



SÉRIOVÉ, PARALELNÉ A HYBRIDNÉ KINEMATICKÉ ŠTRUKTÚRY VÝROBNÝCH STROJOV A ROBOTOV

SERIAL, PARALLEL AND HYBRID KINEMATIC STRUCTURES OF PRODUCTION MACHINES AND ROBOTS

Viera POPPEOVÁ - Vladimír BULEJ - Rudolf REJDA

Abstract

This paper focuses on the characteristics of kinematic structures of production machines and robots. There are described a serial, parallel and hybrid kinematic structures, their properties, advantages and disadvantages, the problems associated with the development of parallel kinematic structures (PKS). At present are applied the PKS in high speed machining, laser and plasma cutting, spraying, measurement, material handling and assembly.

Key words

serial kinematic structure, parallel kinematic structure, hybrid kinematic structure, production machine, robot, delta robot

Úvod

Nové výrobné technológie a procesy vedú k vývoju nových koncepcií strojov alebo k inováciám, u ktorých je rozhodujúce zníženie nákladov, zvýšenie výkonu, flexibility a ich charakteristických vlastností.

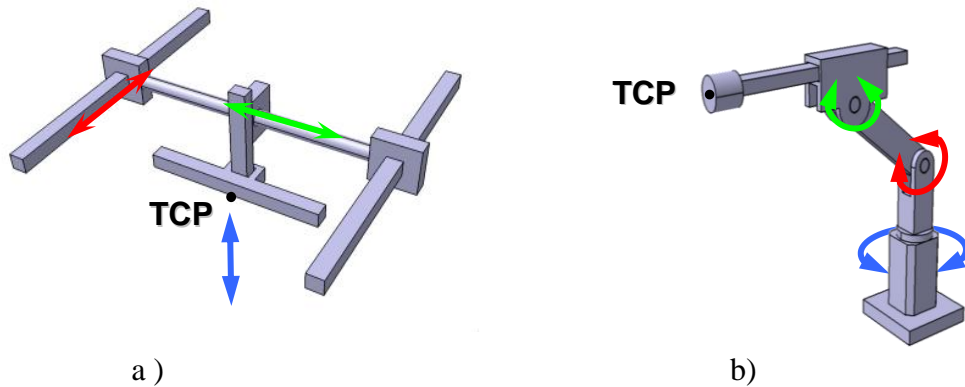
V odboroch, akými sú mechanika a mechatronika, automatizácia a robotika, pokračuje intenzívny vývoj a výskum v oblasti paralelných a hybridných kinematických štruktúr. V súčasnosti disponujeme množstvom vedomostí a technológiami, ktoré nám umožňujú efektívne vyvíjať a spoznávať tieto oblasti.

Na Katedre automatizácie a výrobných systémov ŽU prebieha proces zavádzania informačných technológií do zariadení v rôznych priemyselných odvetviach. Je riešených viacero projektov s tematikou robotiky a mechatroniky, rozpoznávania obrazu, analýzy riadiacich systémov a kinematických štruktúr.

Na základe poznatkov a analýzy doteraz vyvinutých zariadení s paralelnou kinematickou štruktúrou sme sa sústredili na vývoj jednoúčelových mechanizmov využívajúcich hexapodické a hybridné kinematické štruktúry.

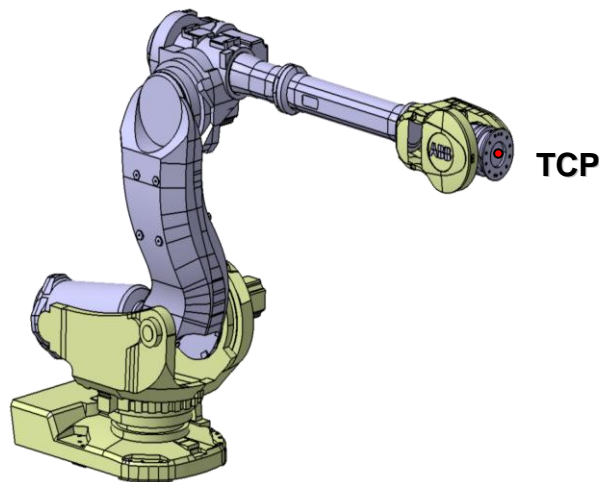
1. Kinematické štruktúry výrobných strojov a robotov

U *sériových kinematických štruktúr* je geometrický tvar pracovného priestoru plne určený relatívnym pohybom koncového bodu TCP (Tool Centre Point; programovaný bod nástroja) - bežne realizovaným posuvnými alebo rotačnými sériovými pohybmi v smere súradnicových osí s odpovedajúcimi priamočiarymi alebo rotačnými vedeniami k ľubovoľnému referenčnému súradnicovému systému (obr.1).



Obr. 1. Sériové kinematické štruktúry mechanizmov (Rejda, 2010)
a) mechanizmus s priamočiarymi vedeniami, b) mechanizmus s rotačnými vedeniami

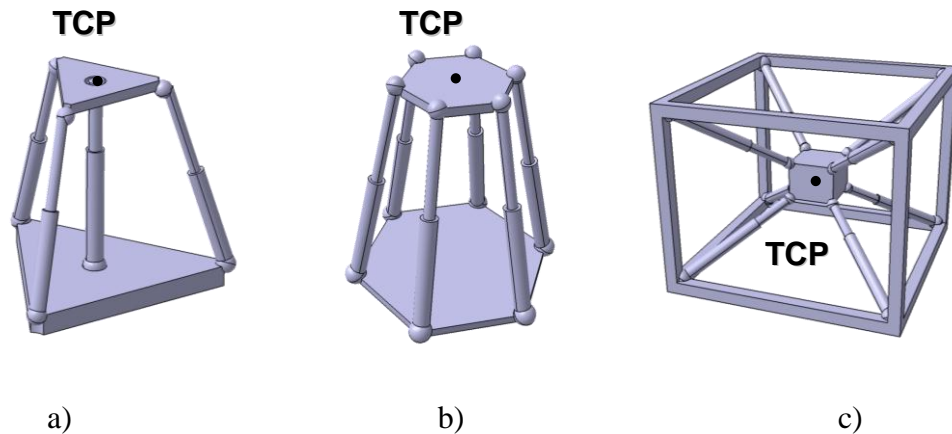
Na niektorých viacsovových mechanizmoch počet stupňov voľnosti a kinematické usporiadanie mechanických členov umožňuje prácu nielen v pravouhlom kartézskom súradnicovom systéme, ale aj v ďalších súradnicových systémoch, ako je valcový (cylindrický), guľový (polárny) alebo antropomorfný.



Obr. 2. 3D model sériového antropomorfného robota IRB 7600 (Rejda, 2010)

Všetky časti sériového rámu sú zaťažené nežiaducimi ohybovými, torznými silami a momentmi, preto musia byť dostatočne efektívne konštruované, aby mali požadované predpoklady ich eliminovať.

Na **paralelných kinematických štruktúrach** s odpovedajúcim počtom stupňov voľnosti (obr. 3), je relatívna priestorová poloha koncového člena (TCP) určená koordinovanými paralelnými lineárnymi alebo rotačnými pohybmi určitého počtu aktívnych a pasívnych lineárnych vedení alebo rotačných členov.



Obr. 3. 3D modely PKŠ (Rejda, 2010): a) tripod, b) hexapod, d) oktapod

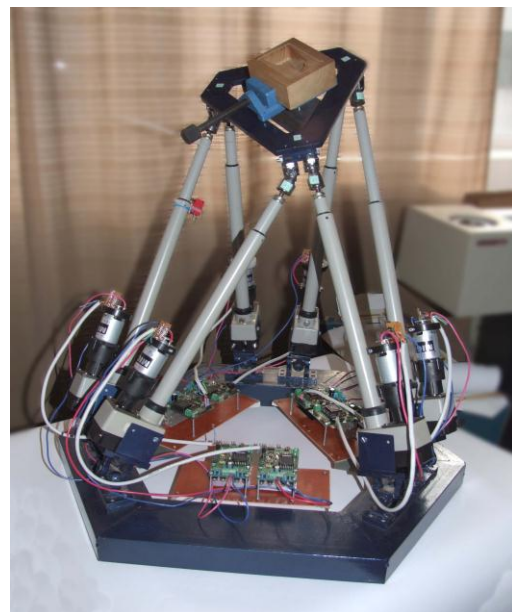
Medzi hlavné výhody paralelných kinematických štruktúr patria:

- nízke hmotnosti pohybujúcich sa častí,
- vysoká pracovná rýchlosť a zrýchlenie,
- rám a všetky časti stroja sú obyčajne len minimálne namáhané ohybovými momentmi,
- väčšina použitých komponentov má vysokú opakovateľnosť v rámci stroja,
- použitie normalizovaných súčiastok,
- vysoká presnosť.

Hexapod je PKŠ so šiestimi lineárnymi jednotkami, ktoré sú prepojené s pevnou i pohyblivou základňou na obidvoch koncoch pomocou guľových alebo kardanových kĺbov. To u takto konštruovaného mechanizmu eliminuje akékoľvek torzné a ohybové namáhania a prispieva k znižovaniu vlastnej hmotnosti a zvýšeniu vlastných frekvencií (Merlet, 2006, Neugebauer, 2007) (obr. 4).



a)

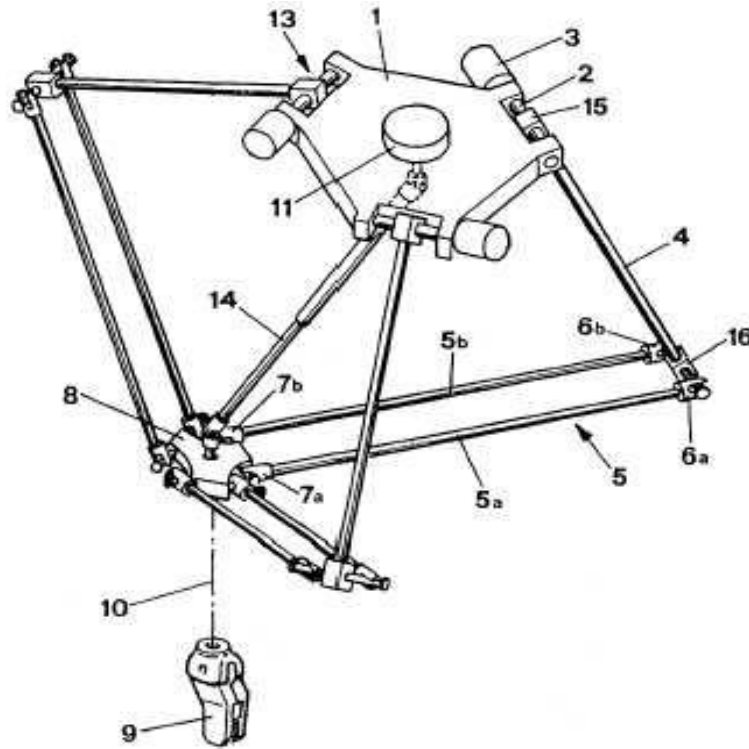


b)

Obr. 4. a) 3D model hexapodického mechanizmu, b) hexapod vyvinutý na Žilinskej univerzite



Ďalším zaujímavým mechanizmom patriacim do skupiny štruktúr s paralelnou kinematikou využívaný v priemysle hlavne v oblasti manipulácie a montáže je **Delta robot**. Bol patentovaný v roku 1942 Willardom L. Pollardom (obr. 5), ale k aktívnemu zavádzaniu mechanizmu do robotiky začalo až o približne 40 rokov neskôr, hlavne vďaka vývoju riadiacich systémov (Rejda, 2010).



Obr. 5. Schéma Delta robota (US patent No. 4,976,582) (Merlet. 2006)

Základná myšlienka konštrukcie paralelného Delta robota je vo využití paralelogramov. Existuje veľké množstvo vyhotovení Delta robotov, či už so servomotormi alebo lineárnymi pohonmi (sliding delta robot). Takéto vyhotovenie mechanizmu nám umožňuje dosahovať zrýchlenia až 15 g (g- gravitačné zrýchlenie) a je optimálnym zariadením pre „pick and place“ operácie s ľahkými predmetmi do 1 kg. Delta roboty dostupné na trhu operujú v typickom cylindrickom pracovnom priestore obvykle s priemerom 1 m a výškou 0,2 m.

Delta roboty, ktorých príkladom je delta robot Adept Quattro s650H od firmy Adept alebo robot IRB 340 od firmy ABB (obr. 6), majú pohybový mechanizmus zložený z troch alebo štyroch nezávislých ramien. Na ich koncoch sú guľovými alebo kardanovými kĺbmi pripojené paralelogramy. Tieto sú pripojené k pohyblivej plošine robota tiež pomocou guľových alebo kardanových kĺbov.



a)



b)

a) Adept Quattro s650H (Bulej, 2010), b) Flex Picker IRB 340 od firmy ABB (Ďurica, 2009)

Obr. 6. Delta roboty

Spodná plošina môže vďaka súčasným rotačným pohybom ramien meniť svoju polohu v priestore, ale nie je možné meniť jej orientáciu robot má tri stupne voľnosti. V prípade požiadavky na riadenie orientácie koncového efektora sa na spodnú plošinu pripájajú ďalšie sériové kinematické členy, napr. pre manipuláciu alebo montáž. V tomto prípade má delta robot hybridnú kinematickú štruktúru so 4, 5 alebo 6 stupňami voľnosti. U oboch typov konštrukcie je však základom stále paralelná kinematická štruktúra.

Hybridné kinematické štruktúry (HKŠ), ako už bolo uvedené v predchádzajúcom odstavci, sú kombináciou paralelnej a sériovej kinematickej štruktúry. Sú zaujímavou alternatívou, ktorá často nachádza priemyselné využitie. HKŠ prinášajú nové možnosti v konštrukcii strojov a zariadení, umožňujú zlepšovať charakteristické vlastnosti PKŠ (Bulej, 2010).



a)



b)

Obr. 7. a) Stroj s hybridnou kinematickou štruktúrou Tricept 805 (PKM Tricept, 2010),
b) hybridný mechanizmu Trivariant vyvinutý na Žilinskej univerzite



V súčasnosti existuje veľké množstvo koncepcií konštrukcií strojov na základe PKŠ a HKŠ, ktoré sú aplikované v strojárskom priemysle a sú určené hlavne na vysokorýchlostné obrábanie, zváranie, laserové alebo plazmové rezanie, meranie a kontrolu, manipuláciu s materiálom alebo montáž.

2. Vývojové trendy paralelných strojov

Vývoj PKM (Parallel Kinematic Machines – strojov s PKŠ) bol spojený s veľkými očakávaniami v deväťdesiatych rokoch minulého storočia.

Technologické dôvody ich vývoja boli hlavne spojené s aplikáciou vysokorýchlostných technológií (HSC), ktoré si vyžadovali zvýšenú dynamiku pohonov a pohybujúcich sa častí strojov – rádové zvýšenie rýchlostí a zrýchlenia. Požiadavka vysokej produktivity a presnosti výroby viedla ku koncepcii multitechnologických strojov s komplexným opracovaním súčiastok na jednom stroji. Bolo potrebné zabezpečiť výrobnú techniku pre päťosové obrábanie – pre zvýšenie produktivity a kvality výroby tvarovo zložitých plôch napr. na formách a zápustkách, lopatkových kolesách, ako aj pre päťstranové obrábanie zložitých skriňových súčiastok.

Konštrukčné problémy sériových mechanizmov výrazne obmedzujú ich nasadenie v oblasti vysokorýchlostných technológií. Sú to hlavne problémy spojené s tým, že rám sériových strojov je namáhaný na ohyb., na stroji sú veľké pohybujúce sa hmoty, vyskytujú sa neprípustné vôle v sériovom mechanizme, je nepriaznivý pomer objemu stroja a pracovného priestoru, v oblasti robotov je všeobecne problém s malou tuhosťou sériových kinematických štruktúr.

Používanie strojov s PKŠ preukázalo nasledovné hlavné výhody. Veľkosť pohonov je neobmedzená pomerom pohybujúcich sa hmôt a tuhosti štruktúry. Namáhanie ohybové je zmenené na ťah a tlak. Paralelné konštrukcie vedú všeobecne k vyššej tuhosti, aká je dosiahnuteľná na sériovej konštrukcii.

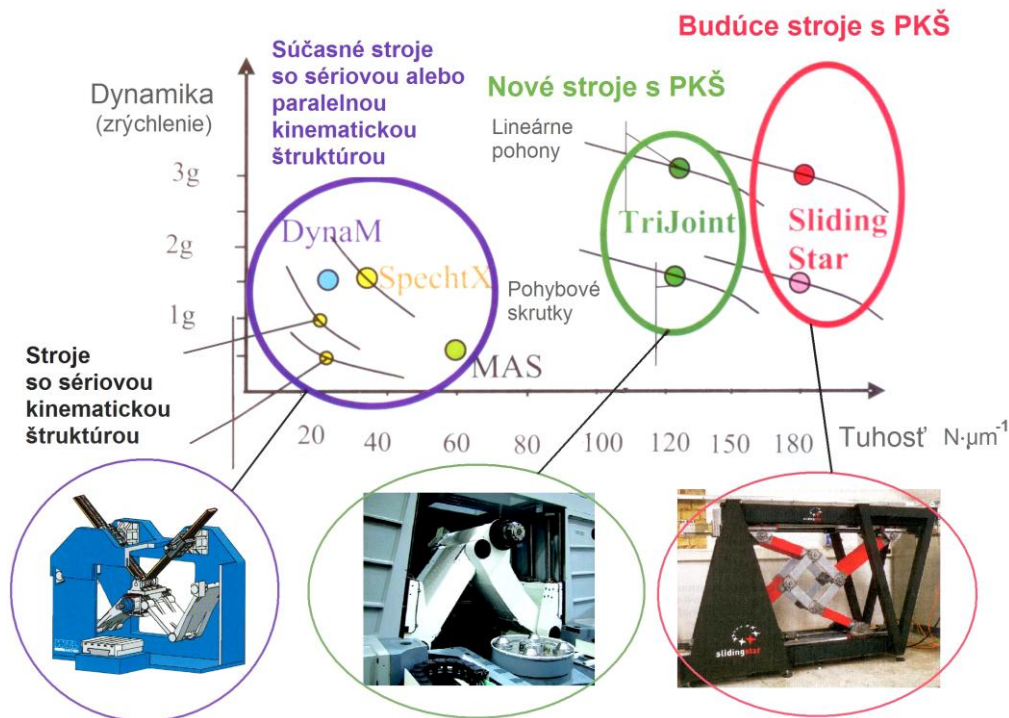
V súčasnosti sa počiatkové nadšenie pre paralelné stroje stlmilo, pretože aplikácia týchto zariadení priniesla aj problémy. Príčiny tých problémov je možné vidieť v oblasti mechaniky a konštrukcie paralelných štruktúr, v oblasti technológie ako aj riadenia.

Príčiny doterajších problémov s vývojom strojov s PKŠ z hľadiska mechaniky a konštrukcie (Valášek, 2009):

- Výskyt singulárnych polôh v pracovnom priestore stroja ako aj kolízie ramien..
- Malý pomer pracovného priestoru a priestoru stroja.
- Nerovnomerné vlastnosti v pracovnom priestore.
- Použitie kĺbov s bodovým stykom.
- Kmitanie pohonov a stroja v dôsledku letného uloženia pohybujúcich sa častí.

Z hľadiska technológie boli príčiny problémov PKM hlavne v tom, že riadiace systémy neboli pripravené pre riadenie paralelných štruktúr, neboli vyvinuté kalibračné zariadenia a metódy, neboli overené technológie pre PKM a neboli dostatočne overené konštrukčné komponenty.

Pre odstránenie príčin problémov PKM sú v súčasnosti vo vývoji robia nasledovné účinné opatrenia. Výskyt singulárnych polôh a nerovnomerné vlastnosti mechanizmu v rôznych polohách sa odstraňuje návrhom tzv. redundantných mechanizmov. Minimalizuje sa použitie kĺbov s bodovým stykom, PKŠ sa nahrádza hybridnými a redundantnými mechanizmami. Letné uloženie nahrádzajú nohy s konštantnou dĺžkou a posuvným (klzným) uložením – tzv. sliding machines. Robí sa seriózny vývoj technológií pre PKM.



Obr. 8. Prognóza vývoja strojov s paralelnými kinematickými štruktúrami a zvyšovanie ich vlastností (upravené podľa prof. Valáška)

Aj napriek uvedeným problémom je potenciál využitia PKŠ v oblasti výrobných strojov a robotov vysoký. Profesor Valášek z ČVUT Praha udáva, že PKŠ môžu dosiahnuť súčasný nárast všetkých mechanických vlastností až o 400 %. Reálnou výzvou súčasnosti sú stroje s PKŠ so zrýchlením na úrovni 5 g (g - gravitačné zrýchlenie), tuhosťou $200 N \cdot \mu m^{-1}$, s pracovným priestorom väčším ako $1 m^3$.

3. Záver

Paralelné mechanizmy sa do praxe a výroby vynikajúco zavádzajú ako manipulačné a montážne zariadenia (Delta roboty). V poslednom čase budia pozornosť aj ako obrábacie stroje vďaka ich vysokému dynamickému potenciálu pri vysokých rýchlostiach pohybu platformy. Tieto výhody paralelných mechanizmov sú spôsobené vysokou tuhosťou ich konštrukcie vďaka ich uzatvorenému kinematickému reťazcu. Výskum týchto štruktúr bol doteraz ale aj v súčasnosti vedený v univerzitných laboratóriách súbežne s výskumom v strojárskom priemysle. V priebehu posledného desaťročia bolo vyvinutých viac než 200 rozdielnych paralelných mechanizmov, väčšinou ako prototypov v rámci výskumu na univerzitách, výskumných ústavoch alebo v priemyselných podmienkach, spolu sa uvádza približne 50 výrobcov zariadení s paralelnou štruktúrou. Napriek vysokému záujmu a úsiliu vo vývoji je odbyt a dopyt po paralelných koncepciách na trhu zatiaľ malý. Do ich ďalšieho vývoja sa vkladajú nádeje, čoho sú dôkazom čoraz častejšie konferencie s touto tematikou. Vývoj týchto štruktúr relatívne mladý oproti dlhoročnej tradícii klasicky koncipovaných obrábacích strojov.

V súčasnosti sa uplatňujú PKŠ v oblasti obrábania, hlavne vysokorýchlostných technológií a päťosového frézovania, ďalej v oblasti laserového a plazmového rezania, striekania náterov a iných médií, merania, manipulácie s materiálom a montáže. Pretože konštrukcia a stavba paralelných mechanizmov je čoraz komplexnejšia, je dôležitý výber



vhodného použitia pre tieto stroje. Dôraz sa kladie aj na výber vhodnej kinematickej topológie pre špeciálne aplikačné úlohy, kde sa uvažuje o vývoji modularity a následnej rekonfigurácie týchto mechanizmov .

Súhrn

Článok je zameraný na charakteristiku kinematických štruktúr výrobných strojov a robotov. Popisuje sériové, paralelné a hybridné kinematické štruktúry, ich vlastnosti, výhody a nevýhody, problémy spojené s vývojom paralelných kinematických štruktúr (PKŠ). V súčasnosti sa uplatňujú PKŠ v oblasti vysokorýchlostného obrábania, laserového a plazmového rezania, striekania, merania, manipulácie s materiálom a montáže.

Kľúčové slová

sériová kinematická štruktúra, paralelná kinematická štruktúra, hybridná kinematická štruktúra, výrobný stroj, robot, delta robot

Použitá literatúra

1. Bulej, V.: *Vývoj mechanizmu s hybridnou kinematickou štruktúrou*. Dizertačná práca, Žilinská univerzita, 2010
2. Ďurica J.: *Vývoj riadiaceho systému pre paralelnú kinematickú štruktúru*. Dizertačná práca, ŽU Žilina, 2009
3. Merlet, J.-P.: *Parallel robots*. Second Edition. Springer, 2006, pp.327, ISBN 0-4020-4132-2
4. Neugebauer, R. – Denkena, B. – Wegener, K.: *Mechatronic Systems for Machine Tools*. In: Annals of the CIRP, Volume 56, Issue 2/2007, October 2007, p. 657 – 686, ISSN 0007-8506
5. Poppeová, V. – et al.: *The Development of Mechanism with Hybrid Kinematic Structure Prototype*. In: Journal of Machine Engineering, Vol. 9, No. 3, 2009, p. 102 – 109, pp. 109, ISSN 1895-7595
6. Rejda, R.: *Návrh programového vybavenia pre paralelné kinematické štruktúry s rôznym počtom stupňov voľnosti*. Písomná práca k dizertačnej skúške. Sjf. ŽU v žiline, 2010
7. Tlustý, J. – et al.: *Fundamental Comparison of the Use of Serial and Parallel Kinematics for Machines Tools*. In: Annals of the CIRP, Vol.48, No.7, 1999, p.351–356, ISSN 0007-8506
8. Uríček, J.: *Simulácia činnosti číslicovo riadených strojov a robotov*. Habilitačná práca, ŽU Žilina, 2001
9. Valášek, M.: *Aktuální stav ve vývoji strojů s paralelní kinematikou*. In: Aktuální trendy ve výzkumu a vývoji obráběcích strojů, 6th of April 2009, ČVUT Praha, ISBN: 978-80-904077-1-8
10. PKM Tricept - Tricept T9000. 2010. [online]. 2010, [cit. 2010-06-03]. Dostupné na internete:
<<http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1238061426>>

Kontaktná adresa

Doc. Ing. Viera Poppeová, PhD., Ing. Vladimír Bulej, PhD. a Ing. Rudolf Rejda,
Katedra automatizácie a výrobných systémov, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina,
e-mail: viera.poppeova@stroj.uniza.sk