

TAČR Centrum kompetence CIDAM

SW Library for control of special kinematic structures developed
for robots operating in chemically aggressive environments

Výzkumná zpráva WP5-DV095

(Algorithms for direct and inverse kinematic transforms, static and dynamic compensation models for the special structures developed in WP5 implemented in form of functional blocks library for use in proper real time control system. User documentation and examples of use will be included.)

Martin Švejda

3. ledna 2019

T A

Č R



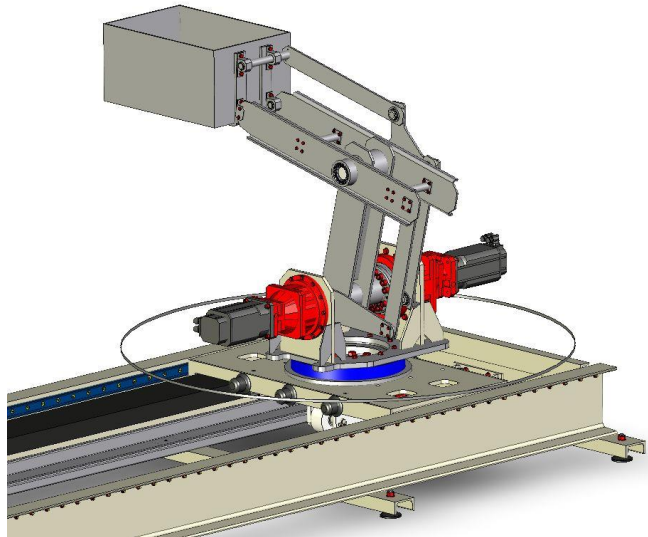
Obsah

Úvod	3
Manipulátor typu Zakladač	4
Kinematická a dynamická analýza	4
Dynamická analýza a návrh výrobní řady manipulátoru typu Zakladač.....	8
Malá varianta – nosnost 50 kg	9
Malá varianta (50 kg): Extremální polohy v pracovním prostoru.....	10
Střední varianta – 150 kg (optimalizace).....	11
Střední varianta (150 kg): Extremální polohy v pracovním prostoru	12
Velká varianta – 500 kg (optimalizace).....	13
Velká varianta (500 kg): Extremální polohy v pracovním prostoru	14
Finální varianta manipulátoru Zakladač (dynamická analýza CAD modelů)	15
Malá varianta – nosnost 50 kg	15
Střední varianta – nosnost 150 kg.....	16
Velká varianta – nosnost 500 kg.....	17
Manipulátor typu Vodník	18
Kinematická a dynamická analýza	18
Finální varianta manipulátoru Vodník (dynamická analýza CAD modelů)	20
Závěr.....	24
Přílohy.....	25
Reference	26

Úvod

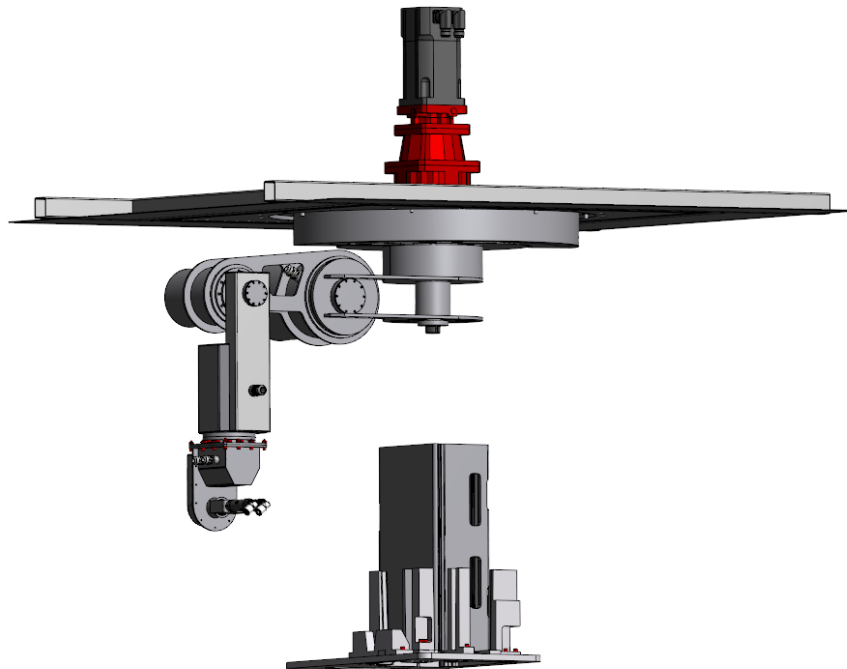
V rámci předložené výzkumné zprávy byly shrnuty a dokončovány všechny podklady pro úspěšnou realizaci řídicího systému obou navržených robotických manipulátorů:

- 1) Manipulátor typu „Zakladač“ (4DoF manipulator), dále jen *Zakladač*



Obr. 1: Manipulátor typu Zakladač

- 2) Manipulátor typu „Vodník“ (7DoF manipulator), dále jen *Vodník*



Obr. 2: Manipulátor typu Vodník

Jedná se především o souhrn algoritmizací (implementovaných v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics) pro řešení:

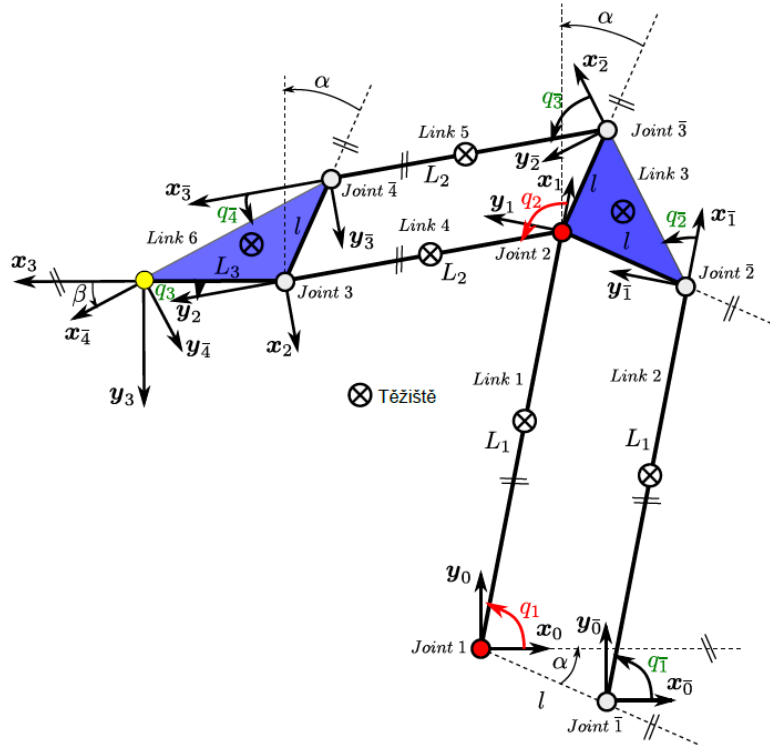
- Přímé a inverzní kinematické a dynamické úlohy
- Inverzní dynamické úlohy
- Optimalizaci délkových rozměrových parametrů ramen manipulátorů na zjednodušeném dynamickém modelu s unikátním kritériem optimality (minimalizace momentů pohonů v pracovním prostoru)
- Podrobnou dynamickou analýzu založenou na skutečném 3D modelu konstrukcí manipulátorů (v podobě 3D CAD modelů)
- Návrhové algoritmy plánování trajektorie pohybu (včetně algoritmů pro optimální plánování redundantních kinematických architektur)

Předložená technická zpráva se odkazuje nejen na již prezentované technické zprávy, viz kapitola *Reference*, ale především na navazující dosud neprezentované technické reporty v kapitole *Přílohy*.

Manipulátor typu Zakladač

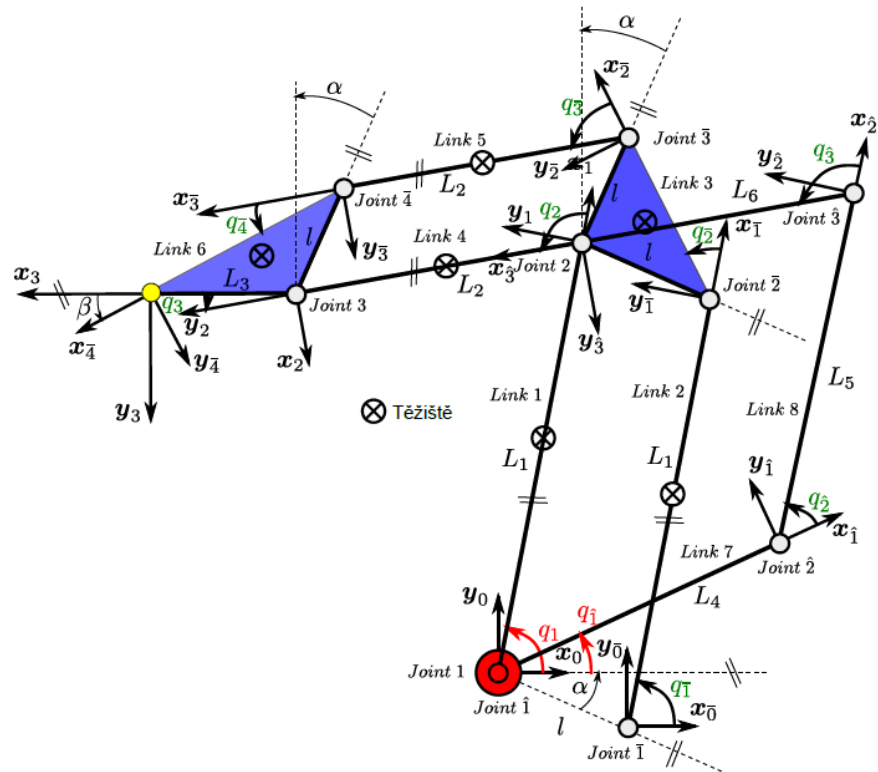
Kinematická a dynamická analýza

Přímá a inverzní kinematická a dynamická úloha pro manipulátor typu Zakladač byla podrobně odvozena a implementována v technické zprávě [2] v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics. Představená první varianta Zakladače, viz Obr. 3, využívala paralelní kinematickou architekturu pouze za účelem ustavení koncového efektoru v konstantní orientaci a jeden z pohonů byl nesen na konci prvního ramene. V rámci výzkumné činnosti byl navržen unikátní optimalizační algoritmus pro nalezení optimálních délek ramen manipulátoru (při předpokladu zjednodušeného dynamického modelu ramen – „tyčkový“ model ramen). Optimalizační algoritmus využíval nové kritérium optimality pro možnosti minimalizace silových momentů aktuátorů v pracovním prostoru robotu s požadavkem na možné zrychlení koncového efektoru v libovolném směru.



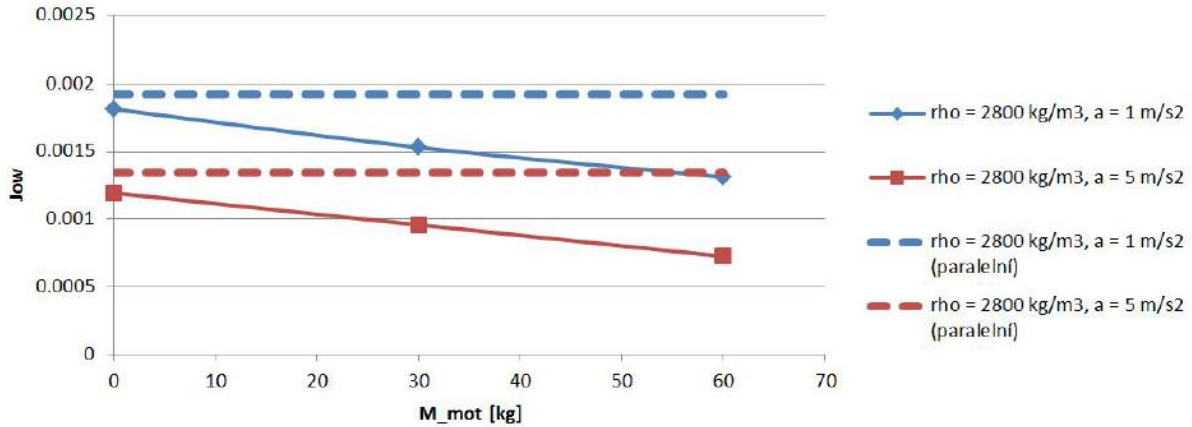
Obr. 3: První kinematická architektura manipulátoru typu zakladač (pohony q_1 – na základně, q_2 - nesený)

Navržený manipulátor byl dále vylepšen o možnosti využití přídatného kinematického řetězce, který umožnil umístění původně neseného pohonu na základnu manipulátoru, viz Obr. 4. Opět byly odvozeny a implementovány příslušné kinematické a dynamické modely, viz technická zpráva [1] a provedena optimalizace rozměrů manipulátoru.

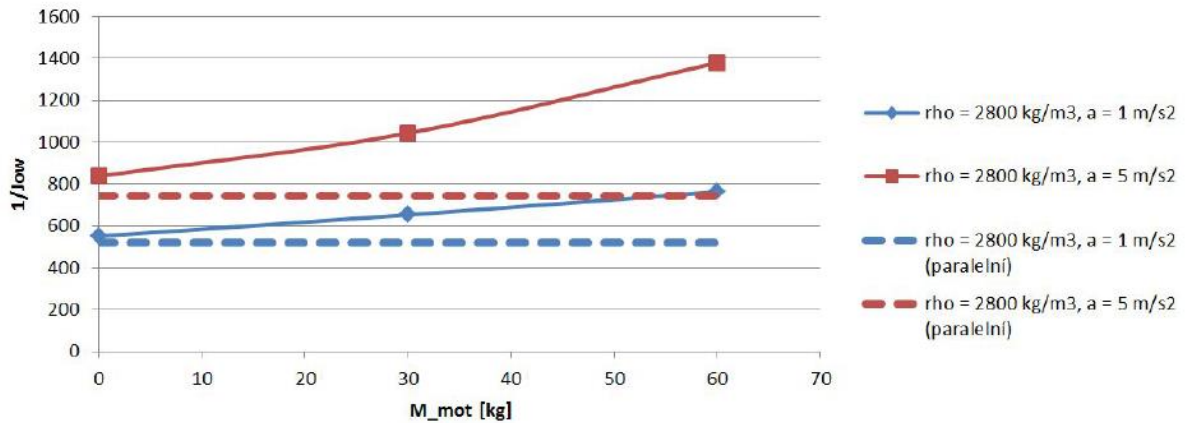


Obr. 4: Vylepšená kinematická architektura manipulátoru typu zakladač (oba pohony q_1 , q_2 umístěné na základně)

Navíc bylo provedeno porovnání obou uvažovaných kinematických architektur manipulátorů a zhodnoceno, že využití paralelních manipulátorů má smysl pro účely uvažovaného použití. Příklad výsledků porovnání optimalizovaných architektur manipulátorů pro ramena z „lehké“ slitiny hliníku v závislosti na rostoucí hmotnosti neseného pohonu M_{mot} (v první variantě manipulátoru) jsou demonstrovány na Obr. 5.

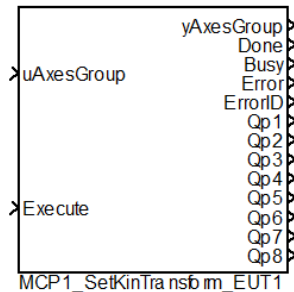


(a) Hodnota kritéria optimality J_{ow} pro optimální parametry.



Obr. 5: Kritérium optimality pro opt. parametry navržených délek ramen manipulátorů a různá uvažovaná zrychlení koncového efektoru v pracovním prostoru ($1/J_{ow}$ odpovídá maximálnímu požadované normě momentů aktuátorů v pracovním prostoru), varianta s pohonem q_2 na základně znázorněna čárkovaně

V rámci implementace řídicího algoritmu do řídicího systému reálného času REXYGEN [3] byl implementován blok *MCP1_SetKinTransform_EUT1*, viz Obr. 6, který je součástí knihovny *uwblib* a je kompatibilní s normou *PLCopen Motion Control* (<http://www.plcopen.org>).



Obr. 6: Blok výpočtu kinematických úloh v REXYGEN

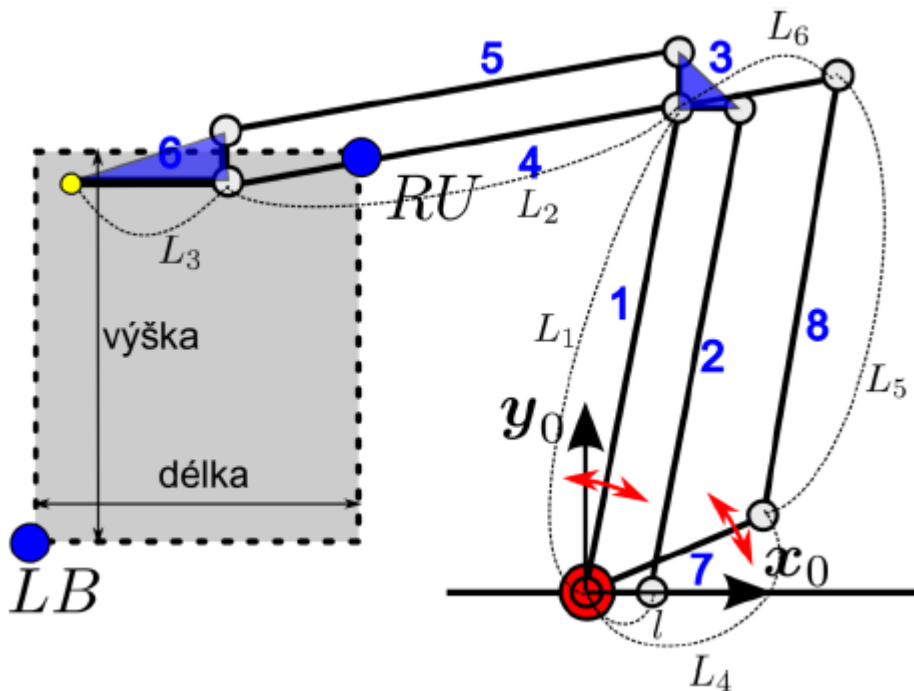
Dynamická analýza a návrh výrobní řady manipulátoru typu Zakladač

Prvotní (zjednodušená) optimalizace konstrukčních délek ramen robotu byla omezena na následující předpoklady, viz [1, 2]:

- Zjednodušený dynamický model robotu („tyčkový“ model = ramena modelovány jako válcové tyče, pohony modelovány jako hmotné body)
- Minimalizace max. normy silových momentů pohonů uvnitř pracovního prostoru robotu pro požadované zrychlení do libovolného směru (viz výše)

Vzhledem k faktu, že v samotném procesu optimalizace rozměrů ramen manipulátoru není možné zahrnout všechna reálná omezení vyplývající z možností technické (konstrukční) realizace prototypu, bylo nutno optimalizované rozměry manipulátoru důsledně konzultovat s partnerem Eurotec JKR s.r.o. (partner odpovědný za konstrukční práce). Jako výsledek vzájemných konzultací vznikly dosud neprezentované reporty, viz [Příloha 1 - 3], shrnující výsledky dílčích optimalizací a zahrnující identifikovaná konstrukční omezení (např. změna mezí intervalů hledaných rozměrů ramen, atd.).

V rámci aktivity byla navržena výrobní řada manipulátoru Zakladač, viz Obr. 7, s následujícími výsledky, více detailů, viz [Příloha 3]:



Obr. 7: Výsledná kinematická architektura robotu typu Zakladač

Malá varianta – nosnost 50 kg

Velikost pracovního prostoru (boxu)

	Šířka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]
Požadavek	400	600	300
Optimalizováno (+ rezerva)	Irelevantní	800	385
Box LB, RU (v s.s. F0)	LB = [-1510,140]		RU=[-710,525]

Nosnost: M = 50 kg

Uvažované kritérium optimalizace rozměrů (maximální norma momentu na aktuátorech (τ_1, τ_2), aby se mohl robot rozjet se zrychlením 1 m/s² z nulové rychlosti do libovolného směru):

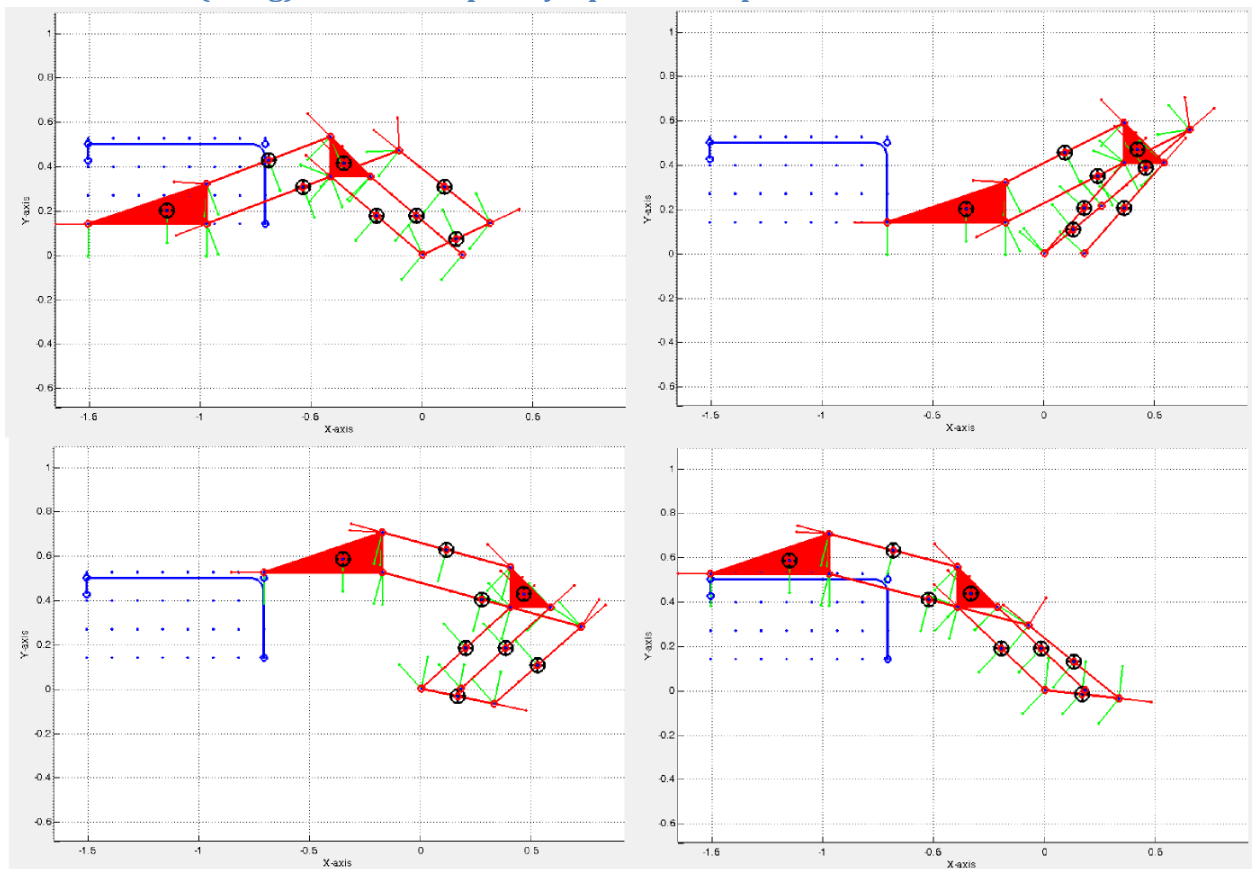
$$\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} = 916.2883 \text{ [Nm]}$$

Optimalizované hodnoty rozměrů:

L3, L ... odměřeno z původního CAD výkresu EUROTEC k 14. 10. 2016

L1	L2	L3 (neoptimalizováno)	L4	L5	L6	L (neoptimalizováno)
0.545	0.599	0.535	0.336	0.525	0.331	0.18

Malá varianta (50 kg): Extremální polohy v pracovním prostoru



Střední varianta – 150 kg (optimalizace)

Velikost pracovního prostoru (boxu)

	Šířka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]
Požadavek	400	800	400
Optimalizováno (+ rezerva)	Irelevantní	1000	500
Box LB, RU (v s.s. F0)	LB = [-1710,140]		RU=[-710,640]

Nosnost: M = 150 kg

Uvažované kritérium optimalizace rozměrů (maximální norma momentu na aktuátorech (τ_1, τ_2), aby se mohl robot rozjet se zrychlením 1 m/s² z nulové rychlosti do libovolného směru):

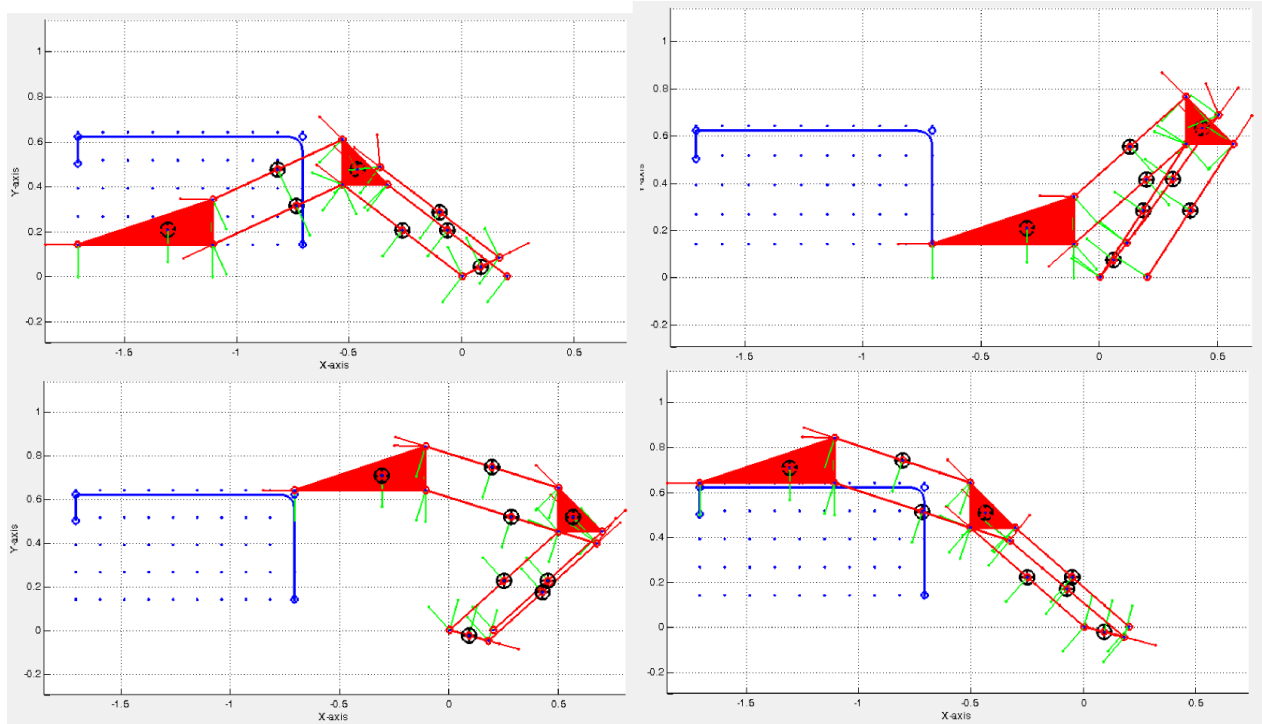
$$\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} = 2042 \text{ [Nm]}$$

Optimalizované hodnoty rozměrů:

L3, L ... poměrně navýšeno

L1	L2	L3 (neoptimalizováno)	L4	L5	L6	L (neoptimalizováno)
0.671	0.636	0.6	0.184	0.666	0.184	0.2

Sřední varianta (150 kg): Extremální polohy v pracovním prostoru



Velká varianta – 500 kg (optimalizace)

Velikost pracovního prostoru (boxu)

	Šířka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]
Požadavek	800	1200	950
Optimalizováno (+ rezerva)	Irelevantní	1400	1050
Box LB, RU (v s.s. F0)	LB = [-2110,140]		RU=[-710,1090]

Nosnost: M = 500 kg

Uvažované kritérium optimalizace rozměrů (maximální norma momentu na aktuátorech (τ_1, τ_2), aby se mohl robot rozjet se zrychlením 1 m/s² z nulové rychlosti do libovolného směru):

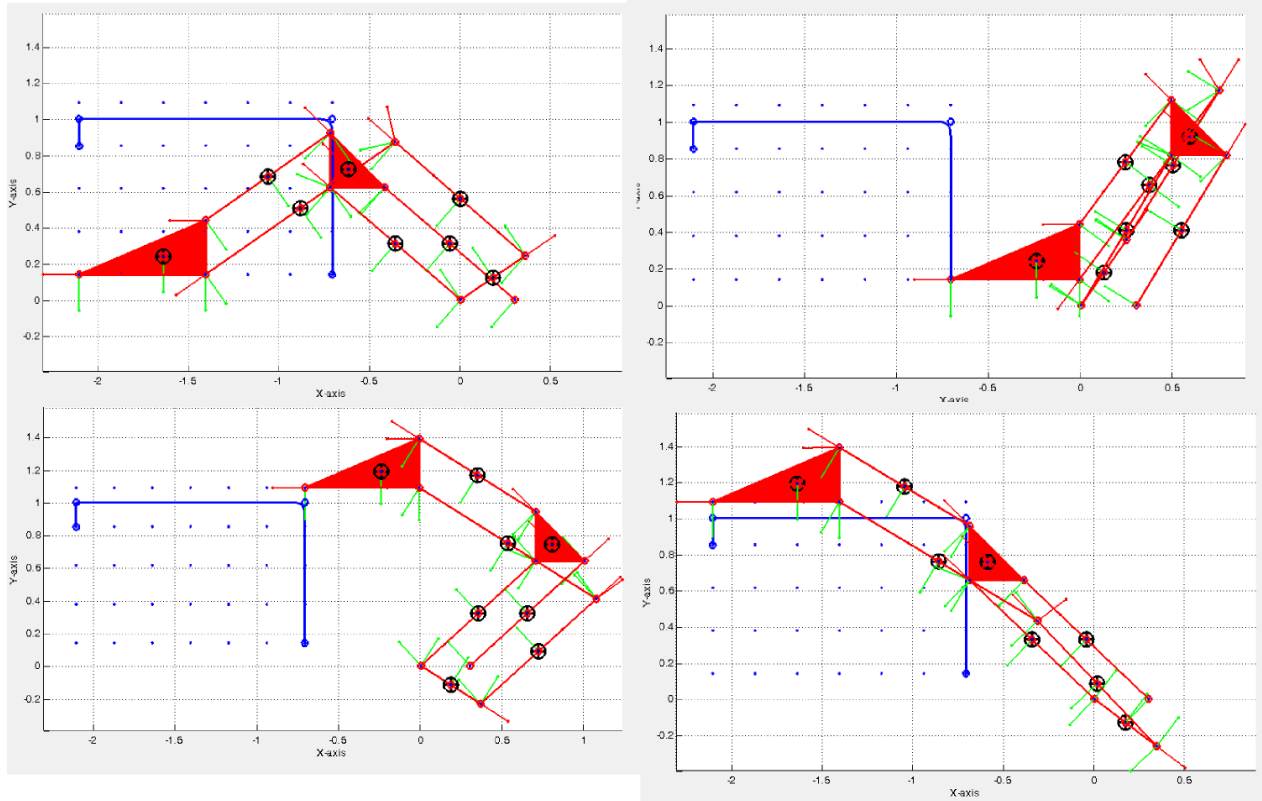
$$\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} = 7899 \text{ [Nm]}$$

Optimalizované hodnoty rozměrů:

L3, L ... poměrně navýšeno

L1	L2	L3 (neoptimalizováno)	L4	L5	L6	L (neoptimalizováno)
0.952	0.841	0.7	0.433	0.956	0.438	0.3

Velká varianta (500 kg): Extremální polohy v pracovním prostoru



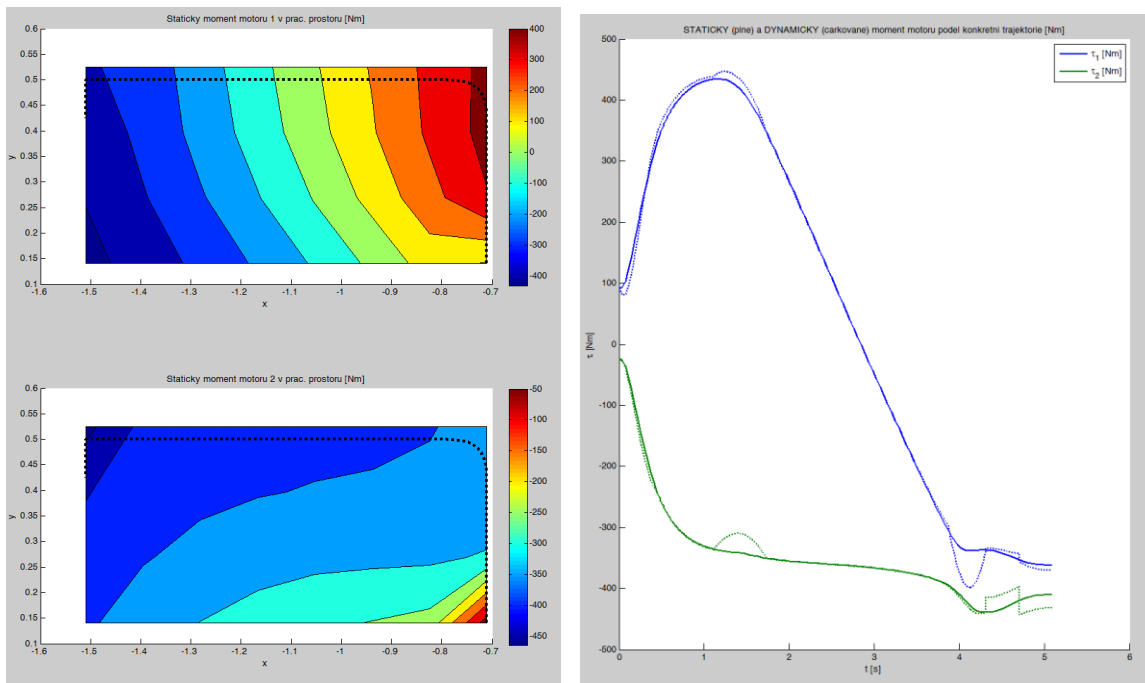
Finální varianta manipulátoru Zakladač (dynamická analýza CAD modelů)

Po výše uvedené optimalizaci rozměrů kinematické architektury robotu byly vypracovány finální dynamické analýzy, které se vyznačují následujícími znaky:

- Zachovány (optimalizované) délkové rozměry ramen robotu (viz varianty manipulátoru výše)
- Zachovány požadavky na trajektorie pohybu (viz varianty manipulátoru výše)
- Dynamický model založen na finálním CAD modelu (Eurotec JKR s.r.o.):
 - Skutečné konstrukční tvary ramen robotu (ne pouze zjednodušený „tyčkový“ model)
 - Skutečné materiálové parametry ramen (hustoty použitých materiálů)
 - Skutečné hmotnosti osazených pohonů (motory + převodovky dle dokumentace)

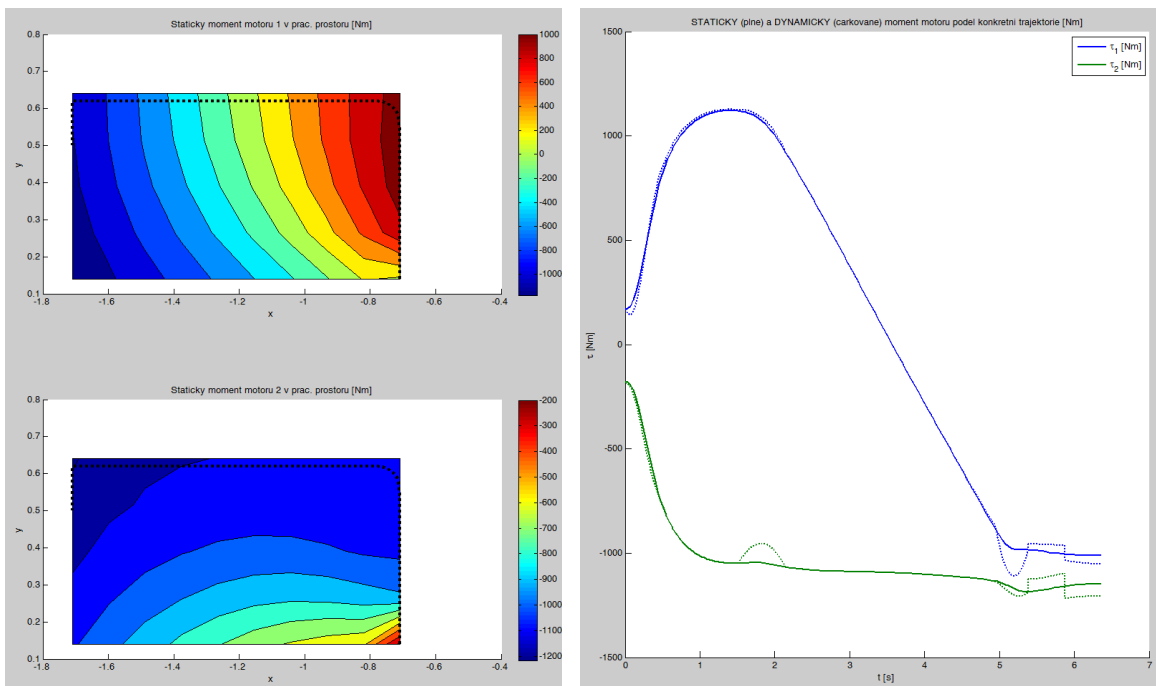
Podrobné technické detaily lze nalézt v [Příloha 4, 5].

Malá varianta – nosnost 50 kg



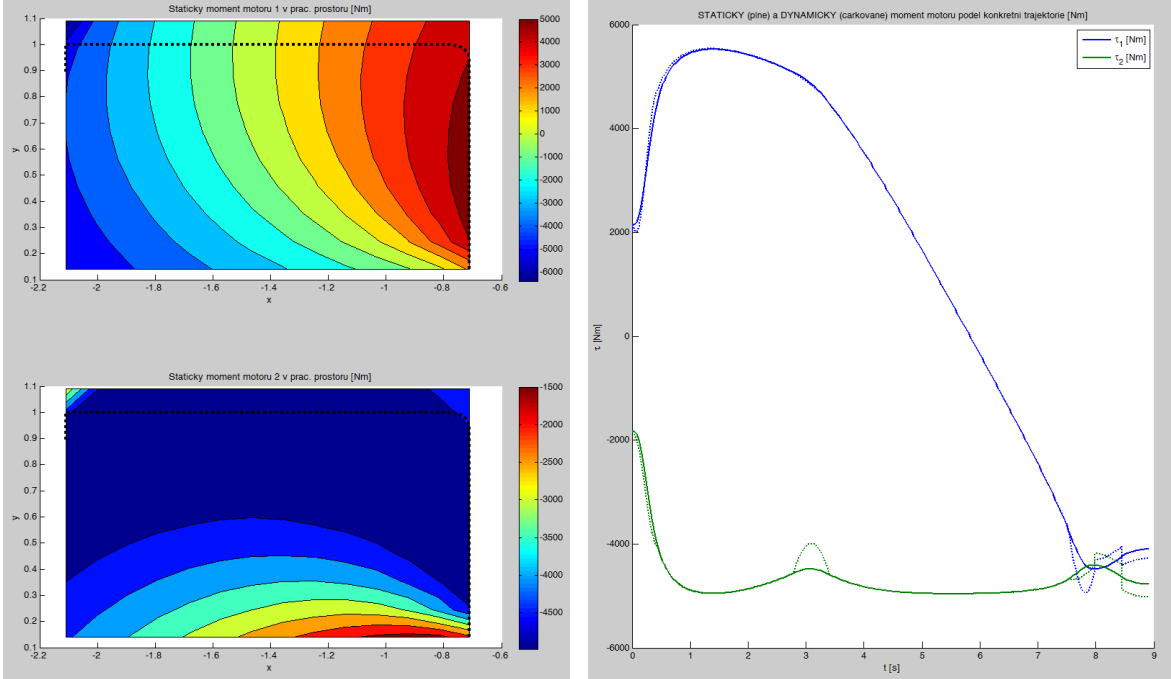
Obr. 8: Statický moment na motorech v pracovním prostoru (vlevo) a STATICKÝ a DYNAMICKÝ moment motoru podél konkrétní uvažované trajektorie (vpravo)

Střední varianta – nosnost 150 kg



Obr. 9: Statický moment na motorech v pracovním prostoru (vlevo) a STATICKÝ a DYNAMICKÝ moment motoru podél konkrétní uvažované trajektorie (vpravo)

Velká varianta – nosnost 500 kg

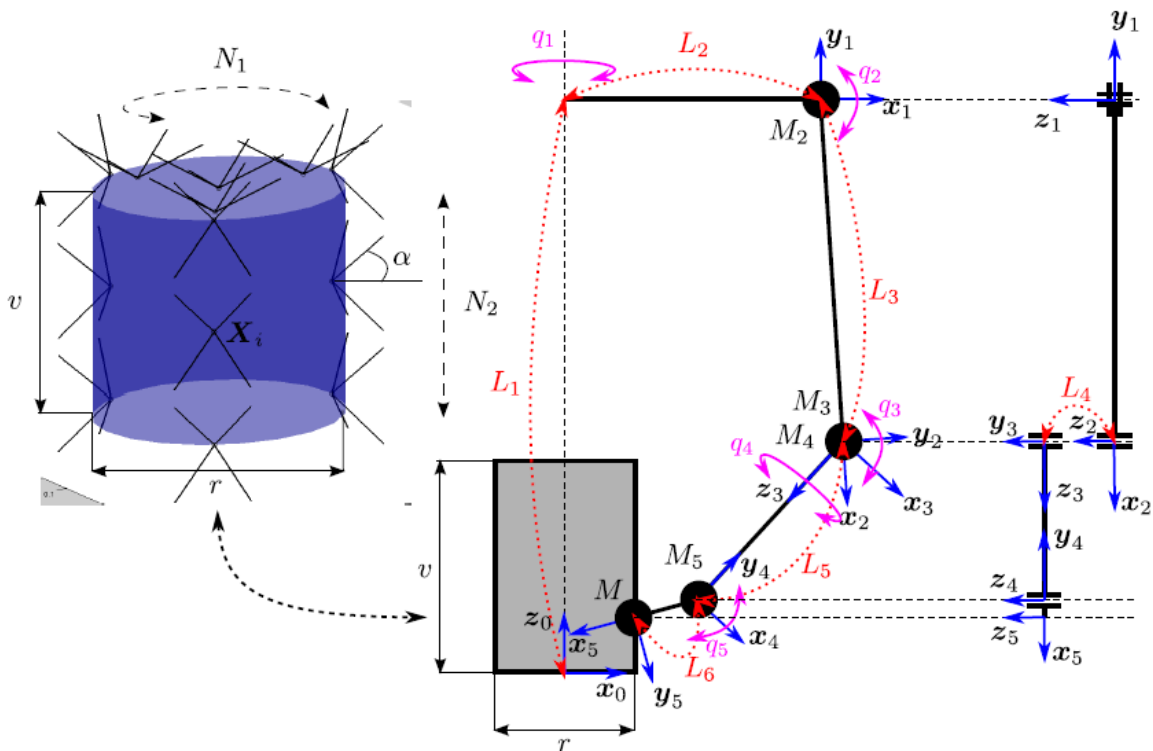


Obr. 10: Statický moment na motorech v pracovním prostoru (vlevo) a STATICKÝ a DYNAMICKÝ moment motoru podél konkrétní uvažované trajektorie (vpravo)

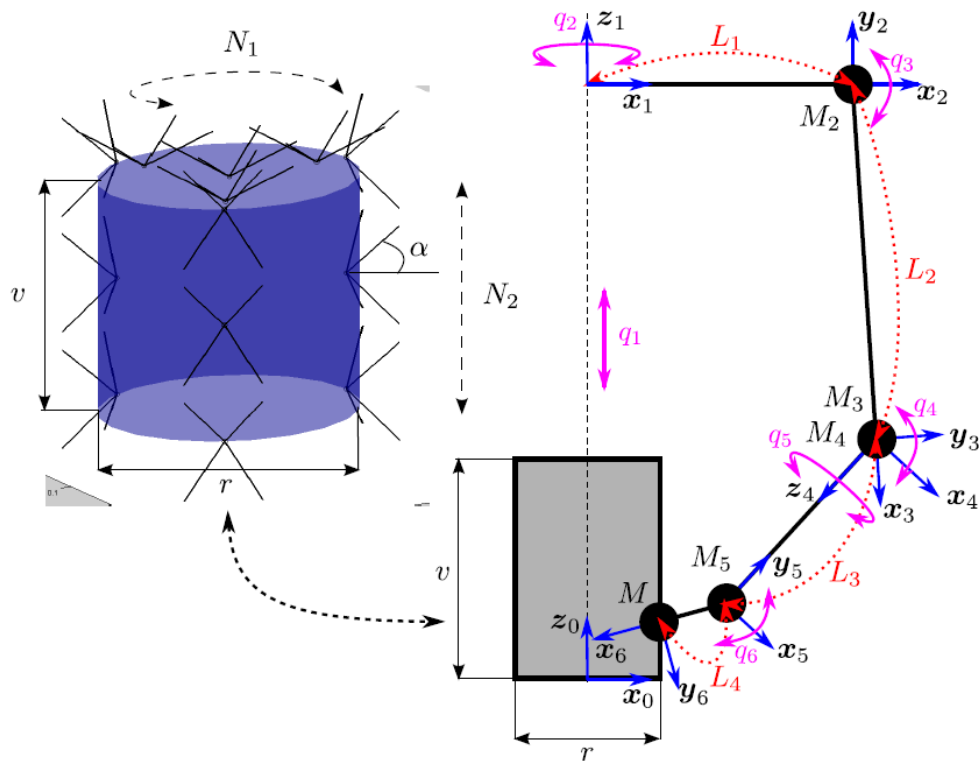
Manipulátor typu Vodník

Kinematická a dynamická analýza

Přímá a inverzní kinematická a dynamická úloha pro manipulátor typu Vodník byla podrobně odvozena a implementována v technické zprávě [4, 5] v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics. Technická zpráva se zabývá návrhem architektury a řízením specifického manipulátoru Vodník, který má být umístěn do vnitřních prostor oplachovací komory průmyslové mycí linky. Standardní varianta navrženého manipulátoru, viz Obr. 11, je rozšířena o další aktuátor (lineární výtah) za účelem zvětšení pracovního prostoru manipulátoru, viz Obr. 12. Specifický plánovač trajektorie pohybu manipulátoru je navržen pro optimalizaci pohybu na základě splnění požadavků na minimalizaci kloubových přejezdů a vyloučení (omezení) kolizí manipulátoru s technologickým dílem či komorou samotnou. V rámci práce byla provedena parametrická optimalizace standardní varianty manipulátoru (minimalizace momentového zatížení aktuátorů) s využitím zjednodušeného „tyčkového“ dynamického modelu.

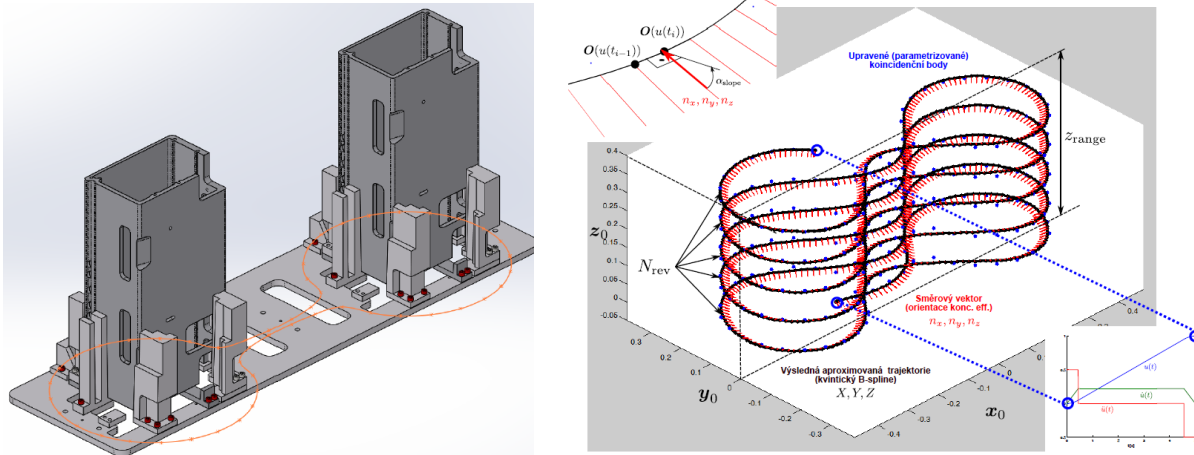


Obr. 11: Standardní varianta manipulátoru



Obr. 12: Redundantní varianta manipulátoru

Analogicky jako v případě manipulátoru Zakladač, byla výsledná dynamická analýza manipulátoru Vodník provedena nad reálnými daty z CAD modelů poskytnutých partnerem Eurotec JKR s.r.o. Cílem předložené technické zprávy [6] bylo stanovit předpokládané momentové zatížení rotačních aktuátorů manipulátoru v závislosti na požadované délce pracovního cyklu, kde vstupními daty je úplný 3D CAD model vyvíjeného manipulátoru (včetně rozměrových a hmotnostních parametrů ramen a aktuátorů). Tvar trajektorie pohybu koncového efektoru manipulátoru je nakreslen přímo v 3D CAD nástroji (Inventor, SolidWorks), ve kterém je konstruován celý manipulátor, včetně zakreslení technologických komponent, které mají být manipulátorem obsluhovány (konkrétně se jedná o ofuk tlakovým vzduchem za účelem osušení komponent po procesu průmyslového mytí), viz Obr. 13. Trajektorie z 3D CAD nástroje je dále exportována ve formě koincidenčních bodů a dále zpracována (editace, interpolace, parametrizace). Součástí zprávy je nástin a řešení výzkumného problému pohybu koncového efektoru manipulátoru po dané trajektorii (aproximační B-spline určený získanými koincidenčními body) s ohledem na maximální možné rychlosti a zrychlení aktuátorů manipulátoru. Zohlednění problému je nezbytné v případech, kdy se manipulátor při svém pohybu blíží do blízkosti singulární polohy a generované rychlosti/zrychlení aktuátorů extrémně rostou. Zvolený postup řešení (vhodným tvarováním feedrate parametrizace trajektorie) vede na striktní limitaci rychlostí aktuátorů, nikoliv však na jejich zrychlení).



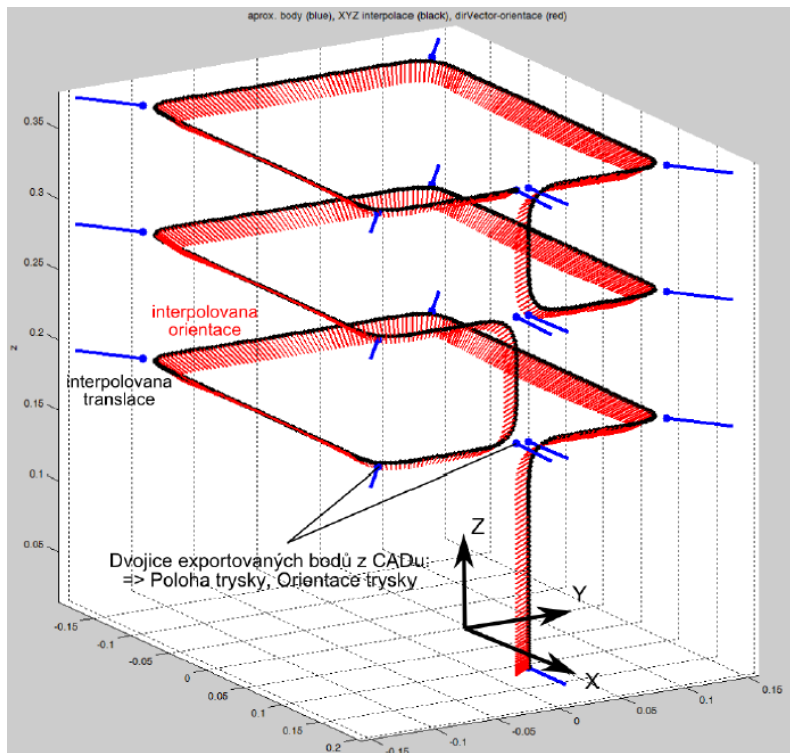
Obr. 13: Plánování trajektorie pro manipulátor Vodník

Opět vzhledem k faktu, že v samotném procesu optimalizace rozměrů ramen manipulátoru není možné zahrnout všechna reálná omezení vyplývající z možností technické (konstrukční) realizace prototypu, bylo nutno optimalizované rozměry manipulátoru důsledně konzultovat s partnerem Eurotec JKR s.r.o. Jako výsledek vzájemných konzultací vznikly dosud neprezentované reporty, viz [Příloha 6] pro dva obsluhované technologické díly a [Příloha 7, 8] pro jeden obsluhovaný technologický díl, shrnující výsledky dílčích dynamických analýz a zahrnující identifikovaná konstrukční omezení .

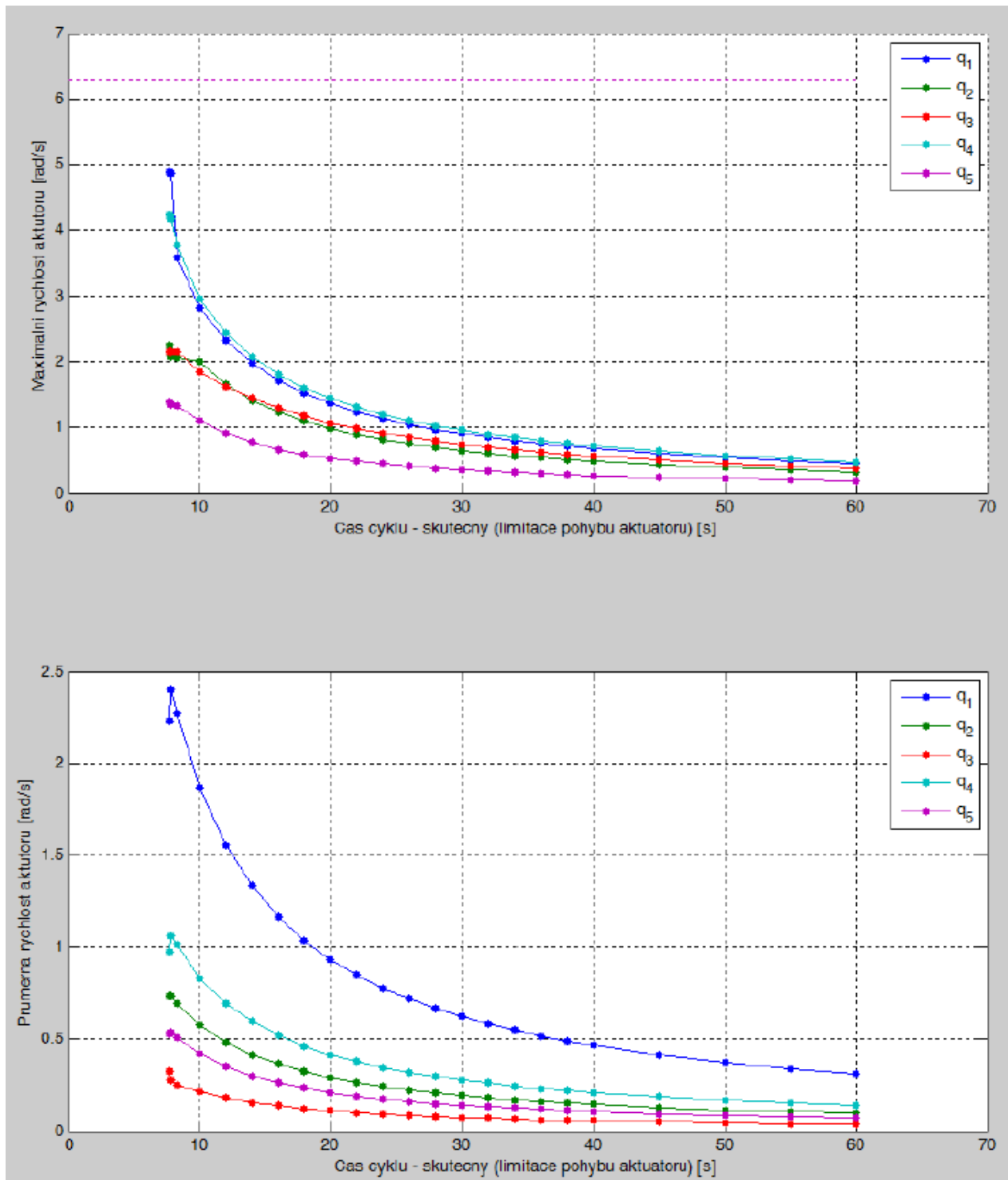
Finální varianta manipulátoru Vodník (dynamická analýza CAD modelů)

Po výše uvedené optimalizaci rozměrů kinematické architektury robotu byly vypracovány finální dynamické analýzy, viz [Příloha 8], které se vyznačují následujícími znaky:

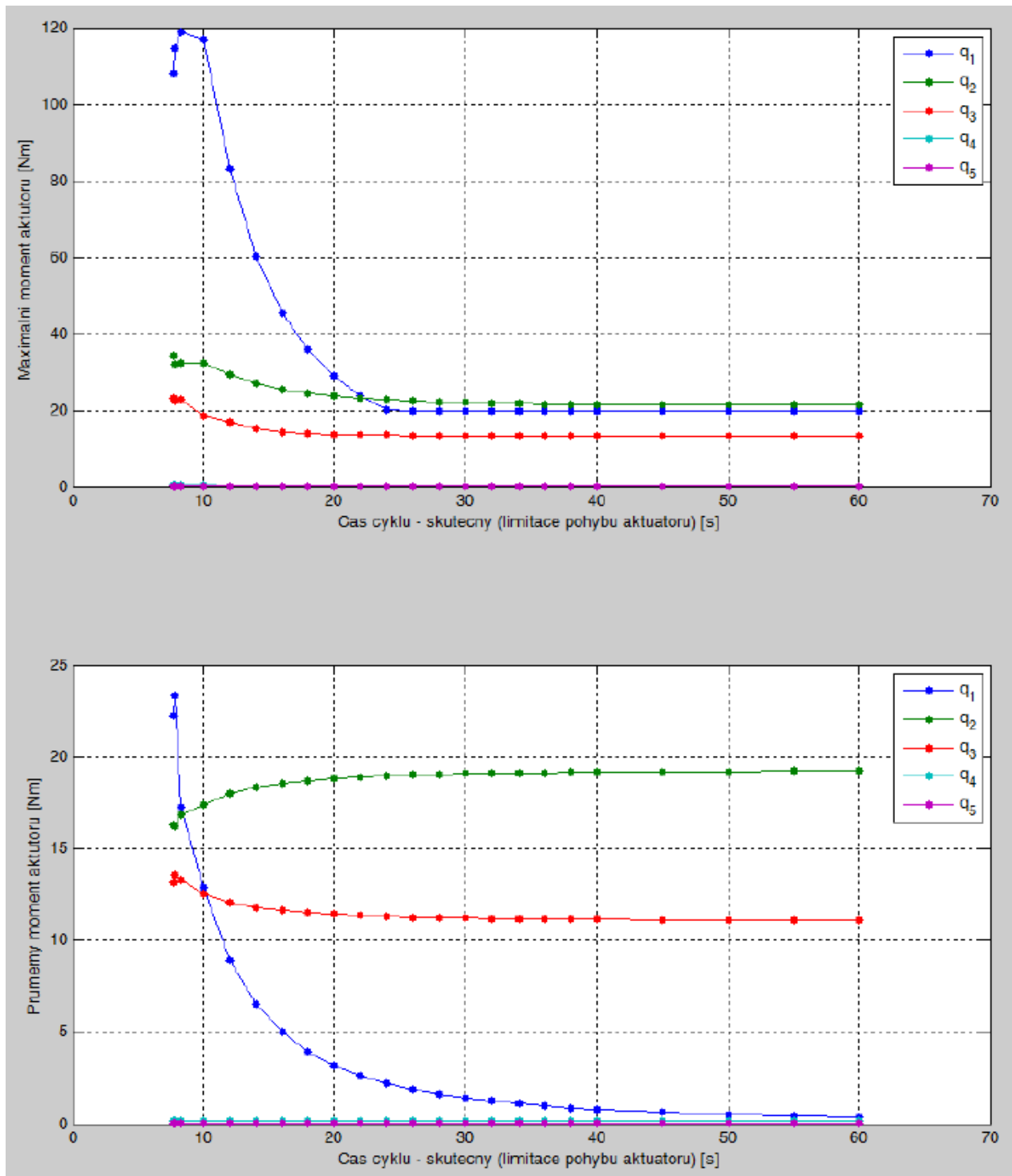
- Mírně modifikovány původní (optimalizované) délkové rozměry ramen robotu (aktualizace dle konstrukčních možností)
- Reparametrizace požadované trajektorie pohybu pro jeden technologický díl, viz Obr. 14
- Dynamický model založen na finálním CAD modelu (Eurotec JKR s.r.o.):
 - Skutečné konstrukční tvary ramen robotu (ne pouze zjednodušený „tyčkový“ model)
 - Skutečné materiálové parametry ramen (hustoty použitých materiálů)
 - Skutečné hmotnosti osazených pohonů (motory + převodovky dle dokumentace)



Obr. 14: Finální trajektorie pohybu robotu Vodník



Obr. 15: Maximální a průměrné rychlosti aktuatorů (za převodovkou) v závislosti na skutečném čase cyklu"



Obr. 16: Maximální a průměrný moment aktuatorů (za převodovkou) v závislosti na skutečném čase cyklu

Závěr

Přeložená technická zpráva zahrnuje dosavadní výzkumné výsledky nezbytné k implementaci algoritmů pro řízení navržených robotických systémů.

Všechny popsané algoritmy byly implementovány v podobě funkcí a funkčních bloků v prostředí Matlab/Simulink/SimMechanics. Funkcionalita algoritmů byla odzkoušena na virtuálních simulačních modelech navržených robotů.

Implementované algoritmy jsou připraveny pro implementaci do řídicího systému reálného času (příští etapa při stavbě reálného prototypu robotů).

Implementace všech algoritmů jsou k dispozici na vyžádání na adrese: msvejda@kky.zcu.cz

Přílohy

Kapitola obsahuje seznam dosud **neprezentovaných** technických reportů, které byly shromážděny jako výstupy dílčích technických aktivit.

Zdrojové soubory příloh jsou přiloženy.

Seznam příloh:

- [Příloha 1] Martin Švejda: *OPTIMALIZACE PARAMETRŮ ROBOTU TYPU ZAKLADAČ*, Verze: 1.0, 13. 11. 2015, **[P1]_Zakladac_optimalizace_V1_0.pdf**.
- [Příloha 2] Martin Švejda: *OPTIMALIZACE PARAMETRŮ ROBOTU TYPU ZAKLADAČ*, Verze: 1.1, *Zpráva navazuje na prvotní optimalizaci manipulátoru (z dokumentu verze 1.0 z 13.11.2015)*, 14. 10. 2016, **[P2]_Zakladac_optimalizace_V1_1.pdf**.
- [Příloha 3] Martin Švejda: *OPTIMALIZACE PARAMETRŮ ROBOTU TYPU ZAKLADAČ*, Verze: 1.2, *Zpráva zahrnuje optimalizovanou řadu manipulátorů*, 27. 4. 2017, **[P3]_Zakladac_optimalizace_V1_2.pdf**.
- [Příloha 4] Martin Švejda, Arnold Jáger: *FINÁLNÍ VERZE ROBOTU TYPU ZAKLADAČ*, Verze: 1.0, *Analýza finálního CAD modelu*, 25. 5. 2017, **[P4]_Zakladac_finalniVerze_V1_0.pdf**.
- [Příloha 5] Martin Švejda, Arnold Jáger: *FINÁLNÍ VERZE ROBOTU TYPU ZAKLADAČ*, Verze: 1.1, *Analýza finálního CAD modelu*, 13. 12. 2017, **[P5]_Zakladac_finalniVerze_V1_1.pdf**.
- [Příloha 6] Martin Švejda, Arnold Jáger: *Dynamická analýza manipulátoru „Vodník“*, Verze: 1.0, *Zpráva navazuje na prvotní dynamickou analýzu manipulátoru (z dokumentu [6] Dynamická analýza manipulátoru „Vodník“, 8. 12. 2017)*, 11. 6. 2018, **[P6]_Vodnik_optimalizace_V1_0.pdf**.
- [Příloha 7] Martin Švejda, Arnold Jáger: *Dynamická analýza manipulátoru „Vodník“*, Verze: 1.1, *Zpráva navazuje na dynamickou analýzu manipulátoru (z dokumentu [Příloha 6] Dynamická analýza manipulátoru „Vodník“, 11. 6. 2018)*, *(Výsledky analýzy pro jeden díl)*, 10. 7. 2018, **[P7]_Vodnik_optimalizace_V1_1.pdf**.
- [Příloha 8] Martin Švejda, Arnold Jáger: *Dynamická analýza manipulátoru „Vodník“*, Verze: 1.2, *Zpráva navazuje na dynamickou analýzu manipulátoru (z dokumentu [Příloha 6] Dynamická analýza manipulátoru „Vodník“, 11. 6. 2018)* *(Výsledky analýzy pro jeden díl, dodány info o rozsahu pohybu os)*, 26. 9. 2018, **[P8]_Vodnik_optimalizace_V1_2.pdf**.

Reference

- [1] ŠVEJDA, Martin. Comparison of serial and parallel structures for 3-link manipulator arm, advanced parametric optimization of special construction (DV023), 2015, **[1]_zakladaceParalelni_navrh_optimalizace.pdf**
- [2] ŠVEJDA, Martin. Kinematical, kinetostatical and dynamical analysis of 4DoF manipulator, parametric optimization of mechanical construction (DV026), 2015, **[2]_zakladace_navrh_optimalizace.pdf.**
- [3] REXCONTROLS. REXYGEN (Programming Automation Devices without Hand Coding). 2018, <https://www.rexygen.com/>.
- [4] ŠVEJDA, Martin. Kinematical, kinetostatical and dynamical analysis of 7DoF manipulator, parametric optimization of mechanical construction (DV027), 2015, **[4]_vodnik_navrh_optimalizace.pdf.**
- [5] ŠVEJDA, Martin. Návrh, řízení a optimalizace manipulátoru do průmyslových myček (vodník) (DV068), 2017, **[5]_vodnik_optimalizace_rizeni.pdf.**
- [6] ŠVEJDA, Martin. Dynamická analýza manipulátoru Vodník (DV075), 2017, **[6]_dynAnalyza.pdf**