



ASSESSMENT OF TECHNICAL LEVEL OF MOBILE ROBOTS OMNI-DIRECTIONAL WHEELS

Radek KNOFLÍČEK *)

***Summary:** Most industrial robots are mounted on fixed base and cannot move around. Their work envelope is thus limited to the volume reached by motion of robot's joints. Hence, these robots must have their work brought to them. A mobile robot, however, can go where the work is and can transport items between fix based robots, thereby opening up many new applications areas. A transport vehicle operation in factories, hospitals and warehouses, etc. must have omni-directional properties that can move and turn freely over narrow floor space in all directions. For this they have been vehicles that use omni-directional wheels. This thesis is drawn as construction and kinematic study of omni-directional wheels of mobile robot. Basal acquaintance conceptions are described here up to now, their practically application including. An optimal variant has been chosen by means of multi-criterion appraisal method. That one is expanded as 5 alternate construction resolutions. An optimal variant is chosen by means of multi-criterion appraisal method again. The frame and carriage drive units are designed. The mostly stressed fitments are checked at final chapters by reason of credibility and to prevent from destruction of the robot. Construction solutions are sketched only and it is possible to take up them.*

1.0 ÚVOD

Kolové podvozky, jako lokomoční ústrojí mobilních robotů se od sebe liší především počtem použitých kol a tvoří tak nejrozšířenější skupinu mobilních robotů ve vnějších i vnitřních aplikacích. Liší se rovněž počtem hnacích a hnaných kol a současně způsobem řízení (tj. natáčení řídicích (směrových) kol [8], a s tím související rozdílná rychlost hnacích kol – elektrický a elektronický diferenciál atd.

Do skupiny kolových podvozků zahrnujeme rovněž speciální podvozky, které využívají tzv. speciálních kol, nebo se spojují do větších celků, souhrnně pojmenovaných jako **všesměrová kola**, **Weinsteinova kola**, **článekové pojezdy**, **MaxWheel® kola**, **šnekové podvozky**, nebo **kola robotů s přísavkami**, zdolávající kolmé zdi.

Speciální kolové podvozky - všesměrová kola: jako historickou zajímavost lze uvést první zmínku o všesměrových kolech (tak jak je z technického hlediska chápeme nyní) již z roku 592 př. n. l. v líčení starozákonního proroka Ezechiela. Starozákonní zápis byl natolik zajímavý, že se o něj začala zajímat Národní agentura pro letecký a kosmický výzkum (NASA) v USA - konkrétně šéfkonstruktor inženýr Josef F. Blumrich. Výsledkem byl, mimo jiné, patent všesměrového kola, který mu udělil patentový úřad USA 5. února 1974, pod číslem 3.789.947. [1].

*) Radek Knoflíček, Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Production Machines, Systems and Robotics, Technická 2, 616 69 Brno, CZ, ++420 5 4114 2474, knoflicek@uvss.fme.vutbr.cz

2.0 KONCEPCE A POPIS KONSTRUKCE VŠESMĚROVÉHO KOLA

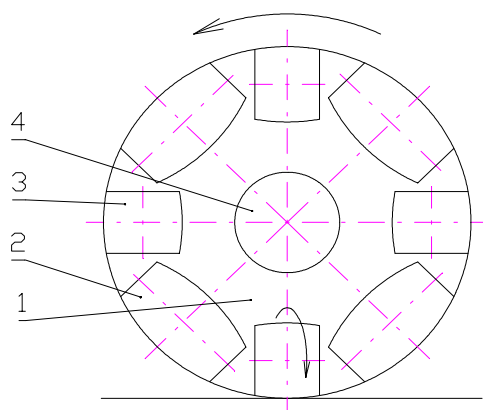
U běžných kolových podvozků je možný pohyb pouze v tečném směru k trajektorii (dráze), tj. kolmo k ose otáčení kola. Naproti tomu všesměrové kolo umožňuje nejen otáčení kolem své osy, ale i odvalování po tangentě, a to bez smykového tření. Skládá se z náboje 1, který je na obvodu opatřen valivými elementy 2 a 3 tvaru válečku nebo soudečku. Náboj je pevně spojen s hřídelí 4 (viz obr 1). Osy elementů mohou být kolmé k ose otáčení kola (tzv. Stanfordské kolo), nebo s ní mohou svírat úhel 45° (ztzv. kolo Illanator). V obou případech je poháněn pouze náboj, přičemž elementy se mohou volně otáčet [4].

Kolo má dva způsoby pohybu:

- rotace okolo osy náboje kdy elementy zůstávají v klidu
- translaci ve směru osy náboje. Element, který je v kontaktu s podlahou se otáčí, a náboj je fixován.

Podvozky mobilních robotů, konstruované se všesměrovými koly, se mohou volně pohybovat ve všech směrech a zatáčet či rotovat na velmi malém prostoru. Jsou také schopny okamžité změny směru pohybu a to s nulovým poloměrem (v ostrém úhlu).

Předností tohoto typu podvozku je vysoká dynamičnost jízdy a vysoká manévrovací schopnost v omezeném prostoru. Nevýhodou je nutná vysoká preciznost provedení kol (tj. výrobní a montážní přesnost) a nízká schopnost překonávání nerovností povrchu [2].



Obr. 1: Základní schéma koncepce všesměrového kola

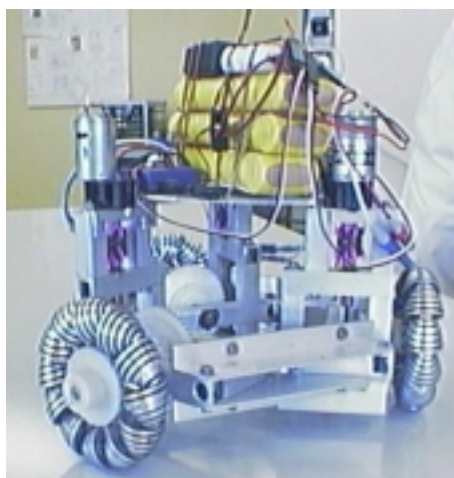
(1 – náboj, 2,3 – valivé elementy, 4 – hřídel)

Můžeme se setkat s několika variantami všesměrových kol, které byly vyvinuty podle potřeby projektantů a konstruktérů mobilních robotů s tímto typem lokomočního ústrojí. Navzájem se od sebe liší tvarem valivých elementů a jejich uspořádáním.

Možné ze světa známé varianty řešení konstrukce všesměrového kola, jak již bylo zmíněno výše, se nazývají dle místa svého vzniku [7]:

- **Stanfordské kolo**
- **Kolo Illanator**

Pokud bychom chtěli uvést příklad všesměrového mobilního robotu, vyvinutého a vyrobeného v České republice, nesmíme opomenout konstrukci experimentálního mini-robotu (Obr. 2), realizovaného na Ústavu informatiky a automatizace Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, ve spolupráci s Ústavem výrobních strojů, systémů a robotiky téže fakulty [1].



Obr.2: Experimentální všesměrový mini-robot sestavený na ÚIA FSI VUT v Brně

3.0 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ VŠESMĚROVÉHO KOLO VLASTNÍ PROJEKCE

Při konstrukčním návrhu všesměrového kola na pracovníky a doktorandy ÚVSSaR v několika variantách, bylo úsilí zaměřeno především na podstatné zdokonalování a zpracování konstrukce stávajících známých koncepcí za zachování patentové čistoty. Jako zlepšení vlastností, za účelem odtranění známých nedostatků, bylo uvažováno zmenšení mezer mezi elementy na obvodu kola tak, aby bylo minimalizováno chvění podvozku mobilního robotu během jízdy a současně zvýšeno hmotnostní zatížení na elementy všesměrového kola (po zabudování do rámu podvozku kol) [5].

3.1 VARIANTA 1: VŠESMĚROVÉ KOLO S OHÝBANÝMI PŘÍČKAMI

Valivé soudečkové elementy jsou k pouzdru připevněny pomocí ohýbaných příček. Pouzdra jsou proti otočení zajištěna pomocí stavěcího šroubu. Na nich je nasazeno kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem a element. Menší elementy jsou k připojeny k pouzdru pomocí ohýbaných příček a jsou rovněž zajištěny proti pootočení pomocí stavěcího šroubu. Menší elementy jsou uloženy na kluzných ložiskách přírubového typu, pro jejich malou stavební výšku a nutnost přenášení axiálních sil.

3.2 VARIANTA 2: VŠESMĚROVÉ KOLO S DĚLENÝMI ELEMENTY

Valivé soudečkové elementy jsou k pouzdru připevněny pomocí rovných příček vsunutých do šikmo vrtaných děr v pouzdru. Na něm je nasazeno kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem a element. Menší elementy jsou k připojeny k pouzdru pomocí krátkých čepů a zasunutých v rozšířeném konci hřídele. Menší elementy jsou uloženy na kluzných ložiskách přírubového typu, pro jejich malou stavební výšku a nutnost přenášení axiálních sil.

3.3 VARIANTA 3: VŠESMĚROVÉ KOLO S DĚLENÝMI ELEMENTY A OHÝBANÝMI HŘÍDELI

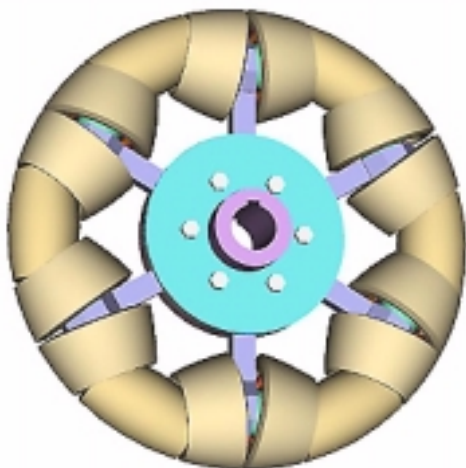
Tato varianta je kombinací dvou předchozích variant. Je zde využito ohnuté příčky ramena pro snadnou výrobu pouzdra. Proto nemusí být element dělený. Z téhož důvodu je použito spojení pouzdra s elementem pomocí osazeného hřídele. Tedy bez nutnosti jeho ohýbání.

3.4 VARIANTA 4: VŠESMĚROVÉ KOLO S NAKLOPENÝMI ELEMENTY

Tato varianta řeší minimalizaci mezer mezi elementy na obvodové křivce kola pomocí sklopení os elementů o $7,5^\circ$. Ložiska kola jsou uloženy na válcích, které jsou zkoseny o úhel $7,5^\circ$. Ty jsou připevněny k ramenu pomocí šroubu – viz obr. 3. Principiálně se neliší od varianty 3.

3.5 VARIANTA 5: VŠESMĚROVÉ KOLO S KUŽELOVÝMI ELEMENTY

Kuželové elementy jsou pomocí dvouřadých kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem a jednořadých kuličkových ložisek spojeny s ramenem. To je zasunuta do náboje a zajištěna kolíkem. Principiálně se neliší od varianty 3.



Obr. 3: Celkový pohled na všesměrové kolo s naklopenými elementy

4.0 MULTIKRITERIÁLNÍ METODA HODNOCENÍ NAVRHOVANÝCH VARIANT

Při výběru nového zařízení, výrobku či obecně technického objektu, stojíme často před otázkou, který zvolit ze široké nabídky, a následně zda jsme zvolili správně. K tomuto problému můžeme přistupovat buď subjektivně (nadřazená restrikce naznačí, “kdo by měl vyhrát”) nebo si necháme zpracovat expertní posudky od nezávislých odborníků. Ovšem jako seriózní se jeví skutečnost, že uijeme systematických a racionálních metod práce využívající objektivizující matematický aparát. V našem případě využijeme poslední možnost, kdy za využití metod systémového přístupu můžeme paralelně srovnávat například několik nabídkových projektů na dodávku výrobku (stroje, zařízení apod.) [3].

Cílem hodnocení například nabídkových projektů je souhrnně vyjádřit **technicko-ekonomickou** (dále je TE) úroveň jednotlivých návrhů a určit pořadí jejich **výhodnosti**. Porovnání TE úrovně technických objektů (nejen výrobků ale i technologických procesů, racionalizačních návrhů

hodnotové analýzy ap.). Je obtížné proto, že TE úroveň je popisována soustavou TE parametrů, o různých. jednotkách. Problém přímé nesčitatelnosti hodnot parametrů se musí řešit různými způsoby agregace těchto hodnot tak, aby bylo možné vyjádřit TE úroveň **jedinou hodnotou**. K tomuto účelu bylo vypracováno několik postupů, souhrnně označovaných jako **metody multikriteriálního hodnocení** [3].

Každý předkládaný projekt má obvykle dvě stránky:

- **Technickou**, která vyjadřuje **funkční vlastnosti** projektu a její úroveň je definována stupněm plnění všech funkcí projektu ΣF_j .
- **Ekonomickou**, která vyjadřuje náklady na zabezpečení těchto funkcí. N

Zatímco náklady N lze poměrně snadno zjistit, neboť jednotlivé nákladové položky mají stejné jednotky a jsou tedy sčitatelné, stupeň plnění funkcí je třeba určit právě pomocí některé metody multikriteriálního hodnocení. Pak teprve lze určit poměrnou efektivní hodnotu (PEH) každého projektu a podle klesající hodnoty PEH projekty seřadit.

$$PEH = \Sigma F_j / A$$

Nejužívanější metody multikriteriálního hodnocení jsou:

- bázecká bodovací metoda
- metoda pořadí
- metoda PATTERN

4.1 BÁZECKÁ BODOVACÍ METODA

Protože se obvykle předkládané varianty posuzují na základě většího počtu různých kritérií, patří tato metoda mezi **metody multikriteriálního hodnocení**. Hodnocená hlediska jsou vyčíslitelná a to významně zjednodušuje proces hodnocení. Použitím **bázecké bodovací metody** se porovnává hodnocená varianta se vzorovým řešením – vzorovým etalonem – bází.

Hodnocení konkrétní varianty probíhá jak po stránce **technické** (označení τ), tak i po **ekonomické** (označení ϵ). Technická i ekonomická hodnota varianty se posléze umísťuje do roviny **hodnotícího diagramu** ($\epsilon = f(\tau)$), kde je její výhodnost patrná ze vztahu k jiným, rovněž zaneseným variantám.

Stručnou podstatu metody a postup při aplikaci lze uvést v následujících bodech:

- nejprve je třeba provést **reprezentativní výběr parametrů (vlastností)**. Je třeba vyloučit vzájemně závislé parametry. Jejich počet by měl být omezen na podstatné a spolehlivě zjistitelné
- stanoví se bodovací stupnice, která hodnotí buď kvalitativní nebo kvantitativní hodnoty parametrů
- určí se významnost (váha) parametrů
- provede se hodnocení

4.1.1 Technická hodnota τ

A) Při identifikaci varianty se hodí celá řada **faktorů, parametrů a vlastností**, které označíme jako $T_1, T_2, \dots, T_n$, tj. $T(1, \dots, n)$

kde: n = maximální počet faktorů, parametrů, vlastností, n = obvykle (1-100)

B) **Hodnotu** každého faktoru, parametru a technické vlastnosti vyjádříme pomocí **třídníku** $t_1, t_2, \dots, t_j$, se stanovenou (zvolenou) stupnicí, tj. : $t(1, \dots, j)$

kde: t_1 = maximální hodnota faktoru, parametru, vlastnosti

t_j = maximální hodnota s kvantifikací a se slovním hodnocením :

$t_1 = 0$ = nevyhovující (min)

$t_2 = 1$ = velmi slabé

$t_3 = 2$ = vyhovující

$t_4 = 3$ = dobré

$t_5 = 4$ = velmi dobré

$t_6 = 5$ = výborné (tj. vzorové, ideální, 100 %) (max.).

Doporučený rozsah stupnice třídění: t (1, 6) nebo t (1, 10) atd. I když je hodnocení faktorů subjektivní je však podloženo objektivně zjistitelnými parametry a vlastnostmi.

C) Hodnocený faktor, parametr, vlastnost lze vyjádřit i **procentuálně**: $p_T = 100/t_j$ [%]

D) **Relativní technická hodnota** n-tého hodnota faktoru, parametru, vlastnosti je pak : $T_n \cdot t_j$

E) **Význam (váhu)** jednotlivých faktorů, parametrů, vlastností pak dle **důležitosti** rozlišíme koeficienty $g_n (\leq 1)$, tedy : $0 < g_n \leq 1$

F) **Technický stav hodnocené varianty** dle a různých hledisek je pak:

$$(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j, \dots, \tau_n) = (g_1 \cdot t_1, g_2 \cdot t_2, \dots, g_j \cdot t_j, \dots, g_n \cdot t_n)$$

G) **Konečná technická hodnota varianty** je pak vyjádřena:

$$\tau = \frac{\sum_{j=1}^n g_j \cdot t_j}{n \cdot t_j} = \frac{g_1 \cdot t_1 + g_2 \cdot t_2 + \dots + g_n \cdot t_n}{n \cdot t_j} \leq 1$$

kde : g_j = koeficient rozlišující významnost hodnocených faktorů, parametrů, vlastností

t_j = hodnota i-tého faktoru, parametru, vlastnosti

n = počet hodnocených faktorů, parametrů, vlastností

V procentuálním vyjádření : $\tau \leq 100 \%$

Konečná technická hodnota (např. zcela nového, továrně vyrobeného produktu) činí : $\tau = 100 \%$

4.2 APLIKACE METODY NA NAVRHOVANÉ VARIANTY VŠESMĚROVÝCH KOL

Hodnocení výše popsaných variant označených jako V1, V2, V3, V4 a V3 je provedeno na základě vlastností, uvedených v následujících tabulkách [5].

• HODNOCENÍ VARIANTY V 1: VŠESMĚROVÉ KOLO S OHÝBANÝMI PŘÍČKAMI

	Vlastnost	ozn.	t_j	p_T	g_n	t_n
1	Možnost výroby běžně dostupnými stroji, nástroji a pomůckami	T1	3	33,33	1	3
2	Technologická náročnost	T2	2	50	1	2
3	Montážní jednoduchost	T3	4	25	0,4	1,6

Konečná technická hodnota V1: $\tau = 0,4$ tj. $\tau = 40 \%$

• HODNOCENÍ VARIANTY V 2: VŠESMĚROVÉ KOLO S DĚLENÝMI ELEMENTY

	Vlastnost	ozn.	t_j	p_T	g_n	t_n
1	Možnost výroby běžně dostupnými stroji, nástroji a pomůckami	T1	3	33,33	1	3
2	Technologická náročnost	T2	2	50	1	2
3	Montážní jednoduchost	T3	4	25	0,4	1,6

Konečná technická hodnota V2: $\tau = 0,44$ tj. $\tau = 44 \%$

- **HODNOCENÍ VARIANTY V 3: VŠESMĚROVÉ KOLO S DĚLENÝMI ELEMENTY A OHÝBANÝMI PŘÍČKAMI**

	Vlastnost	ozn.	tj	pT	gn	tn
1	Možnost výroby běžně dostupnými stroji, nástroji a pomůckami	T1	3	33,33	1	3
2	Technologická náročnost	T2	3	33,33	1	3
3	Montážní jednoduchost	T3	5	20	0,4	2

Konečná technická hodnota V3: $\tau = 0,533$ tj. $\tau = 53,3 \%$

- **HODNOCENÍ V4: VŠESMĚROVÉ KOLO S NAKLOPENÝMI ELEMENTY**

	Vlastnost	ozn.	tj	pT	gn	tn
1	Možnost výroby běžně dostupnými stroji, nástroji a pomůckami	T1	4	25	1	4
2	Technologická náročnost	T2	4	25	1	4
3	Montážní jednoduchost	T3	4	25	0,4	1,6

Konečná technická hodnota V4: $\tau = 0,64$ tj. $\tau = 64 \%$

- **HODNOCENÍ VARIANTY V5: VŠESMĚROVÉ KOLO S KUŽELOVÝMI ELEMENTY**

	Vlastnost	ozn.	tj	pT	gn	tn
1	Možnost výroby běžně dostupnými stroji, nástroji a pomůckami	T1	3	33,33	1	3
2	Technologická náročnost	T2	3	33,33	1	3
3	Montážní jednoduchost	T3	5	20	0,4	2

Konečná technická hodnota V5: $\tau = 0,533$ tj. $\tau = 53,3 \%$

Dílčí závěr: Na základě hodnocení navržených variant pomocí metody multikriteriálního hodnocení (basické bodovací metody) lze konstatovat, že jako optimální koncepce kola se jeví V4 – všesměrové kolo s naklopenými elementy.

5.0 VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Srovnání zadaných parametrů navrhovaného lokomočního ústrojí mobilního robotu se všesměrovými koly s dosaženými parametry je uvedeno v následující tabulce:

Parametry	Zadáno	Dosaženo
Rozměry (d x š x v)	1300 x 900 x 600 mm	785 x 780 x 420 mm
min. rychlost	1 cm/s	1 cm/s
max. rychlost	1 km/hod	1,29 km/hod
Hmotnost	150 kg	118 kg

Všechny zadané technické parametry se pohybují v požadovaných mezích. Rozměry byly dodrženy s velkými rezervami a to i při dostatečné bezpečnosti, tuhosti a dimenzování klíčových součástí. To je výhodné z hlediska použití mobilního robotu ve velmi stísněných prostorech a pro projíždění dveřmi. Vzhledem k celkové malé výšce podvozku je jeho těžiště nízko nad zemí, což zaručuje vysokou stabilitu jízdy a dobrou manévrovatelnost. Rychlostní a hmotnostní požadavky byly

rovněž dodrženy s určitou rezervou. Robot je schopen pohybu po vodorovné rovině v přímém směru se zrychlením $0,5 \text{ ms}^{-2}$. Prozatím nebyly brány v úvahu velikosti záložních zdrojů, řídicího počítače, senzorického systému a ostatního potřebného palubního vybavení. Konstrukce byla navržena pro prototyp, a je tudíž brán zřetel na snadnou vyrobiteľnost všech komponent v běžných dílenských podmínkách a dostupnost použitých materiálů. Rám není přizpůsoben pro uchycení ramene robotu a řídicího systému, protože přesné rozměry a tvar nebyly při vypracování tohoto projektu známy. Konstrukce rámu je proto řešena co nejjednodušším způsobem s přihlédnutím na malou technologickou náročnost. Zároveň je provedena tak, aby uchycení dalších komponent nečinilo velké potíže. Práce byla zaměřena především na konstrukci všesměrového kola (platformy). Záléžitosti směrového řízení, prozatím nebyly řešeny. Vzhledem k neznámým hodnotám příkonu elektrických spotřebičů, vezených na podvozku (senzorického systému, měničů, řídicího systému) nelze uspokojivě v této projektové práci stanovit celkovou dobu nepřetržitě činnosti mobilního robotu.

6.0 ZÁVĚR

Při konstrukci nového podvozku mobilního robotu bylo vycházeno z přijatého technického zadání a dalších požadovaných vlastností zejména spolehlivosti, bezpečnosti, snadné vyrobiteľnosti, a ceně. Těmto kritériím je podřízena konstrukce všech součástek.

Motory, převodovky a brzdy jsou nakoupeny jako monobloky od zahraniční firmy Maxon z důvodu vysoké kvality a malé náročnosti na prostor. To se poněkud projeví nepříznivě na pořizovací ceně, ale je zaručena dlouhodobá spolehlivost, což je hlavní požadavek na výrobek, jestliže chceme aby uspěl na případném otevřeném trhu ve vysoké konkurenci zahraničních firem.

Některé konstrukční prvky nejsou dořešeny do konečné podoby, je tedy možné na základě této práce pokračovat v řešení problematiky všesměrových kol v širším měřítku. Projekt pouze hodnotí současný stav, dosavadní vytvořené koncepce a nastiňuje některá další možná řešení.

7.0 LITERATURA

- [1] Kárník, L. Knoflíček R., Novák-Marcinčin J.: Mobilní roboty, vyšlo v nakladatelství MÁRFY SLEZSKO, Opava, 2000, str.: 151
- [2] Kárník, L., Marcinčin, J. N.: Biorobotická zařízení, MÁRFY SLEZSKO, Opava, 1999, str.: 65
- [3] Knoflíček, R: Projektování mobilních robotických soustav ve vztahu k jejich aplikaci, s přihlédnutím k optimalizaci pohonných jednotek, Habilitační práce VUT v Brně, 2000, str.: 138
- [4] Knoflíček, R.: Mobilní robotické systémy (Interní učební text ÚVSSaR, FSI, VUT v Brně, 1997), str.: 97
- [5] Kvapil, A: Všesměrové kolo jako lokomoční ústrojí mobilního robotu, Diplomová práce VUT v Brně, 1998, str.: 23 a 55
- [6] Marcinčin, J. N. , Kárník, L.: Mobilné robotické zariadenia, Sborník přednášek konference ROBTEP '99 – Robotika v teorii a praxi, Sjf TU , Prešov, 1999, str.. 153
- [7] Mc Kerrow, P. J. : Introduction to Robotics, Addison - Wesley Publishing Company, Sydney, Australia 1991, page: 234
- [8] Řeřucha, V.: Intelligent Control – Modern part of Cybernetics, In: Artificial Intelligence in Control and Measurement, International Summer School, CEPUS SK-46, Brno, 2000, str.: 115