocenitelná součást vývojového vybavení je konektorový panel, námi zakoupený CLP1103 s indikací, tj. redukce mezi konektory přímo na kartě a konektory běžně používanými (CANNON, BNC). Při přípravách experimentů si tak každý snadno zajistí potřebné propojení.

### Úvodní seznamovací experimenty

První pokusy byly jednoduché. Šlo o práci s bitovými I/O, kde se funkce sledovala na indikační části panelu. Potom se prováděli pokusy s A/D (sejmutí funkce generátoru) a D/A převodníky (zobrazení generované funkce osciloskopem).

Protože však karta byla zakoupena pro experimentální účely v elektrických pohonech, chystané experimenty se směřovaly hlavně k sejmutí analogových veličin (s vyhovující rychlostí) a ke generování PWM. PWM byla generována dvojím způsobem. Nejprve „manuálně“ prostřednictvím bitových I/O a později pouze integrovanou periférií SLAVE procesoru TMS320F240.

První způsob má tu výhodu, že je třeba si uvědomit koincidence signálu pily modulovaného na požadované poměrné sepnutí. Avšak z praktického hlediska dalšího využití odladěných algoritmů je tato práce zbytečná (kromě pedagogických účelů). Navíc jsme omezeni frekvencí spínání, která je dána krokem výpočtu.

### Používané vybavení

Na Katedře elektrických pohonů a trakce jsou k dispozici výrobky osazené výkonovou elektronikou a příslušným signálovým přizpůsobením vstupů a výstupů.

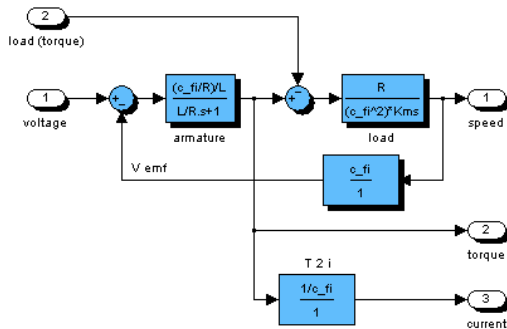
3f střídač s IGBT modulem Skiip 82AC06 a driverem SKHI60, navíc je vybaven měřicí elektronikou – čidla firmy LEM a zesílení. Čidla měří napětí a proud ss meziobvodu a dvě sdružená napětí a dva fázové proudy.

Blok osmi půlmůstků s IGBT. Tento výrobek je osazen proudovými čidly firmy LEM, která měří fázové proudy každého půlmůstku. V popisovaných experimentech (vyjma U/f řízení as. motoru) používáme vždy dva půlmůstky spojené se zátěží jako dvou, resp. čtyř, kvadrantový měnič.

... a další.

## Stejnosměrný cize buzený motor

Jedná se o typickou úlohu z regulační techniky v oblasti elektrických pohonů. Kde se zabýváme regulační smyčkou proudu a rychlosti. Uvažovaný matematický model motoru je na Obr. 1.



Obr. 1 Matematický model ss motoru

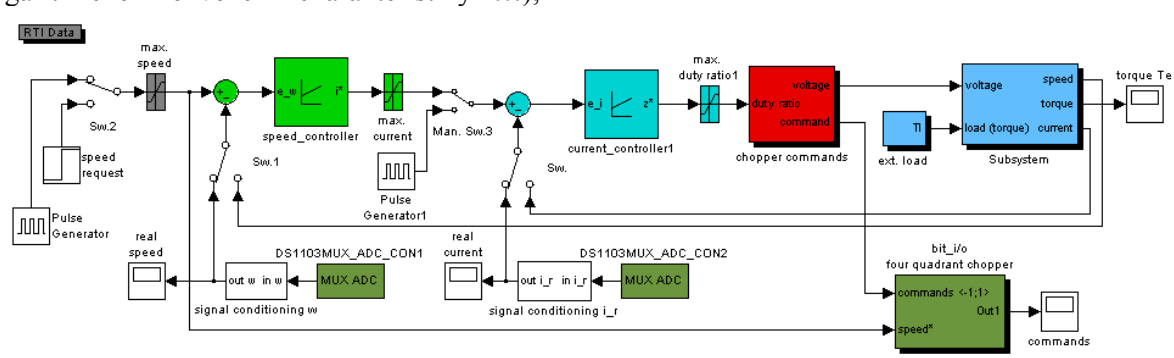
Zmiňované regulátory jsou obecně typu PID, možnost zadání všech tří konstant je ponechána pro případné přesné návrhy v dalším používání, buď v modelu nebo při experimentu s nástroji **dSPACE**. Po předchozích zkušenostech byl běžný integrátor v regulátorech nahrazen integrátorem s možností omezení přesycení, což odstraňuje problémy při trvalé regulační odchylce.

U proudového regulátoru v následujícím uvažujeme konstantu P, resp. P a I. U regulátoru rychlosti musíme navrhovat již obě konstanty P a I. Regulátor má vnitřní strukturu na obr. 2. a výsledný přenos s  $pk_?$ ;  $ik_?$ ;  $dk_?$  je uvažován následující:

$$F(s) = pk_? + \frac{ik_?}{s} + dk_? \cdot s$$

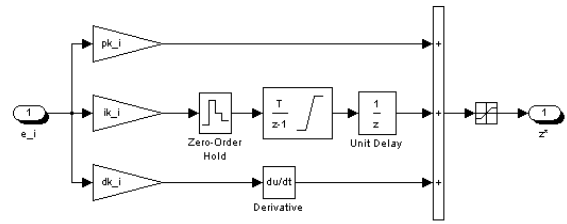
? ... nahrazuje typ regulátoru

Podle známých teorií můžeme použít spoustu metod (symetrické optimum, optimální modul, geometrické místo kořenů, logaritmické frekvenční charakteristiky ...),



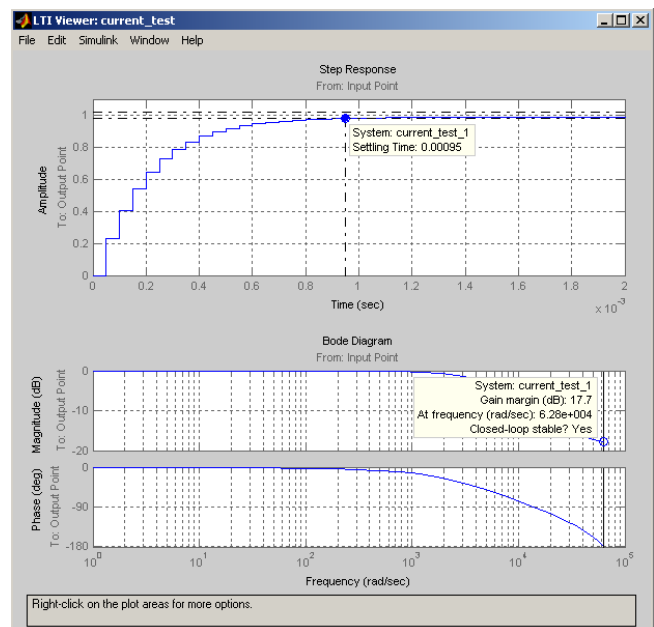
Obr. 4 Model regulačních smyček proudu a rychlosti

pro tuto úlohu je však volen postup odhadu konstant podle symetrického optima.



Obr. 2 Obecný PID regulátor

Jejich doladění proběhlo pomocí metody logaritmických frekvenčních charakteristik. Jako velice vhodný nástroj je k tomuto používán **LTI Viewer pro Simulink**, součást **Control System Toolbox**, více viz „[help\pdf\\_doc\control\get\\_start.pdf](#)“ v instalaci **MATLABu**.



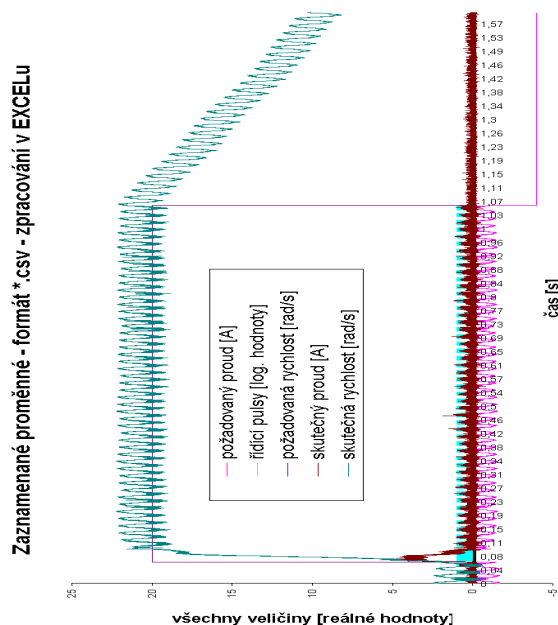
Obr. 3 Ukázka návrhu regulátoru – LTI Viewer

Jakmile máme navrženy a správně nastaveny regulační smyčky proudu a rychlosti, je odezva ss motoru je uspokojivá. I když výpočty probíhají v reálných veličinách, nemusíme se starat o přetečení proměnných jako v běžném programování procesorů s pevnou řádovou čárkou (slave procesor). Jediné, co musíme správně nastavit jsou přípustné intervaly všech veličin a úpravy zpětnovazebních signálů na reálný rozměr.

Vše bylo ověřeno praktickým experimentem, záleželo však na tom, zda jsme obvod kotvy napájeli z dvoukvadrantového nebo z čtyřkvadrantového měniče. Povel PWM se z výstupu regulátoru proudu nechaly snadno odvodit pro oba typy měničů. Je zřejmé, že dynamika u napájení čtyřkvadrantovým měničem byla podstatně lepší.

V software **ControlDesk** lze snadno přichystat ovládací panel celého experimentu, jak je vidět na Obr. 6. Sestavený panel Pro experimentování s teoreticky navrženy konstantami regulátorů plně pro potřeby studentů ve cvičení postačil.

Capture Settings Window umožňuje snadno nastavit ukládání určených veličin. Tato data lze ukládat jako soubory v \*.mat nebo \*.csv formátu.

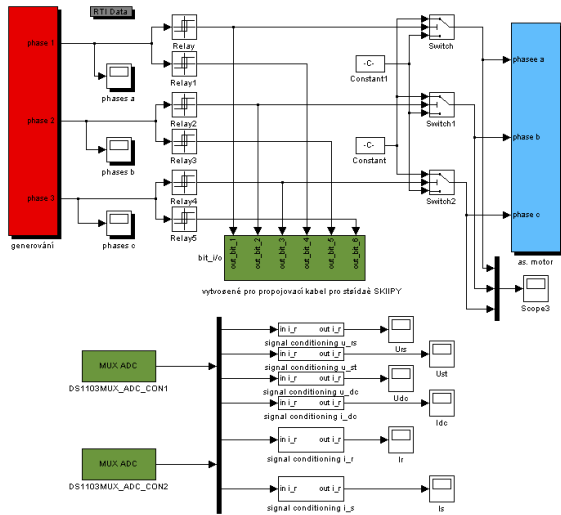


Obr. 5 Ukázka práce s daty – například EXCEL

Obr. 6 Control Desk a vytvořený panel

## U/f řízení asynchronního motoru

Podobným postupem byl realizován jednoduchý experiment s as. motorem. U/f řízení sleduje ve svém principu ideální využití stroje. To prakticky znamená při rostoucím požadavku rychlosti otáčení (napájecí frekvence) podle dané charakteristiky zvyšovat i napájecí napětí.



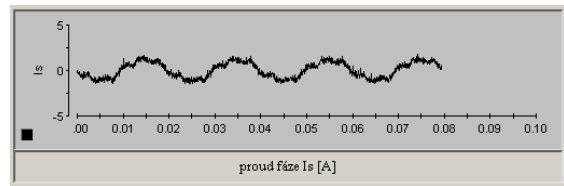
Obr. 7. Realizace U/f řízení as. motoru

Zvyšujeme-li a snižujeme-li požadovanou rychlost po nějaké křivce v čase, musíme se vypořádat se dvojí časovou závislostí argumentu goniometrické funkce. V tomto příspěvku však postačí zmínka o

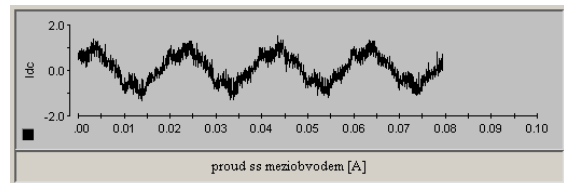
realizovatelnosti správného generování se základními bloky knihovny MATLAB/Simulink.

Generování povelů pro tranzistory (PWM) bylo zpočátku realizováno manuálním způsobem prostřednictvím I/O bitů (tj. koincidence signálu pily s definovanou úrovní, v pozdějším bylo s výhodou použito generování PWM periférií slave procesoru.

V Control Desk byl podobně jako pro experiment se stejnosměrným motorem sestaven ovládací panel. V průběhu měření šlo opět snadno ukládat naměřené veličiny



Obr. 8 Proud jedné fáze



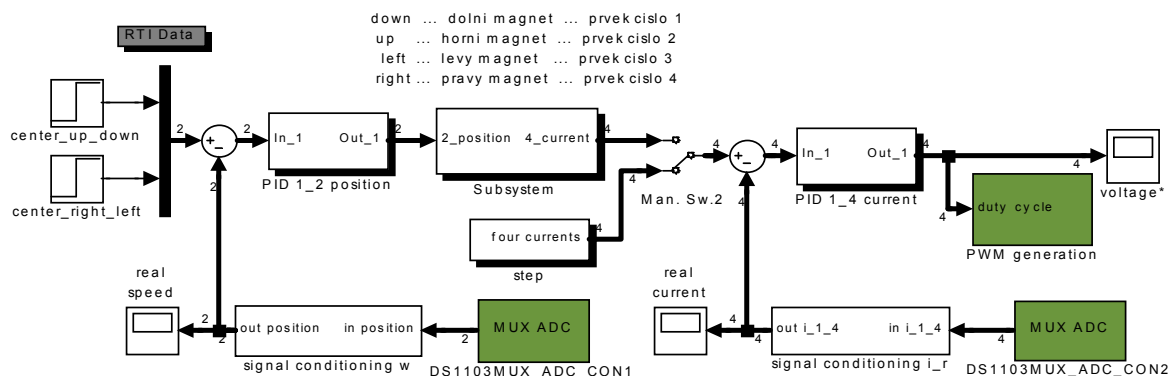
Obr. 9 Proud ss meziobvodem

## Řízení radiálního magnetického ložiska

Na katedře elektrických pohonů a trakce bylo před lety založeno experimentální pracoviště magnetických ložisek. Od té doby bylo radiální magnetické ložisko zrealizováno a bylo provedeno mnoho experimentů.

Vzhledem k tomu, že radiální ložisko znamená stabilizaci ve dvou osách, v dalším vždy uvažujeme (viz Obr. 10):

- dvě regulační smyčky polohy
- čtyři regulační smyčky proudu (napájení čtyř elektromagnetů)



Obr. 10 Schéma řízení radiálního magnetického ložiska

V prvních experimentech řízení realizovala analogová elektronika (operační zesilovače). Později se postupně tato řídicí část nahradila řízením procesorovou deskou D8201N1 (procesory TI C25 a INTEL 196). Během vývoje se prováděla různá měření a vyhodnocování naměřených údajů. Klíčovou studií se stala „identifikace magnetického ložiska.“ Pomocí řešení soustavy diferenciálních rovnic v **MATLABu** se zjišťoval matematický popis. Takové výpočty se prováděly pouze pro daná nastavení regulátorů (proudu i polohy), o kterých se dalo říci, že jsou nejlepší možná. Proto se při vyhovujícím matematickém popisu přistoupilo k optimalizaci regulátoru polohy za použití **Optimization Toolbox** a jeho kritérií „**Quasi-Newton**“ a „**Simplex search**.“ Pro tuto úlohu musela být vytvořena funkce tří proměnných

P,I,D. Průběh regulace s novými konstantami byl tak kvalitativně lepší.

V současné době bylo za použití **MATLAB/Simulinku** sestaveno regulační schéma a matematický model. Řízení bylo experimentálně ověřeno s kartou **DS1103**. Velice snadno a rychle tak byly ověřeny poznatky v návrhu parametrů regulátorů. Z posledních závěrů totiž vyplývá, že návrh regulátoru polohy není jen pouhé navržení tří konstant P,I,D. Regulátor by totiž měl mít zpoždění určitého řádu (2.), musí se tedy pro konkrétní typ navrhovat i příslušné časové konstanty.

Ověřování parametrů takového regulátoru je s vybavením **MATLAB/Simulink** a **dSPACE** relativně jednoduchá záležitost.

---

## Další chystané experimenty

### 1. Pracoviště magnetických ložisek

Vzhledem k zaměření autora na uložení magnetickým polem (magnetická ložiska, bezložiskové motory). Chystaný experiment je zřejmý. Probíhají přípravné práce na realizaci bezložiskového motoru.

Principiálně se jedná o synchronní motor s diskovým rotorem s permanentními magnety.

Matematický model samotného motoru i řízení se realizuje v **MATLAB/Simulinku**.

Uvažujeme pouze naměřená napětí a proudy cívek statoru, na základě kterých musíme dostatečně přesně určit úhel natočení rotoru. S touto informací víme tedy přesně který pól rotoru je u určitého pólového nastavce. Na základě těchto poznatků lze usuzovat podle změn indukčnosti cívek i na radiální vychýlení.

Na experimentálním ověření je potvrzení těchto úvah či nutnost použít čidla polohy. V tomto dílčím experimentu bude rotor uložen na ložiskách a řízení bude zajišťovat karta **DS1103**.

### 2. Pohon s asynchronním motorem

Jako další směřování představeného experimentu s asynchronním motorem je

realizace některé vylepšené metoda řízení. Mezi uvažované patří vektorové řízení, přímé řízení momentu DTC, ... a další.

---

V prezentovaných experimentech byly nastaveny parametry výpočtu:

Fixed-step ode5(Dormand-Prince) Fixed step size: 0.00005s Target file: rti1103.tlc

---

Ing. Pavel Komárek, vystudoval obor průmyslová elektronika na Katedře aplikované elektroniky FEL ZČU Plzeň. V současné době je třetím rokem doktorand na Katedře elektrických pohonů a trakce (K314) FEL ČVUT Praha a pod vedením Prof. Ing. Jiřího Pavelky, DrSc. se věnuje magnetickým ložiskům a bezložiskovým motorům.

ČVUT FEL - <http://www.feld.cvut.cz/cz/FEE/index.html>

Ing. Pavel Komárek - <http://web.iol.cz/komarekp/index.html>