

USE OF COMPLEX DYNAMIC MODELS IN DESIGN AND CONTROL OF WALKING ROBOTS

R. Grepl, Č. Ondrůšek, C. Kratochvíl¹

Summary: *The paper describes the design of complex dynamic model of quadruped walking mobil robot. Method of building of the numerical computational model and its simulating is shown. Complex model consist of submodels of robotic mechanism, DC motor, gearbox model and thermal model of electrical motor. In the paper is also discussed application of computational model directly for control of robot and also as a data generator for global and local approximation method, mainly artificial neural networks. Control algorithm is also considered in model.*

Keywords

walking robot, mobil robot modelling, dynamic model, multi body rigid system, Matlab–SimMechanics

1 Úvod

Vytvořený komplexní model (KMR) mobilního čtyřnohého kráčejícího robotu lze považovat za hlavní výstup práce [6]. Dáno je to i tím, že integruje některé z ostatních výsledků této práce a další zkušenosti s modelováním mobilních kráčejících robotů zveřejněné v [7, 10, 11, 12, 13].

Snaha navrhnout KMR vycházela z potřeby řešení některých problémů, které se jeví jako obtížně řešitelné, případně neřešitelné, pouze s využitím jednotlivých submodelů (kinematický, dynamický, tepelný, model motoru). Jedná se např. o:

- modelování momentového zatížení jednotlivých pohonů během pohybu robotu (důležité při návrhu parametrů převodového mechanismu a volbě motoru)
- volba optimálního nastavení parametrů regulátoru pohonů, dále vliv nepřesnosti řízení pohonů na zatížení motorů
- zjištění okamžitého elektrického výkonu odebíraného ze zdroje (důležité pro návrh baterií a výkonové elektroniky)



Ing. Robert Grepl, Prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc.:

Laboratoř mechatroniky a robotiky, ÚT AV ČR a ÚTMB FSI VUT v Brně,

Technická 2, 616 69, Brno, e-mail: grepl@umt.fme.vutbr.cz

Doc.Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.: ÚVEE FEKT VUT v Brně

- modelování vyšší úrovně řízení (reakce na vysoké oteplení motorů, úlohy udržení stability)

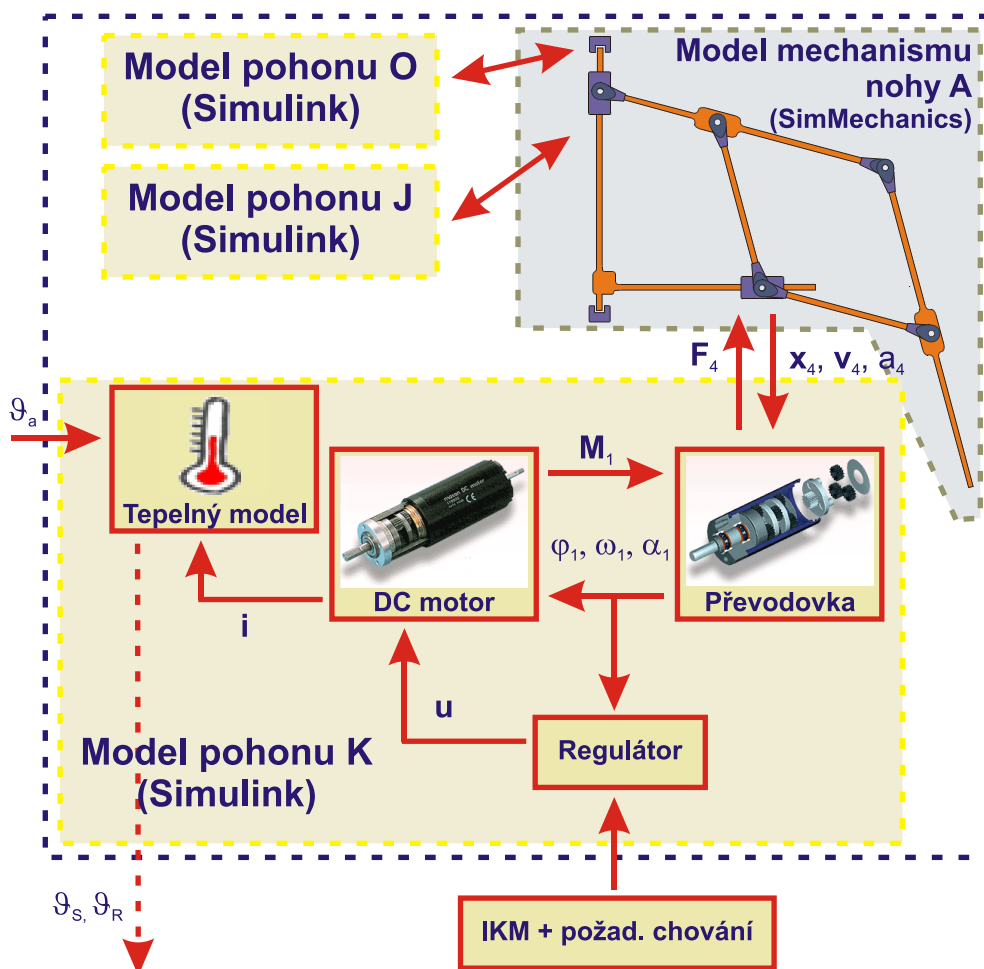
Současně s integrací submodelů do jednoho komplexního modelu roste i obtížnost jeho numerického řešení. Objevují se algebraické smyčky, které nelze odstranit, problémy numerické nestability vlivem různých časových konstant jednotlivých submodelů (stiff systémy) apod.

Následně je nutno si položit poněkud filosofickou otázku věrohodnosti takto složitých modelů. Vždy je nutné uvážit, budou výsledky alespoň orientačně užitečné. Často předznamenávají numerické obtíže také problémy praktické (kinematická singularita [2]), mnohdy je možné výsledky částečně zkontrolovat. Takovéto otázky je ale nutno klást i u jiných, ve vědecké i průmyslové praxi velmi rozšířených, typů numerických analýz (FEM).

2 Struktura KMR

Při návrhu KMR bylo nutno uvážit, jaké všechny problémy do modelování zahrnout a do jakých detailů při jejich popisu zajít. Vždy se jedná o otázky obtížnosti řešení, nalezení parametrů sestavených modelů a věrohodnosti výsledků, přičemž složitější model nemusí samozřejmě znamenat kvalitnější výsledky.

Zvolená struktura KMR je znázorněna na obr. 1.



OBR. 1: SCHÉMA KOMPLEXNÍHO MODELU (JEDNA NOHA ROBOTU)

KMR obsahuje následující submodely:

- model mechanismu robotu (SIMMECHANICS)
- model převodového ústrojí každého pohonu (SIMULINK)
- model stejnosměrného motoru každého pohonu (SIMULINK)
- model regulace pohonů (SIMULINK)
- tepelný model každého pohonu (SIMULINK)

Při návrhu jsme tedy přijali tato zjednodušení:

- neuvažujeme čepové tření v kloubech mechanismu (z hlediska dynamiky i statiky není podstatné ve srovnání s třecími odpory šroubového převodu; lze je velmi těžko odhadovat, v případě potřeby zpřesnění modelu by bylo nutné provést měření)
- kontakt nohy robotu s terénem uvažujeme bez prokluzu (samozřejmě se jedná o ideální případ, který v praxi nenastane, pro simulační výpočty však představuje značné zjednodušení a pro řadu výše popsaných problémů dostačuje)
- v naší práci se nezabýváme modelováním terénu, elektroniky, vyšších úrovní řízení, navigačních úloh atd., nemodelujeme ani zdroje energie robotu

KMR umožňuje vypočítat hodnoty momentů, proudů a oteplení motorů každého pohonu robotu při režimu statické chůze, kdy robot stojí třema nohama na zemi a čtvrtou přesouvá na jinou pozici (nemá kontakt s terénem). Přesouvat se může i těžiště (tělo) robotu.

Realizace KMR v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics je znázorněna na obr. 2 a 3.

3 Realizace jednotlivých částí KMR

3.1 Kinematika a dynamika mechanismu robotu

Inverzní kinematický model a dynamický model mechanismu robotu byly vytvořeny v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics. Poměrně podrobně jsme se touto problematikou zabývali v příspěvcích [7, 10, 11, 12]. Výsledná simulační schémata jsou na obr. 2 a 3.

3.2 Model převodového mechanismu

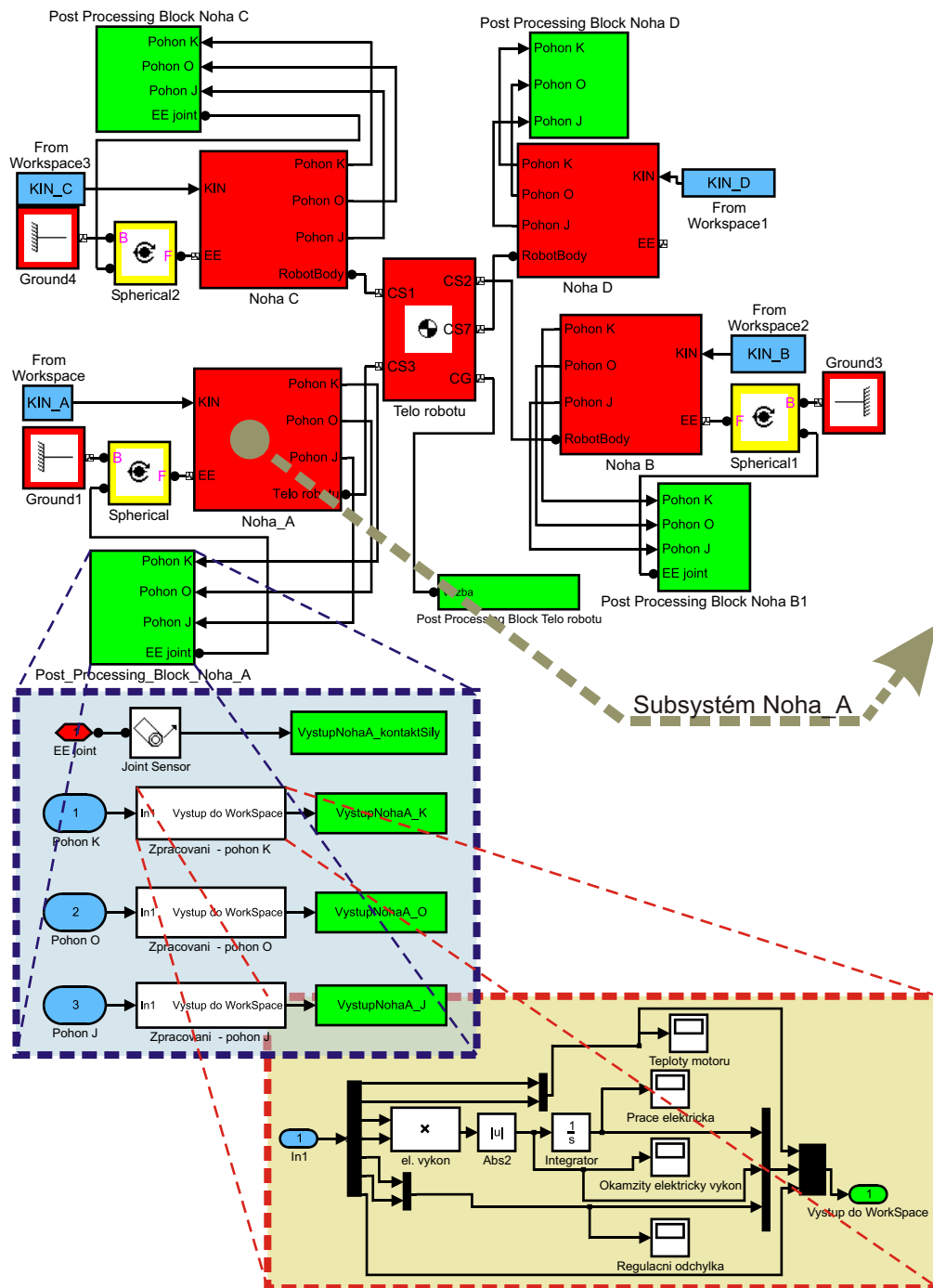
Každá noha robotu je osazena třemi pohonovými soustavami. Výkon se přenáší z motoru přes planetovou převodovku, soukolí s čelním ozubením a šroubový převod na nohu robotu.

Model převodového ústrojí byl vytvořen v prostředí SIMULINK. Převodovka je realizována v simulačním výpočtu pouze kinematicky, dynamické vlastnosti zahrnuté redukcí celkového momentu setrvačnosti na hřídel motoru. Zanedbáváme nepřesnosti a vůle v ozubení a šroubu, uvažujeme pouze převod

$$i_c = i_{12}i_{23}i_{34}[m^{-1}] \quad (1)$$

pro posuvný pohon bodů K a J . Z hlediska výkonového je nejvýznamnější vliv tření ve šroubu, kde se ztrácí přibližně polovina výkonu. Na planetové převodovce pak čtvrtina.

$$\eta_c = \eta_{12}\eta_{23}\eta_{34}[-] \quad (2)$$

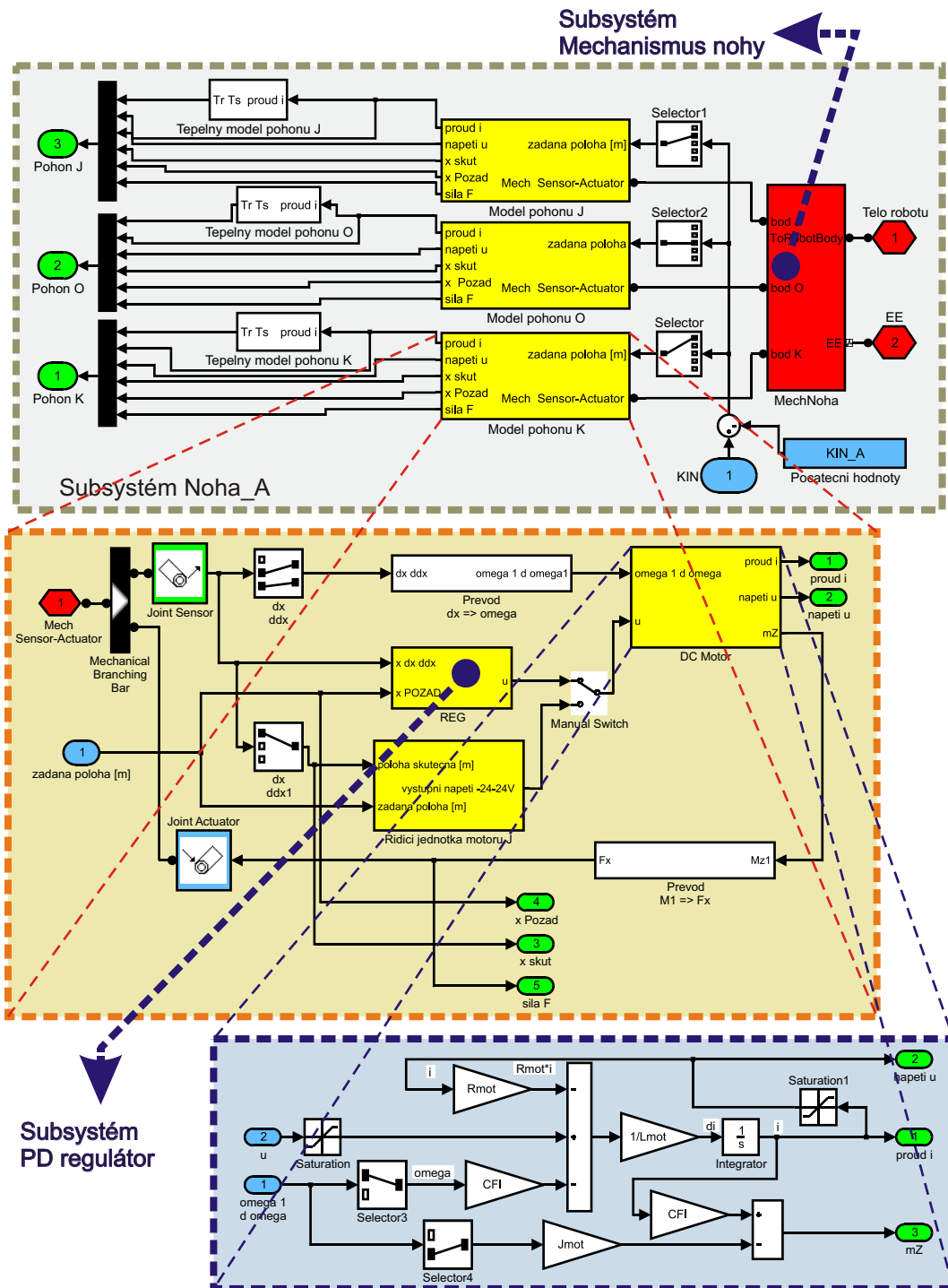


OBR. 2: KOMPLEXNÍ MODEL ROBOTU REALIZOVANÝ V SIMMECHANICS – PRVNÍ ČÁST

Výkon na výstupu (síla a rychlost posuvu bodu K a J) je pak tedy snížen o celkové ztráty v převodu.

V průběhu ladících simulačních výpočtů jsme experimentovali i s modelem převodu zahrnujícím řešení třetího momentu na šroubu podle klasických rovnic

$$M_3 = \frac{D}{2} |F_4| \tan(\gamma + \varphi) \quad (3)$$



OBR. 3: KOMPLEXNÍ MODEL ROBOTU REALIZOVANÝ V SIMMECHANICS – DRUHÁ ČÁST

$$M_3 = \frac{D}{2} |F_4| \tan(\gamma - \varphi) \quad (4)$$

kde rovnice 3 platí pro utahování a rovnice 4 pro povolování. Ukázalo se však, že takovéto modelování šroubu nemá na celkové výsledky podstatný vliv a představuje díky silné nelinearitě komplikaci pro numerické řešení.

3.3 Model stejnosměrného motoru

K modelování elektrické části komplexního modelu robotu jsme použili všeobecně známý lineární model stejnosměrného motoru s konstantním buzením (permanentsními magnety). Častý způsob zápisu je rovnicemi

$$u = R_m i + L_m \frac{di}{dt} + c\phi\omega \quad (5)$$

$$c\phi i = J_m \frac{d\omega}{dt} + m_z \quad (6)$$

kde u je napájecí napětí vinutí, R_m elektrický odpor rotoru, i proud ve vinutí, L_m indukčnost vinutí rotoru, $c\phi$ konstanta (závislá na konstrukci stroje), ω mechanická úhlová rychlost rotoru, J_m moment setrvačnosti rotoru a m_z mechanický zatěžovací moment. Po úpravě vhodné pro simulační software obdržíme

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_m}(u - R_m i - c\phi\omega) \quad (7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_m}(c\phi i - m_z) \quad (8)$$

přičemž hodnota konstanty $c\phi$ se dá vyjádřit pomocí mechanické časové konstanty motoru τ_m takto:

$$c\phi = \sqrt{\frac{J_m R_m}{\tau_m}} \quad (9)$$

Hodnotu napájecího napětí (v ustáleném stavu) pro požadovanou úhlovou rychlost motoru ω^* určíme z předpokladu konstantního proudu a úhlové rychlosti z rovnice 5. Po úpravě dostaneme:

$$u_{ust} = R_m \frac{M_z}{c\phi} + c\phi\omega^* \quad (10)$$

3.4 Model regulátoru pohonu

Během testování KMR jsme pracovali se dvěma regulátory:

- **vlastní polohový PD regulátor** - snahou byla co nejjednodušší implementace do prostředí SIMULINKU. Regulační veličina - napájecí napětí u se vypočte:

$$u = r_0(x - x^*) + r_1\dot{x}$$

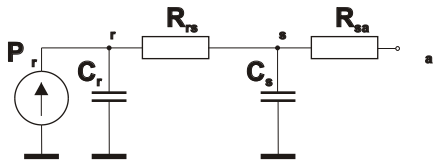
kde x^* je požadovaná poloha posuvné vazby v bodě K a J . Pro otočnou osu α se řeší podobně. Výhodou je užití derivační složky, která je přímo snímána v simulačním modelu. Tím odpadá nutnost další integrace veličiny x , což je z hlediska rychlosti výpočtu výhodné.

- **diskrétní polohový PI regulátor** vytvořený Michalem Bezdíčkem v rámci diplomové práce v r. 2003([9, 8]). Model regulátoru byl navržen za účelem urychlení nastavení a ověření vlastností regulátoru na fyzikálním modelu, kde regulaci realizuje mikrokontroler ADUC814.

Pro oba použité regulátory KMR fungoval, z pochopitelných důvodů byl výpočetně rychlejší regulátor PD. V simulačním modelu jsme volbu regulátoru realizovali manuálním přepínačem.

3.5 Tepelný model pohonu

Motor Maxon použitý v pohonových soustavách robotu se konstrukčně významně liší od klasického stejnosměrného motoru. Nepohybující se stator s permanentními magnety je uvnitř samonosného rotoru („bezželezný“ rotor).



OBR. 4: SCHÉMA TEPELNÉ SÍTĚ SE DVĚMA UZLY

obr. 4 odpovídá následující dynamický model.

$$C_r \frac{d\vartheta_r}{dt} + \frac{1}{R_{rs}}(\vartheta_r - \vartheta_s) = P_r \quad (11)$$

$$C_s \frac{d\vartheta_s}{dt} + \frac{1}{R_{rs}}(\vartheta_s - \vartheta_r) + \frac{1}{R_{sa}}(\vartheta_s - \vartheta_a) = 0 \quad (12)$$

$$P_r = R_w I^2 \quad (13)$$

$$R_w = R_w^{25}(1 + \alpha_{Cu}(\vartheta_r - 25)) \quad (14)$$

$$R_{sa} = k_s S (\vartheta_s - \vartheta_a)^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

kde

α_{Cu} je koeficient tepelného odporu mědi (= 0,00392 1/K)

R_w^{25} je elektrický odpor vinutí při teplotě 25 °C

R_{rs} je tepelný odpor mezi rotorem a státorem

R_{sa} je tepelný odpor mezi státorem a okolím – je závislý na součinu k_s (součinitel tvaru) a S (plocha statoru)

I je elektrický proud přiváděný do vinutí

ϑ_r , ϑ_s a ϑ_a jsou teploty rotoru, statoru a okolí

C_r a C_s jsou tepelné kapacity rotoru a statoru

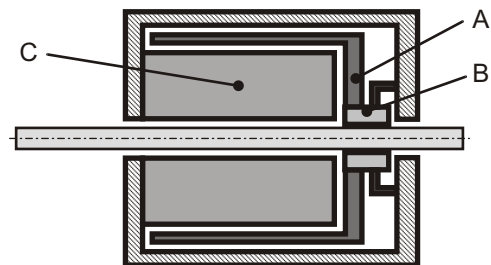
Tepelný odpor R_{rs} vyjadřuje převážně přenos tepla vedením z rotoru přes vzduchovou mezeru na plášť a pak přes plášť až na jeho povrch. Je možné ho považovat za konstantní. Oproti tomu odpor R_{sa} charakterizuje přenos tepla radiací a přirozenou konvekcí a proto je nutno uvažovat jeho závislost podle Stefan–Boltzmannova zákona.

4 Výsledky simulace KMR

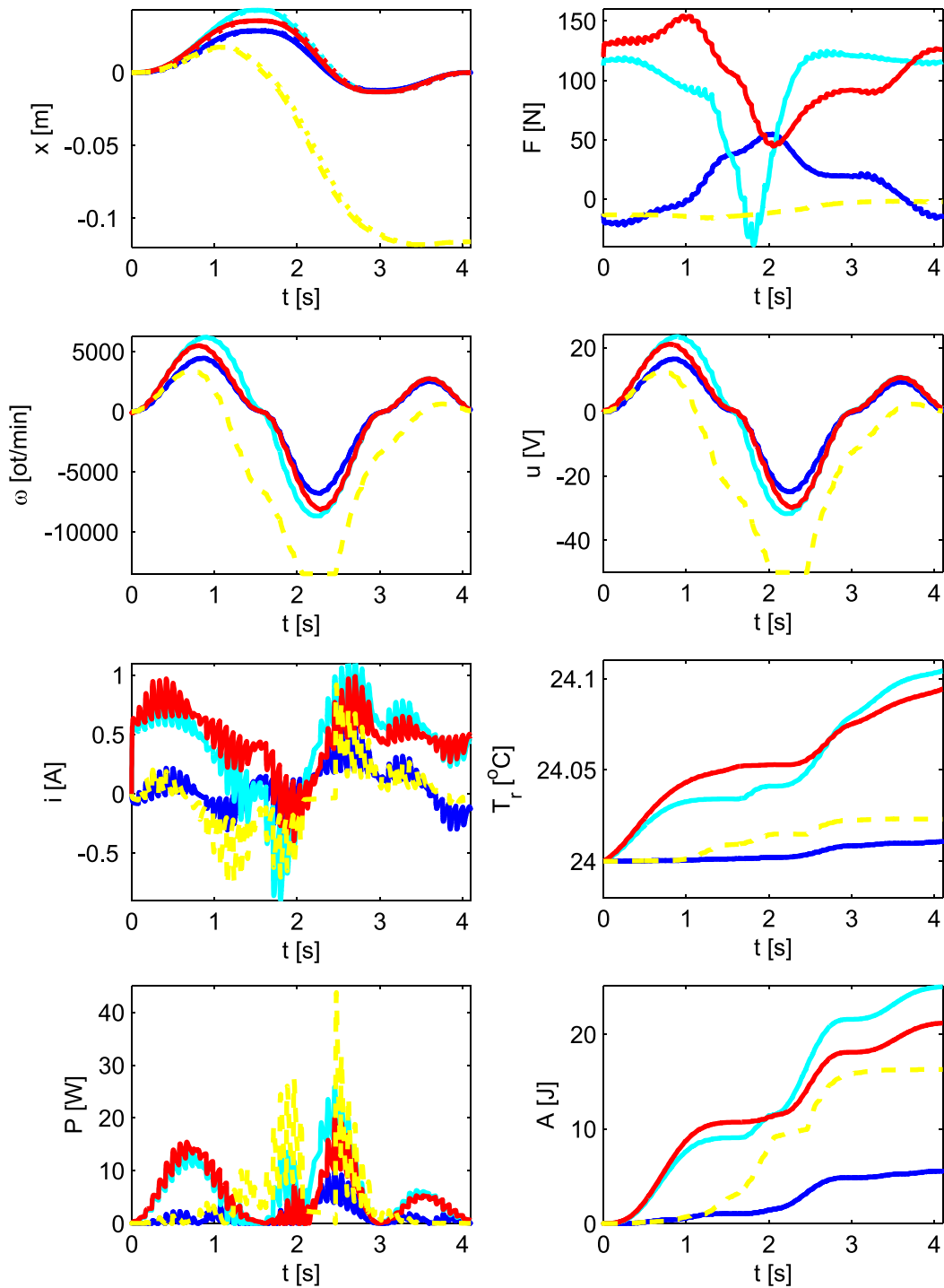
Možné využití KMR ukážeme na příkladu analýzy jednoduchého pohybu těla robotu. Robot stojí ve staticky stabilní poloze na třech nohách, čtvrtá noha je volná. Je nadefinován jednoduchý pohyb těla robotu, tři nohy zůstávají v kontaktu s terénem, čtvrtá se bez jiného vnějšího zatížení přesouvá. Provedeme simulaci a graficky pak vykreslíme hodnoty sil a rychlostí v pohonech, napětí a proudy na motorech, kvalitu regulace a elektrický výkon a práci celého robotu.

Díky tomuto uspořádání se motor vyznačuje velmi malým momentem setrvačnosti a příznivějšími tepelnými parametry (menší tepelné odpory). Schématický průřez motorem je na obr. 5.

Na základě studia literatury a analýzy výsledků několika numerických experimentů jsme zvolili nejjednodušší možnou strukturu tepelné sítě se dvěma uzly (rotor, stator). Schématu takovéto sítě uvedenému na



OBR. 5: SCHÉMATICKÝ PRŮŘEZ MOTOREM (A–VINUTÍ, B–KOMUTÁTOR, C–PERM. MAGN.)



OBR. 6: VÝSLEDKY SIMULACE PRO POHON J (MODRÁ – NOHA A, SVĚTLE MODRÁ – NOHA B, ČERVENÁ – NOHA C, ŽLUTÁ – POHYBUJÍCÍ SE NOHA D)

5 Závěr

V prostředí MATLAB byl vytvořen komplexní dynamický model čtyřnohého kráčejičho robotu (KMR). Mechanická část soustavy byla modelována pomocí MATLAB/SIMULINK/SimMechanics, modely pohonů zahrnující elektromotor, převodové ústrojí a regulaci, stejně tak jako tepelné modely elektromotorů byly realizovány v čistém SIMULINKU. Všechny části komplexního modelu jsou vytvořeny parametricky, čímž je umožněna velmi jednoduchá změna konstrukčních

parametrů bez zásahu do vlastního modelu.

Vytvořený komplexní model umožňuje analyzovat chování robotu při statické chůzi, kdy jsou v dotyku s terémem tři nohy, tělo robotu a čtvrtá noha se pohybuje. Z modelu lze získat informace o velikosti sil v koncových bodech došlapu, momentovém zatížení motorů, proudu a napětí na nich. Dále lze zjistit silové zatížení kloubových spojení mechanismu, což může být užitečné při návrhu konstrukce. Velmi jednoduše lze testovat kvalitu a vlastnosti regulačních algoritmů jednotlivých pohonů. Díky znalosti chování každého z motorů je možné určit okamžitý odebraný výkon ze zdroje i celkově spotřebovanou energii při definovaném pohybu.

Praktická využitelnost dynamického modelu vytvořeného v SIMMECHANICS byla prokázána při návrhu řízení fyzikálního modelu nohy robotu. V SIMULINKU byly ke komplexnímu modelu jedné nohy přidány bloky regulace a opakovaným provedením simulačních výpočtů se určily konstanty regulátorů. Následně se provedlo naprogramování mikrokontrolerů a prototyp fungoval. Detailně je postup popsán v příspěvku [8] a diplomové práci [9].

Poděkování

Práce vznikla za podpory pilotního projektu ÚT AV ČR č. 52020 „Realizace základních řídicích členů kráčivého robotu“ a projektu MŠMT MSM 262100024 „Výzkum a vývoj mechatronických soustav“.

Reference

- [1] WOOD, G.D.: *Simulating mechanical systems in Simulink with SimMechanics*, The MathWorks Inc., www.mathworks.com, 2002
- [2] MIČEK P.: *Omezení vlivu singularit při posuzování neuro-fuzzy modelu*, Engineering Mechanics 2002, Svratka, Czech Republic
- [3] HOUŠKA, P., BŘEZINA, T., SINGULE, V.: *Koncepce mechatronické soustavy nohy kráčivého robotu*, Inženýrská mechanika 2002, Svratka, Česká republika, 2002
- [4] HOUŠKA, P., BŘEZINA, T., SINGULE, V.: *Control and synchronization drive unit of leg of walking robot*, Mechatronics, Robotics and Biomechanics 2003, international conference, Hrotovice, Czech Republic, 2003
- [5] VLACH, R.: *Řízení ventilace elektrického stroje s využitím metod umělé inteligence*, disertační práce, Ústav mechaniky těles, FSI, VUT v Brně, 2002
- [6] GREPL, R.: *Využití komplexních dynamických modelů při návrhu a řízení kráčejícího robotu*, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, FSI VUT v Brně, disertační práce, 2004
- [7] GREPL, R.: *Dynamic model for stability control of walking robot*, Colloquium Dynamics of Machines 2004, Praha, 10.-11.2., 2004
- [8] BEZDÍČEK, M., SAJFRT, L., GREPL, R.: *Návrh řízení servopohonů pantografické nohy v SimMechanics*, Výpočtová mechanika 2003, Nečtiny, Česká republika, 2003
- [9] SAJFRT, L., GREPL, R.: *Inverzní kinematické řízení pohybu pantografické nohy robotu*, diplomová práce, ÚMT FSI VUT v Brně, 2003
- [10] GREPL, R.: *Kinematic and Dynamic Modelling of Quadruped Walking Robot*, Mechatronika 2003, 6th International Symposium On Mechatronics, 18.-20. června, Trenčianské Teplice, Slovensko, 2003

- [11] GREPL, R., ONDRŮŠEK, Č.: *Inverzní kinematické modelování v SIMMECHANICS a jeho aplikace na robotické mechanismy*, Inženýrská mechanika 2003, 12.-15. května, Svratka, Česká republika, 2003
- [12] GREPL, R.,KRATOCHVÍL,C.: *Robotic Leg Inverse Dynamic Modelling and Design Optimization in SimMechanics*, Mechatronics, Robotics and Biomechanics 2003, mezinárodní konference, Hrotovice, Česká republika, 2003
- [13] GREPL, R.,KRATOCHVÍL,C.: *Inverzní kinematický model robotické nohy metodou Lazy Learning*, Výpočtová mechanika 2002, 29.-31. října, Nečtiny, Česká republika, 2002