TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra sklářských strojů a robotiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2007 Michal OBST

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program M2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T010 Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření: Sklářské a keramické stroje

Koncepční studie robotu pro automatické mytí skleněného opláštění budov

(Conceptual study of robot for automatic washing of glass facades of buildings)

KSR - 19220

MICHAL OBST

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. František Novotný, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Marcel Horák, PhD.

Rozsah diplomové práce:

Počet stran:	70
Počet tabulek:	4
Počet obrázků:	59
Počet výkresů:	14
Počet příloh:	0
Počet CD ROM:	1

Datum odevzdání : 25.5.2007

TISKOPIS: ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

TÉMA:

Koncepční studie robotu pro automatické mytí skleněného opláštění budov

ANOTACE:

Diplomová práce se zabývá automatizací procesu mytí skleněných plášťů budov. První kapitola je věnována analýze současného stavu servisních robotů orientovaných na problematiku mytí skleněného opláštění, druhá a třetí kapitola rozebírá koncepční studii mobilní plošiny a technologie čištění. Čtvrtá kapitola je věnována popisu konstrukčního řešení mobilní plošiny robotu a v poslední kapitole je provedeno technickoekonomické hodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Robot, mobilní plošina, skleněné opláštění, technologie čištění.

THEME:

Conceptual study of robot for automatic washing of glass facades of buildings

ANNOTATION:

Diploma thesis is focused on questions concerning automatization of the process of washing glass facades of buildings. First chapter deals with analysis of actual situation of service robots oriented on questions of glass facade cleaning, second and third chapter analysis conceptual study of mobile platform and cleaning technology. Fourth chapter deals describes design concept of mobile platform of the robot and last chapter gives technical and economic evaluation of chosen design concept.

KEYWORDS:

Robot, mobile platform, glass facade, cleaning technology.

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Liberci dne 18.5.2007

…………………………….
Michal OBST

Poděkování

Děkuji panu ***Doc. Ing. Františku Novotnému, CSc.***, vedoucímu Katedry sklářských strojů a robotiky Technické univerzity v Liberci, za odborné vedení, cenné připomínky a trpělivost v průběhu řešení této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval panu ***Ing. Marcelu Horákovi, PhD.*** za poskytnuté informace a inspirativní návrhy související s řešením této diplomové práce.

Děkuji také své rodině za veškerou podporu během celého studia.

Michal OBST

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ **9**

ÚVOD **12**

1. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU SERVISNÍCH ROBOTŮ **13**

1.1. Klasifikace servisních robotů 13

1.2 Současný stav servisních robotů 14

1.3 Čistící a inspekční roboty 16

1.3.1 Roboty závěsné *17*

1.3.2 Roboty ve větší míře autonomní *19*

1.3.3 Plně automatizovaný robot *20*

1.4 Požadavky na mechanismus mobilní plošiny 24

2. KONCEPČNÍ NÁVRH MOBILNÍ PLOŠINY **25**

2.1 Koncepce mobilní plošiny čistícího robotu 25

2.2 Alternativní návrhy mobilní plošiny čistícího robotu 28

2.3 Analýza variant 30

3. KONCEPČNÍ NÁVRH ČISTÍCÍHO AGREGÁTU **33**

3.1 Koncepce technologie čištění skleněných plášťů 33

3.2 Mechanismus realizující otočení plošiny 37

3.3 Připojení čistícího agregátu k podvozku plošiny 39

4. KONSTRUKČNÍ ZPRACOVÁNÍ VYBRANÉ VARIANTY **42**

4.1 Přehled technické dokumentace 42

4.2 Popis konstrukčního řešení 43

4.2.1 Návrh pohonu *44*

4.2.2 Přídržný systém mechanismu *45*

4.2.3 Rozmístění úchopných hlavic *47*

4.2.4 Volba řídícího systému *48*

4.2.5 Uložení pohyblivých částí mechanismu *49*

4.2.6 Bezpečnostní aspekty *51*

4.3 Výpočtová část konstrukčního řešení 52

4.3.1 Dimenzování pohonu *52*

4.3.2 Dimenzování pohonu – planetová převodovka *58*
4.3.3 Kontrola podtlakového přídržného systému *60*

5. TECHNICKOEKONOMICKÉ VLASTNOSTI ROBOTU **66**

5.1 STANOVENÍ NÁKLADŮ NA ŘEŠENÍ 66
5.2 PERSPEKTIVA NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ 67

ZÁVĚR **68**

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY **69**

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

d	[mm]	vnější průměr přísavky
f_H	[Hz]	provozní frekvence
g	[m·s^{-2}]	tíhové zrychlení
f_{START}	[Hz]	startovací frekvence
f_{START}'	[Hz]	startovací frekvence
F_{Au}	[N]	silové zatížení přísavky
F_{Ax}	[N]	silové zatížení přísavky
F_{Bu}	[N]	silové zatížení přísavky
F_{Bx}	[N]	silové zatížení přísavky
F_x	[N]	silové zatížení přísavky
F_t	[N]	třecí síla
i	[-]	převodový poměr
J_{MOT}	[kg.m^2]	moment setrvačnosti motoru
J_{TOT}	[kg.m^2]	celkový moment setrvačnosti zátěže
J_{TOT}'	[kg.m^2]	celkový moment setrvačnosti zátěže
J_L	[kg.m^2]	moment setrvačnosti zátěže přepočítaný na hřídel motoru
J_L'	[kg.m^2]	moment setrvačnosti zátěže přepočítaný na hřídel motoru
J_2	[kg.m^2]	momenty setrvačnosti členu 2
J_2'	[kg.m^2]	momenty setrvačnosti členu 2
J_4	[kg.m^2]	momenty setrvačnosti členu 4
J_4'	[kg.m^2]	momenty setrvačnosti členu 4
$J_{PŘ}$	[kg.m^2]	moment setrvačnosti převodovky
J_{red}	[kg.m^2]	redukovaný moment setrvačnosti
J_{red}'	[kg.m^2]	redukovaný moment setrvačnosti
k	[-]	bezpečnost
L	[mm]	vzdálenost přísavek
m_{MOT}	[kg]	hmotnost motoru
$m_{PŘ}$	[kg]	hmotnost převodovky
m_1	[kg]	hmotnost členu 1
m_3	[kg]	hmotnost členu 3
m_3'	[kg]	hmotnost členu 3
m_c	[kg]	celková hmotnost plošiny

M_b	[Nm]	rozběhový moment
M_b'	[Nm]	rozběhový moment
M_H	[Nm]	přídržný moment
M_L	[Nm]	moment vnější silové zátěže
M_L'	[Nm]	moment vnější silové zátěže
M_{L1}	[Nm]	moment vnější silové zátěže – pohyb členu 3
M_{L2}	[Nm]	moment vnější silové zátěže – pohyb členu 1
M_{MOT}	[Nm]	kroutící moment motoru
M_{MOT/f_H}	[Nm]	kroutící moment motoru odpovídající dané frekvenci f_H
$M_{PŘ}$	[Nm]	kroutící moment planetové převodovky
M_{RED}	[Nm]	redukovaný kroutící moment
n	[-]	počet činných přísavek
n_{kc}	[kroků/otáčka]	celkový počet kroků
n_r	[kroků/otáčka]	počet kroků na rozběh
n_b	[kroků/otáčka]	počet kroků na brždění
Δp	[MPa]	hodnota vakua
r	[mm]	poloměr členů 2 a 4
r_k	[mm]	poloměr členů 2 a 4
s_k	[kroků/otáčka]	počet plných kroků na otáčku
t_b	[s]	doba brždění
t_c	[s]	celková doba pohybu
t_k	[s]	doba konstantní rychlosti
t_r	[s]	doba rozběhu
U_N	[V]	napájecí napětí
v_{s3}	[m.s^{-1}]	rychlost členu 3
x	[mm]	vzdálenost skleněných tabulí
x_1	[mm]	vzdálenost polohy těžiště členu 1 od referenčního bodu
x_3	[mm]	vzdálenost polohy těžiště členu 3 od referenčního bodu
x_T	[mm]	celková vzdálenost polohy těžiště od referenčnímu bodu
y_1	[mm]	vzdálenost polohy těžiště členu 1 od referenčního bodu
y_3	[mm]	vzdálenost polohy těžiště členu 3 od referenčního bodu
y_T	[?]	celková vzdálenost polohy těžiště od referenčnímu bodu
z	[mm]	zdvih plošiny
β	[°]	náklon pracovní plochy od horizontální roviny

φ	[°]	úhel natočení členů 2 a 4 vzhledem k pracovní ploše
φ_0	[°]	plný krok motoru
φ_{PJ}	[°]	úhel natočení motoru
ω_2	[rad.s^{-1}]	úhlová rychlost členu 2

ÚVOD

Moderní architektura reaguje na požadavky vyspělé společnosti. Stále více přibývá komplikovaných a rozmanitých tvarů budov a použitých materiálů. Současným trendem rozvoje moderní architektury je projektování unikátních výškových budov s částečným nebo téměř úplným skleněným opláštěním. Z toho důvodu je možné očekávat rozmach v oblastech autonomního čištění těchto ploch. Proto nabývá na významu realizace speciálních zařízení, díky kterým bude možné snadno dosáhnout jejich vyčištění a také zpřístupnění nedostupných míst.

Cílem této práce je zachytit současný rozvoj robotů orientovaných na problematiku poloautomatického nebo plně automatického mytí skleněných plášťů budov a na základě rozboru požadavků a současného stavu mycích robotů následně navrhnout konstrukční řešení mobilní plošiny robotu schopného pohybu po vertikální stěně.

Diplomová práce je rozdělena do pěti kapitol. V první kapitole je provedeno rozdělení jednotlivých druhů servisních robotů, spolu s přehledem současné úrovně robotů schopných pohybu po vertikálních stěnách. Ve druhé kapitole je provedena analýza koncepčních řešení mobilní plošiny robotu a výběr vhodné varianty pro konstrukční zpracování. Třetí kapitola je věnována koncepční studii technologie čištění, jednotce pro natočení mechanismu a alternativnímu návrhu připojení čistícího agregátu k pohybovému ústrojí robotu. Ve čtvrté kapitole je popsáno konstrukční řešení pohybového ústrojí robotu spolu s potřebnými výpočty. Konstrukční řešení bylo zpracováno také formou technické dokumentace. V poslední části je provedeno technickoekonomické zhodnocení a posouzení přínosu daného řešení.

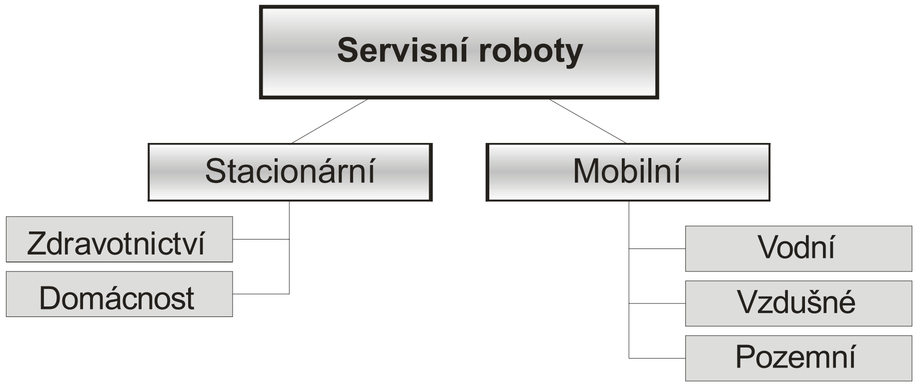
1. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU SERVISNÍCH ROBOTŮ

1.1. Klasifikace servisních robotů

Servisní robot (dále pouze SR) je volně programovatelné mobilní zařízení, z části nebo zcela automaticky konající servis (služby), který neslouží přímo k výrobě hmotných statků, ale k působení na lidi a technické systémy i jiné objekty.

Obecně je struktura SR tvořena mobilní plošinou zajišťující pohyblivost (kola, pásy, kráčení, vznášení, atd.) a jedním či více aplikačními moduly nebo podsystémy (manipulační jednotky, koncové efektory a moduly informační, komunikační, řídící, bezpečnostní aj.) [1]. Přitom základní klasifikace SR (*obr. 1*) je značně nejednotná. Systematické řazení podle rozhodujících znaků bude možné učinit až po jejich širším rozvoji a uplatnění.

Dělení SR podle kritérií *typu servisní úlohy* (technologická činnost, netechnologická činnost nebo pomocná činnost), *typu prostředí* (nebezpečné, nepřirozené, veřejné, domácí a osobní) nebo případně také podle *typu podvozku* (kolesové, pásové, kráčející a netradiční), je zatím velmi hrubé pro potřeby návrhu a hodnocení konstrukcí.



Obr. 1 *Základní klasifikace servisních robotů.*

Jako dobrý základ pro další strukturování klasifikace SR se jeví dělení servisních robotů podle oblastí použití a následně také podle činností [2]:

- Oblast nepřirozeného prostředí
  - mořské, podzemní, vesmírné - nosiče sond a zařízení.

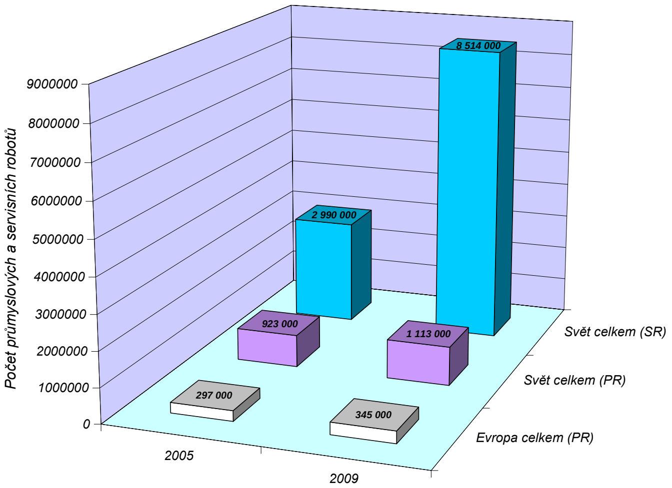
- Oblast nebezpečného prostředí
  - prostředí chemické, radioaktivní, destrukční práce, nosiče zbraní, policejní a vojenské aplikace (pyrotechnické roboty), protipožární roboty.

- Oblast veřejného prostředí
  - čištění, úklid, monitoring, údržba, veřejný dozor.

- Oblast domácího prostředí
  - domácí práce, obslužné práce, pomocné práce.

- Oblast osobního životního prostředí
  - protetická, osobní obsluha, zábava.

Mezinárodní federace robotiky (*IFR*) vydala v roce 2006 studii týkající se počtu používaných robotů v roce 2005, s výhledem na období do roku 2009 (*obr. 2*). Tato studie předpokládá světový nárůst průmyslových robotů o minimálně 6% s tím, že se množství servisních robotů do konce roku 2009 zvýší až na trojnásobek dosavadního počtu [3].



Obr.2 *Celkový počet průmyslových a servisních robotů v roce 2005 s výhledem na rok 2009.*

1.2 Současný stav servisních robotů

Servisní robot, který je schopen práce na vertikální stěně, umožňuje automatizaci úloh do této doby vykonávaných vesměs manuálně. S nastupující automatizací jednotlivých úloh vzrostla také míra bezpečnosti obslužného personálu spolu s efektivitou procesu. Některé "šplhající roboty" jsou dnes již běžně využívány. Jedná se o čištění výškových budov, inspekci nebezpečných prostředí jako jsou např. nádrže v ropném

průmyslu a jaderné elektrárny, opravy trupů lodí nebo protipožární ochranu. Nadále se usiluje i o využití těchto robotů ve vesmírných aplikacích.

Mechanismus, který udrží pohybové ústrojí robota na stěně během pracovní fáze, ale samozřejmě i během pohybu, je poměrně složitou záležitostí. V praxi jsou v současnosti využívány dva běžné a jeden nekonvenční princip přídržného mechanismu pohybového ústrojí robotů šplhajících po stěnách [13]:

- Sací adheze - Jedná se o nejběžnější typ přilnavosti pohybového ústrojí. Robot nese na palubě čerpadlo k vytvoření vakua uvnitř přísavek, které jsou tisknuty ke stěně. Hlavními nevýhodami podtlakových prvků jsou především čas potřebný pro vytvoření dostatečného množství vakua, což může následně snížit rychlost pohybu celého ústrojí, dále pak trhliny v povrchu ohrožující přilnavost plošiny z důvodu nedostatku či úplné ztráty vakua a také závislost na atmosférickém vzduchu, bez kterého není možné vytvořit vakuum.

- Magnetická adheze - Využívána spíše pro specifické aplikace, kdy může být plnohodnotně zužitkováno jejich spolehlivé přilnavosti k povrchu. Nevýhodou je, že můžou být uplatněny pouze v prostředí s feromagnetickým povrchem.

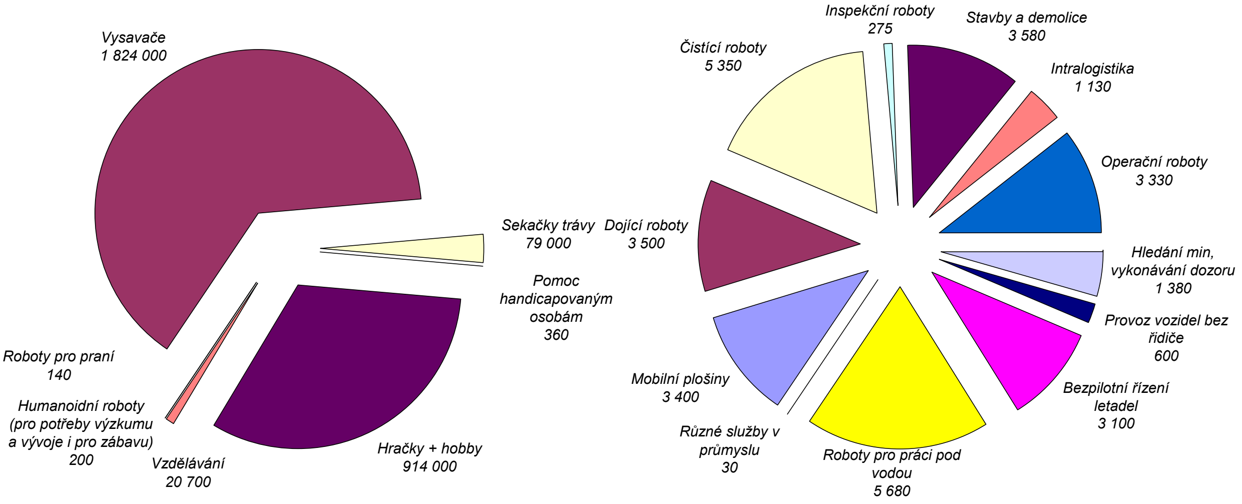
- Ultra adheze - Zcela nekonvenční a poměrně mladou metodou přilnavosti jsou syntetické nano-vlákenné materiály. Přestože je možná jejich aplikace na široké škále povrchů a to i v případě prasklin, nesplňují zatím dostatečně požadavky aplikačního užití. Snaha o uplatnění tohoto druhu adheze se objevuje v poslední době především ve vesmírných aplikacích.

Větší potřeba míry bezpečnosti a také zvýšení kvality vykonané práce při minimalizaci všech nákladů nasměrovalo uplatnění servisních robotů i do oblasti údržby vnějších plášťů budov. Jejich nasazení je levnější, bezpečnější a efektivnější oproti manuální činnosti.

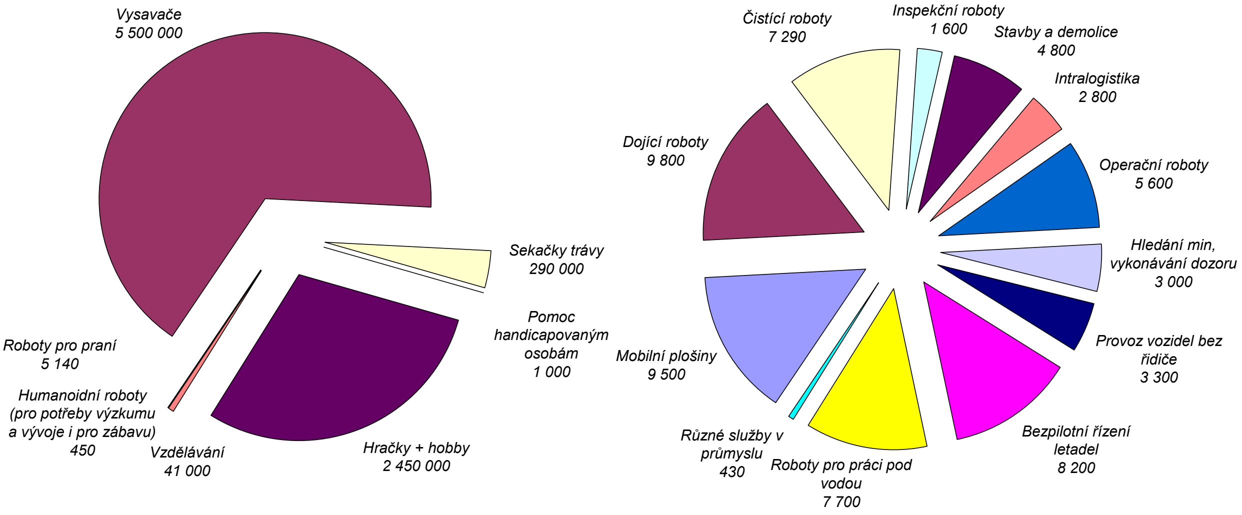
1.3 Čistící a inspekční roboty

Oblast využití servisních robotů pro mytí opláštění skleněných budov získává uplatnění až v posledních letech. Ve většině případů se proto počítá s řešením mytí již od prvotního stavebního plánu a dané robotizované zařízení je poté vázáno ke konkrétní stavbě.

Série takovýchto robotů již existuje v provedení určeném k horizontálnímu čištění v podobě mobilních vysavačů a mycích jednotek, což představuje značnou část celkového počtu servisních robotů (viz. příklad na *obr. 3 a obr. 4*). Je zřejmé, že se bude i nadále rozvíjet výroba servisních robotů s uplatněním jak v privátních (sekačky trávy, prací roboty, vysavače, hobby, hračky, atd.), tak i v průmyslových sférách [3].



Obr. 3 *Servisní roboty v roce 2005, privátní a průmyslová sféra.*



Obr. 4 *Servisní roboty v roce 2009, privátní a průmyslová sféra.*

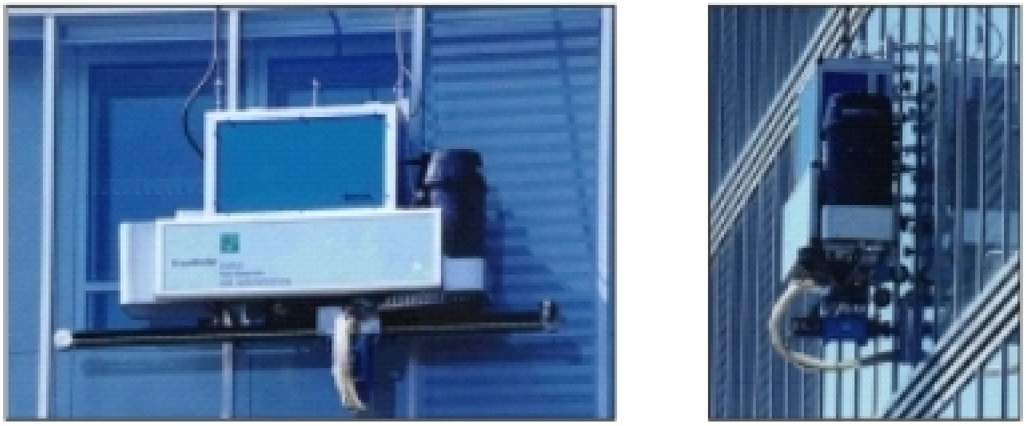
Řešením problematiky čištění vertikálních skleněných plášťů budov a inspekčními úlohami se zabývá mnoho renomovaných firem, univerzit a přidružených vývojových laboratoří. Z koncepčního hlediska existují tři základní úrovně řešení pohybového ústrojí těchto automatů:

- roboty závěsné;
- roboty poloautomatické;
- roboty automatické.

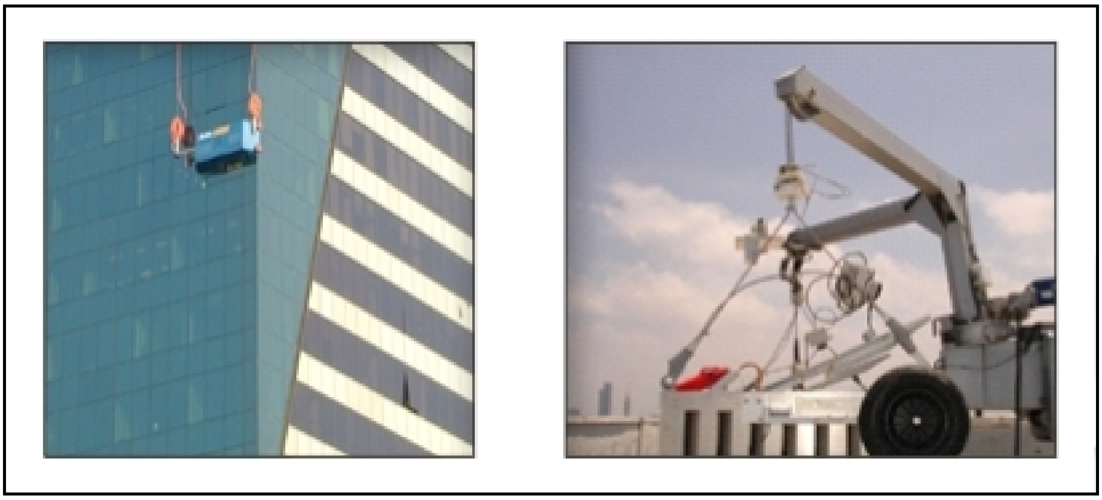
1.3.1 Roboty závěsné

Závěsné roboty jsou dnes nejčastěji užívanou variantou. Představují strategii poloautomatického robotu, který je ve vertikální poloze zajišťován kotevními lany *(obr. 6)*, jejichž délka je postupně modifikována specifickým jeřábovým systémem umístěným na střeše budovy nebo pod budovou. Bezpečnou vzdálenost od skleněného pláště udržuje kolový podvozek vlastního robotu, jehož nedílnou součástí jsou systém axiálního přítlaku pro pozicování a přidržení plošiny během procesu čištění a mycí jednotka. Čistící médium je přiváděno buď z energetického vozíku, který zůstává na zemi, nebo z vlastní recyklační jednotky připojené k pohybovému ústrojí. Znečištěná voda je odsávána speciálním systémem a kompletně recyklována.

Typickými zástupci této úrovně mycích robotů jsou roboty *SkyWipe+* (*obr. 5*) vyvinutý v Fraunhofer IFF institutu v Německu [4], nebo již průmyslově vyráběný robot *Skybot 2010-20* (*obr.6*) Izraelské společnosti SKY BOT ltd. [5].



Obr. 5 *Servisní robot SkyWipe+.*

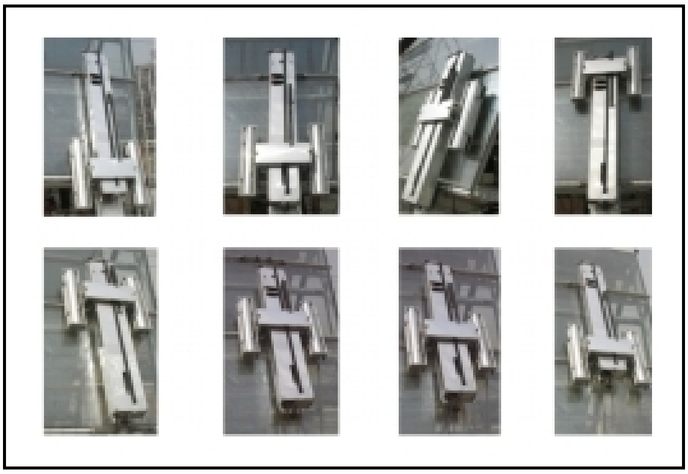


Obr. 6 *Servisní robot Skybot 2010 spolu s jeřábovým systémem.*

Další variantou přichycení robotu mohou být také konstrukční vodící prvky zhotovené přímo na stěně budovy. V tomto případě již není potřeba jiných závěsných a bezpečnostních systémů. Je ovšem zřejmé, že použití tohoto typu robotu je nutné zahrnout již do prvotního plánu výstavby dané budovy a není tudíž možné využít tento mycí robot univerzálně i pro jiné typy budov.

Ve spolupráci univerzit v Hamburku a Čínském BeiHangu byl realizován projekt, jehož cílem bylo zkonstruovat *„šplhající robot“* využívaný pro čištění sférických ploch (rovné desky napojené pod určitým úhlem) Národního divadla v Číně [6]. Robot využívá při svém pohybu ve vertikálním směru konstrukčních drážek na stěnách budovy, umístěných mezi jednotlivými vrstvami skleněných tabulí. Hlavní tělo robotu tvoří dva rámy, které jsou poháněny elektromotory a mohou se po sobě volně pohybovat (*obr. 7 a obr. 8*). Horizontální pohyb ve vodících drážkách podél budovy umožňuje sada kol umístěných na hlavním rámu.

***Obr.** 7* *Šplhající robot.*



Obr. 8 *Přesun robotu mezi jednotlivými vrstvami skla.*

Výhody: jednoduchost,
spolehlivost,
vysoká účinnost mytí.

Nevýhody: poměrně značná hmotnost,
vázáno na konkrétní budovu,
nutnost instalace jeřábu či jiného závěsného systému.

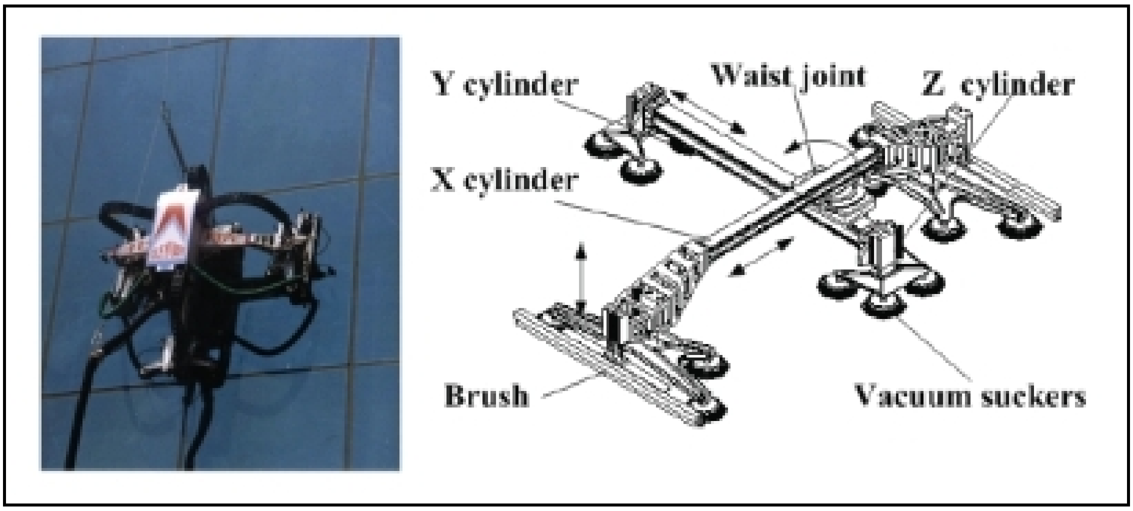
1.3.2 Roboty ve větší míře autonomní

Větší autonomnost pohybu poskytují mobilní plošiny koncipované na bázi podtlakových úchopných prvků s možností pohybu po stěně s maximálním sklonem až 90°. Tyto „kráčející roboty“ jsou schopny překonávat jisté překážky (spojovací lišty jednotlivých tabulí skla, větrací a dveřní lišty, aj.) a jsou naváděny teleoperátorem. Doplněny jsou mycí jednotkou s externím přívodem čistícího média, tj. bez vlastního zásobníku. Tato skupina robotů vyžaduje zvýšenou pozornost při návrhu bezpečnostních opatření a zabezpečení robotu proti náhlým poruchám nebo pádu ze stěny.

Speciálně za účelem mytí skleněné pyramidy v Louvru byl vyvinut čtyřnohý kráčející robot *RobuGLASS* (*obr. 9*) Francouzské firmy ROBOSOFT [7]. Tento mycí robot je schopen pohybu po vertikálních stěnách s překážkami o maximální jmenovité výšce h_{max}=20mm. Při pohybu i čištění skleněné plochy je jištěn podtlakovým přídržným systémem a proto nepotřebuje další jištění proti pádu ze stěny.

Obr. 9 *Servisní robot RubuGLASS.*

Roboty *Sky-cleaner I-IV* (*obr. 10*) jsou produktem Institutu TAMS – Univerzita Hamburg a jsou sestaveny pouze z pneumatických komponent [9, 10, 15, 8]. Pohyb v rovině čištěné plochy zajišťuje dvojice pneumotorů spojených do kříže pomocí kloubu sloužícího ke kompenzaci drobných úhlových nepřesností pohybu. Jsou schopny překonat drobné překážky na skleněné ploše a pro zvýšení bezpečnosti proti pádu jsou opatřeny navíjecím systémem, spojeným se střechou budovy ocelovým lanem.



Obr. 10 *Servisní robot Sky-cleaner.*

Výhody: zvýšení autonomnosti pohybu,
zvýšení míry použitelnosti,
odpadá instalace jeřábu.

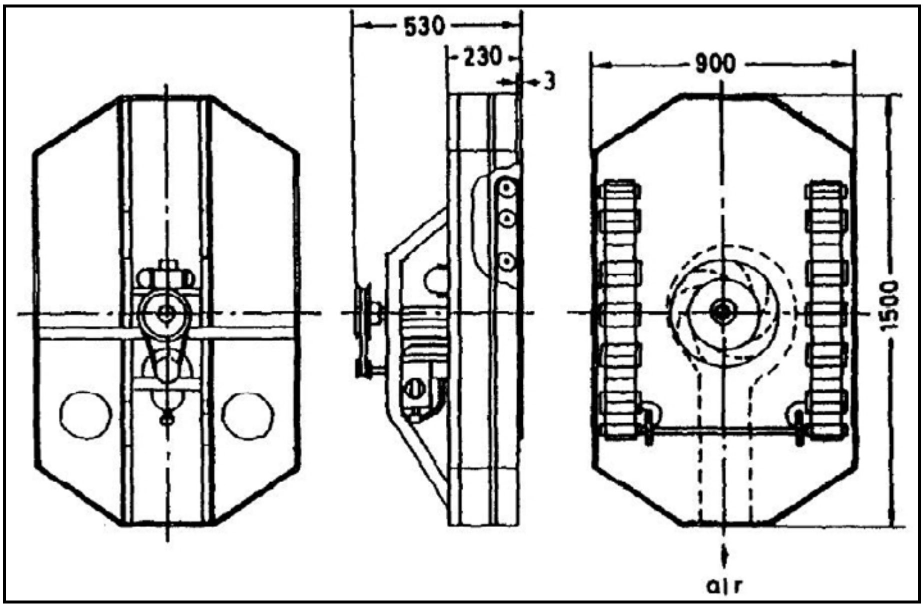
Nevýhody: zajištění dostatečné bezpečnosti,
pokles mycího výkonu.

1.3.3 Plně automatizovaný robot

Autonomní a plně automatizovaný robot, tj. celek s individuálním pohybem, doplněný řídícím systémem s plnohodnotnou vizualizací scény. Spojení s okolím se v tomto případě omezuje pouze na dálkové bezdrátové ovládání a zdroje energie jsou vesměs součástí pohybového ústrojí. Jedná se o nejvyspělejší variantu řešení.

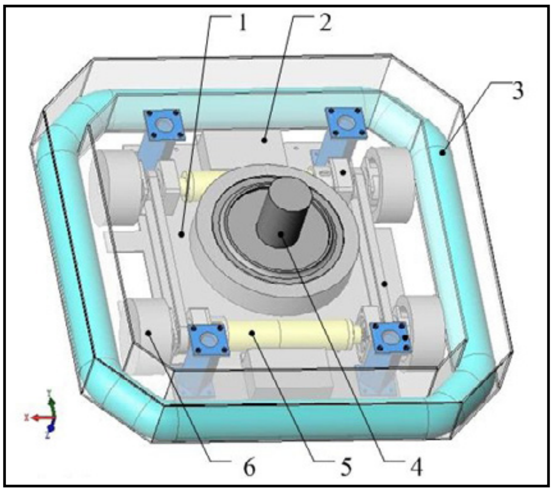
Robot *„Large sucker“* (*obr. 11*) využívá k vytvoření dostatečné upínací síly ke stěně podtlaku (popř. magnetismu) pomocí mechanismu pracujícího na obráceném principu vznášedla. Celé pohybové ústrojí bylo navrženo jako jedna veliká podtlaková

přísavka. Mezera mezi okrajem plošiny a stěnou je utěsněna manžetou sloužící ke snížení atmosférického vzduchu proudícího dovnitř a tím pádem bránící prudkému poklesu vakua. K pohybu byla využita kola a v případě rovných, širokých ploch bez překážek také pásy. Sací dmychadlo a DC motorky pro pohon kol jsou součástí pohybového ústrojí. Mezera mezi stěnou a robotem, spolu s koeficientem tření a výkonem dmychadla jsou hlavní faktory, mezi kterými je zapotřebí najít optimální poměr pro vytvoření dostatečné upínací síly ke stěně [11].



Obr. 11 *Large sucker robot.*

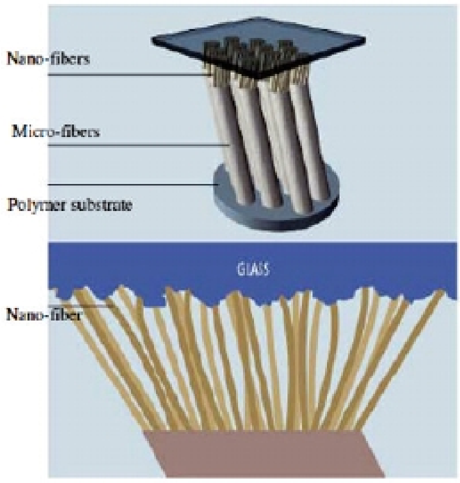
Odlehčená mobilní plošina robotu pro záchranné mise (o*br. 12*), nesoucí senzory a CCD kameru a pohybující se na stejném principu jako předchozí robot, byla vyvinuta v Institutu TAMS – Univerzita Hamburg [10]. Její flexibilitu dokládá možnost využití na plochách s různou kvalitou povrchu a rozdílnými materiály, spolu se schopností překonávat drobné překážky (výška x šířka – 50mm x 50mm).



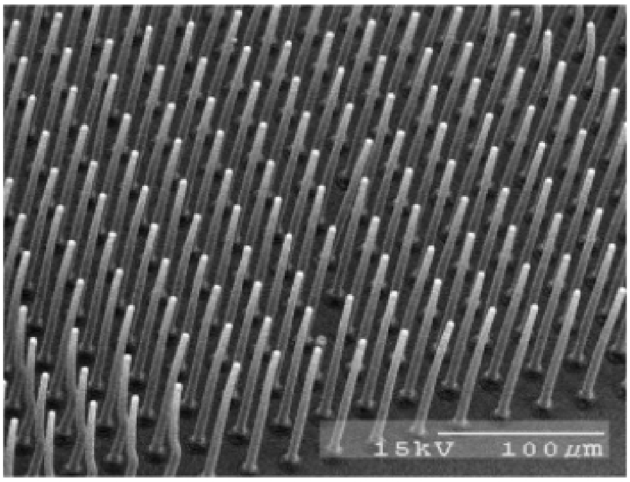
Obr. 12 *CAD model robotu „Smart".*

Výroba umělých ultra-adhezivních vláken (o*br. 14*), použitelných pro roboty šplhající po stěnách, byla inspirována úchopným mechanismem zvířat jako jsou ještěrky či

brouci. Schopnost těchto zvířat, udržet se na různých stěnách a různých materiálech, spočívá především v jejich nohách, na kterých mají miliardy miniaturních vláken. Každé vlákno je složeno z micro-vlákna o maximálním průměru kolem 5μm a 100-1000 nano-vláken na povrchu každého micro-vlákna (*obr. 13*) [12, 13].

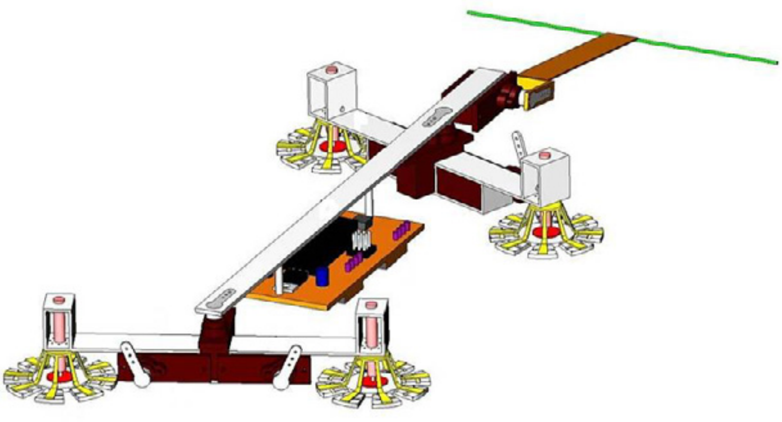


Obr. 13 *Struktura vláken robotu Gecko.*

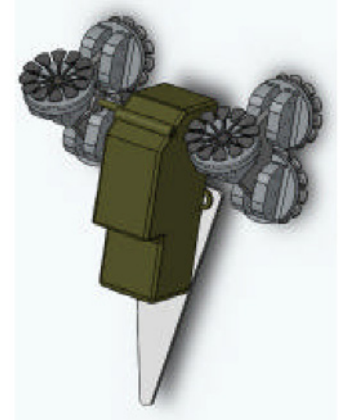


Obr. 14 *Umělá ultra-adhezivní vlákna.*

Klasickými představiteli této skupiny robotů jsou maloplošné roboty *Geckobot* (*obr. 15*) a *Waalbot* (*obr. 16*) vyvinuté na Univerzitě v Pittsburghu [14]. Tyto roboty nejsou schopny (především kvůli svým rozměrům) překonávat překážky a proto je u nich důležité řízení pohybu v jakémkoliv směru. Důležitým prvkem je také mechanismus pro „odloupnutí“ nohy od stěny před jejím následujícím pohybem. Zdroj energie, mikroprocesor, ovladače a senzory jsou umístěny na těle robotu, především z důvodu zvýšení míry autonomního pohybu.

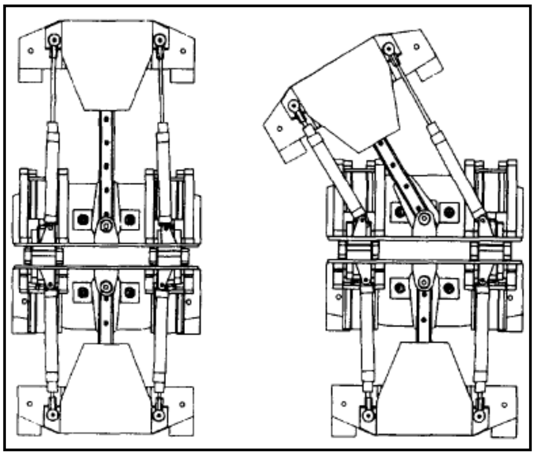


Obr. 15 *CAD model robotu Geckobot.*

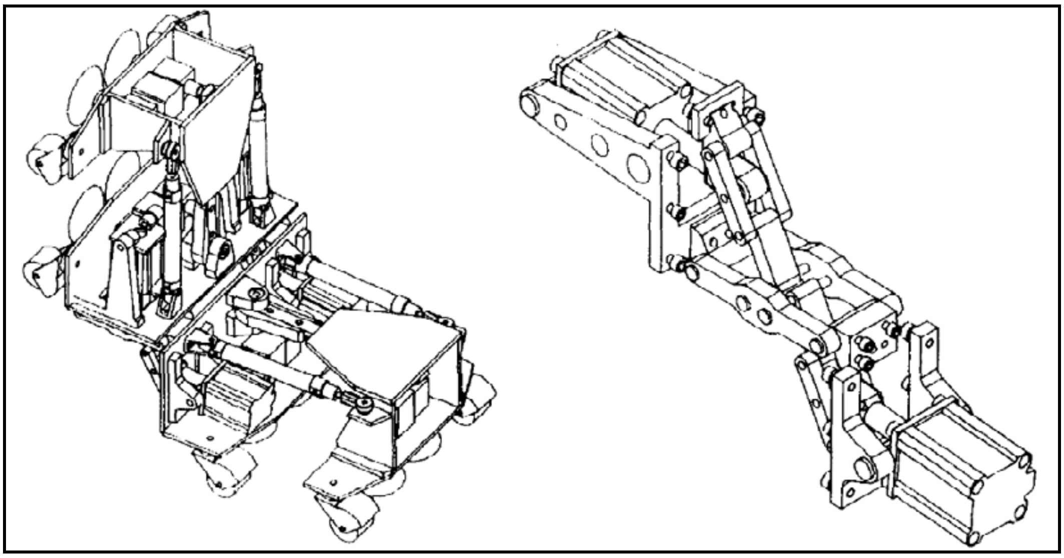


Obr. 16 *CAD model robotu Waalbot.*

Pro mechanický robot *ROBICEN* [16], vyvinutý v rámci projektu několika světových univerzit, byla zvolena koncepce s pneumotory a podtlakovými přísavkami (*obr. 17*) především proto, že mají pneumatické komponenty dobrý poměr mezi hmotností a silou, kterou jsou schopny vyvinout. Mezi hlavní části robotu patří mobilní plošina, senzorická hlava a řídící panel. Dvě identická těla mobilní plošiny robotu jsou spojena speciálně vyvinutými klouby složenými ze dvou pneumotorů a mechanismu zajišťujícího naklopení o potřebný úhel (*obr. 18*) s maximálním možným naklopením o 90°. Každé tělo robotu má dva pneumotory , centrální vedení pro dosažení potřebné tuhosti a čtyři podtlakové přísavky zajišťující pohyb plošiny a bezpečné držení na stěně. Pohyby robota jsou složeny pouze ze základních posuvů a rotací.



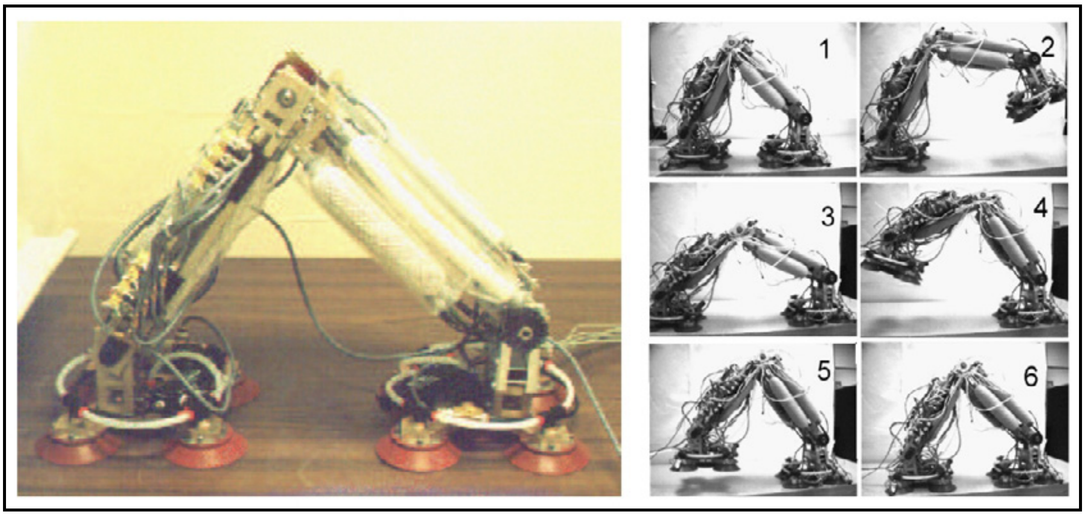
Obr. 17 *Servisní robot ROBICEN.*



Obr. 18 *Mechanismus pro naklápění robotu.*

Běžně dostupné podtlakové přísavky nedrží dostatečně na hrubých plochách a tak byly okraje přísavek opatřeny speciální samolepící páskou (B1-AF/Armaflex – produkt firmy Armstrong). Vakuum je generováno ze stlačeného vzduchu využitím Venturiho efektu. Mikroprocesor na palubě robotu je propojený sériovým portem s osobním počítačem, integrovaným v naváděcím panelu operátora.

Zcela odlišnou variantou provedení mobilní plošiny zastupuje kráčející robot *ROBIN* (ROBotic INspektor) [17]. Tento robot (o*br. 19*) má dvě vakuové nohy propojené kloubovým mechanismem se 4° volnosti, který umožňuje jak rovinný pohyb, tak i přesun mezi sousedními plochami. Za zcela speciální je možné označit využití pneumatických svalů k pohybu robotu, řízených velmi jednoduchým systémem ventilů (on/off system).



Obr. 19 *Servisní robot ROBIN spolu s jednotlivými fázemi kroku.*

Nohy zajišťují bezpečné uchycení při jakémkoliv sklonu stěny a pět přísavek na každé z nich je rozmístěno do růžice. Aby se minimalizovalo nebezpečí poklesu podtlaku v důsledku praskliny v povrchu stěny, bylo zapotřebí zvolit vhodný poměr mezi požadavky minimální plochy nohou a naopak maximální vzdálenosti jednotlivých přísavek.

Výhody: velmi vysoká míra autonomnosti pohybu,
vizualizace scény.

Nevýhody: poměrně složitá zařízení,
další poklesy mycího výkonu.

1.4 Požadavky na mechanismus mobilní plošiny

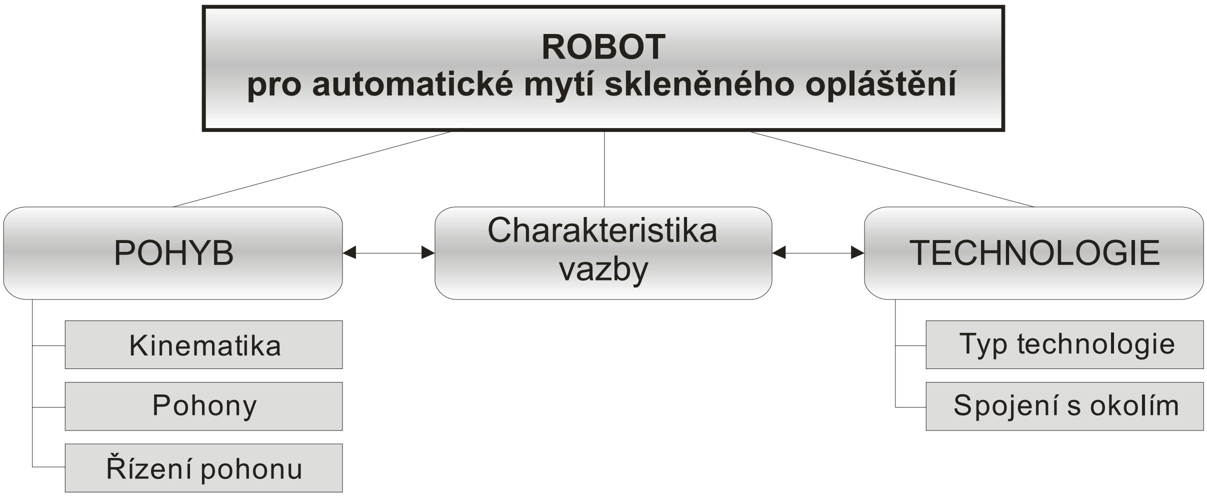
Mezi hlavní požadavky na konstrukční řešení mechanismu mobilní plošiny patří především:

- co nejvyšší míra autonomního pohybu;
- minimalizace hmotnosti, minimalizace odlehlosti těžiště od skleněné plochy;
- zajištění dostatečné bezpečnosti držení na vertikální skleněné ploše.

2. KONCEPČNÍ NÁVRH MOBILNÍ PLOŠINY

2.1 Koncepce mobilní plošiny čistícího robotu

Základní dělení koncepce čistícího robotu je znázorněno na *obr. 20*:



Obr. 20 *Základní dělení koncepce robotu pro automatické mytí.*

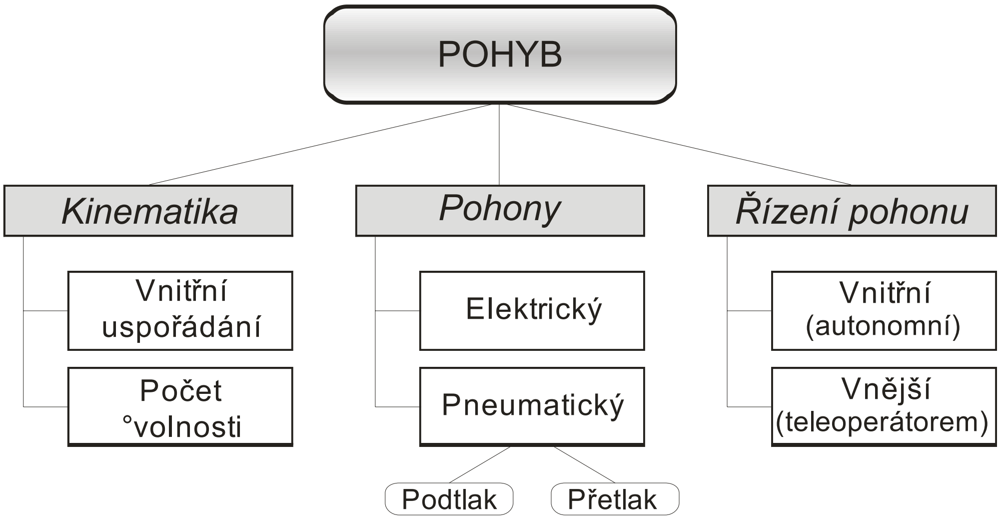
Mechanismus robotu pro automatické mytí skleněného opláštění budov lze z koncepčního hlediska rozdělit na dva dílčí mechanismy:

a) **Pohybové ústrojí robotu** - zajišťující pohyb robotu v rovině pracovní plochy a dostatečné upevnění robotu na dané ploše během pohybu i pracovní fáze.

b) **Mechanismus čištění skleněných ploch** - pro realizaci dané technologie čištění, včetně vazby k pohybovému ústrojí a okolnímu prostředí.

Základním koncepčním rozlišením robotu je charakter pohybu mobilní plošiny, která nese vlastní čistící zařízení. Je zřejmé, že jsou pohyb, spolu s technologií čištění a charakteristikou vazby úzce spjaty a hodně se navzájem ovlivňují.

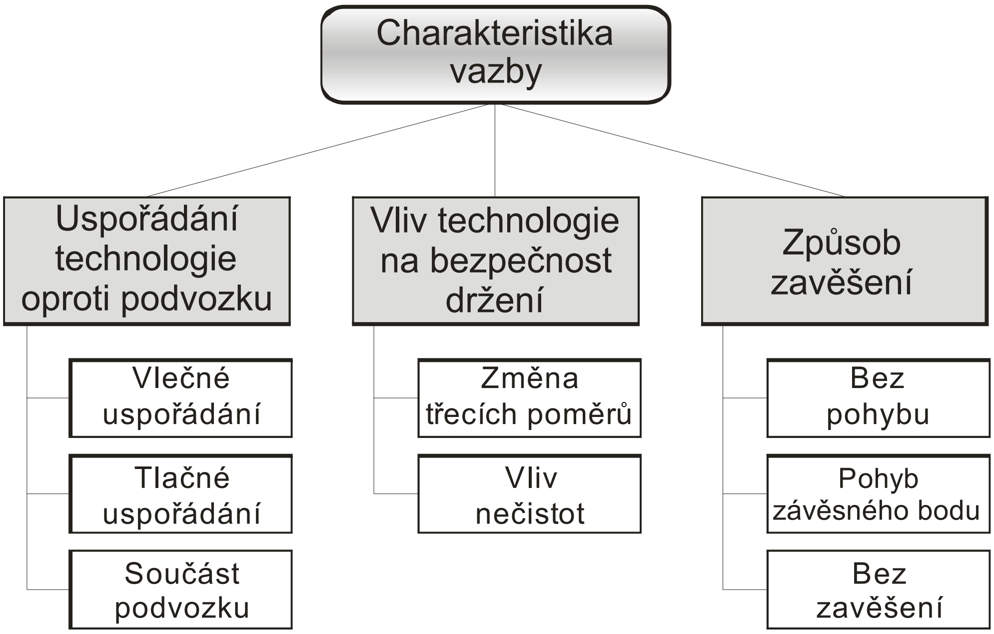
Pohyb robotu (*obr. 21*) lze rozlišovat z hlediska použitých pohonů, způsobu řízení pohonů a také z hlediska vnitřního uspořádání a kinematiky daného zařízení. Pro pohyb robotu je možné využít několika druhů pohonů. Důležitou roli při volbě pohonů hraje druh pohybu a vnitřní uspořádání robotu, autonomnost pohybu, tvar skleněné plochy, způsob řízení a v neposlední řadě také hmotnost robotu.



Obr. 21 *Základní rozdělení koncepce pohybu.*

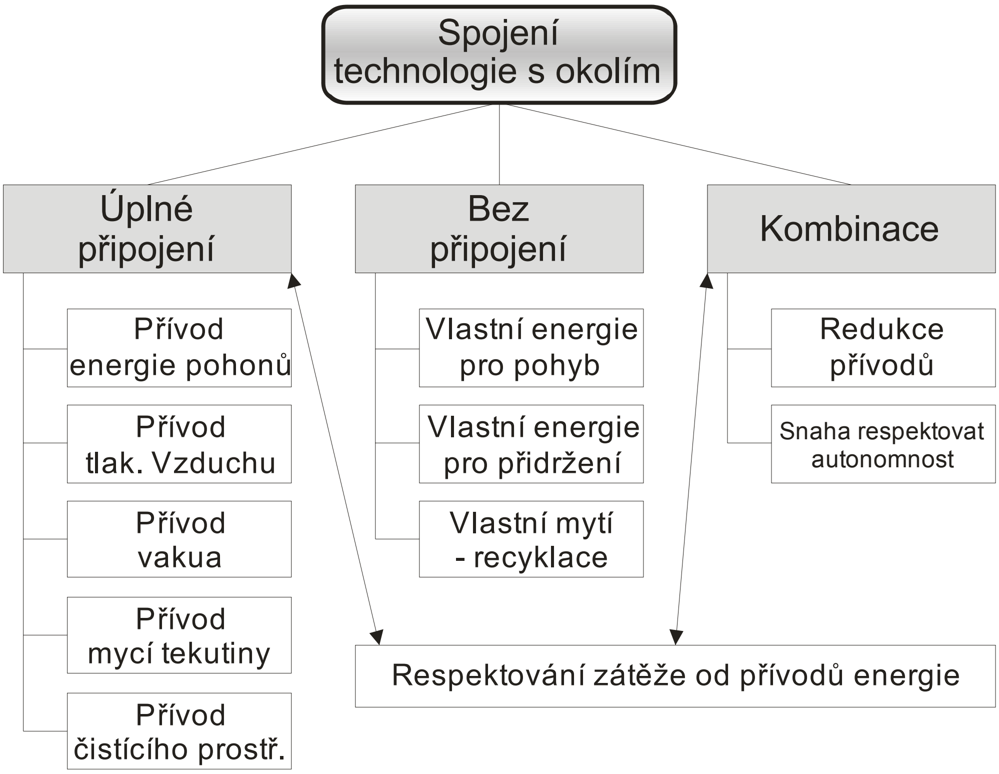
Volba pneumatických pohonů může být, oproti elektrickým, vhodnější vzhledem k celkovému zjednodušení řízení robotu, odlehčení konstrukce robotu a nižší míry opotřebení komponent. Elektrické motory naopak rychleji reagují na signál a z hlediska řízení pohybu i přesnosti pozicování jsou přesnější.

Charakteristiku vazby (*obr. 22*) je možné chápat jako pojítko mezi pohybem mobilní plošiny a technologií čištění skleněné plochy. Za pozornost zde stojí především uspořádání technologie oproti podvozku plošiny nebo ovlivnění bezpečnosti držení během čistícího procesu. Velmi důležité je také řešení jednotlivých způsobů bezpečnostních aspektů.



Obr. 22 *Základní rozdělení charakteristiky vazby.*

Typ technologie čištění (*viz. kapitola 3.1*) a její spojení s okolním prostředím (*obr. 23*) mají podstatný vliv na výsledný charakter pohybu robotu. Úplné spojení technologie s okolím znamená přívod všech druhů energie (energie elektrických pohonů, tlakový vzduch, vakuum, mycí tekutina, atd.) z energetického vozíku, umístěného na zemi pod budovou nebo na střeše budovy. Zcela autonomní spojení potom naopak znamená, že jsou veškeré zdroje energie na palubě mobilní plošiny bez propojení s okolím. Často využívanou variantou je kombinace obou výše zmiňovaných způsobů, kdy jsou přívody určitým způsobem redukovány. V případě úplného nebo kombinovaného spojení technologie čištění s okolím je důležité respektovat zátěž od energetických přívodů.



Obr. 23 *Základní rozdělení spojení technologie s okolím.*

V této kapitole jsem se zabýval alternativními návrhy řešení pohybového ústrojí mobilního čisticího robotu pro pohyb na vertikální stěně budovy. Byly zpracovány celkem tři alternativní návrhy čisticího robotu a z nich následně vybráno, pomocí rozhodovací analýzy, optimální řešení.

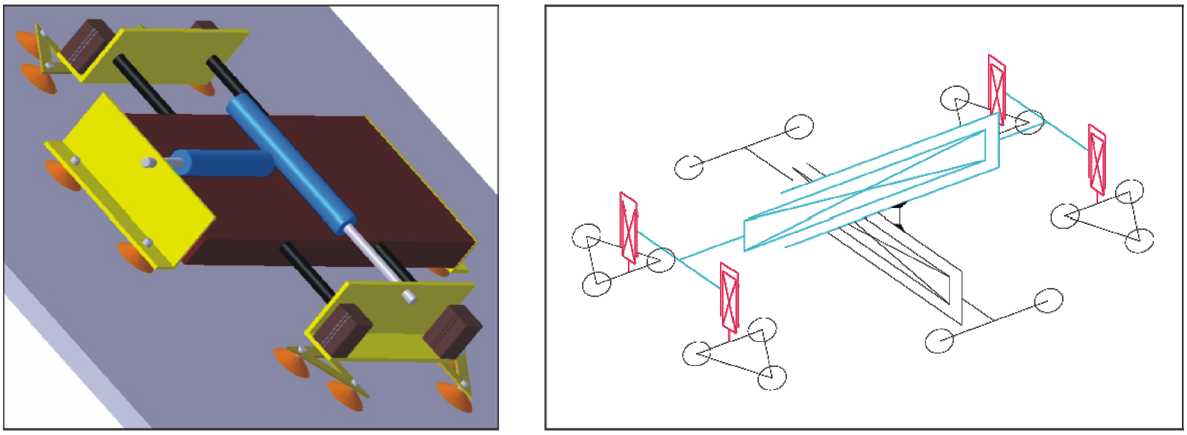
2.2 Alternativní návrhy mobilní plošiny čistícího robotu

Na základě podrobného rozboru požadavků na mechanismus, uvedených v *kapitole 1.4*, byly vybrány tři alternativní návrhy řešení mobilní plošiny pro pohyb po vertikální stěně:

- Křížový stůl;
- Kráčející robot;
- Robot „housenka“.

2.2.1 Varianta A – Křížový stůl

Mechanismus se skládá ze dvou na sebe kolmo uložených lineárních jednotek s lineárním vedením pro zajištění dostatečné tuhosti a kompenzaci nepřesností chodu. Pohon je zajištěn přímočarými pneumotory.



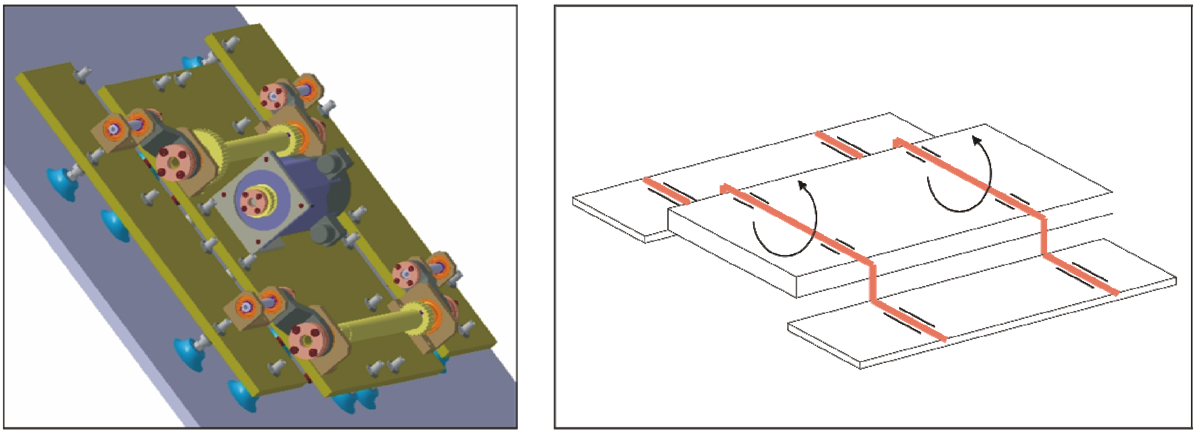
Obr. 24 *Zjednodušený model alternativního řešení mechanismu společně s kinematickým schématem – varianta A.*

Mechanismus s 3° volnosti umožňuje, kromě posuvů v pracovní rovině, překonávat drobné překážky zdvihem celého mechanismu ve směru osy kolmé na pracovní plochu. Z hlediska použitých pohonů a prvků zajišťujících úchopnou sílu se jedná o čistě pneumatické provedení s ovládáním pohybové sekvence aplikací PLC. K vyvození dostatečně velké úchopné síly byly zvoleny aktivní přísavky.

Čistící jednotka byla uvažována jako součást jedné z lineárních jednotek mobilní plošiny kde veškerá silová energie včetně čistících tekutin jsou přivedeny ze země, kde je umístěný energetický vozík.

2.2.2 Varianta B – Kráčející robot

Mechanismus je založen na principu dvou symetricky uspořádaných paralelogramů s rotačním přerušovaným pohybem kliky, zajišťující pseudokontinuální charakter pohybu plošiny.



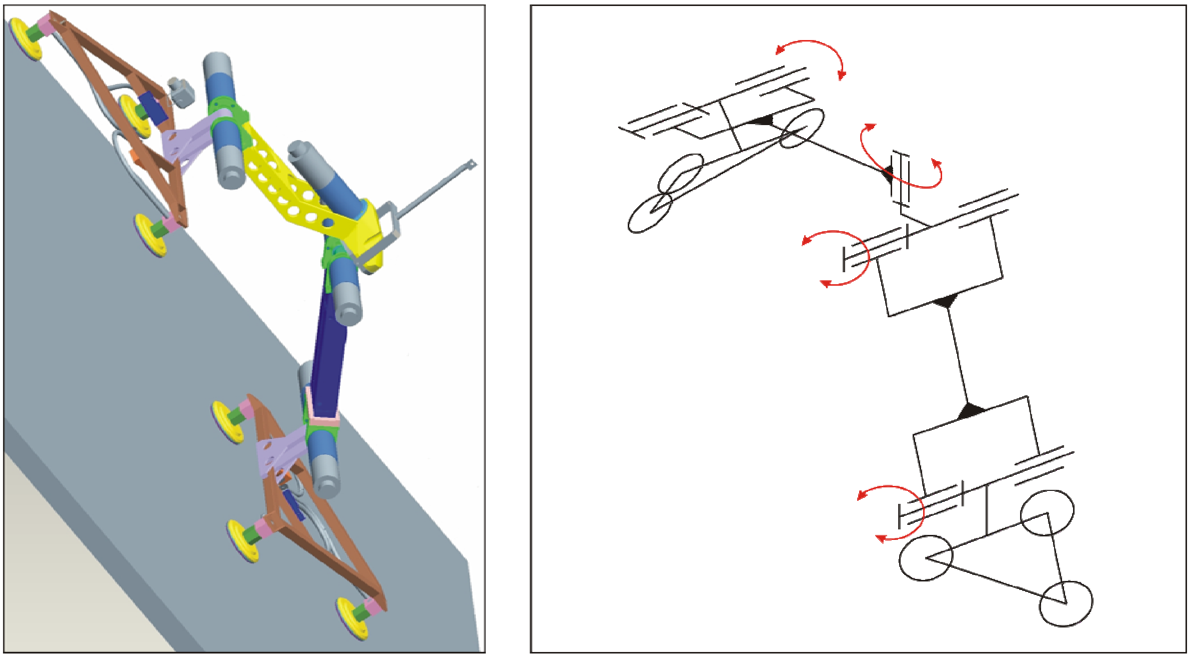
Obr. 25 *Zjednodušený model alternativního řešení mechanismu společně s kinematickým schématem – varianta B.*

Jedná se o systém s kombinovaným elektro-pneumatickým pohonem. Hlavní dopředný pohyb je realizován prostřednictvím krokového motoru s řemenovým převodem. K vyvození dostatečně velké úchopné (přídržné) síly byly zvoleny, stejně jako v předchozím případě, aktivní přísavky. Rychlé střídání podtlaku vakuových přísavek a jejich odvzdušnění je realizováno ve spojení s odměřováním polohy kliky a hodnoty dosaženého vakua. Ovládání pohybové sekvence je umožněno aplikací PLC.

Čistící jednotka byla uvažována jako vlečné zařízení s veškerými energetickými přívody ze země z energetického vozíku.

2.2.3 Varianta C – Robot „housenka“

Mechanismus který připomíná pohyb housenky, se 4° volnosti a schopností překonávat drobné překážky na skle a dokonce i přecházet mezi různě orientovanými plochami. Pohony pro rotaci robotu kolem jednotlivých os jsou řešeny elektrickými servopohony s mechanickými převodovkami. Ovládání pohybové sekvence je umožněno bezdrátově aplikací dálkového ovládání a mikroprocesoru na palubě mobilní plošiny.



Obr. 26 Zjednodušený model alternativního řešení mechanismu společně s kinematickým schématem – varianta C.

Vysokou míru autonomního pohybu zde naopak potlačuje nedostatek prostoru pro připojení čistící jednotky a s tím spojená rostoucí komplikovanost celého mechanismu.

2.3 Analýza variant

Nejvhodnější varianta z výše uvedených alternativních návrhů čistícího robotu byla vybrána pomocí rozhodovací analýzy, která umožnila objektivizovat proces rozhodnutí podle vhodného počtu užitných kriterií.

Soubor kritérií pro výběr vhodné varianty řešení byl zvolen takto:

1. míra autonomnosti;
2. ekonomičnost nasazení;
3. opakovatelnost nasazení;
4. hmotnost soustavy;
5. spolehlivost celé soustavy.

Pro přesnější posouzení míry závažnosti daných kriterií. Pro posuzování jednotlivých alternativ řešení byla každému kritériu přiřazena hodnota ze stobodové

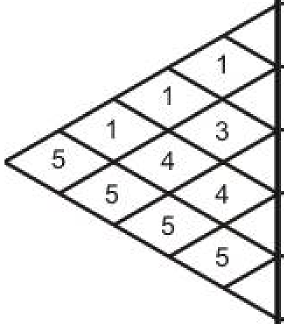
stupnice a vypočten vážený průměr. Pro stanovení pořadí důležitosti byla použita metoda párového srovnávání, jejíž základ je v postupném porovnávání míry důležitosti vybraného kritéria oproti ostatním a poskytuje váhu dílčích kritérií.

Posuzovány byly tři varianty řešení:

Varianta A – Křížový stůl;
Varianta B – Kráčející robot;
Varianta C – Robot „housenka“.

Podklady pro posouzení variant jsou přehledně uspořádány v *tabulce 1*. Na základě zhodnocení byla zvolena varianta B, které jsou věnovány následující kapitoly.

Tab. 1 *Rozdovací analýza*



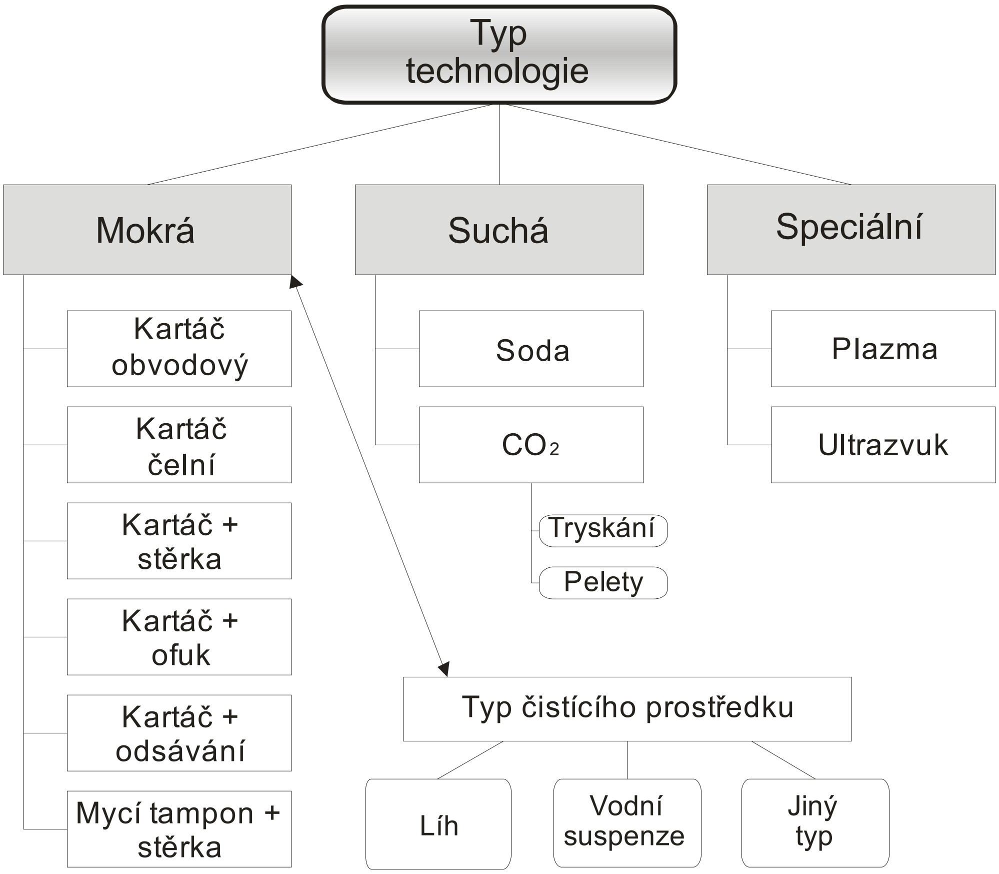
PÁROVÉ SROVNÁNÍ KRITÉRIÍ				MATICE UŽITNOSTI ALTERNATIV							
				X		A		B		C	
	Počet	Pořadí		Hodnota		Hodnota		Hodnota		Hodnota	
Poř.č.	voleb	významnosti	Váha	Prostá	Vážená	Prostá	Vážená	Prostá	Vážená	Prostá	Vážená
1.	3	2	4	100	400	60	240	85	340	70	280
2.	0	5	1	100	100	55	55	75	75	30	30
3.	1	4	2	100	200	70	140	90	180	75	150
4.	2	3	3	100	300	30	90	60	180	75	225
5.	4	1	5	100	500	65	325	85	425	85	425
CELKEM					1500	850		1200		1110	
UŽITNOST V RELATIVNÍM VYJÁDŘENÍ [%]						56,60%		80,00%		74,00%	
POŘADÍ ALTERNATIV PODLE UŽITNOSTI						**3**		**1**		**2**	

3. KONCEPČNÍ NÁVRH ČISTÍCÍHO AGREGÁTU

3.1 Koncepce technologie čištění skleněných plášťů

Mechanismus čištění skleněných ploch, jako jeden z dílčích mechanismů robotu, slouží k realizaci daného typu technologie čištění. Prostřednictvím pevné vazby k pohybovému ústrojí robotu a okolnímu prostředí, musí respektovat požadavky nízké hmotnosti při maximálním čistícím výkonu a vysoké míry tuhosti připojení při minimálním ovlivnění funkčnosti mobilní plošiny.

Jednotlivé typy technologie mytí, které je možné dílčím způsobem použít k čištění skleněných ploch, jsou znázorněny na *obr. 27*.

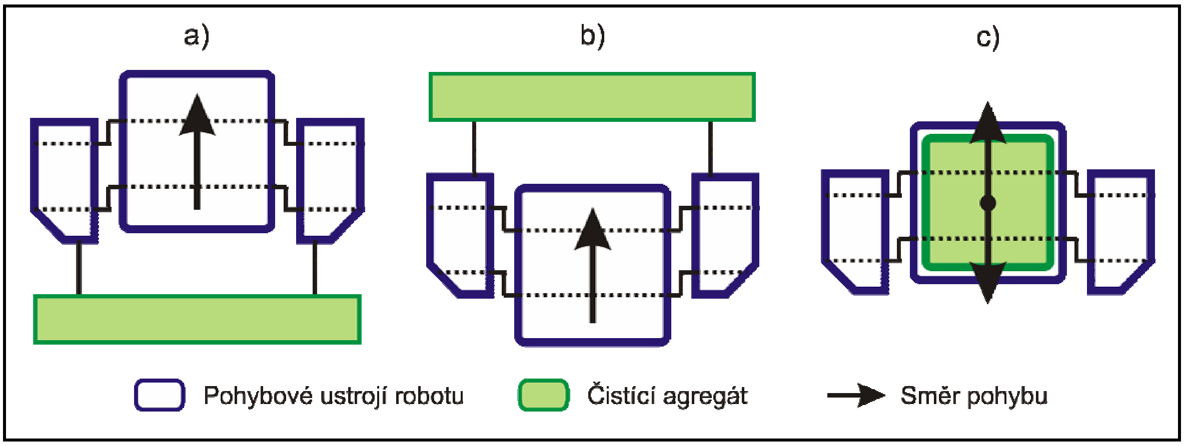


Obr. 27 *Základní rozdělení jednotlivých typů technologie čištění skleněných ploch.*

Ve většině případů stávajících řešení mycích robotů převládá mokré čištění v provedení – „kartáč ze syntetických materiálů + stěrka“ (popř. doplněné odsáváním). Moderní technologie (tryskání pelet CO_2, využití plazmy, atd.) zatím nejsou využívány v tak hojném počtu jak by se dalo očekávat. Pro další řešení problematiky

automatizovaného mytí skleněných plášťů budov by ovšem mohly být přínosem, především z hlediska zjednodušení a odlehčení celého systému.

Uspořádání čistícího agregátu oproti podvozku (*obr. 28*), spolu s charakterem pohybu robotu na vertikální ploše (*obr. 29*), vychází z rozdělení charakteristiky vazby (*viz. obr. 22*).



Obr. 28 *Uspořádání technologie čištění oproti podvozku mobilní plošiny.*

Při pohybu robotu po vertikální stěně je potřeba zajistit dostatečnou upínací sílu pro bezpečný pohyb robotu s minimálním nebezpečím pádu. Každé přídavné zařízení, připojené k mobilní plošině robotu, potřebnou hodnotu upínací sílu navýší. Proto je důležité, zajistit dostatečnou sílu upnutí i pro tato přídavná zařízení, kterým je také čistící agregát.

Čistící agregát ve vlečném a tlačném provedení připojení (*obr. 28a,b*) k mobilní plošině může, při dostatečné tuhosti a správně zvolené upínací síle, zachytit a rozložit klopné momenty zatěžující přísavky. Naopak provedení, kdy je čistící agregát součástí mobilní plošiny (*obr. 28c*) může celý systém poměrně zjednodušit a také podstatně odlehčit, ale za předpokladu stávajícího konstrukčního řešení mobilní plošiny nebude možné dosáhnout krajních míst na skleněné ploše.

Na *obr. 29* jsou znázorněny varianty charakteru pohybu čistícího robotu po vertikální skleněné stěně (dále v textu byl proveden rozbor pro případ vlečného uspořádání technologie oproti podvozku plošiny):

I. Lineární charakter pohybu ve vertikálním směru s otočením plošiny o 180° na kraji pracovní plochy a přemístěním o potřebnou šířku podvozku

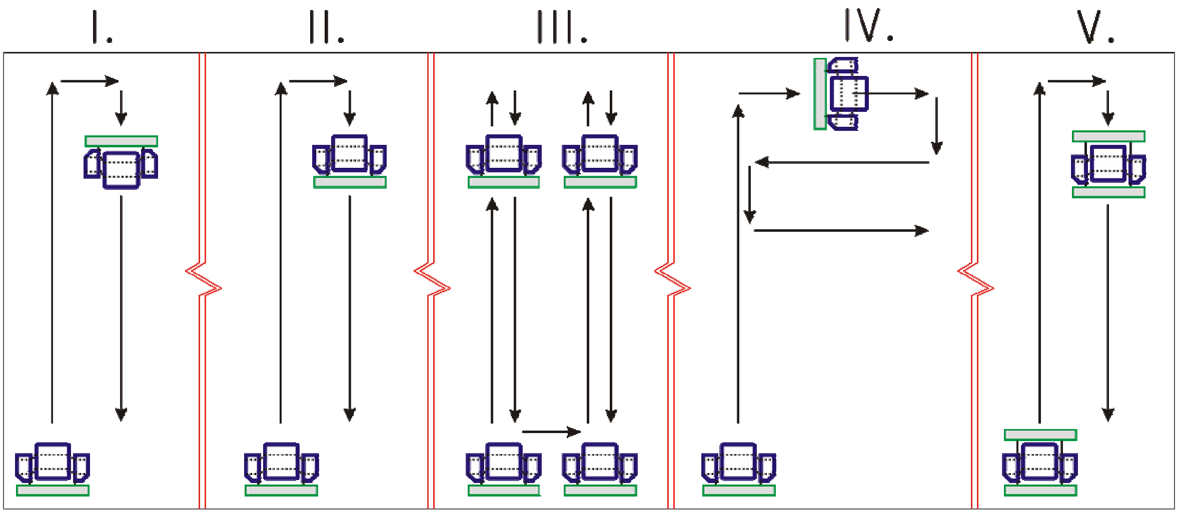
v horizontálním směru – čistící agregát je stále za pohybovým ústrojím, čímž nedojde ke znečištění umyté plochy pohybovým ústrojím.

II. Lineární charakter pohybu ve vertikálním směru bez otočení plošiny na kraji pracovní plochy a s přemístěním o potřebnou šířku podvozku v horizontálním směru – při pohybu nahoru je podvozek mobilní plošiny v kontaktu se špinavou plochou a při pohybu zpět může vyčištěnou plochu zašpinit.

III. Lineární pohyb spolu s navrácením do výchozí pozice ve vertikálním směru a následným přemístěním o potřebnou šířku podvozku v horizontálním směru.

IV. Vystoupání na okraj pracovní plochy ve vertikálním směru a poté pohyb a čištění v horizontálním směru – při respektování současného konstrukčního řešení mobilní plošiny není tato varianta možná především z hlediska uložení pohyblivých částí, které nejsou dimenzovány na zatížení v axiálním směru.

V. Vícenásobné mytí v obou směrech pohybu – výhodou je, že nedojde ke znečištění podvozku robotu, které by mohlo ovlivnit výsledný efekt čištění. Přidáním další čistící hlavice dojde k navýšení hmotnosti.



Obr. 29 *Pohyb robotu na vertikální stěně ve vazbě na uspořádání čisticího agregátu.*

Cyklus pracovního režimu je možné rozdělit na střídání režimu pohybu plošiny a režimu pracovního (čištění skleněné plochy) – **přerušovaný pracovní režim**, nebo na nepřetržitý proces čištění při současném pohybu mobilní plošiny – **kontinuální pracovní režim**. Je zřejmé, že pro kontinuální pracovní režim je nezbytné zajistit neustálý

přítlak k pracovní ploše během lineárního pohybu robotu. Tento režim umožňuje zkrátit výsledný pracovní čas jednoho cyklu.

Důležitým faktorem při volbě vhodné technologie mytí je také řešení přívodu vody spolu s čistícím prostředkem. V úvahu připadá zcela autonomní řešení bez spojení s vnějším okolím nebo přívod z energetického vozíku ze země nebo ze střechy budovy.

- *Uzavřený obvod bez spojení s okolím*:
  - vyžaduje vlastní zásobník na čistící médium, recyklační nebo filtrační jednotku;
  - vyžaduje zařízení zajišťující cirkulaci média v uzavřeném obvodu (čerpadlo, atd.);
  - přídavná zařízení navyšují hmotnost;
  - po určité časové periodě je nutná výměna čistícího média;
  - odpadá hmotnostní zatížení agregátu od hadic naplněných tekutinou.

- *Spojení z energetickým vozíkem*:
  - umožňuje odvod znečištěného média do kanalizace nebo filtrační a recyklační jednotky;
  - pro energovody (zejména hadice s čistícím médiem) připojené k čistícímu agregátu je potřeba zajistit dodatečné zavěšení, aby nezatěžovaly robot velikou hmotností;
  - odpadá hmotnostní zatížení agregátu od čerpadla nebo jiného zařízení pro cirkulaci média, které může zůstat na energetickém vozíku.

Každé z těchto řešení má své přednosti, ale také nedostatky a proto je vhodné zvolit určitou kombinaci těchto řešení.

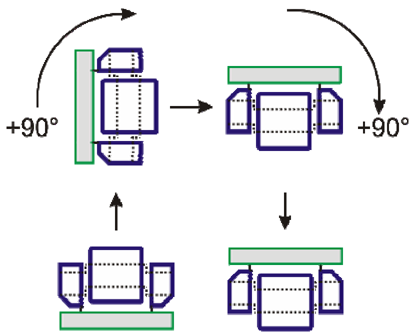
Odvod tekutiny z čištěného povrchu lze realizovat odsáváním znečištěné kapaliny, ofukováním umytého povrchu vzduchem nebo stíráním znečištěné tekutiny pomocí stěrky. Negativní vliv na odvod mycí tekutiny z povrchu vertikální skleněné stěny má především faktor gravitace.

3.2 *Mechanismus realizující otočení plošiny*

Řešení mechanismu pro natočení plošiny na pracovní ploše bylo navrhováno společně s uspořádáním technologie čištění oproti podvozku. Zvoleno bylo vlečné uspořádání čistící hlavice za mobilní plošinou. Na konci pracovní plochy je předpokládáno natočení o 90°, přemístění o potřebný počet kroků daným směrem a následně opětovné natočení.

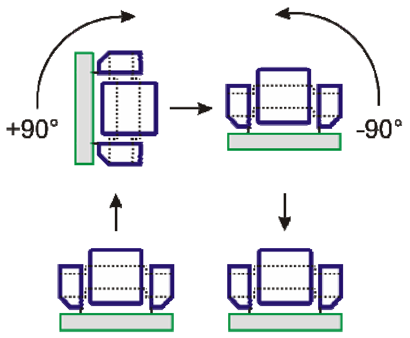
Pro případ natočení mobilní plošiny na konci pracovní plochy z důvodu přemístění v horizontálním směru připadají v úvahu dvě varianty provedení:

a) Na okraji pracovní plochy je uskutečněno natočení plošiny o 90° po směru hodinových ručiček. Po přemístění následuje otočení o 90° po směru hodinových ručiček, jak je znázorněno na *obr. 30*. Tento způsob je komplikovanější z hlediska vícenásobného cyklu otočení rotační jednotky (princip je rozebrán dále v textu). Jeho předností je, že čistící agregát je stále v uspořádání za pohybovým ústrojím a nedojde tak ke znečištění umyté plochy od pohybového ústrojí.



Obr. 30 *Způsob natočení robotu – varianta a).*

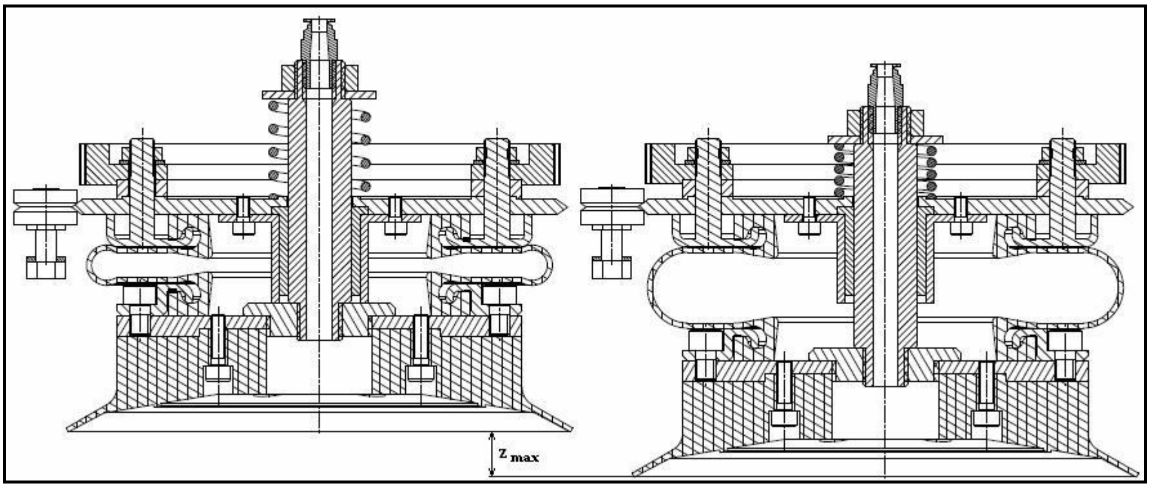
b) Nejprve je realizováno natočení o 90° po směru hodinových ručiček. Po přemístění následuje návrat do výchozí polohy, to znamená otočení o 90° proti směru hodinových ručiček (*obr. 31*). Z hlediska pohybové sekvence je tento způsob natočení jednodušší. Při následném pohybu ve vertikálním směru předchází čistící agregát pohybové ústrojí. Mohl by tak být ovlivněn výsledný efekt čištění, znečištěním umytého úseku podvozkem pohybového ústrojí plošiny.



Obr. 31 *Způsob natočení robotu – varianta b).*

V následujícím řešení otočného mechanismu je pro natočení mobilní plošiny na konci pracovní plochy uvažována *varianta a)* . Pro zajištění natočení plošiny je použit pryžový měch, který zajistí dostatečný zdvih celé mobilní plošiny nad skleněnou plochu před vlastním otočením. V případě, že není do pryžového měchu přiveden tlakový vzduch, je výška mechanismu minimalizována tlačnou pružinou umístěnou mezi dorazy (*obr. 32a*). Dostatečná přídržná síla potřebná k upnutí otočné jednotky k povrchu, je vyvozena podtlakovou přísavkou s vnějším průměrem $d = 200\ mm$. Rotace je realizována přes ozubený řemen dvojicí pneumotorů.

Po přivedení vzduchu do pryžového měchu dojde současně k nadzvednutí podvozku mobilní plošiny (*obr. 32b*) o potřebný zdvih (hodnota zdvihu plošiny $z_{max} = 18\ mm$ je daná dorazy otočného mechanismu) a přisátí přísavky. Poté natočí pneumotory plošinu o 90° ve směru hodinových ručiček. Po natočení a dosednutí podvozku na pracovní plochu následuje přetočení jednotky zpět do výchozí pozice a přemístění plošiny v horizontálním směru o potřebný počet kroků. Následuje opět nafouknutí měchu a přisátí přísavky s následným natočením o 90° ve směru hodinových ručiček. V tomto případě již není potřeba přetočit jednotku zpět do výchozí pozice. Následuje přímočarý dopředný pohyb k protilehlému okraji pracovní plochy. Následující dvě otočení na druhém kraji pracovní plochy jsou realizována v opačném směru než bylo popsáno výše.



Obr. 32 *Mechanismus natočení mobilní plošiny robotu: a) poloha měchu při dopředném pohybu plošiny, b) poloha měchu při otáčení plošiny.*

Mechanismus natočení plošiny je uložen ve třech kladkách s nuceným silovým stykem (kladky firmy *Hepco – RLJ-25*), které jsou uchyceny na těle pohybového ústrojí. Dvě kladky jsou standardního provedení a třetí kladka je excentrická, čímž je možné po dotažení docílit drobného předepnutí spoje.

Je zřejmé, že robot nemůže stoupat centrální přísavkou po spáře mezi skly, protože by nebylo možné vyvodit dostatečnou přídržnou sílu potřebnou k udržení plošiny na pracovním povrchu během otáčení. Tento nedostatek je možné eliminovat snížením, nebo zvýšením počtu kroků v kombinaci s detekcí podtlaku pod přísavkou - v případě nedostatečné hodnoty podtlaku nedojde k natočení plošiny a plošina se posune o stanovený počet kroků zpět nebo dále mimo spáru mezi skly.

Mechanismus otočné jednotky byl zpracován formou výkresu podsestavy (č.v. 2-DP S02080000-2-16-00). Hlavní komponenty pneumatického obvodu otočné jednotky jsou shrnuty v *tab. 2* a schéma zapojení je znázorněno na *obr. 40.*

Tab. 3 *Specifikace prvků obvodu otočné jednotky.*

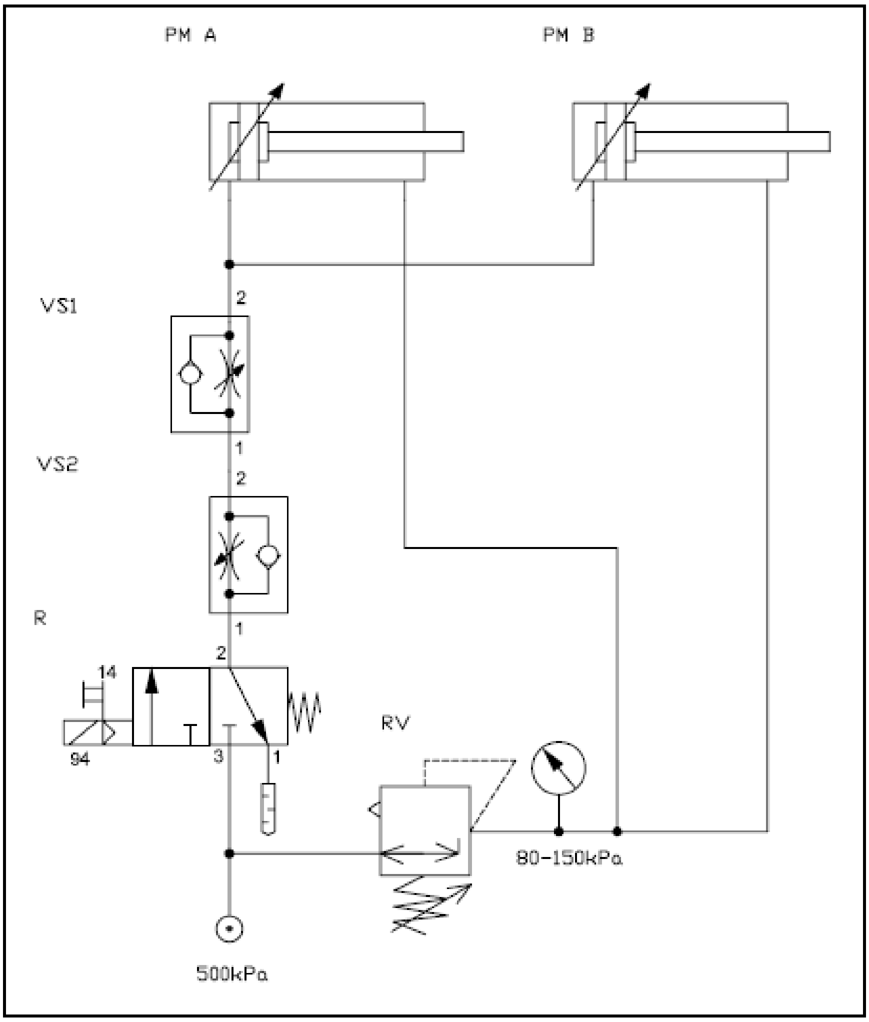
Poz.	Název	Typ	Ks
11	Přísavka standardní kruhová	ESS – 200 - SU	1
12	Měch - Rubena	Vlnovec 170/1	1
13	Pneumotor	ADN – 20 – 150 – A-P-A	2
14	Ejektor s vakuovým spínačem	VADMI – 200 – P	1
15	Elektromagnetický ventil	CPE14 – M1BH – 3GL – QS-8	1
16	Elektromagnetický ventil	CPE10 – M1BH – 5J – QS-8	1
17	Jednosměrný škrtící ventil	GRLA M5 – QS – 6-D	4
18	Patkové upevnění pneumotoru	HNA - 20	4

3.3 Připojení čistícího agregátu k podvozku plošiny

Čistící agregát je umístěn za mobilní plošinou. Tělo plošiny je již poměrně zatížené a proto je vhodné využít ke spojení technologie mytí s mobilní plošinou nohou pohybového ústrojí. Hlavice čistícího agregátu musí být v neustálém kontaktu s čištěnou pracovní plochou, ale zároveň musí být schopná respektovat charakteristický pohyb nohou.

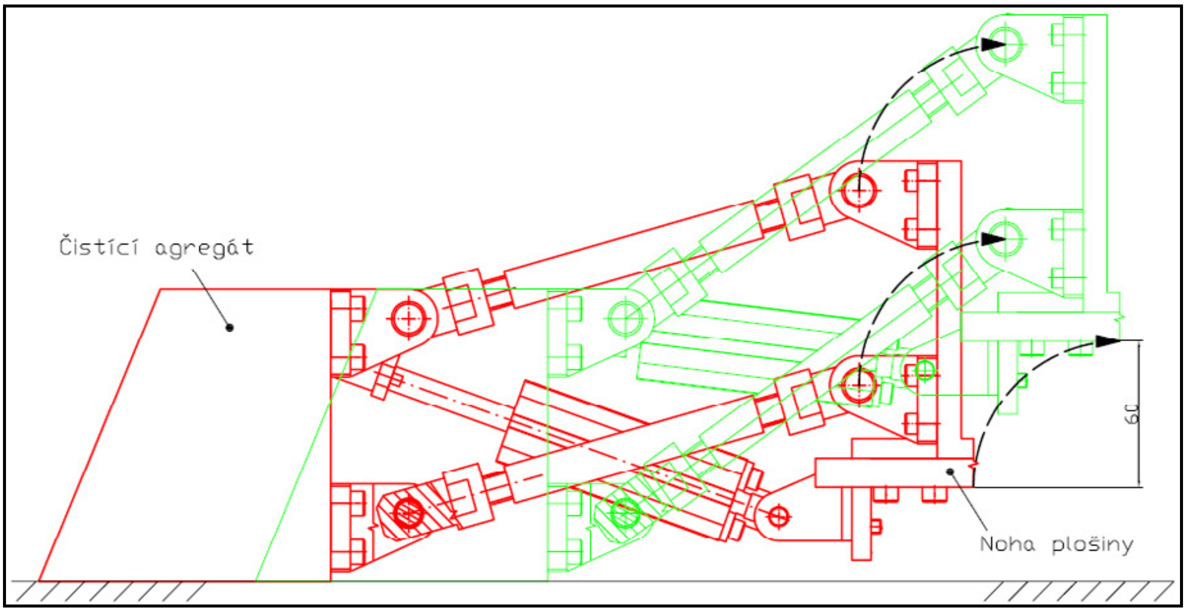
Pro mechanismus zavěšení byla zvolena dvojice paralelně uložených ramen (na principu paralelogramu) spojujících nohy plošiny s čistící hlavicí. Jednotlivá ramena mechanismu jsou na obou koncích agregátu spojena s nohami mobilní plošiny pomocí dvojčinných kompaktních pneumotorů (ADN-20-80-APA firmy Festo), které plní dvě funkce. Po přivedení tlakového vzduchu nadzvednou plošinu nad pracovní plochu (potřebné pro natočení pohybového ústrojí). V případě zasouvání pístnice pneumotorů je

pomocí redukčního ventilu (*RV*) upravována hodnota tlaku ve válcích pneumotorů (*PM A, PM B*) na předem nastavenou hodnotu, čímž je zajištěn přítlak čistícího agregátu k pracovní ploše. Rychlost zasouvání a vysouvání pístu je možné redukovat pomocí obousměrných škrtících ventilů (*VS1, VS2*). Schéma zapojení pneumatického obvodu je znázorněno na *obr. 33*.



Obr. 33 *Schéma zapojení pneumotorů.*

Po nasazení plošiny na stěnu a přivedení tlakového vzduchu do pneumatického obvodu dojde k přítlaku hlavice čistícího agregátu na pracovní plochu. Pneumotory zajišťují přítlak mechanismu ke skleněné ploše během celého procesu čištění. Přítlak je potřebný především v případě pohybu po vertikální stěně, protože vlastní tíha bude odtahovat čistící agregát od stěny. Krajní polohy mechanismu při pohybu nohou jsou zřejmé z *obr. 34*.



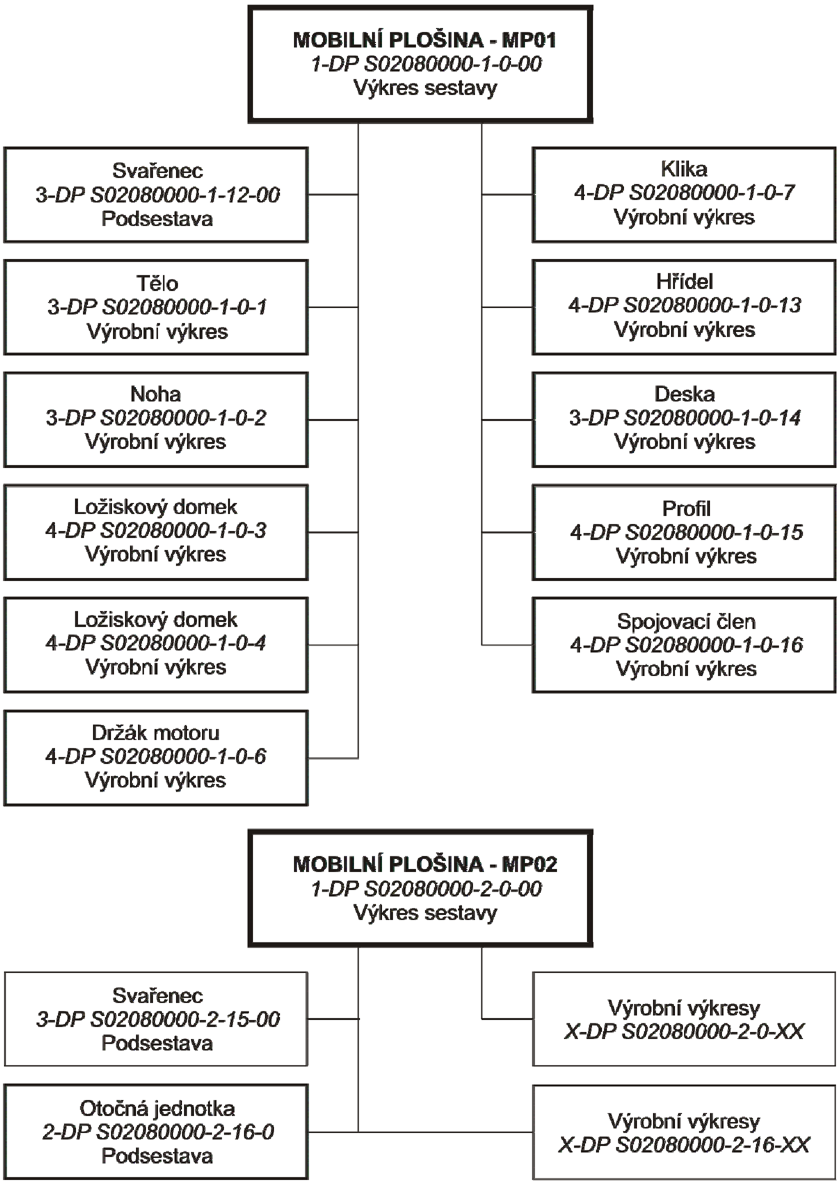
Obr. 34 *Polohy mechanismu při pohybu nohou.*

Na konci pracovního cyklu je potřeba zajistit zdvih čistícího agregátu nad pracovní plochu, tak aby bylo možné natočit celý robot. Tato operace je realizována přisátím středu, natočením nohou o 90° a přivedením tlakového vzduchu do pneumotorů uchycených na nohy pohybového ústrojí a čistící agregát.

4. KONSTRUKČNÍ ZPRACOVÁNÍ VYBRANÉ VARIANTY

4.1 Přehled technické dokumentace

Kompletní konstrukční řešení mobilní plošiny MP01, schopné pohybu po vertikální stěně, je zpracováno ve formě výkresové dokumentace - výkres sestavy MOBILNÍ PLOŠINA-MP01 (č.v. 1-DP S02080000-1-0-00) a její podsestavy, spolu s příslušnými výrobními výkresy. Schéma členění výkresové dokumentace je na *obr. 35*, kde je znázorněno označení výkresů a naznačeno propojení mezi nimi. Kompletní výkresová dokumentace je v datovém souboru na přiloženém CD. U výkresů je také přiložen kompletní seznam výkresové dokumentace.



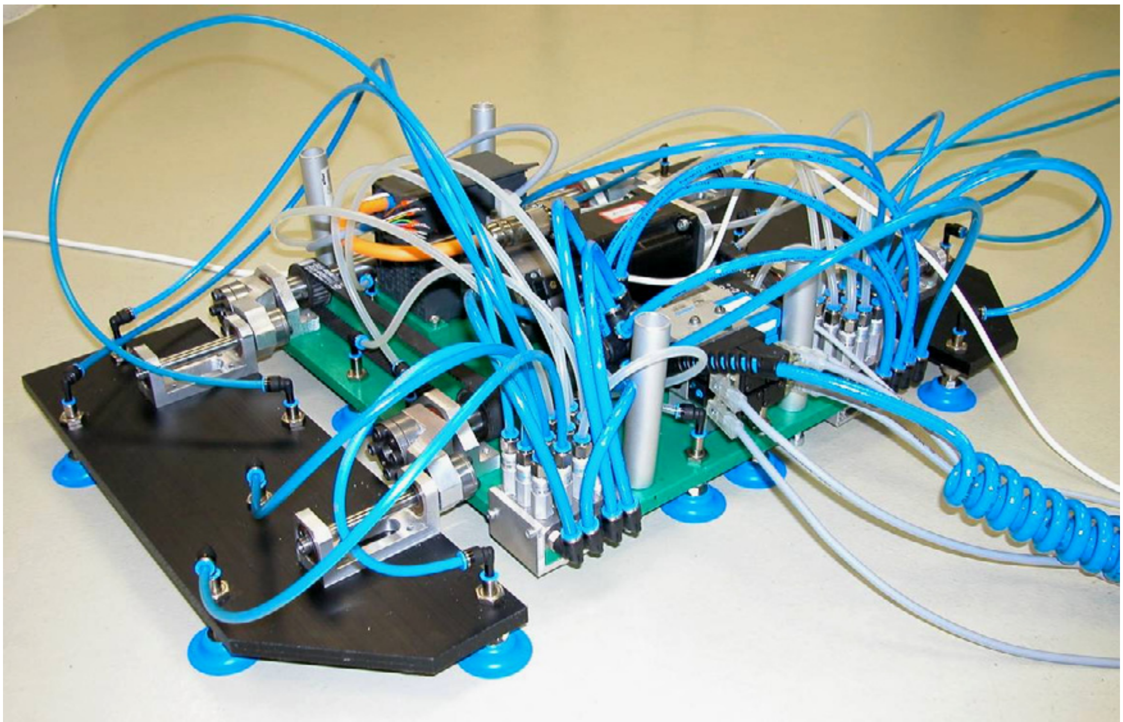
Obr. 35 *Schéma přiložené technické dokumentace.*

Pro popis pohybových možností mobilní plošiny, spolu s popisem zhotoveného funkčního modelu podvozku je možné konstrukční řešení rozdělit do několika podsystémů (*viz. kap. 4.2.1 – 4.2.6*).

4.2 Popis konstrukčního řešení

Jako součást konstrukčního řešení dané problematiky byl zhotoven funkční model mobilní plošiny s pracovním názvem MP01 (*obr. 36*). Na tomto funkčním modelu je možné realizovat pouze lineární pohyb plošiny po skleněných stěnách se sklonem 0°-90° od horizontální roviny. Tento model není konstrukčně schopný natočení nebo přesunu plošiny na konci pracovní plochy. Na modelu byly odzkoušeny předpoklady pohybových možností mechanismu spolu s funkčností jednotlivých subsystémů.

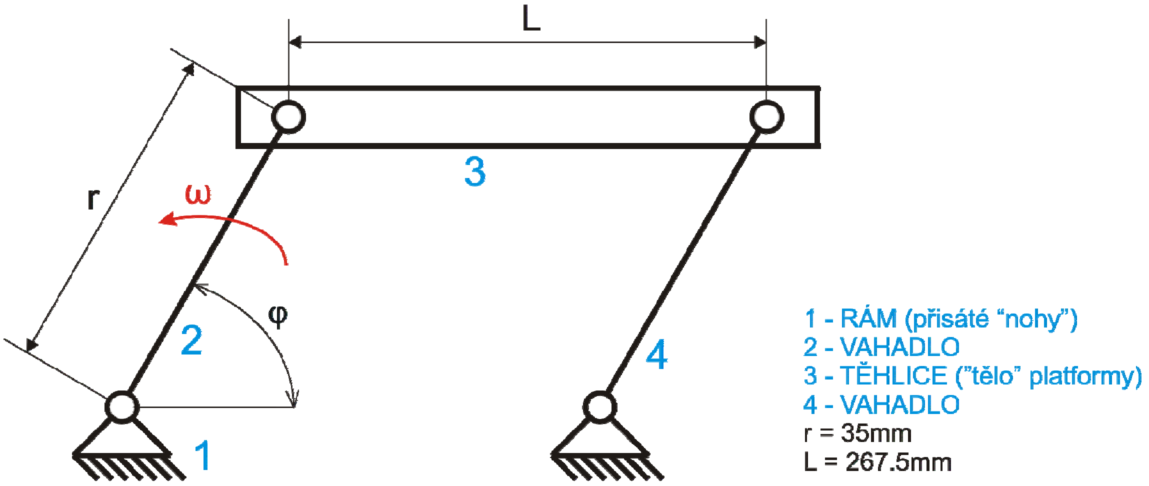
Jednotka pro otočení mechanismu na vertikální stěně, spolu s čistícím agregátem byly zpracovány formou dílčích koncepčních návrhů řešení (*viz. kapitola 3*). Jejich realizace se předpokládá jako součást dalšího prototypu funkčního modelu.



Obr. 36 *Mobilní plošina MP01: 1 – krokový motor, 2 – řídící jednotka, 3 – řemenový převod, 4 – obvod inteligentní pneumatiky.*

Na základě podrobné analýzy stávajících přístupů v řešení dané problematiky byla pro pohybové ústrojí zvolena koncepce částečně uzavřeného kinematického řetězce

tvořeného dvěma symetricky uspořádanými paralelogramy. Kinematické schéma mechanismu mobilní plošiny je znázorněno na *obr. 37*.



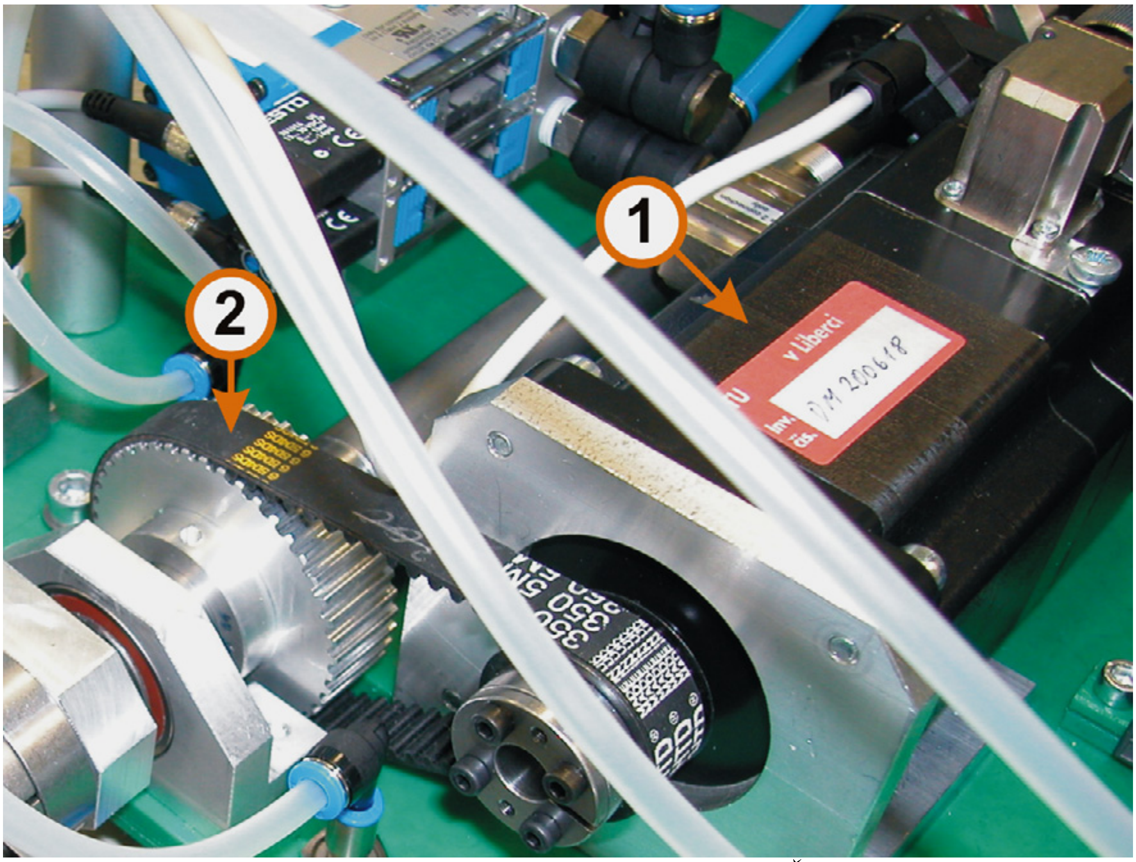
Obr. 37 *Kinematické schéma mechanismu mobilní plošiny.*

Cyklus hlavního dopředného pohybu mobilní plošiny robotu je realizován střídavým pohybem „těla" *3* a dvojice „nohou" *1* robotu, současným otáčením hnacího členu *2* a vahadla *4*. Pohyb paralelogramu je vyvozen společným pohonem s transformací pohybu a realizací převodového poměru pomocí řemenového převodu. Ke krokování dochází střídavým zapojováním vakua do příslušných sekcí přísavek pohybových prvků.

4.2.1 Návrh pohonu

Pro realizaci lineárního pohybu mobilní plošiny byl zvolen třífázový krokový motor firmy Berger Lahr *VRDM 3910* v provedení s elektromagnetickou brzdou a inkrementálním enkodérem pro monitorování chodu motoru. Transformace pohybu spolu s dostatečným převodovým poměrem jsou realizovány řemenovým převodem (*obr. 38*).

Tento motor podporuje také technologii *Microstepping*. Tato technologie je dána budící jednotkou, která poskytuje vydělení plného kroku motoru (full step) na tzv. mikrokroky (microsteps). Tímto způsobem lze zvýšit počet kroků v pohybu motoru a tím i rozlišení pohybu a získat hladší průběh pohybu.



Obr. 38 *1 - Krokový motor firmy Berger Lahr, 2 - Řemenový převod.*

Parametry krokového motoru *VRDM 3910* s brzdou a enkodérem:

Kroutící moment	$M_{MOT} = 4{,}0$ Nm.	
Přídržný moment	$M_H = 4{,}52$ Nm.	
Moment setrvačnosti motoru	$J_{MOT} = 2{,}2$ kg.cm^2.	
Počet plných kroků na otáčku	$s_k = 200 - 10000$ kroků/ot.	(nastavitelná hodnota)
Krok motoru (plný)	$\varphi_0 = 1{,}8° - 0{,}036°$.	(odvislé od počtu kroků na otáčku)
Hmotnost motoru	$m_{MOT} = 4{,}8$ kg.	(s brzdou a enkodérem)

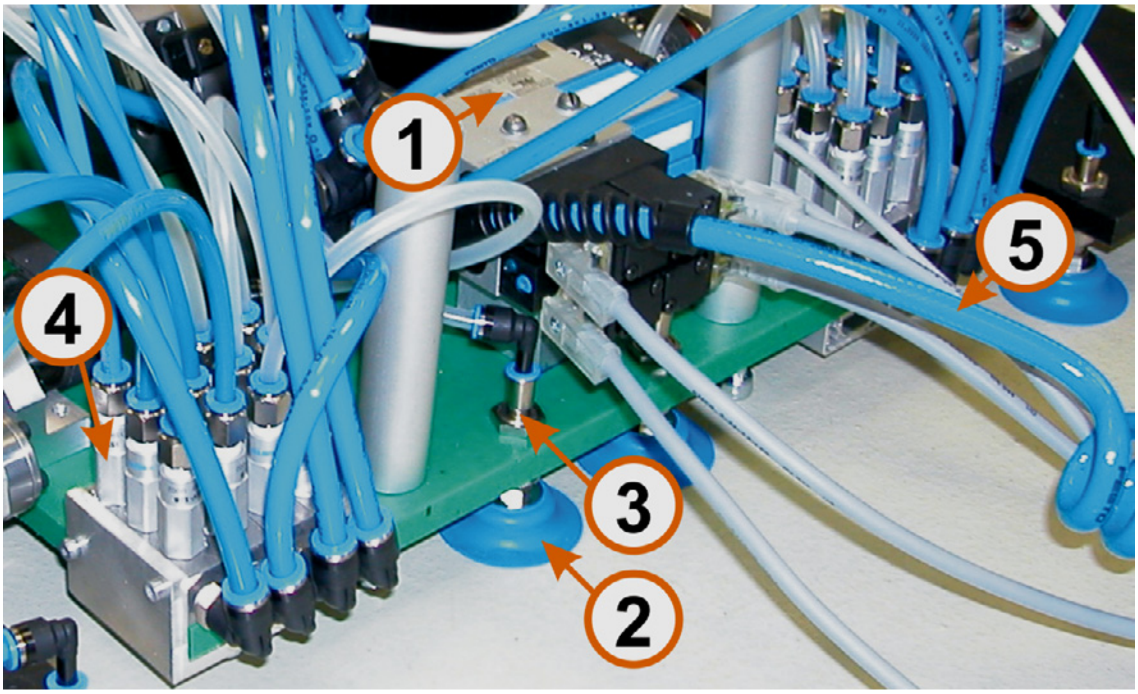
4.2.2 Přídržný systém mechanismu

Obvod inteligentní pneumatiky byl navržen s ohledem na bezpečnostní aspekty pohybu mobilní plošiny po vertikální stěně. Schéma jeho zapojení je znázorněno na *obr. 40*. Použité komponenty vakuového obvodu jsou shrnuty v *tab. 3*.

Rychlé střídání podtlaku vakuových přísavek a jejich odvzdušnění je realizováno ve spojení s odměřováním polohy kliky a indikací hodnoty dosaženého vakua.

K udržení mobilní plošiny na vertikální stěně slouží 24ks standardních kruhových polyuretanových přísavek *ESS – 50 – SU* (*obr. 39*). Pro případ najetí některé z přísavek na překážku, obsahuje každá z nich vlastní výškový kompenzátor *ESH – HC – 4 – QS* (*obr. 39*). Maximální možná výšková kompenzace je u tohoto typu držáků přísavek 6 mm.

Vakuové sací ventily *ISV – 1/8* (*obr. 39*) se samočinným uzavíráním přívodu vakua byly použity pro případ, že některá z přísavek nebude zakryta a tím pádem by mohlo dojít k lokálnímu porušení těsnosti spoje. V takovém případě ventil uzavře přívod tlakového vzduchu a zapne ho až v případě těsného doléhání přísavky na plochu.



Obr. 39 *Vybrané komponenty obvodu podtlakových přísavek: 1 – ejektory VADMI, 2 – kruhová přísavka, 3 – výškový kompenzátor ESH, 4 – vakuový sací ventil ISV, 5 – přívod stlačeného vzduchu.*

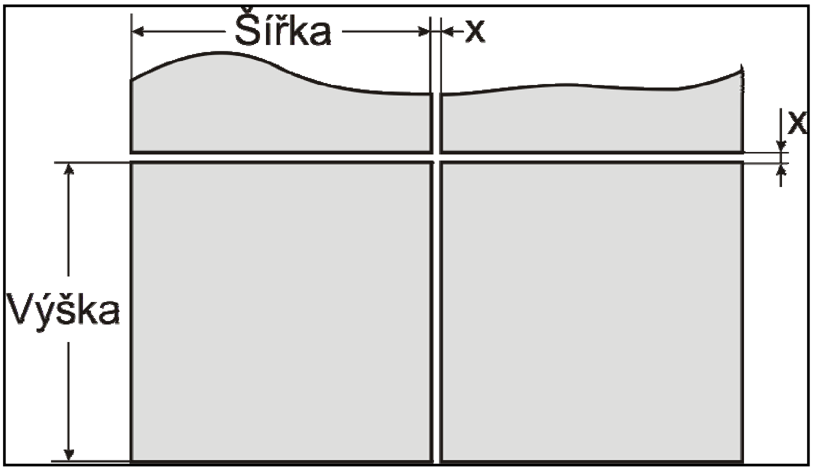
Tab. 3 *Specifikace prvků obvodu podtlakových přísavek.*

Poz.	Název	Typ	Ks
1	Jednotka úpravy vzduchu	Festo	1
2	Rozdělovací blok	FR-4-1/4	1
3	Záslepka	QSC-6H	1
4	Ejektor s vakuovým spínačem	VADMI – 140 – P	2
5	Dvojitý rozdělovací díl	QSLV2-1/4-8	4
6	Rozdělovací blok	FR-4-1/8-B	8
7	Vakuový sací ventil	ISV –1/8	24
8	Držák přísavek s kompenzací výšky	ESH-HC-4-QS	24
9	Přísavka standardní kruhová	ESS – 50 - SU	24
10	L-spojka s nástrčnou koncovkou	QSL-6H	24

4.2.3 Rozmístění úchopných hlavic

V primární koncepci rozmístění podtlakových přísavek byly pominuty všechny typy bodových spojů skel a lišt vyčnívajících z povrchu skleněné stěny budovy. Přísavky jsou rozmístěny tak, aby byl v případě pohybu některé z částí pohybového ústrojí robotu po spáře mezi skly vyřazen z provozu pouze minimální počet podtlakových přísavek.

Osová vzdálenost jednotlivých přísavek musí být (ve vertikálním i horizontálním směru) vždy větší, než je maximální možná mezera mezi jednotlivými skly (*obr. 41*). Tímto opatřením se zabrání vyřazení z provozu více přísavek najednou.



Obr. 41 *Dovolené spojovací rozměry skleněných tabulí.*

Pro stávající řešení rozmístění přísavek na mobilní plošině byly uvažovány spojovací rozměry skleněných tabulí:

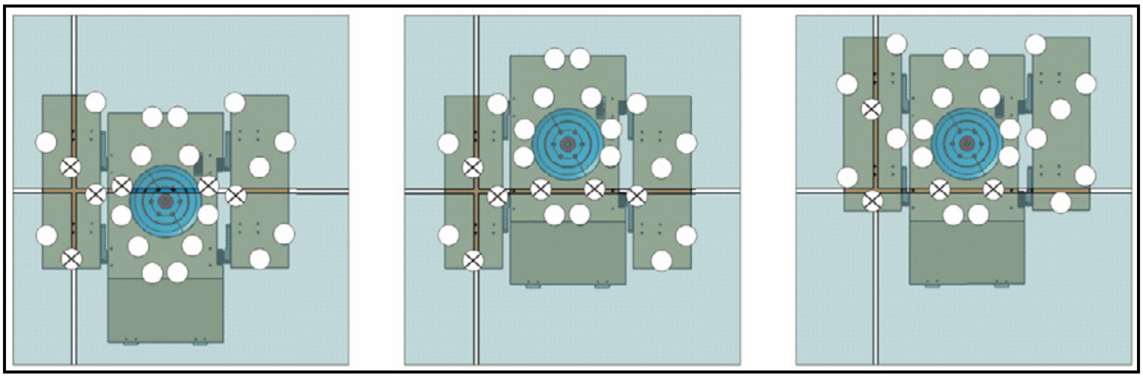
$Šířka_{min}$ = 1000 mm,

$Výška_{min}$ = 1000 mm,

x_{max} = 15 mm.

Cyklus pohybu mobilní plošiny po skleněné stěně ve vertikálním směru, spolu s rozmístěním 24ks přísavek je zřejmý z *obr. 42*. Neaktivní přísavky, které jsou

v jednotlivých fázích pohybového cyklu vyřazeny z provozu, jsou na obrázku viditelně odlišeny. V ideálním případě (rovná stěna bez spár a jiných překážek) bude přisáto dvanáct přísavek. V případě pohybu nohou se jedná o přísavky na těle, v případě pohybu těla jde o přísavky na nohou. Pokud se pohybuje pohybové ústrojí po spáře, nebudou aktivní všechny přísavky. Maximálně však budou z provozu vyřazeny čtyři přísavky.

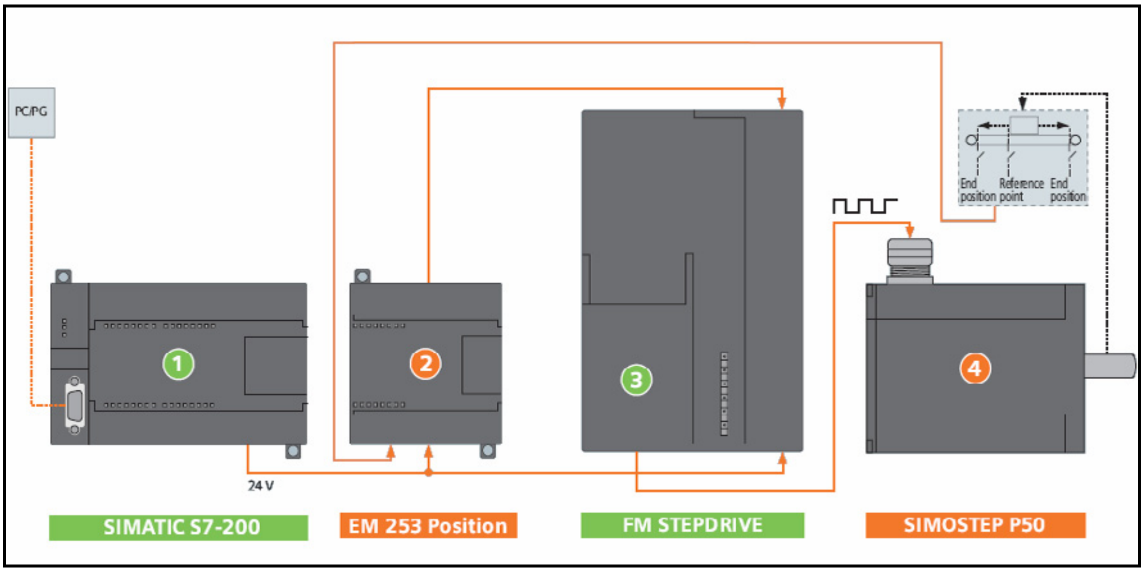


○ Aktivní přísavka ⊗ Neaktivní přísavka

Obr. 42 *Cyklus pohybu plošiny spolu s rozmístěním přísavek.*

4.2.4 Volba řídícího systému

Řídící systém je tvořen produkty firmy Siemens. Jedná se o řídící jednotku na plošině volně programovatelných automatů *SIMATIC S7 – 200*. Schéma zapojení jednotlivých modulů je uvedeno na *obr. 43* a schéma propojení řídící jednotky s ovládáním, krokovým motorem, senzory a ejektory pneumatického obvodu je uvedeno na *obr. 44*. Řídící jednotka je součástí mobilní plošiny.



Obr. 43 *Zapojení jednotlivých modulů řídící jednotky.*

Hlavní parametry a moduly řídící jednotky:

- *S7-200 CPU 226:* Tento modul řídí celou aplikaci a přenáší profil polohování do generátoru pulsů.

  Napájecí napětí: U_N = 24V.

  Integrované *I/O*: 24*DI*/16*DO* (digitálních), 2*AI*/2*AO* (analogových).

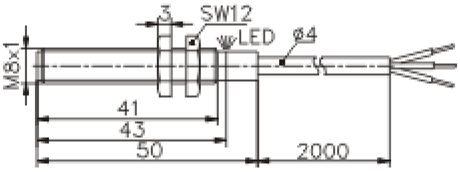
  Programovací jazyk: STL.

- *EM 253:* Tento modul generuje pulsy důležité pro krokový motor – může být nastaveno celkem až 25 profilů pozicování.

- *FM STEPDRIVE:* Modul pro napájení krokového motoru.

Po zapnutí najede motor do referenční polohy a teprve poté je spuštěn příslušný program ovládání pohybové fáze. Referenční poloha (najetí jedné z rotujících klik do nulové polohy) je snímána pomocí indukčního snímače *PAS 085 313F* od firmy PLOSKON AT (*obr. 45*).

Nominální spínací dosah:	1 mm
Reálný spínací dosah:	0.8 – 1.2 mm
Pouzdro:	M 8
Materiál:	Poniklovaná mosaz
Zabudovatelnost:	zabudovatelný



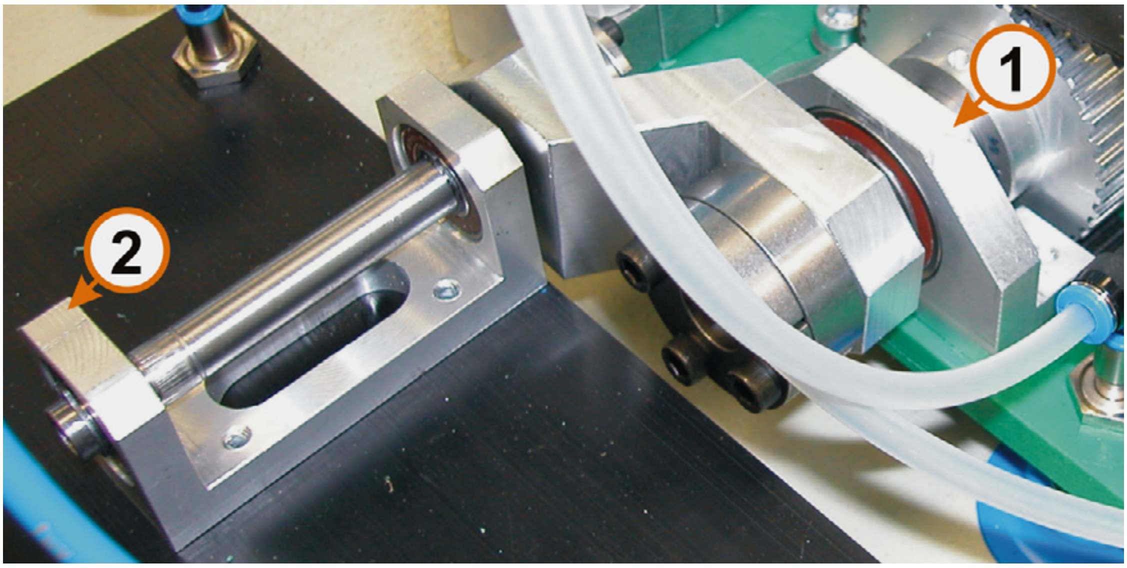
Obr. 45 *Indukční snímač PAS*

4.2.5 Uložení pohyblivých částí mechanismu

Ložiska motoru jsou mazána trvalou náplní a je tudíž vhodné, aby i ostatní pohyblivá spojení byla bez nároku na domazávání.

Pro uložení hřídelí na „těle“ mobilní plošiny byla použita kuličková jednořadá *ložiska 6004 2RSR – ČSN 02 4630* a pro uložení hřídelí na „nohách“ mobilní plošiny byla použita kuličková jednořadá *ložiska 5001 2RSR – ČSN 02 4630.* Zatížení těchto ložisek je

převážně radiálními silami a životnost ložisek je dostatečná pro celou dobu provozu modelu mobilní plošiny MP01.

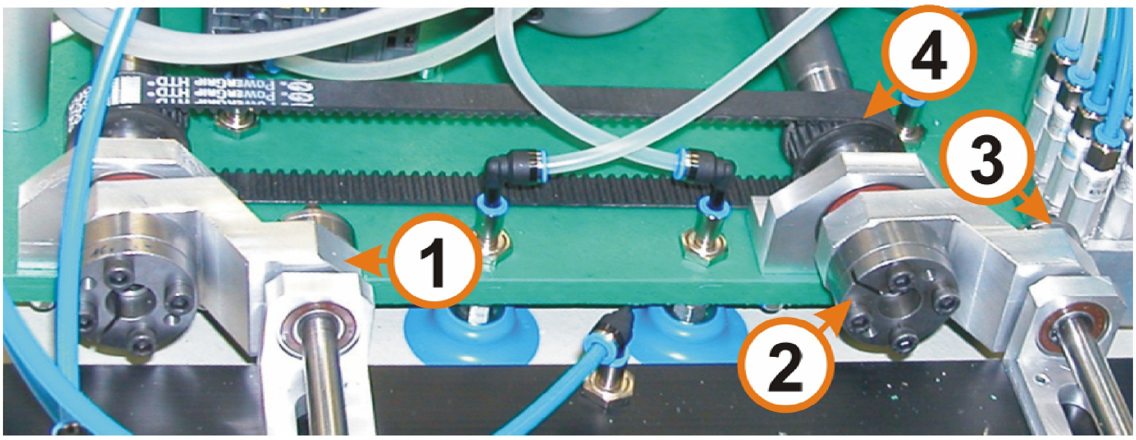


Obr. 46 *Ložisková tělesa: 1 – na „těle" plošiny, 2 – na „nohách" plošiny.*

Z důvodu minimalizace hmotnosti celého mechanismu byla pro uložení ložisek vyrobena speciální ložisková tělesa (*obr. 46*). Na jejich výrobu byl použit dural a díky tomu byla snížena hmotnost oproti využití klasických, sériově vyráběných ložiskových domků přibližně 3 – 5 krát.

Malá řemenice řemenového převodu je přichycena na hřídel krokové motoru pomocí segmentového svěrného pouzdra - *MLC 3000 (12x18)* firmy Flennor (*obr. 47*). Velká řemenice je přichycena na hřídel na „těle" plošiny pomocí pera – *Pero 6e7x6x25 ČSN 02 2562*. Vzhledem k zatížení kroutícím momentem jsou obě spojení z hlediska bezpečnosti přenosu kroutícího momentu dostatečná.

Pro spojení hřídelí na „těle" a „nohách" mobilní plošiny, byly vyrobeny speciální duralové kliky (*obr. 47*). Vlastní uchycení klik je na koncích hřídelí realizováno svěrnými spoji, pomocí segmentových svěrných pouzder firmy Flennor. Pro zajištění dostatečné synchronizace chodu obou paralelogramů jsou hřídele na „těle" mobilní plošiny spojeny ozubeným řemenem (*obr. 47*).



Obr. 47 *Spojení hřídelí mobilní plošiny: 1 – duralová klika, 2 – svěrné pouzdro (16x24), 3 – svěrné pouzdro (12x18), 4 – ozubený řemen pro synchronizaci chodu.*

4.2.6 Bezpečnostní aspekty

Přestože by mělo být silové držení na pracovní ploše pomocí obvodu aktivních podtlakových přísavek dostatečné z hlediska bezpečnosti proti odtržení, je však důležité zajistit mobilní plošinu dalšími bezpečnostními prvky. Nejedná se pouze o zabezpečení plošiny proti odtržení a pádu, ale také o ochranu proti poškození skla.

Řadu staveb moderních výškových budov lemuje na okraji střechy závěsný systém. Hlavní funkcí této závěsné lávky je poskytnout možnost upnutí pro horolezce v případě potřeby oprav nebo čištění skleněného pláště budovy. Tento závěsný systém je možné využít k napojení doplňujícího zabezpečení plošiny.

Pojezd bezpečnostního mechanismu by měl nést navíjecí zařízení se schopností navíjet nebo uvolňovat lanko tak, aby nebylo moc prověšené, ale aby plošinu nezatěžoval nadměrnými silami. Pojezd mechanismu by měl být také v úzké vazbě na mobilní plošinu robotu. Tuto vazbu je možné realizovat:

- systémem odměřování (gyroskopické systémy) – při překročení limitního úhlu odklonění lanka od vertikální roviny popojede pojezdové ústrojí o nastavenou vzdálenost nebo dochází k pohybu pojezdového ústrojí do té doby, než je naplněna další limitní hodnota sklonu. Tato vazba je potřebná v případě programového řízení robotu.

- on - line spojením – při navádění operátorem je možné pominout všechny způsoby odměřování, protože pohyb pojezdu a plošiny v horizontálním směru můžou být spojeny a naváděny zároveň.

4.3 Výpočtová část konstrukčního řešení

4.3.1 Dimenzování pohonu

Pro zhodnocení zatížení motoru bylo nejprve nutné stanovit moment setrvačnosti zátěže J_L, na kterém je závislá velikost startovací frekvence motoru a společně s jeho nárůstem se posouvá START – STOP charakteristika doleva k nižším frekvencím.

Příslušný moment setrvačnosti zátěže byl stanoven z rovnice ekvivalence celkové kinetické energie mechanismu a energie redukčního členu a následně byl přepočten na hřídel krokového motoru:

$$\frac{1}{2}\cdot J_{red}\cdot\omega_2^2=\frac{1}{2}\cdot J_2\cdot\omega_2^2+\frac{1}{2}\cdot m_3\cdot v_{s3}^2+\frac{1}{2}\cdot J_4\cdot\omega_2^2 . \qquad (4.1)$$

Za předpokladu, že $v_{s3} = r\cdot\omega_2$ dostaneme dosazením do rovnice *4.1* a úpravou vztahu:

$$J_L=J_{red}\cdot\frac{1}{i^2}=\left(J_2+J_4+m_3\cdot r^2\right)\cdot\frac{1}{i^2}=56{,}3kg\cdot cm^2 , \qquad (4.2)$$

kde J_L ..... moment setrvačnosti zátěže přepočítaný na hřídel krokového motoru [$kgcm^2$];
$J_2 = J_4 = 2.35\ kgcm^2$ ..... momenty setrvačnosti členů 2 a 4;
$m_3 = 18$ kg ..... hmotnost členu 3;
i = 2 ..... převodový poměr řemenového převodu,
r = 35 mm ..... poloměr vahadel 2 a 4 (kliky paralelogramu).

Stanovení zátěžného momentu M_L vychází ze vztahu *4.3,* respektive *4.4* a jeho hodnota je proměnlivá v závislosti na naklonění pracovní plochy a v závislosti na střídavém pohybu „těla“ a „nohou“ mobilní plošiny:

$$M_{L1}=m_3\cdot g\cdot r\cdot\cos(\varphi-\beta)\text{, respektive} \qquad (4.3)$$

$$M_{L2}=m_1\cdot g\cdot r\cdot\cos(\varphi-\beta), \qquad (4.4)$$

kde M_{L1} ..... zátěžný moment při pohybu „těla“ plošiny [Nm];
M_{L2} ..... zátěžný moment při pohybu „nohou“ plošiny [Nm];
$m_3 = 18$ kg ..... hmotnost „těla“ plošiny (člen 3);

$m_1 = 5,6$ kg ….. hmotnost „nohou“ plošiny (člen _1_);

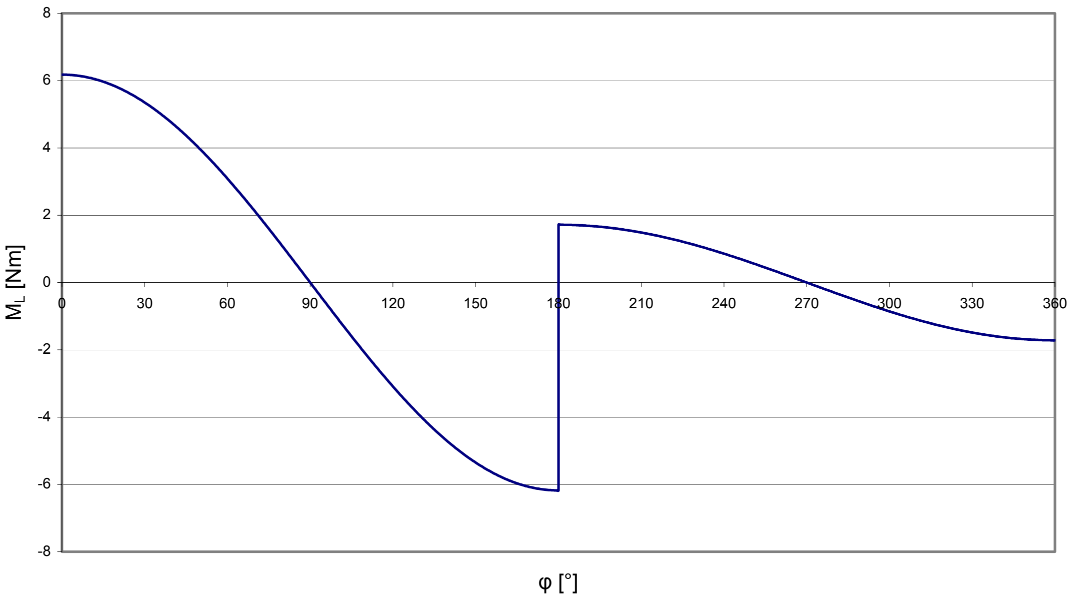
$g = 9.81\ m\cdot s^{-2}$ ….. tíhové zrychlení;

$r = 35$ mm … poloměr vahadel _2_ a _4_ (kliky paralelogramu);

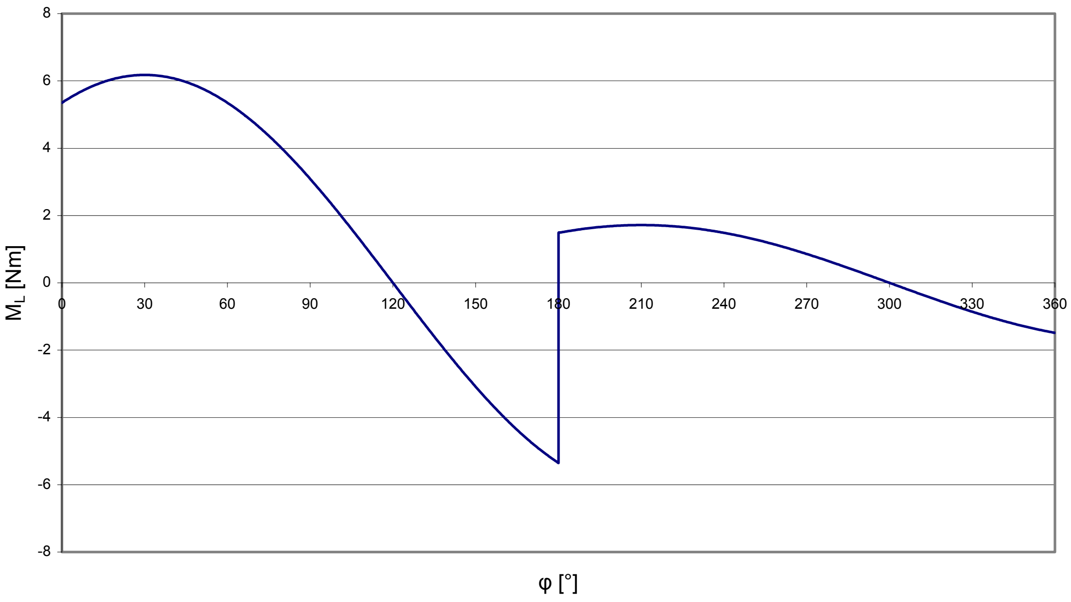
$\beta = 0° - 90°$ ….. náklon pracovní plochy od horizontální roviny;

$\varphi = 0° - 180°$ ….. natočení klik mechanismu vzhledem k pracovní ploše.

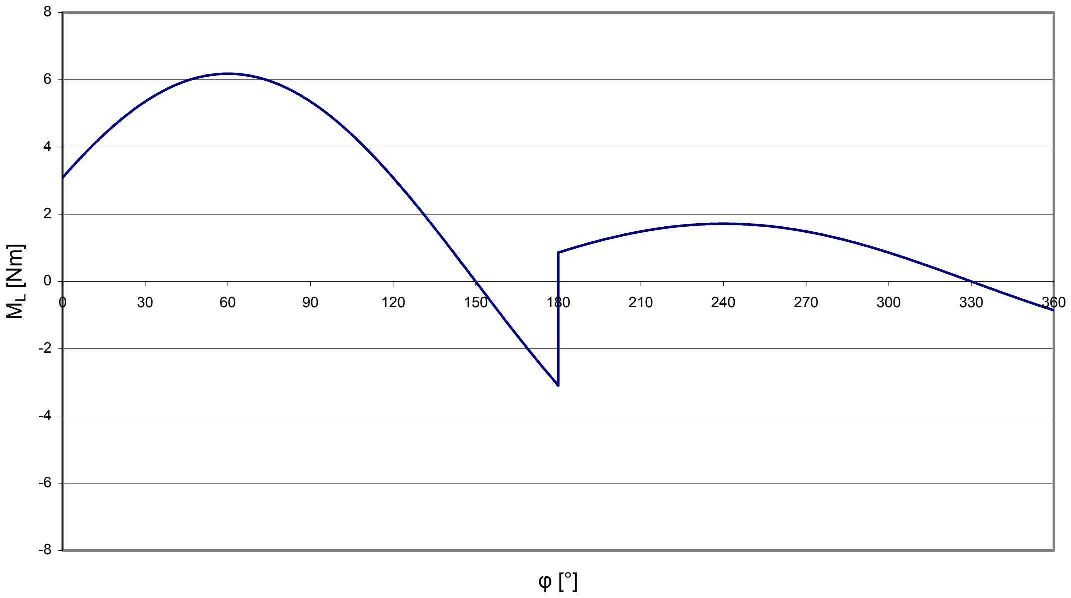
Hodnota výsledného zátěžného momentu M_L byla stanovena z průběhů momentu v závislosti na natočení kliky (člen _2_ a _4_), při respektování odlišného sklonu pracovní plochy od horizontální roviny *(obr. 48 - 52)*.



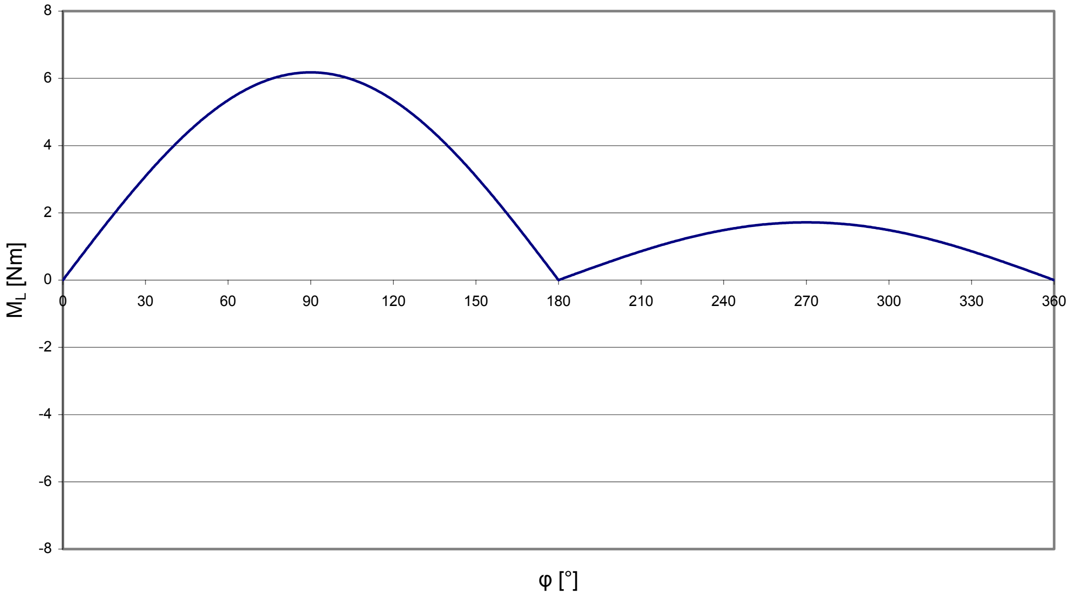
Obr. 48 *Časový průběh zátěžného momentu M_L – sklon pracovní plochy $\beta = 0°$.*



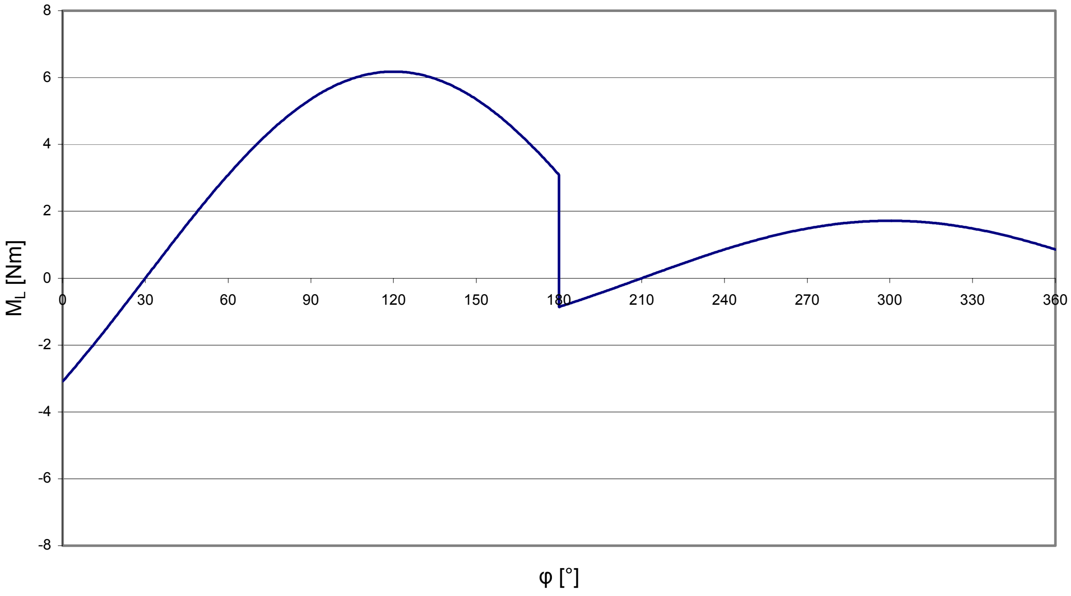
Obr. 49 *Časový průběh zátěžného momentu M_L – sklon pracovní plochy β = 30°.*



Obr. 50 *Časový průběh zátěžného momentu M_L – sklon pracovní plochy β = 60°.*

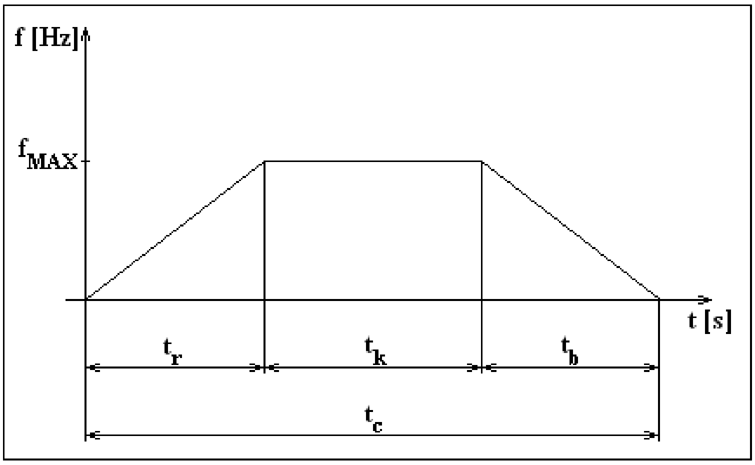


Obr. 51 *Časový průběh zátěžného momentu M_L – sklon pracovní plochy β = 90°.*



Obr. 52 *Časový průběh zátěžného momentu M_L – sklon pracovní plochy β =120°.*

Za předpokladu idealizovaného průběhu zrychlení a brždění (*obr.53*) lze následně stanovit rampový průběh rychlosti krokového motoru:



$$t_c = t_r + t_k + t_b \qquad (4.5)$$

t_r ….. doba rozběhu

t_k ….. doba konst. rychlosti

t_b ….. doba brždění

pokud uvažujeme $t_b = t_r$,

bude pak: $t_c = 2t_r + t_k$

Obr. 53 *Průběh rychlosti pohybu krokového motoru.*

Pro zadané hodnoty potom bude:

celková doba pohybu	…..	$t_c = 0.8$ s;
doba rozběhu	…..	$t_r = t_b = 0.2$ s;
úhel natočení	…..	$\varphi_{PJ} = 180°$;
krok motoru (plný)	…..	$\varphi_0 = 0.36°$;
převodové číslo	…..	i = 2;
počet kroků na otáčku	…..	$s_k = 1000$ kroků/ot;
moment setrvačnosti zátěže	…..	$J_L = 56{,}3$ kgcm^2.

Celkový počet kroků, o které se motor pootočí z výchozí pozice do pozice konečné vypočteme ze vztahu:

$$n_{kc} = \frac{i \cdot \varphi_{PJ}}{\varphi_0} = \frac{2 \cdot 180}{0.36} = 1000 kroků, \quad \text{tj. 1otáčka.} \qquad (4.6)$$

Hodnota provozní frekvence poté bude:

$$f_H \geq \frac{n_{kc}}{t_c - t_r} = \frac{1000}{0.6} = 1666.6 Hz, \quad \text{zvoleno } f_H = 1700 \text{ Hz.} \qquad (4.7)$$

Poté lze stanovit počet kroků na rozběh a brždění:

$$n_r = n_b = \frac{f_H \cdot t_r}{2} = 170 kroků\,. \tag{4.8}$$

Rozběhový moment bude:

$$M_b = J_{TOT} \cdot \frac{\varphi_{0rad} \cdot f_H}{t_r} = 0.00563 \cdot \frac{2\pi \cdot 0.36}{360} \cdot \frac{1700}{0.2} \cong 0.3 Nm\,, \tag{4.9}$$

kde

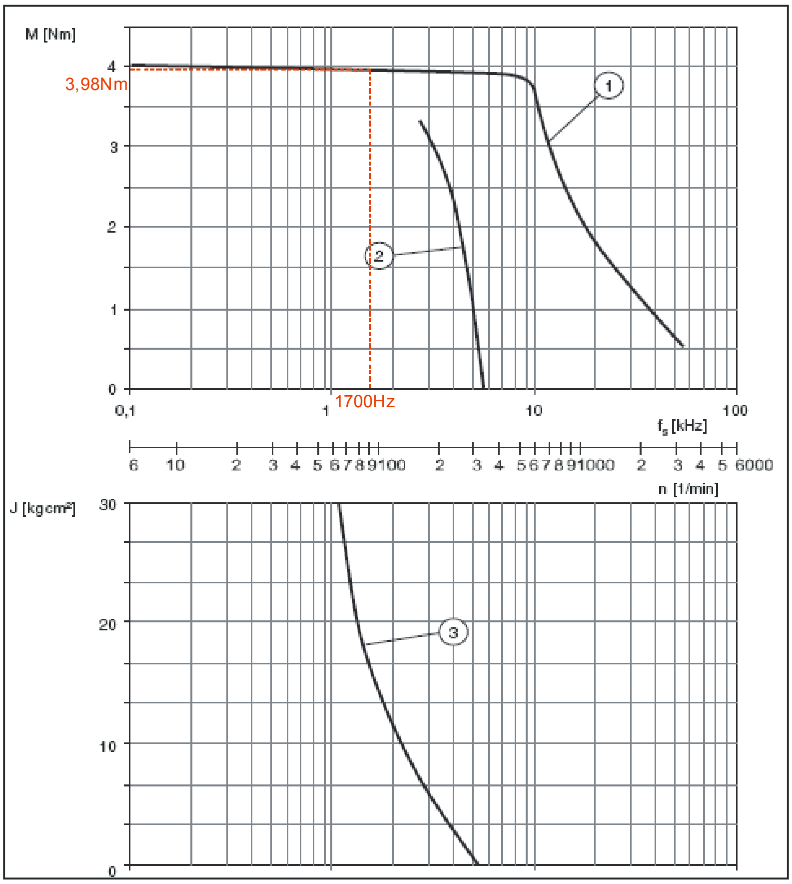
$$J_{TOT} = J_{MOT} + J_L = 2.2 + 56.3 = 58.5 kgcm^2\,. \tag{4.10}$$

Hodnota maximální startovací frekvence poté bude:

$$f_{START_{\max}} \cong 19.9 \cdot \sqrt{\frac{M_b}{J_{TOT}}} \cong 46 Hz\,. \tag{4.11}$$

Maximální moment motoru odpovídající provozní frekvenci je možné odečíst z momentové charakteristiky krokového motoru VRDM 3910 (*obr. 54*). Jeho hodnota byla stanovena pro provozní frekvenci f_H = 1700 Hz.

M_{MOT/f_H} = 3.98 Nm



Obr. 54 *Momentová charakteristika krokového motoru VRDM 3910.*

Z daných hodnot je možné dopočítat výkonovou rezervu motoru:

$$\Delta = \frac{M_{MOT/f_H} - (\frac{M_L}{i} + M_b)}{M_{MOT/f_H}} \cdot 100 = \frac{3.98 - (3.15 + 0.3)}{3.98} \cdot 100 \cong 13.3\%, \qquad (4.12)$$

kde M_b ….. rozběhový moment [Nm],

M_{MOT/f_H} ….. max. moment motoru odpovídající dané frekvenci f_H [Nm],

M_L ….. moment vnější silové zátěže [Nm].

Z výsledné hodnoty výkonové rezervy krokového motoru je zřejmé, že je motor dimenzován téměř na hranici únosnosti z hlediska setrvačných sil a momentového zatížení motoru. Podle informace od výrobce není vysoká hodnota momentu setrvačnosti zátěže pro pohon výhodná, přesto jej lze s redukovanou dynamikou zátěže provozovat.

4.3.2 Dimenzování pohonu – planetová převodovka

Přidáním jednostupňové planetové převodovky *PLE - 80* firmy Berger Lahr, s vyšším převodovým poměrem oproti řemenovému převodu, dojde k zvýšení hodnoty možné momentové zátěže motoru. Díky tomuto konstrukčnímu řešení je možné přidat na mobilní plošinu mechanismus otočení podvozku a zvětšit poloměr klik na hodnotu r = 60 mm.

Parametry převodovky *PLE - 80*:

Kroutící moment	$M_{PŘ}$ = 50 Nm.
Moment setrvačnosti přev.	$J_{PŘ}$ = 0,45 kg.cm^2.
Převodový poměr	i = 5.
Vůle	< 12 arcmin.
Hmotnost převodovky	$m_{PŘ}$ = 2,1 kg.

Moment setrvačnosti zátěže, po přidání planetové převodovky, mechanismu natočení mobilní plošiny a zvětšení rozměru klik bude:

$$J_L' = J_{red}' \cdot \frac{1}{i^2} = \left(J_2' + J_4' + m_3' \cdot r_k^2 \right) \cdot \frac{1}{i^2} = 37{,}6 kg \cdot cm^2, \qquad (4.13)$$

kde J_L' ….. moment setrvačnosti zátěže přepočítaný na hřídel krokového motoru při využití převodovky [$kgcm^2$];

$J_2' = J_4' = 2.78\ kgcm^2$ ….. momenty setrvačnosti členů 2 a 4 pro zvětšený poloměr klik;

$m_3' = 26\ kg$ ….. hmotnost „těla“ plošiny (člen 3);

$i = 5$ ….. převodový poměr řemenového převodu,

$r_k = 60\ mm$ ….. poloměr vahadel 2 a 4 (kliky paralelogramu).

Stanovení zátěžného momentu M_L vychází ze vztahu *4.14* a jeho maximální hodnota byla stanovena pro pohyb „těla“ a natočení kliky $\varphi = 0°$:

$$M_L' = m_3' \cdot g \cdot r_k \cdot \cos(\varphi - \beta) = 15.3Nm\,, \qquad (4.14)$$

kde M_L' ….. zátěžný moment při pohybu „těla“ plošiny [Nm];

m_3' ….. hmotnost „těla“ plošiny (člen 3) [kg];

$g = 9.81\ m s^{-2}$ ….. tíhové zrychlení;

$\beta = 0° - 90°$ ….. náklon pracovní plochy od horizontální roviny;

$\varphi = 0° - 180°$ ….. natočení klik mechanismu vzhledem k pracovní ploše.

Hodnoty ze vztahů *4.6 – 4.8* jsou shodné i pro upravenou variantu a rozběhový moment motoru pro upravenou plošinu poté bude:

$$M_b' = J_{TOT}' \cdot \frac{\varphi_{0rad} \cdot f_H}{t_r} = 0.004 \cdot \frac{2\pi \cdot 0.36}{360} \cdot \frac{1700}{0.2} \cong 0.214Nm\,, \qquad (4.15)$$

kde
$$J_{TOT}' = J_{MOT} + J_{PŘ} + J_L' = 2.2 + 0.45 + 37.6 = 40.25kgcm^2\,. \qquad (4.16)$$

Hodnota maximální startovací frekvence bude:

$$f_{START_{\max}}' \cong 19.9 \cdot \sqrt{\frac{M_b'}{J_{TOT}'}} \cong 45.9Hz\,. \qquad (4.17)$$

Z daných hodnot je možné dopočítat výkonovou rezervu motoru:

$$\Delta = \frac{M_{MOT/f_H} - (\frac{M_L'}{i} + M_b')}{M_{MOT/f_H}} \cdot 100 = \frac{3.98 - (3.06 + 0.214)}{3.98} \cdot 100 \cong 17.9\%, \qquad (4.18)$$

kde M_b' ….. rozběhový moment [Nm],

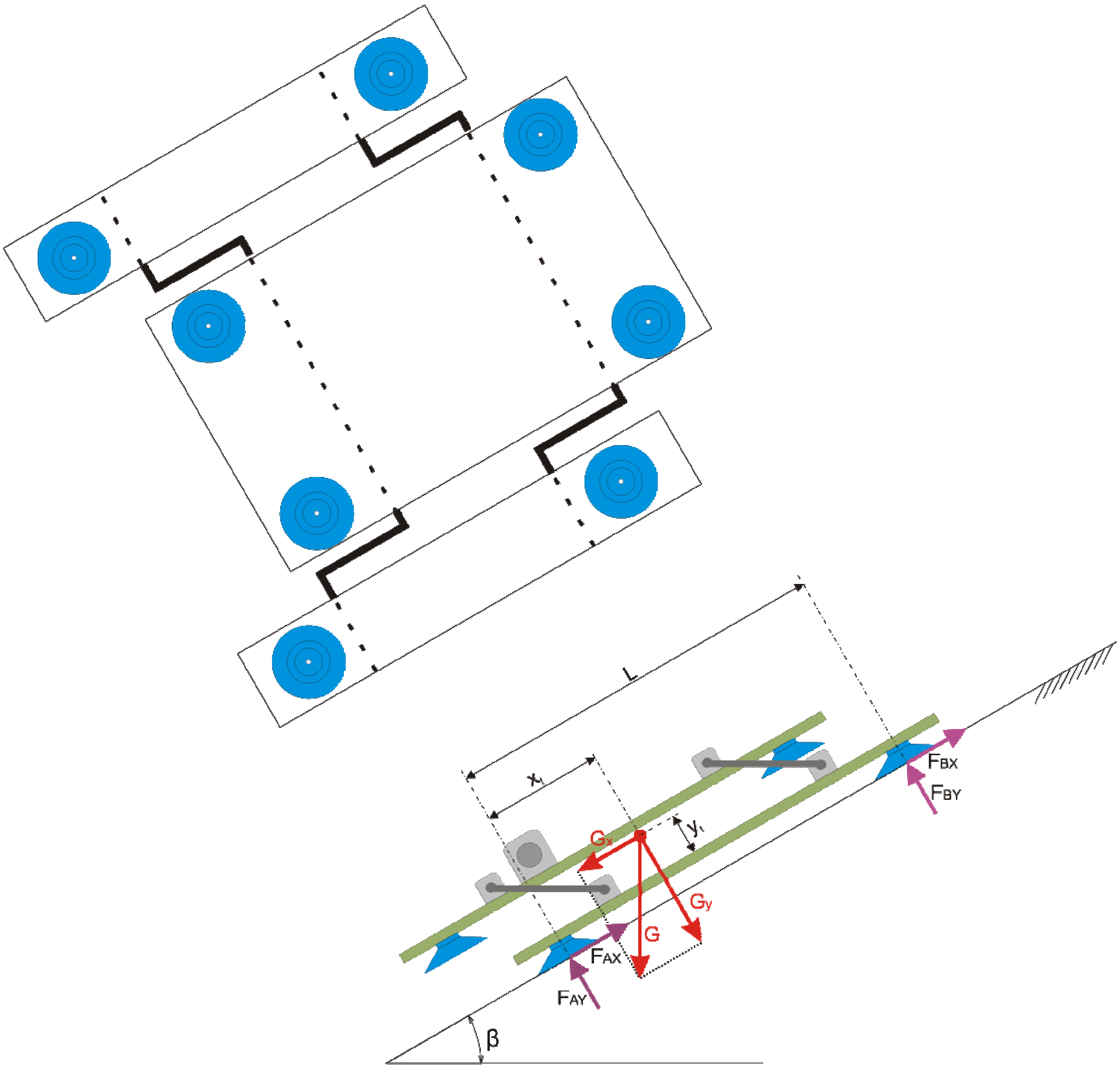
M_{MOT/f_H} ….. max. moment motoru odpovídající dané frekvenci f_H [Nm],

M_L' ….. zátěžný moment při pohybu „těla“ plošiny [Nm].

Z vypočítaných hodnot je zřejmé, že se nahrazením řemenového převodu planetovou převodovkou, podstatně zvýší hodnota momentové zatížitelnosti pohonu. Díky tomu bude možné upravit stávající řešení pohybového ústrojí, které je na hraně výkonové rezervy a hrozí ztráta synchronizace kroku. Na mobilní plošinu bude možné připojit jednotku pro otáčení plošiny (*viz. kap. 3.2*), což nebylo v konstrukčním řešení MP01 možné z důvodu její značné hmotnosti.

4.3.3 Kontrola podtlakového přídržného systému

Silové zatížení přísavek bylo kontrolováno na teoretickém modelu (*obr. 55*) pohybového ústrojí s celkovým počtem 8 přísavek. Teoretická síla zatěžující přísavky byla stanovena jak pro pohyb „těla“ plošiny, tak pro pohyb „nohou“ plošiny.



Obr. 55 *Model pro stanovení zatížení přísavek.*

Za předpokladu, že platí $F_{Ax} = F_{Bx} = F_x = F_t$, můžeme stanovit rovnice rovnováhy:

x: $$F_{Ax} + F_{Bx} - m_c \cdot g \cdot \cos(\beta) = 0\,, \qquad (4.19)$$

y: $$F_{Ay} + F_{By} - m_c \cdot g \cdot \sin(\beta) = 0\,, \qquad (4.20)$$

A: $$\frac{m_c \cdot g \cdot \cos(\beta) \cdot y_T(\varphi)}{L} - \frac{m_c \cdot g \cdot \sin(\beta) \cdot x_T(\varphi)}{L} + F_{By} \cdot L = 0\,, \qquad (4.21)$$

kde

m_c ….. celková hmotnost plošiny [kg];

g ….. tíhové zrychlení [m.s^{-2}];

β ….. sklon skleněné desky [°];

φ ….. úhel natočení kliky [°];

$x_T(\varphi)$ ….. vzdálenost polohy těžiště od referenčnímu bodu ve směru *x*-ové osy, v závislosti na natočení kliky;

$y_T(\varphi)$ ….. vzdálenost polohy těžiště od referenčnímu bodu ve směru *y*-ové osy, v závislosti na natočení kliky;

L=400mm ….. vzdálenost přísavek.

Změnu polohy těžiště v závislosti na natočení kliky mobilní plošiny (*obr. 56* a *obr. 57*) je možné vyjádřit vztahy:

$$x_T(\varphi) = \frac{x_3 m_3 + m_1 \cdot \left[x_1 + r_k \cdot (1 - \cos(\varphi))\right]}{m_c}, \tag{4.22}$$

$$y_T(\varphi) = \frac{y_3 m_3 + m_1 \cdot \left[y_1 + r_k \cdot \sin(\varphi)\right]}{m_c}, \tag{4.23}$$

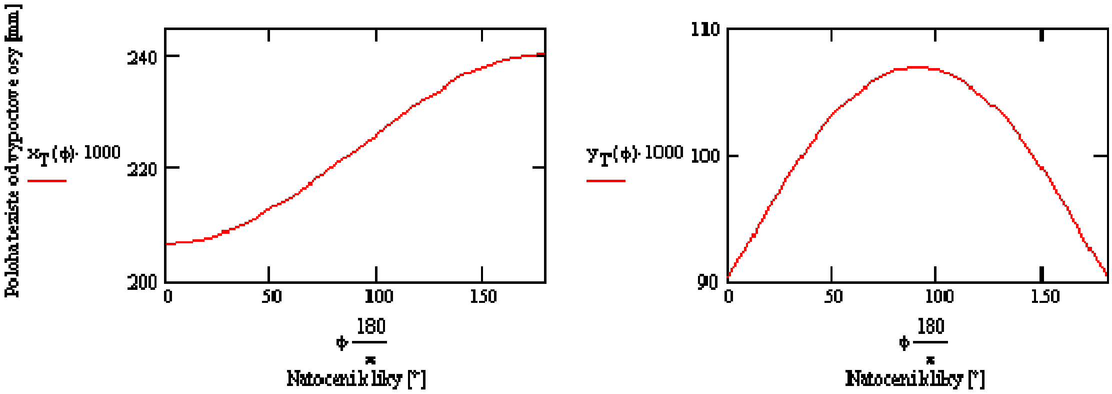
při pohybu „nohou“ a přisátých přísavkách „těla“ mobilní plošiny, respektive

$$x_T(\varphi) = \frac{x_1 m_1 + m_3 \cdot \left[x_3 + r_k \cdot (1 - \cos(\varphi))\right]}{m_c}, \tag{4.24}$$

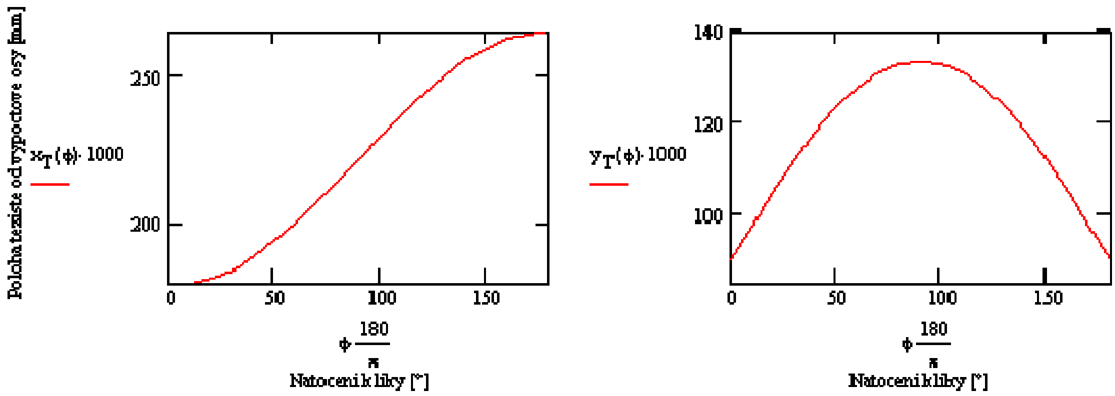
$$y_T(\varphi) = \frac{y_1 m_1 + m_3 \cdot \left[y_3 + r_k \cdot \sin(\varphi)\right]}{m_c}, \tag{4.25}$$

při pohybu „těla“ plošiny a přisátých přísavkách na „nohách“.

Závislosti změny polohy těžiště na natočení kliky, jak pro pohyb „nohou“ tak i pohyb „těla“ plošiny, jsou znázorněny v grafech na *obr. 56* a *57*.

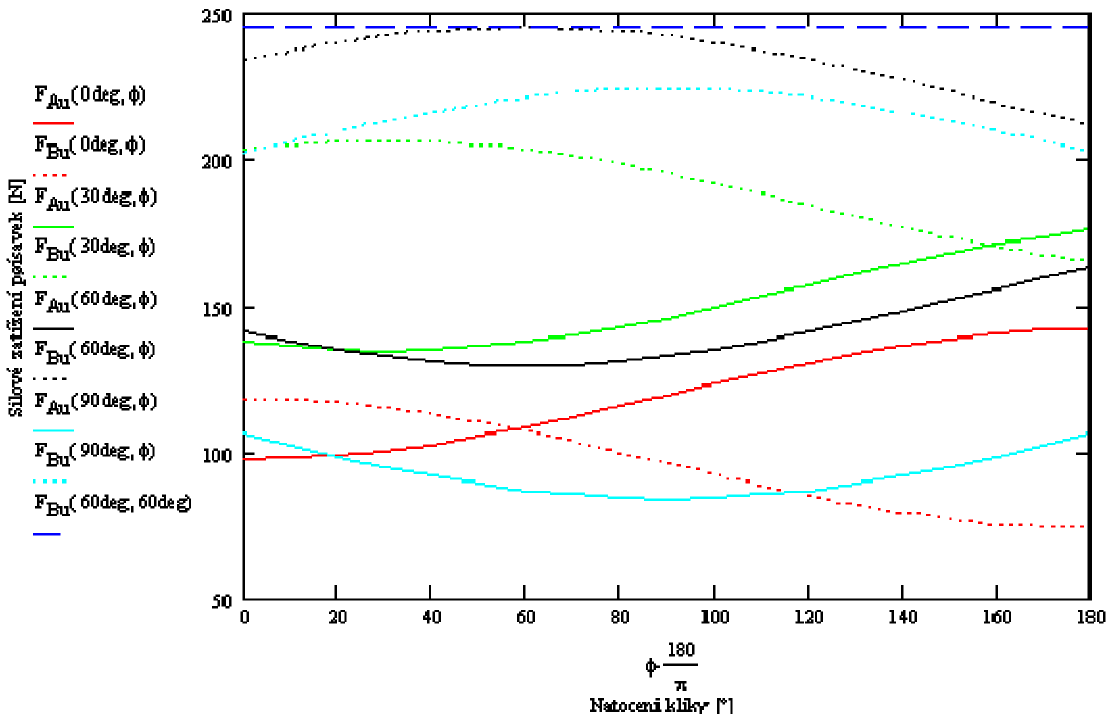


Obr. 56 *Závislost změny polohy těžiště ve směru osy x a osy y, na natočení kliky – pohyb „nohou“ plošiny.*

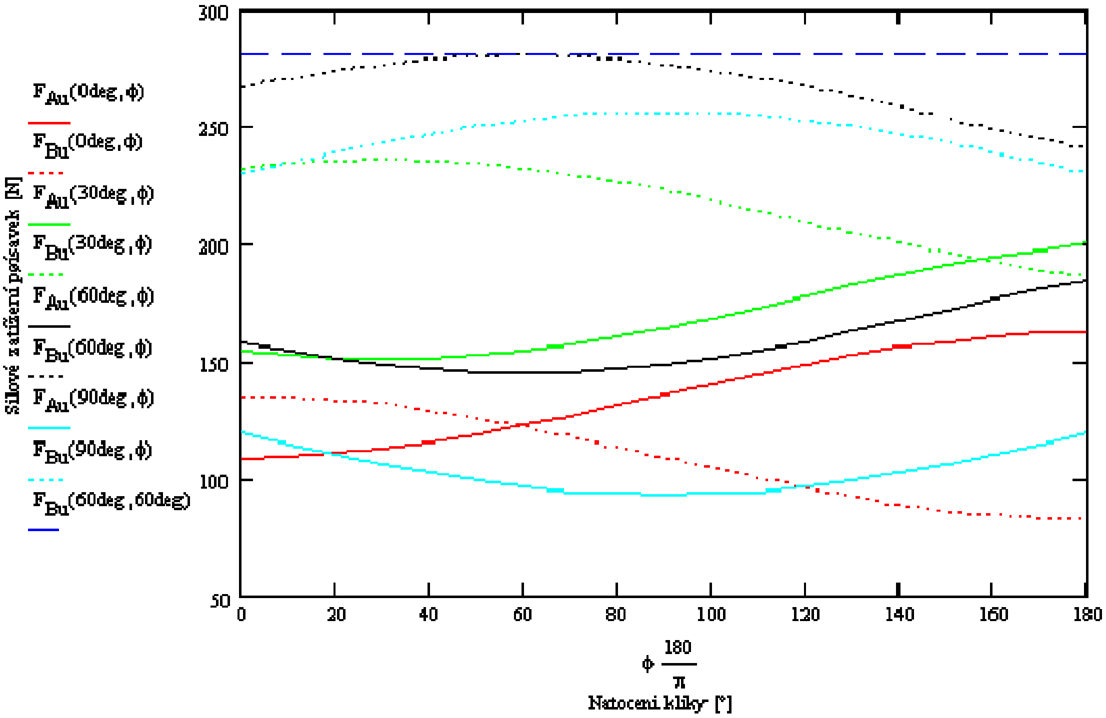


Obr. 57 *Závislost změny polohy těžiště ve směru osy x a osy y, na natočení kliky – pohyb „těla“ plošiny.*

Po dosazení vypočítaných hodnot těžiště ze vztahů *4.16 - 4.19* do pohybových rovnic *4.13 – 4.15*, můžeme stanovit maximální síly zatěžující přísavky během pracovního cyklu. Hodnotu maximální zatěžující síly je možné odečíst z grafů na *obr. 58* a *obr.59*.



Obr. 58 *Silové zatížení přísavek v závislosti na natočení kliky φ a sklonu stěny β – pohyb „nohou“ plošiny.*



Obr. 59 *Silové zatížení přísavek v závislosti na natočení kliky φ a sklonu stěny β - pohyb „těla“ plošiny.*

Pro stanovenou maximální sílu zatěžující dvojici přísavek, vynásobenou potřebnou bezpečností je nakonec možné stanovit minimální geometrický průměr přísavek, potřebný pro bezpečné uchycení plošiny k pracovní ploše:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot F_{\max}}{n \cdot \pi \cdot \Delta p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 280{,}65}{2 \cdot \pi \cdot 0.5}} \cong 37.8mm \ , \qquad (4.26)$$

kde k ….. bezpečnost (zvoleno k = 4);

n ….. počet činných přísavek;

Δp ….. hodnota použitého vakua [MPa].

Geometrický průměr jedné přísavky spolu se silovým zatížením byli hodnoceny pouze pro rozmístění přísavek na stanoveném teoretickém modelu. Zároveň bylo pominuto vyřazení z provozu některé z přísavek v případě pohybu po ploše, která není z hlediska přidržení ideální (praskliny, spáry, konstrukční překážky na skle, atd.). Hodnota bezpečnosti je silně závislá na součiniteli tření mezi polyuretanovou přísavkou a skleněnou plochou. Velikost součinitele tření je odlišná pro suchý povrch, mokrý povrch a mokrý povrch se zbytkem čistícího lubrikantu.

Vliv vyřazení přísavek z provozu na silové držení plošiny na vertikální stěně, spolu s optimalizací rozmístění přísavek by mohlo být úkolem pro další rozbor a zpracování tohoto námětu.

5. TECHNICKOEKONOMICKÉ VLASTNOSTI ROBOTU

5.1 Stanovení nákladů na řešení

Ceny nakupovaných dílů byly zjištěny z aktuálních ceníků zastupujících firem na českém trhu. Ceny dílů vyráběných na zakázku jsou uvedeny podle faktury výrobce.

Tab. 4 *Seznam a ceny nakupovaných dílů reálného modelu.*

díl	*typ - označení*	*cena*	*cena Kč*	*počet kusů*	*cena celkem*
		cena za 1 ks			
Motor	*VRDM 3910 (brzda, enkodér)*	2 250 EUR	63 000,-	1	63 000,-
Řídící jednotka	*SIMATIC S7-200*	1 390 EUR	39 000,-	1	39 000,-
Ovládací jednotka			7 000,-	1	7 000,-
Kabeláž			4 000,-		4 000,-
Cena kompletního pohonu					**113 000,-**
Řemenice	*Flennor HTD - 5M*		1 000,-	4	4 000,-
Řemeny	*Flennor HTD - 5M*		750,-	2	1 500,-
Svěrná pouzdra	*MLC 3000*		3 200,-	5	16 000,-
Cena komponent Flennor					**21 500,-**
Nespecifikované komponenty pneumatického obvodu			86 000,-		86 000,-
Cena pneumatického obvodu					**86 000,-**
Desky Murtfeld	*Murlubric*		8 400,-	1	**8 400,-**
Indukční snímač	*Ploskon*		1 200,-	1	**1 200,-**
Nespecifikované položky (spojovací materiál, pojistné kroužky, ložiska, atd.)			6 000,-		**6 000,-**
Cena nakupovaných komponent celkem					**~236 100 Kč**

Sečtením výrobních nákladů a nákladů spojených s konstrukcí zařízení lze odhadnout celkovou cenu na vznik nového konstrukčního řešení reálného modelu.

Moduly a nákup komponent	236 100 Kč
Subdodávky	+ 23 000 Kč
Výrobní náklady	+ 125 000 Kč
Režijní náklady	+ 26 000 Kč
Náklady na montáž a oživení	+ 18 000 Kč
Cena celkem	428 100 Kč

Náklady na konstrukci a provoz zařízení musí být vyváženy technickým a ekonomickým přínosem:

- Technickým přínosem je přechod z manuální práce na polo- nebo plnou automatizaci úlohy. Použitím mycího robotu se zvýší bezpečnost práce a zpřístupní těžko dostupná místa.

- Ekonomický přínos je především ve zkrácení času potřebného na vyčištění pracovní plochy (až na 1/10 času potřebného pro manuální čištění jedním pracovníkem).

5.2 Perspektiva navrženého řešení

Stávající konstrukční řešení je, v porovnání s dalšími výzkumnými projekty, ojedinělé z hlediska charakteru pohybu.

Při samotném řešení nebyla uvažována vazba na konkrétní typ skleněného opláštění. Mobilní plošina je tudíž aplikovatelná na širší škálu výškových budov (s respektováním omezujících předpokladů pro spoje skleněných tabulí uvedených v *kap. 4.2.3*).

Pro použití plošiny na konkrétní budově není nutná instalace jeřábového systému. Součástí budovy musí být závěsná rampa, která je však u většiny moderních výškových budov už součástí stavebních plánů.

U konstrukčního řešení mobilní plošiny MP02 je předpokládáno řízení pomocí dálkového ovládání, čímž vzroste autonomnost pohybu.

ZÁVĚR

Na základě rozboru existujících modelů robotů schopných pohybu po vertikálních stěnách byly zhodnoceny jejich výhody a nevýhody z hlediska pohybu (kinematika, volba pohonů, řízení pohonů, atd.), přídržného systému, spojení technologie s okolním prostředím a doplňujících bezpečnostních aspektů.

Ze stávajících řešení robotů pro mytí skleněných plášťů budov, byl stanoven soubor požadavků na konstrukční řešení mobilní plošiny. Na základě těchto požadavků byly sestaveny alternativní návrhy, z nichž byla pomocí rozhodovací analýzy vybrána nejvhodnější varianta konstrukčního řešení.

Pohyb mobilní plošiny robotu je vyvozen krokovým motorem a je realizován střídavým pohybem „těla" a dvojice „nohou" robotu. Jako přídržný systém zajišťující dostatečné uchycení robotu na stěně slouží pneumatický obvod podtlakových přísavek. Ovládací prvky jsou umístěny na „těle" robotu. Veškeré silové přívody jsou předpokládány externě z energetického vozíku.

Technologie čištění skleněného opláštění budov byla zpracována formou rozboru možných přístupů řešení dané problematiky. Zohledněna byla hlediska typu použité technologie, uspořádání čistícího agregátu oproti podvozku plošiny, charakteru pohybu robotu po vertikální stěně, cyklu pracovního režimu a spojení technologie s okolím. Konstrukční řešení čistící jednotky je uvažováno jako téma pro další zpracování.

V rámci řešení diplomové práce byl v laboratoři Katedry sklářských strojů a robotiky zhotoven funkční model mobilní plošiny. Model je schopný pouze dopředného pohybu po skleněné ploše se sklonem 0°-90° od horizontální roviny. Na tomto modelu byly odzkoušeny předpoklady funkčnosti pohybového ústrojí.

Předložená studie mobilní plošiny tvoří základ pro reálnou aplikaci v systému mobilního mycího robotu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SKAŘUPA, J.; MOSTÝN, V.: Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů . 1. vydání Košice. Edice vědecké a odborné literatury – Strojní fakulta, TU v Košicích, 2002. ISBN 80-88922-55-0.

[2] Co je to ten robot?: Servisní robot. [online] [cit. 6.9.2006]. Dostupné na World Wide Web: <http://robot.vsb.cz/cojerobot/servisni.htm>

[3] International Federation of Robotics. [online] [cit. 11.10.2006]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.ifr.org/>

[4] Fraunhofer IFF Institut - Facade cleaning robots. [online] [cit. 6.9.2006]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.iff.fraunhofer.de/eng/aut/9831.htm>

[5] SkyWipe+. [online] [cit. 6.9.2006]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.dornier-tech.com/en/skywipe/swplus.htm>

[6] ZHANG, H., ZHANG, J., LIU, R., ZONG, G.: Realization of a Service Robot for Cleaning Spherical Surfaces. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 2005, vol. 2, no. 1, p. 053-058, ISSN 1729-8806.*

[7] Robosoft - Robot RobuGlass. [online] [cit. 6.9.2006]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.robosoft.fr>

[8] ZHANG, H., ZHANG, J., ZONG, G.: Effective Pneumatic Scheme and Control Strategy of a Climbing Robot for Class Wall Cleaning on High-rise Building. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 2006, vol. 3, no. 2, p. 183-190, ISSN 1729-8806.*

[9] Climbing Robots — Pneumatic climbing robot and Gecko robot. [online] [cit. 3.11.2006]. Dostupné na World Wide Web: <http://tech-www.informatik.uni-hamburg.de/projects/index.php?content=Climbing%20Robots>

[10] ZHANG, H.: Requirements of Wall Cleaning and Development of Climbing Robot. [online] [cit. 3.11.2006]. Dostupné na World Wide Web: <http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/lehre/2005ss/proseminar/robotik/pdf/2005-04-18.pdf>

[11] NISHI, A.: Development of Wall-Climbing Robots. *Computers Elect. Engng, 1996, vol. 22, no. 2, p. 123-149.*

[12] SITTI, M., FEARING, R. S.: Synthetic Gecko Foot-Hair Micro/Nano-Structures for Future Wall-Climbing Robots. *Proceedings of the IEEE International*

Conference on Robotics and Automation, 2003, vol. 1, 14-19 September, p. 1164 – 1170.

[13] MENON, C., MURPHY, M., SITTI, M.: Gecko Inspired Surface Climbing Robots. *ROBIO 2004. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2004, 22-26 August, p. 431 – 436.*

[14] UNVER, O., MURPHY, M. P., SITTI, M.: Geckobot and Waalbot: Small-Scale Wall Climbing Robots. [online] [cit. 11.10.2006]. Dostupné na World Wide Web: <http://nanolab.me.cmu.edu/publications/papers/Unver-AIAA2005.pdf>

[15] SUN, D., ZHU, J., LAI, CH., TSO, S. K.: A visual sensing application to a climbing cleaning robot on the glass surface. *Mechatronics*, *2004, vol. 14, no. 10*, *p. 1089-1104.*

[16] BRIONES, L., BUSTAMENTE, P., SERNA, M. A.: A Wall-Climbing Pneumatic Robot for Inspection in Nuclear Power Plants. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 1994, vol. 11, no. 4, p. 287-292.*

[17] PACK, R. T., CHRISTOPHER, J. L., KAWAMURA, K.: A Rubbertuator-Based Structure-Climbing Inspection Robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1997, vol. 3, 20–25 April, p. 1869–1874.*

Další použité prameny:

- ✓ LEINVEBER, J., VÁVRA, P.: Strojnické tabulky. Třetí doplněné vydání. ALBRA, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- ✓ Katalogy výrobců použitých komponent: FESTO, HEPCO, RUBENA, BERGER LAHR, IGUS, FLENNOR, MURTFELDT, SIEMENS.