



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**



# **ROBOTY A MANIPULÁTORY**

Učební text

**Jiří Skařupa**

**Ostrava 2012**

Recenze: Doc. Ing. Zdeněk Konečný, PhD.  
Ing. Kateřina Kostolányová, Ph.D.

Název: Roboty a manipulátory  
Autor: Jiří Skařupa  
Vydání: první, 2012  
Počet stran: 229  
Náklad: 20

Studijní materiály pro studijní obor 2301R013-70 Robotika Fakulty strojní  
Jazyková korektura: nebyla provedena.

**Určeno pro projekt:**

Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost

Název: Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu

Číslo: CZ.1.07/2.2.00/07.0339

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Jiří Skařupa

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

**ISBN 978-80-248-2613-4**

## OBSAH

<b>1. ÚVOD DO STUDIA PŘEDMĚTU ROBOTY A MANIPULÁTORY .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1. OBSAH STUDIA.....</b>	<b>9</b>
1.1.1. Základní charakteristika a struktura předmětu.....	9
1.1.2. Současné problémy praxe v oboru.....	10
<b>1.2. VÝCHOZÍ POZNATKY KE STUDIU PŘEDMĚTU .....</b>	<b>15</b>
1.2.1. Průmyslové roboty a manipulátory.....	16
1.2.2. Metodika konstruování v oboru – obecný model postupu.....	19
1.2.3. Metody CAI - TRIZ.....	27
1.2.4. Funkčně nákladová analýza.....	30
<b>1.3. SOUČASNÉ ROBOTICKÉ SYSTÉMY .....</b>	<b>33</b>
1.3.1. Průmyslové roboty.....	33
1.3.2. Servisní roboty.....	36
1.3.3. Mechatronické systémy robotického typu.....	39
1.3.4. Mechanické subsystémy, agregáty a prvky robotů.....	43
<b>2. MECHANICKÁ ÚSTROJÍ ROBOTŮ .....</b>	<b>46</b>
<b>2.1. VYVAŽOVACÍ ÚSTROJÍ ROBOTŮ.....</b>	<b>47</b>
2.1.1. Vyvažování rotačních pohybových jednotek.....	47
2.1.2. Vyvažování lineárních pohybových jednotek.....	50
2.1.3. Kvalita vyvážení.....	54
<b>2.2. PŘEVODOVÁ ÚSTROJÍ – KLOUBOVÉ MÉCHANISMY .....</b>	<b>66</b>
2.2.1. Paralelogramy, pantografy.....	66
2.2.2. Kinematické struktury a geometrické poměry polohovacích ústrojí s pantografy.....	72
2.2.3. Silové poměry v pantografu – reakce.....	74
2.2.4. Návrh pantografu.....	77
2.2.5. Pohony – druhy, silové a momentové účinky.....	78
<b>3. PRINCIPY A METODIKA VÝPOČTU AKČNÍHO SUBSYSTÉMU ROBOTŮ....</b>	<b>82</b>
<b>3.1. DRUHY VÝPOČTŮ AKČNÍHO SUBSYSTÉMU ROBOTŮ A MOŽNÉ POSTUPY</b>	<b>83</b>
3.1.1. Deformační výpočty.....	84
3.1.2. Analytický deformační výpočet kartézského manipulátoru.....	90
3.1.3. Funkční – předběžné výpočty.....	101
<b>4. METODIKA A PROSTŘEDKY PŘEDBĚŽNÉHO NÁVRHU ROBOTŮ.....</b>	<b>103</b>
<b>4.1. METODY NÁVRHU SERVISNÍCH ROBOTŮ.....</b>	<b>104</b>
4.1.1. Charakteristika výchozí situace v servisní robotice.....	104
4.1.2. Analýza servisních činností.....	105
4.1.3. Variabilita konstrukcí servisních robotů.....	107
4.1.4. Předběžný návrh - studie.....	113
4.1.5. Vlastní postup návrhu servisních robotů.....	116
4.1.6. Celkový přehled návrhu servisních robotů.....	119
<b>4.2. METODY NÁVRHU PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ.....</b>	<b>123</b>
4.2.1. Požadavky a kritéria pro konstrukci průmyslových robotů.....	123
4.2.2. Volba koncepce.....	124
4.2.3. Předběžné výpočty.....	131
4.2.4. Návrh a výpočty modulárních průmyslových robotů.....	138
<b>4.3. PROSTŘEDKY NÁVRHU PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ.....</b>	<b>152</b>

4.3.1. Struktura systému .....	153
4.3.2. Analýzy .....	154
4.3.3. Syntézy.....	166
<b>5. NAVRHOVÁNÍ ROBOTŮ A MANIPULÁTORŮ .....</b>	<b>175</b>
<b>5.1. MODERNÍ POSTUPY – GOLDFIRE INNOVATOR .....</b>	<b>176</b>
5.1.1. Principy GFI .....	176
5.1.2. Možnosti využití GFI pro tvůrčí práci návrháře .....	177
5.1.3. Workflow Design New System (Návrh nového systému) .....	180
5.1.4. Příklad aplikace workflow .....	181
<b>5.2. APLIKACE POSTUPŮ A PROSTŘEDKŮ PRO NÁVRH AKČNÍHO SUBSYSTÉMU (AS) .....</b>	<b>195</b>
5.2.1. Přípravné kroky pro návrh AS .....	195
5.2.2. Návrh a výpočty vybraných částí akčního subsystému robotu .....	199
<b>6. PŘÍLOHY .....</b>	<b>219</b>
Další zdroje .....	220
Klíč k řešení .....	224

# POKYNY KE STUDIUI

## Roboty a manipulátory

Pro předmět 2. semestru magisterského studia oboru Robotika jste obdrželi studijní balík obsahující:

- integrované skriptum pro distanční studium, obsahující i pokyny ke studiu
- CD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol
- harmonogram průběhu semestru a rozvrh prezenční části
- rozdělení studentů do skupin k jednotlivým tutorům a kontakty na tutorý
- kontakt na studijní oddělení

### Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětu Průmyslové roboty a manipulátory a Metodika konstruování v oboru.

### Cílem předmětu

je seznámení studenta s principy navrhování robotických systémů a jejich výpočtů. Po prostudování modulu by měl student být schopen aplikovat tyto základní principy do vlastní tvůrčí práce v oboru. Měl by být schopen provádět návrh, výpočty a kontrolu robotů a jejich základních mechanických částí a předepsat jejich provozní podmínky.

### Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do magisterského studijního programu Strojní inženýrství, oboru 2301T013 Robotika, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na tématické bloky, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

### Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



**Čas ke studiu:** xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden **čas** potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají jisté zkušenosti. Čas potřebný k prostudování a zvládnutí jednotlivých tématických bloků je do značné míry závislý především na úrovni jejich znalostí z definovaných prerekvizit.



**Cíl:** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Okamžitě potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



## VÝKLAD

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.



## Shrnutí kapitoly

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k němu ještě jednou.



## Kontrolní otázka

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



## Úkol k řešení

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavní význam předmětu a schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti, při řešení reálných situací, hlavním cílem předmětu.



## KLÍČ K ŘEŠENÍ

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

# 1. ÚVOD DO STUDIA PŘEDMĚTU ROBOTY A MANIPULÁTORY

Po úspěšném a aktivním absolvování tohoto BLOKU budete umět:

<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Objasnit obsah předmětu v souvislosti s aktuálními potřebami praxe v oboru</li><li>▪ Interpretovat základní poznatky z předmětů Průmyslové roboty a manipulátory a Metodika konstruování v oboru, nezbytné pro jejich aplikaci v tomto předmětu</li><li>▪ Diskutovat aktuální vývoj technických systémů v oboru</li></ul>	Cíle přednáškového bloku
---	--------------------------

<i>Robot, mechatronický systém, základní poznatky, zaměření studia a předmětu, současné robotické systémy, požadavky</i>	Klíčová slova
--	---------------



**Čas ke studiu:** 6 hodin

## 1.1. OBSAH STUDIA

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY budete umět:

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vyjádřit obsah a strukturu předmětu a studijní opory</li> <li>▪ Objasnit hlavní problémy praxe v oboru, k jejichž řešení přispěje studium předmětu</li> </ul>	Cíle kapitoly
--	---------------

<i>Robot – průmyslový, servisní, sériový, paralelní, robotika, mechatronika, metodika konstruování, navrhování robotů, prerekvizity, know how, metody a prostředky návrhu.</i>	Klíčová slova
--	---------------



**Čas ke studiu:** 2 hodiny

Předmět Roboty a manipulátory dovršuje souhrn poznatků a praktických postupů, které jsou potřebné pro práci tvůrčího technika – inženýra v daném oboru. V kapitole je vysvětlen obsah studijní opory a předmětu jednak v návaznosti na absolvované prerekvizity a také na problematiku, kterou budou absolventi řešit ve své praxi.



### VÝKLAD

#### 1.1.1. Základní charakteristika a struktura předmětu

Obsah předmětu je pro studenty oboru Robotika završením poznatků o mechanických ústrojích robotů a jejich navrhování. K tomu v rámci dřívější průpravy absolvovali předměty Průmyslové roboty a manipulátory (bakalářské studium) a Metodika konstruování v oboru - Robotika (magisterské studium) a samozřejmě, vzhledem k tomu, že se jedná v případě robotů o mechatronické systémy, také průpravu v oblasti pohonů, mechatroniky, senzoriky a dalších. Protože v každém technickém oboru je výsledný profil absolventů založen na zvládnutí technických systémů oboru a metod jejich tvůrčího využití při návrhu systémů nových či inovovaných, bude nutné doplnit a rozvinout poznatky o systémech a subsystémech robotiky a dále ukázat jak aplikovat při navrhování těchto systémů dříve získané metodické poznatky.

Je zřejmé, že hotovým tvůrčím technikem žádný čerstvý inženýr (absolvent) nemůže být. To podstatné, co jej čeká v praxi, je vytváření vlastního know how, jako individuální sumy poznatků, která podstatně ovlivňuje jeho hodnotu na trhu práce i kvalitu odborného, potažmo osobního života (nejen finančním ohodnocením, ale i uspokojením z výsledků jeho tvůrčí práce a osobních přínosů na pracovišti).

Z tohoto důvodu skriptum přináší nejen strohé uvedení základních principů postupů navrhování a výpočtů, ale i podrobnější rozvedení některých témat, která se týkají možností jak know how vytvářet a aplikovat jako osobní přidanou hodnotu, v tvůrčím procesu v rámci pracovního týmu na pracovišti. Protože ne vždy tuto okolnost studenti při výuce chápou bude na ni v tomto kontextu u příslušných témat upozorněno.



V předmětu Průmyslové roboty a manipulátory byly probrány základní znalosti o prvcích, agregátech a subsystémech a ústrojích akčního (mechanického) systému průmyslových robotů. Tyto znalosti jsou nyní doplněny o další důležitá ústrojí a také o další typy robotů a jejich konstrukční řešení, dnes již běžně v praxi se vyskytující.

Poznatky potřebné pro navrhování robotů a mechatronických systémů robotického typu byly v základní úrovni probrány v Metodice konstruování v oboru. V tomto studijním materiálu v relaci ke studovanému předmětu jsou tyto znalosti aplikovány pro navrhování nových koncepcí, struktur a prvků robotů různých typů.

Skriptum je strukturováno na základě zkušeností autora získaných v průběhu 25 let (od roku 1984) přednášení této problematiky na Fakultě strojní, VŠB – Technické univerzity Ostrava. Změny ke kterým v průběhu let docházelo odpovídají především rychlému vývoji oboru a s ním souvisejících disciplín, ale také rozvoji metod počítačové podpory navrhování technických systémů a metod podpory tvůrčí práce, opět realizovaných s využitím výpočetní techniky.

Skriptum je členěno do 5 tématických celků:

#### 1. Obsah studia

Kapitola dokládá současný rozvoj robotiky a problémy jejího dalšího rozvoje a v tomto kontextu ukazuje jak strukturování skripta odpovídá požadavkům kladeným na tvůrčí pracovníky v oboru.

#### 2. Mechanická ústrojí robotů

Jsou zde vyloženy základy řešení dalších ústrojí robotů (doplňující poznatky skripta Průmyslové roboty a manipulátory) a principy jejich návrhu a výpočtů.

#### 3. Principy a metodika výpočtu prvků akčního subsystému robotů

Upřesňují se zde obecné zásady výpočtů prvků, agregátů a subsystémů robotů při využití systémů počítačové podpory jejich návrhu.

#### 4. Metodika a nástroje předběžného návrhu robotů

Poskytuje hrubý přehled metod a nástrojů dnes užívaných při předběžném navrhování složitých technických systémů robotického typu s doporučením k jejich výběru v různých situacích tvůrčí technické práce.

#### 5. Navrhování robotů

Na příkladech ukazuje konkrétní postupy návrhu robotů zejména ve fázi tvorby koncepčních řešení nových robotů a jejich subsystémů, nebo při zásadních inovacích již vyráběných typů.

Soubor předkládaných poznatků byl průběžně ověřován na řešení projektů robotů, či mechatronických systémů robotického typu, týmem pracovníků katedry robototechniky Fakulty strojní, VŠB – Technické univerzity Ostrava, ve spolupráci s firmami, zejména v oblasti nasazení pro záchranu lidí a materiálu při krizových situacích.

### **1.1.2. Současné problémy praxe v oboru**

Průmyslové roboty (dále PR) jsou v dnešní době již plně rozvinuté technické systémy, které kooperují s výrobními systémy ve strojírenství a nachází uplatnění i mimo toto odvětví. Základní, ve světě vyráběné koncepce PR, dosáhly vysoké technické úrovně i spolehlivosti, takže nezaostávají za výrobními stroji, ke kterým jsou nasazovány. Výhodnost určitých typů podle účelu, ke kterému jsou využívány, vedla k tomu, že jsou opakovaně produkovány různými výrobci a inovovány, zejména adekvátně úrovni subsystémů a prvků. Tento stav odpovídá i propracování a ověření poznatků nashromážděných v uplynulém období.



Obr. 1.1.2. – 1 Sériový robot fy Yaskawa



Obr. 1.1.2. – 2 Paralelní robot fy Fanuc

Kromě postupně inovovaných úspěšných koncepcí PR (obr. 1.1.2.-1 a obr. 1.1.2.-2) , probíhá i proces hledání nových koncepčních řešení (obr. 1.1.2.-3). To se týká jednak automatizace nových technologií ve strojírenství, ale i jiných odvětví (např. stavebnictví, potravinářského průmyslu aj.). Rozvoj prvkové základny a úspěchy ve vývoji a aplikacích PR vedly i k výzkumu a nástupu robotů do automatizace servisních činností, ke vzniku servisních robotů (dále SR, obr. 1.1.2.-4) a robotů personálních. Význačnou okolností, která ztěžuje jejich provoz a rovněž jejich návrh, je vysoký stupeň nestrukturovanosti prostředí a z toho vyplývající důsledky pro autonomní provedení úloh.



Obr. 1.1.2. – 3 Hybridní robot

Pro SR je možné využít mnoha teoretických i praktických poznatků i vyráběných prvků pro PR, či přímo jejich subsystémů. Avšak při bližším zkoumání okolností nasazení i návrhu SR je zřejmé, že rozsah možných nasazení, diverzibilita příležitostí a procesů i prostředí jsou prakticky neomezené a tedy i stupeň novosti řešených úloh při jejich návrhu bude zcela mimořádný, a to i v dlouhodobé perspektivě. Při posouzení fenoménu globalizace a z toho rezultujících aspektů vývoje a uplatnění jakýchkoliv produktů, je nutné brát v úvahu, že na jedné straně se zde otevírají ohromné tržní příležitosti, ale i velká

konkurence. Konkurenční kritéria jsou známa – mezi jinými je to rychlost vývoje a vstupu produktu na trh, kvalita, cena, servis aj. Pokud mají mít jednotlivé firmy možnost do tohoto sektoru úspěšně vstoupit, musí být adekvátně připraveny ke splnění těchto požadavků.

Tyto skutečnosti se promítanou do práce výzkumných a vývojových pracovníků, vzhledem k nárokům na rychlost a počet inovací a nutnost nacházet v této oblasti nové

principy řešení problémů. Týká se to rozvoje metod a nástrojů pro podporu těchto činností, které musí umožnit jednak jejich výraznou intenzifikaci, jednak zefektivnění, posouzení technické realizovatelnosti, ekonomické realizovatelnosti a možností uplatnění získaných, principiálně nových řešení i v jiných oblastech.



Obr. 1.1.2. – 4 Servisní průzkumný a pyrotechnický robot

V posledních letech dochází i zde k rychlému rozvoji a množství metod a nástrojů se stává poněkud nepřehledným. Navíc metody i nástroje jsou vhodné pro různé aplikace v různé míře.

Vzhledem k prognózám o mimořádném významu servisní robotiky pro hospodářství vyspělých států již i v současnosti, jde o problematiku, která může přispět k rozvoji oboru a jeho konkurenceschopnosti i v České republice.

Rozpracování metod a prostředků pro návrh servisních robotů probíhá na katedře robototechniky, Fakulty strojní VŠB - TU Ostrava, od r. 1999, jako součást projektu výzkumných záměrů MŠMT (s plánovaným ukončením v r. 2003), konkrétně výzkumného záměru CEZ:J17/98:272300008 "Inovace konstrukcí strojů a zařízení směrem ke zvyšování výkonnosti, spolehlivosti, úspor energie a

ochrany životního prostředí", kde byly sledovány tři dílčí oblasti této problematiky: Rozvoj inovačních metod a nástrojů v oblasti strojních a mechatronických systémů, Inovace a vývoj servisních robotizovaných systémů a Aplikace CAD systémů v oblasti modelování a simulace mechatronických systémů, s cílem optimalizace jejich parametrů. Prezentované nástroje a prostředky byly vesměs získány a ověřeny i v rámci grantových projektů FR MŠMT a GAČR, řešených na katedře robototechniky v letech 1994 – 2001 a následně ve výzkumně – vývojových projektech Ministerstva průmyslu a obchodu typu Tandem, Tip a Alfa ve spolupráci s mnoha firmami v ČR..

První výsledky v této oblasti byly publikovány v monografii „Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů“ [Skařupa, Mostýn 2001], která tématicky navazuje na monografii „Teorie průmyslových robotů“ [Skařupa, Mostýn 2000]. Ta byla zaměřena zejména na aplikaci numerických výpočetních metod v oblasti kinematiky a dynamiky průmyslových robotů a manipulátorů. V porovnání s obdobnými pracemi nabídla konkrétní a ověřené výpočtové metody pro konstruktéry, výpočtáře a vědecké pracovníky, vhodné k relativně snadné aplikaci, při takových výpočtech, jako je stanovení reakcí v pohybových jednotkách robotů, k dimenzování nosných i převodových prvků robotu aj.

Uvedené metody jsou však aplikovatelné až tehdy, jsou-li známy příslušné hmotnostní a kinematické charakteristiky konkrétního robotu, což je závěrečná fáze jeho vývoje. Jestliže začneme za této situace ověřovat správnost návrhu konstrukce robotu, znamená to prakticky vždy nezbytné úpravy konstrukce a i několikrát opakování částí, či celého cyklu vývoje; tedy známý iterativní přístup k návrhu konstrukcí strojů. To může způsobit časovou prodlevu vůči konkurenci, při vstupu do tržního prostředí a návazné další poškozující ekonomické dopady pro výrobní firmu.

Naše pozornost se tedy zaměřuje na počáteční fázi návrhu robotů. Jde o definici správného zadání pro vývoj produktu (robotu, agregátů, pohybových jednotek, převodů,

periferií robotizovaných pracovišť aj.), analýzu úkolu, stanovení požadavků na konstrukci, analýzu nebo návrh technologie, analýzu a syntézu funkční, orgánovou i stavební, s využitím moderních prostředků počítačové podpory. Na to pak navazuje využití možností inteligentních CAD systémů, s jejich stále komplexnější strukturou. Vytváří se model produktu, který již v rané fázi vývoje může být optimalizován a hodnocen a doveden do stupně komplexnosti, který umožňuje aplikaci metod zaměřených na kontrolní dílčí výpočty.

Postup a filozofie návrhu, použité metody a prostředky se nutně musí lišit podle analýzy situace na počátku vzniku myšlenky, směřující k založení vývoje produktu. V těchto úvahách a instrumentech se budou muset vývojáři dokázat rychle orientovat, aby splnili očekávání svých firem.

Předvýrobní fáze navrhování výrobku je v dnešní době realizována na základě uplatnění vyváženého vztahu teoretických a experimentálních přístupů. V obou případech se silně prosazuje dynamicky se rozvíjející výpočetní technika s příslušným programovým zázemím.

Tlak na zkracování periody výzkumu a vývoje z hlediska zkrácení času pro přípravu výroby a zkrácení celkového času pro uvedení nového produktu na trh, vede k rozvoji prostředků pro operativní sdílení informací mezi jednotlivými vývojovými týmy a realizátory umožňujících rychlou implementaci výsledků do výroby a pružnou reakci na změny během optimalizace výrobku. Velký význam má možnost archivace dílčích postupů a zkušeností popřípadě jejich průběžné zobecnění pro pozdější využití.

Programové prostředky pro teoretické i experimentální postupy jsou dostupné ve formě univerzálního (komerčního) sw nebo ve formě specializovaného sw, vytvářeného podle konkrétních podmínek a charakteru sledovaného výrobku. Způsoby využívání univerzálních programů a vytváření vazeb mezi nimi ve smyslu vytváření metod přístupů řešení, představuje prostor novodobých nástrojů pro rychlý optimalizovaný návrh strojů a jejich komponent

Metody experimentálního výzkumu se v procesu navrhování strojů, zařízení a jejich komponent projevují jako prostředky zpětné vazby, s průběžným působením v rámci zpřesňování čistě teoretických postupů a dále jako nástroje pro identifikaci parametrů realizovaných zařízení, s ohledem na vzájemné porovnávání a upřesňování dalšího vývoje. V některých případech mohou být experimentální metody aplikovány pro zrychlení vývoje. Velkou perspektivu mají metody rychlého prototypování (virtuall prototyping).

Výzkum a vývoj metod navrhování, optimalizace a experimentálního sledování struktur strojů a jejich komponent má zásadní význam pro uplatnění ve všech oborech a zcela výrazně podmiňuje jejich rozvoj.

V současné době existuje velký počet firem (a dále narůstá) specializovaných na výrobu jednotlivých komponent, agregátů a uzlů strojů (pro všechny subsystemy), což vede k zavádění nových technologií, ke zvyšování sériovosti, zvyšování kvality, snižování nákladů a koncentraci kapitálu na jejich další intenzivní vývoj a inovace. Prakticky to znamená, že intenzivní změny prvkové základny umožňují a podněcují inovace a vývoj nových koncepcí a struktur strojů, ale na druhé straně jsou již běžné i postupy inverzní, tj. vývojáři ke svým vizím o vývoji struktur a koncepcí dávají podněty, či přímo konkrétní zakázky na vývoj prvků potřebných vlastností. Přitom tyto prvky jsou dnes poměrně běžně v plné nabídce (s katalogem i všemi potřebnými informacemi a s možností okamžité konzultace) k dispozici na webovských stránkách internetu. Je třeba si uvědomit co znamená jen tato poslední okolnost -

stále aktuální katalog, celosvětová dostupnost stejných prvků, konkurenční tlak na rychlost inovací, zvyšování sériovosti, trh odběratele a tedy i konstruktéra (prvky využívajícího).

Druhou zásadní změnou proti minulosti, která nastala proti dobám ne tak dávným je skutečnost, že v důsledku snadné dostupnosti vysoce kvalitních prvků, se konstruktéři zaměřují na špičkovou tvůrčí práci, týkající se zejména koncepcí a struktur strojů, spíše se tedy jedná o projektování, nebo jistému významnému posunutí činnosti konstruktéra, tak jak byla chápána po celé minulé století (návrh každého detailu, a to včetně realizace vhodnou technologií). Také z této okolnosti vyplývá značný boom v oblasti nástrojů a prostředků pro racionalizaci etapy tvorby koncepcí a návrhu technických systémů.

Předkládaná skripta pro studenty oboru "Robotika" obsahují, jak vyplývá z výše uvedeného, témata, která v těchto relacích a rozsahu a ve vztahu k robototechnickým a potažmo mechatronickým systémům, dosud v tomto kontextu nebyla publikována. Měla by představovat, k dílčím otázkám konstruování a dimenzování a metodice návrhu jednotlivých uzlů robotů, základní studijní materiál, respektive osnovu znalostí absolventů oboru, od které se odvíjí obsah dalších vědních disciplin, potřebný pro tvorbu tak komplexního produktu, jakým je průmyslový, servisní, či personální robot, jako typický představitel mechatronických systémů.

Většina témat je však jistě zajímavá a především přímo využitelná i pro studenty ostatních oborů (zejména konstrukčních) strojních fakult. Týká se to např. postupů počátečních etap tvorby návrhů a inovací, analytických metod, podpory kreativity a CAD/CAI/CAE systémů.

Vzhledem k tomu, že jde o první vydání skripta a s novou tematikou, bude autor vděčen za každou připomínku ke zlepšení jejich obsahu a/nebo struktury, ať již ze strany pedagogů, odborníků z praxe i studentů.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste si připomenuli pojmy známé vám z předchozího studia, viz klíčová slova. Ze složitosti mechatronických – robotických systémů vyplývá také složitost návrhových postupů a nutnost využít speciální prostředky pro snížení rizika tvůrčí práce.



## Kontrolní otázky

1. V čem spočívá odlišnost robotu oproti manipulátoru?
2. Jak se liší robot sériový od paralelního?
3. Čím se odlišují průmyslové a servisní roboty?
4. Jaké jsou fáze technického života robotů?

Která témata prerekvizit jsou pro předmět Roboty a manipulátory zvláště důležitá a proč?

## 1.2. VÝCHOZÍ POZNATKY KE STUDIU PŘEDMĚTU

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY budete umět:

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpretovat základní poznatky předmětu Průmyslové roboty a manipulátory a Metodika konstruování v oboru, na které nově studovaná látka navazuje</li> <li>• Rozhodnout při řešení nových problémů, které z dříve získaných poznatků lze využít.</li> </ul>	Cíle kapitoly
--	---------------

<p><i>Základní kinematické struktury průmyslových robotů – kartézská, cylindrická, sférická, angulární, scara, Gantry, subsystémy PR – akční, řídicí, sensorický, pohyby částí PR – globální, regionální, lokální, pracovní prostor, kolizní prostor, dynamické, statické a výkonové charakteristiky PR.</i></p> <p><i>Technický život technických systémů, inženýrské činnosti, základní rozpor technické tvůrčí práce, konstrukční postup, funkční a orgánová struktura, black box, morfologická matice, vlastnosti technických systémů, TRIZ, ARIZ, funkčně nákladová analýza.</i></p>	Klíčová slova
---	---------------



**Čas ke studiu:** 3 hodiny

Robotika, jako každý jiný strojírenský obor, pojednávající o určitém druhu technického systému využívá poznatků mnoha vědních disciplin. Vzhledem k tomu, že roboty jsou typickými představiteli mechatronických systémů je počet těchto disciplin a šíře těchto poznatků značná. Nestačí pak při návrhu strojní části robotu respektovat všeobecně uznávané postupy, ale je nutné brát zřetel i na řešení systému z hlediska poznatků elektrotechniky, elektroniky, sensoriky, řízení a softwarového inženýrství.

Vytvořila se tak nová filozofie přístupu k navrhování takových systémů, charakteristická především týmovou spoluprací profesních specialistů z výše uvedených disciplin. Tak jako jsme do nedávné doby vycházeli z přístupu elektromechanického, dnes jde o přístup mechatronický. Důsledkem této filozofie pak není pouhý součet přínosů jednotlivých disciplin, ale přínos násobně vyšší daný synergií efekty.

Pro rozvoj a dovršení poznatků v oboru Robotika, předmětem Roboty a manipulátory, v následujících subkapitolách, připomeneme, co by měl student znát z předchozího studia předmětů, definovaných jako prerekvizity.

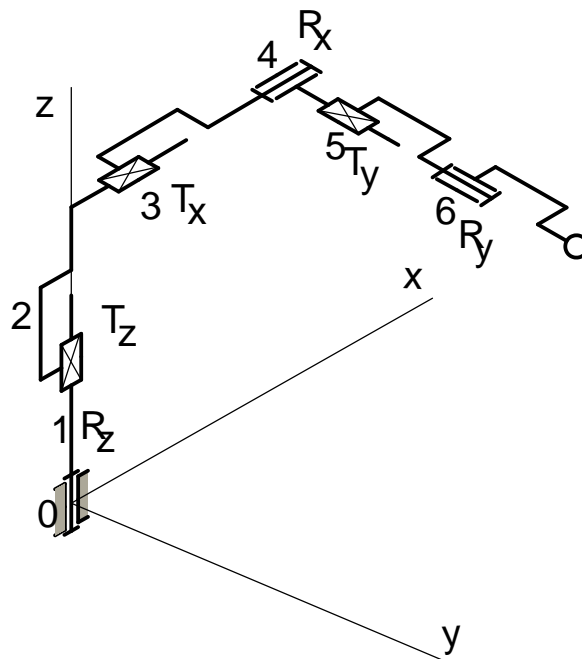


## VÝKLAD

### 1.2.1. Průmyslové roboty a manipulátory

V této části nebudeme opakovat látku probranou a dostupnou ve skriptu k předmětu Průmyslové roboty a manipulátory, ale pouze upozorníme na podstatné poznatky, na které budeme dále navazovat.

Současné průmyslové roboty mají běžně 6 stupňů volnosti, z nichž každý může být buď rotační, nebo posuvný, přičemž rotace má volbu 3 os ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) a posuv rovněž a tyto mohou být za sebou libovolně seřazeny, pak z velkého počtu možností musíme konečný řetězec volit podle nějakých kritérií. Různým řazením podle druhu pohybu a užití osy souřadného systému získáme určitou koncepci robotu s charakteristickými vlastnostmi, často velmi rozdílnými. Příklad řazení stupňů volnosti do kinematického řetězce a vzniku koncepčního řešení viz obr. 1.2.1.-1.



Obr. 1.2.1. – 1 Kinematický řetězec PR se 6 stupni volnosti

Očíslovány jsou jednotlivé členy, rám 0, rozlišeny rotace a translace a přiřazeny k osám

Mezi významná kritéria na základě kterých koncepci volíme a také hodnotíme jejich úspěšnost patří:

- Tvar a velikost pracovního prostoru

- Požadovaná dráha těžiště objektu manipulace (OM)
- Požadovaná přesnost polohování OM
- Požadovaná orientace OM
- Volba druhu pohonu jednotlivých os
- Vhodné konstrukční provedení kinematické dvojice (kloubu a ramene PR – z hlediska zejména výrobního, montážního, ekonomického – výrobních nákladů, umístění převodů a motorů, kabeláže, aj.)
- Způsob součinnosti PR s periferiemi RTP – polohovadly, dopravníky, kontejnery, výrobními stroji, aj.

Tento výčet není vyčerpávající a navíc si musíme uvědomit jak daná kritéria odpovídají (jsou odvozena od) aplikačním požadavkům v konkrétním případě.

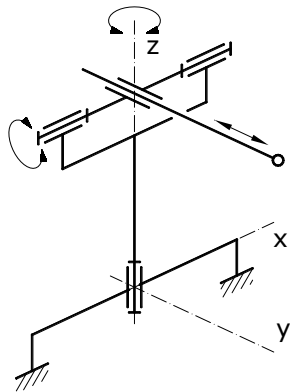
Na základě těchto kritérií se ukázaly jako zvláště vhodné a proto různými výrobci celosvětově opakované, jen některé typy kinematických řetězců. To samozřejmě platilo pro určitou etapu vývoje. S novými technickými možnostmi ve vývoji prvků, technologií a agregátů i rozvojem řízení, sensoriky, umělé inteligence, aj., je nutné vždy ověřovat zda neexistují možnosti využití jiných koncepcí s novými benefity pro praxi.

Kinematické řetězce se označují také podle toho v jakém prostoru se pohybují koncové body horního ramene (vyznačené kroužkem). V obr. Obr. 1.2.2. – 2 jsou polohy bodu dány kartézskými souřadnicemi, podobně jako u obr. Obr. 1.2.2. – 7, zatímco typ robotu s prvním kinematickým řetězcem se označuje stojanový, kartézský, druhý se označuje jako Gantry (portálový). Na obr. Obr. 1.2.2. – 3 je řetězec robotu stojanového, polohující v cylindrickém souřadném systému. Roboty na obr. Obr. 1.2.2. – 4 a obr. 1.2.2. – 6, polohují ve sférickém souřadném systému. Rozdíl mezi nimi je pouze v posledním členu z hlediska jeho pohybu. První vykonává posuvný pohyb, kdežto druhý rotační pohyb. Největší počet robotů v současnosti pracuje právě pouze s rotačními členy a označují se jako angulární (úhlové). Poslední kinematický řetězec na obr. Obr. 1.2.2. – 5 je použit u robotů, které se označují podle názvu prvního robotu tohoto typu SCARA (zkonstruován v Japonsku). Všechny pohyby se vykonávají okolo vertikálních os, což umožňuje velké rychlosti pohybu a rovněž vyšší přesnost než u předešlých konstrukcí. Tato vlastnost je potřebná zejména při montážích.

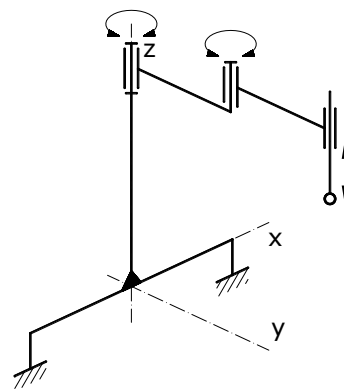


Obr. 1.2.1. – 2 Kinematická struktura  $T_x, T_z, T_y$     Obr. 1.2.1. – 3 Kinematická struktura  $R_z, T_z, T_y$

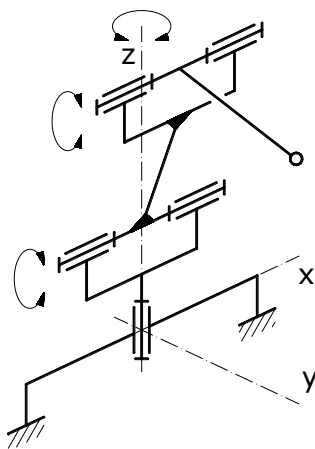




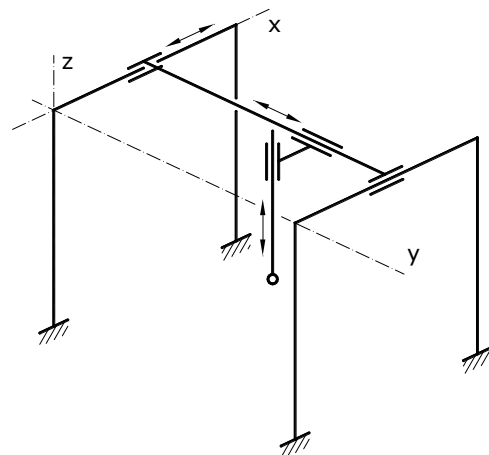
Obr. 1.2.1. – 4 Kinematická struktura  $R_z, R_x, T_y$



Obr. 1.2.1. – 5 Kinematická struktura  $R_z, R_z, T_z$



Obr. 1.2.1. – 6 Kinematická struktura  
 $R_z, R_x, R_x$



Obr. 1.2.1. – 7 Kinematická struktura  
 $T_x, T_y, T_z$

Dále byly studovány principy řešení polohovacích jednotek (stupňů volnosti), které uplatníme při dosazování za členy kinematického řetězce. Obojí (kinematické řetězce i principy polohovacích jednotek) poskytuje velké možnosti pro variabilitu navrhovaného robotu.

Z hlediska rozvíjení poznatků v předmětu Roboty a manipulátory je dále důležité zopakování témat:

- Mechanika nosného subsystému robotů
- Mechanika výkonného subsystému robotů
- Pohony robotů – motory a převody
- Efektory robotů
- Orientační ústrojí – principy a konstrukce
- Polohovací ústrojí – zásady a postup konstruování jednotlivých ramen v různých koncepcích robotů

V kapitole Pohony robotů zdůrazníme poznání vlastností jednotlivých druhů motorů používaných v robotech a jejich spolupráci s poháněnou částí robotu (ramena). Následují otázky správné volby motorů. Důležitá je tvorba modelu pohonu, založená na redukci parametrů ramene na hřídel motoru. V souvislosti s požadavky na parametry motorů a

převodů je nezbytné uvědomit si potřebu neobvykle velkých převodových poměrů a z toho vyplývajících druhů převodů a jejich konstrukcí.

Převody a jejich prvky i jejich navrhování bylo probráno v Částech a mechanismech strojů, což je nezbytné zopakovat. V předmětu PraM byly pak probrány převody, které mají zvlášť velký význam pro konstrukci robotů – valivé šrouby, planetové převody, harmonické převody a cyklopřevody.

V rámci navazujícího výkladu tohoto předmětu bude doplněna problematika čtyřkloubového mechanismu – paralelogramu a pantografu, které jsou u robotů často používány. Z mechanických ústrojí zbývá doplnit výklad o subsystému vyvažování ramen robotů.

## 1.2.2. Metodika konstruování v oboru – obecný model postupu

Chceme-li se zabývat konkrétními postupy a okolnostmi návrhů nových typů, jejich principů a koncepcí, či jejich výraznými inovacemi je nezbytné připomenout si jaké k tomu existují prostředky a technologie a z nich si pro vlastní aplikaci je potřeba umět vybrat nejvhodnější.

Jde o znalosti z předmětu stejného názvu. Zde jen připomeneme ty, které doporučíme pro první aplikace při konkrétních návrzích robotů, v rámci cvičení z předmětu a při zpracování projektů v jiných předmětech a nakonec při zpracování diplomové práce.

Popíšme výchozí situaci v procesu hledání nového řešení nebo inovace stávajícího produktu. Tu lze dokumentovat grafickým vyjádřením průběhu tvorby v jednotlivých fázích technického života produktu – technického systému.

Základní inženýrskou činností – jejím smyslem a cílem, je vytváření technických systémů, které jsou společensky potřebné, efektivní, kvalitní, bezpečné, aj. S technickým systémem souvisí další, odvozené inženýrské činnosti, proto je nutné technický systém a jeho vlastnosti blíže analyzovat.

Technický systém (TS) systém se může nacházet v různých etapách svého technického života:

- Přípravná etapa – začíná vznikem myšlenky (nápadu), námětu, na vytvoření technického systému k určitému účelu a končí rozhodnutím o organizované přípravě jeho realizace.
- Návrhová etapa – námět je rozpracován pro realizaci a posouzení i garanci vlastností.
- Realizační etapa – výroba a montáž technického systému.
- Provozní etapa – TS plní užité funkce, pro které byl určen a jsou získávány poznatky pro jeho další zlepšování.
- Likvidační (recyklační) etapa – po ukončení provozní etapy je TS recyklován, ohleduplně k životnímu prostředí a využit jako zdroj surovin pro další užití.

Návrhová a realizační etapa se kryjí s technickými činnostmi – jde o tvůrčí činnosti v pravém smyslu slova – při vzniku nového TS.

Technický život TS lze členit ještě jiným způsobem:

- Život abstraktní – označovaný jako předvýrobní etapa (přípravná a návrhová etapa), kdy TS existuje pouze jako soustava postupně se rozšiřujících informací.

- Život výrobní – totožný s realizační etapou.
- Život konkrétní – TS reálně existuje (etapa realizační a provozní).

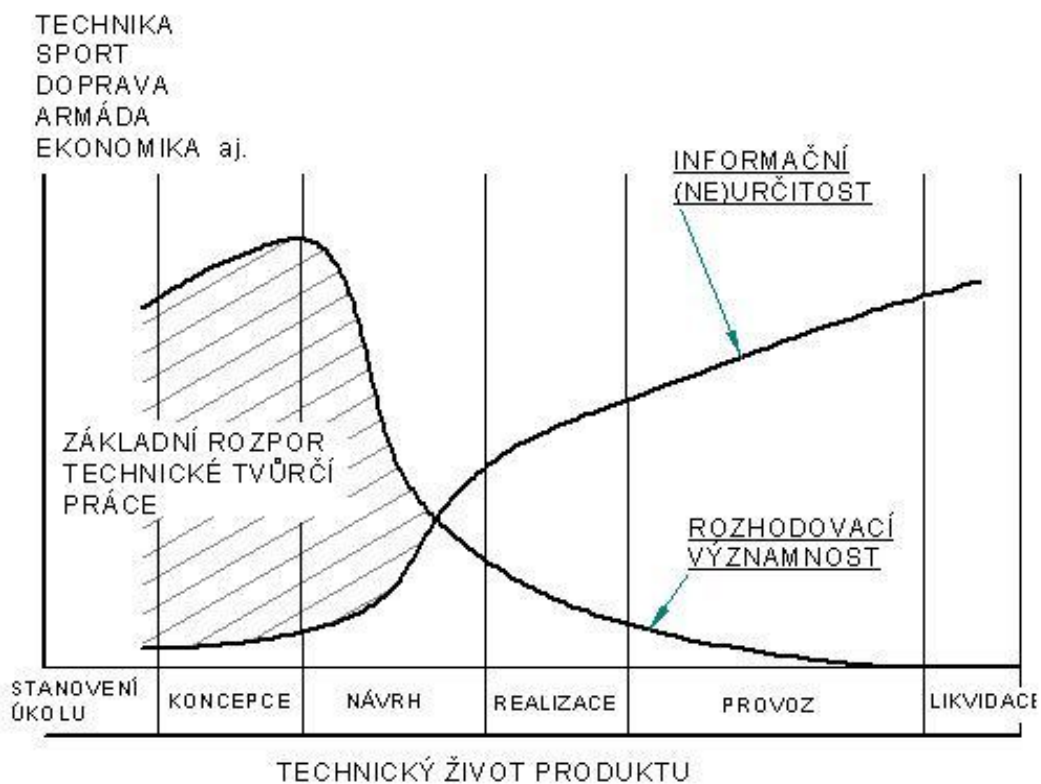
Pro technického tvůrčího pracovníka je důležitá zejména návrhová etapa, protože o kvalitě TS se rozhoduje až z 90% právě zde. Právě zde je nutné překonat základní rozpor technické tvůrčí práce – rozpor mezi informační určitostí a rozhodovací významností – významností pro dosažený výsledek – správně navržený TS (obr. 1.2.2. – 1).

Informační určitostí rozumíme množství informací o TS v určitém časovém intervalu. Rozhodovací významností rozumíme význam rozhodnutí v daném čase pro kvalitu a efektivnost realizovaného objektu v budoucnu ( v provozní etapě). O základní koncepci TS se rozhoduje na konci přípravné a na začátku návrhové etapy.

Technické činnosti, související s návrhem nového TS lze členit na:

- Tvůrčí – jimiž vzniká nova kvalita v porovnání se současným stavem.
- Výkonné – nutné pro realizaci výsledků tvůrčí činnosti.
- Organizační – vytvářející podmínky pro tvůrčí práci technického tvůrčího pracovníka.
- Informační – získávání, třídění, zpracování a využívání informací.

Zatímco o užité hodnotě rozhodují až z 90% činnosti tvůrčí a zčásti informační, ostatní činnosti jsou rovněž nezbytné, ale užitnou hodnotu ovlivňují pouze z 10% a většinou jsou algoritmizovatelné, tzn., že je znám postup jejich provádění, či řešení.



Obr. 1.2.2. – 1 Základní rozpor technické tvůrčí práce a etapy technického života

Technická tvůrčí činnost je posloupností řešení problémových situací, spojených s vytvářením návrhu a prognózou budoucích vlastností TS. Pod problémovou situací rozumíme činnost, která vyžaduje rozhodnutí o dalším postupu, vynucené buď nedostatečným rozvojem vědy, nebo je znám větší počet řešení a postupů, ale s určitými nedostatky z hlediska přijatých kritérií a a použijí se optimalizační postupy. Právě úspěšnost a rychlost řešení problémových situací je meritem věci, při posuzování vhodnosti návrhových metod a prostředků, pro technickou tvůrčí práci.

Pro etapu vypracování prvních představ o zcela novém řešení technického systému (v principu, struktuře, nebo v koncepci) je stále nejvhodnější, a to zejména pro začínající tvůrčí pracovníky, **“Obecný model postupu tvorby technického systému”**.

Při vytváření technického systému se vyskytují činnosti, které jsou plně algoritmizovatelné, ale i činnosti jejichž výsledek do značné míry závisí na intuici. I když existuje řada metod podporujících intuitivní procesy jde přece jen o slabší stránku této disciplíny. Skutečností zůstává, že vysoce kreativní činnosti, vyžadující invenci, schopnosti intuice, se vyskytují ve zvlášť vysokém rozsahu v prvních etapách technického života produktu – při vzniku první myšlenky, stanovení a rozpracování úkolu a hledání nových koncepcí.

Rychlost inovací výrobků jak již bylo ukázáno, se neustále zvyšuje a rychle narůstá také podíl nových technických systémů – nových principiálně nebo koncepčně. Mezi takové technické systémy patří průmyslové roboty a počet nových řešení bude i v dlouhodobé perspektivě vysoký, zvláště u servisních a personálních robotů. Z toho důvodu je třeba specifikovat metody a prostředky pro uvedené etapy vývoje produktu, zdokonalovat je a ověřovat jako komplexní linku k podpoře vývoje i k ověřování výsledků návrhu.

Název etapy	Základní kroky	Komentář
Stanovení úkolu	Upřesnění typu úkolu (požadovaných účinků)	Inovační – dílčí, komplexní Nová koncepce Nový princip
	Stanovení cílů Stanovení požadavků	K žádaným účinkům Požadavkový list
Tvorba koncepcí	Upřesnění technického procesu (technologický princip a postup)	Podle typu úkolu stanovení a optimalizace analýza a optimalizace Varianty technického procesu – principů nebo sekvencí
	Stanovení funkční struktury Stanovení orgánové struktury	Variety a optimalizace FS Aplikace morfologické matice Varianty a optimalizace OS
Navrhování	Vypracování hrubé stavební struktury	Variety a optimalizace SS Předběžné výpočty
	Vypracování úplné stavební struktury	Určení technických vlastností Kontrolní výpočty
Detailování úplné stavební struktury	Vypracování dílenských výkresů	Kontrolní výpočty

Tab. 1.2.2. – 1 Základní etapy a kroky konstrukčního procesu

Transformace počátečních informací do komplexní a vyčerpávající informace o nově navrženém produktu (jeho úplná stavební struktura), ať již zachycená ve výkresové dokumentaci nebo v počítačovém modelu, je obecně činností s vysokým podílem rizika. Složitost vztahů mezi požadovanými vlastnostmi technického systému (požadavky) a hledanými konstrukčními vlastnostmi, vyžaduje většinou vícenásobné opakování iteračního cyklu, na základě postupné konkretizace, přičemž se postupuje od neúplných údajů k úplným a od předběžných hodnot a odhadů ke konečným.

V nové situaci (konkurence, globalizace, rychlost inovací, progrese prvků TS, mechatronický přístup aj.) je nezbytné změnit metody a prostředky, pro návrh nového technického systému. Při vědomí omezeného času, který je k dispozici pro vstup nového technického systému na trh, třeba hledat postupy návrhu, které vyhovují následujícím kritériím:

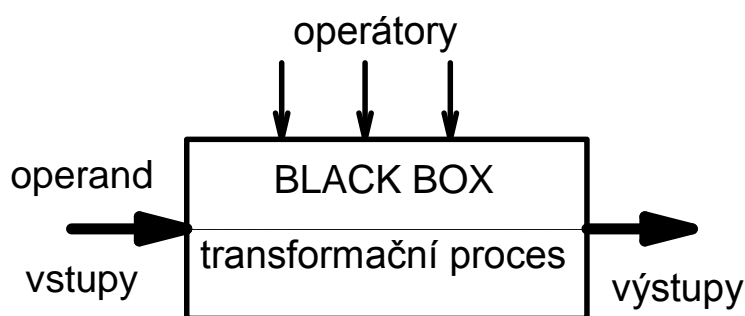
- pravděpodobnost dosažení správné funkce (funkcí) po uvedení technického systému (TS) do provozu,
- pravděpodobnost progresivnosti TS, v době uvedení do provozu,
- pravděpodobnost technické a ekonomické realizovatelnosti v etapě realizace.

Výsledkem technické tvůrčí práce je uspokojení určitého požadavku společnosti konkrétním účinkem, který je zpravidla spojen s výrobkem. Proces, který může vést k vytvoření takového výrobku označujeme jako konstrukční.

Cílem konstrukčního procesu je návrh optimálního výrobku, v daných podmínkách, v co nejkratším čase a s minimálními náklady. Zde se střetávají dva pojmy, které jsou ústřední pro další uvažování. Výrobek, který nadále budeme označovat obecněji jako **technický systém (TS) a konstrukční proces** – jako sled kroků a použitých metod, které vedou k výše uvedenému výsledku. Má-li být technický tvůrčí pracovník – v našem případě konstruktér - úspěšný při návrhu nového nebo inovovaného TS musí mít relevantní poznatky o obou pojmech. Přitom nejobtížnějším krokem v tomto postupu je překonání základního rozporu mezi rozhodovací významností a informační (ne)určitostí, zejména v prvních etapách návrhu TS.

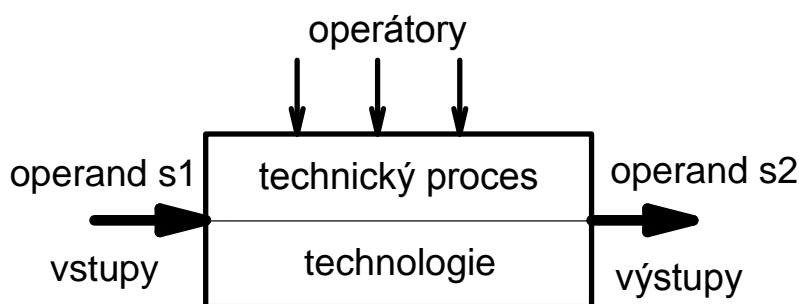
Obecný model postupu tvorby technického systému, který budeme uplatňovat při návrhu zcela nového produktu vychází z níže uvedených okolností.

K tomu, abychom mohli vytvořit nový objekt – výrobek – technický systém, který bude uspokojovat naše potřeby, musíme nějakým způsobem transformovat vlastnosti látek z přírodního stavu do stavu, který požadujeme k dosažení určitého účinku. Situaci lze znázornit pomocí ustálené terminologie. BB – černá skříňka představuje konkrétní, nám zatím



Tab. 1.2.2. – 2 Černá skříňka představující konkrétní, ale zatím neznámý transformační proces

operátorů, které svými účinky působí na operand. Změna se odehrává v okolním prostředí – místě a čase. Transformační procesy mohou být různého druhu – např. chemické, biologické, aj. Pro technické procesy, které nás zajímají, lze využít schéma podle tab. 1.2.2.-3.



Tab. 1.2.2. – 3 Transformační proces realizovaný jako technický proces

jako technologie. V rámci konkrétní použité technologie jsou potřebné zpravidla i další – vedlejší vstupy (operandy), jako jsou zdroje energie, informace, pomocné materiály (maziva, chladiva, aj.). To platí i pro výstupy.

Transformační procesy realizujeme technickými systémy konkrétního druhu, avšak zcela obecně můžeme uvést souhrn vlastností, které technické systémy musí mít, aby vyhověly konkrétnímu uživateli. Technické systémy dodávají, spolu s člověkem, účinky, které provádí transformaci. Transformační účinky – hlavní účinky jsou doplněny účinky pomocnými, pohonnými, regulačními, spojovacími a nosnými. Soustava účinků (označovaných také jako funkce) vytváří tzv. funkční strukturu TS. Každá funkce (účinek) může být zpravidla fyzicky realizována určitým seskupením jednoduchých stavebních prvků – orgánem (ložisko, spojka). TS pak má i svoji orgánovou strukturu a stavební strukturu. Každý TS je nositelem různých vlastností, klasifikovaných do tříd, s jejich různými stavy a technickými parametry. Přehled vlastností je v obr. 1.2.2. –2.

Je očividné, že z první představy o účelu výrobku (účelové funkci) nelze přímo dojít k představě o konečném produktu, který má doloženu technickou dokumentaci v potřebné podrobnosti, odpovídající zmíněné tabulce.

K účelu (účelové funkce), pro který bude výrobek určen a uveden na trh, lze dojít přes dílčí funkce sestavené do struktury s možnými variantami. K dílčím funkcím hledáme možné varianty fyzické realizace, označované jako orgány. Protože i orgány lze variabilně strukturovat nabízí se výběr možných realizací, podléhajících výše zmíněným kritériím v procesu hledání optimálního výsledku.

neznámý transformační proces (změna stavu), o jehož nalezení usilujeme. V rámci tohoto procesu budeme zpracovávat materiál (označovanou jako operand) na vstupu ve stavu 1 do žádaného stavu 2 na výstupu z BB (tab. 1.2.2.-2). Proces proběhne pomocí určitých prostředků –

Technický proces je umělou transformací, za užití technických prostředků a účasti člověka, vědeckých poznatků a řízení (operátorů). Konkrétní způsob jak se transformace při technickém procesu provádí je označován

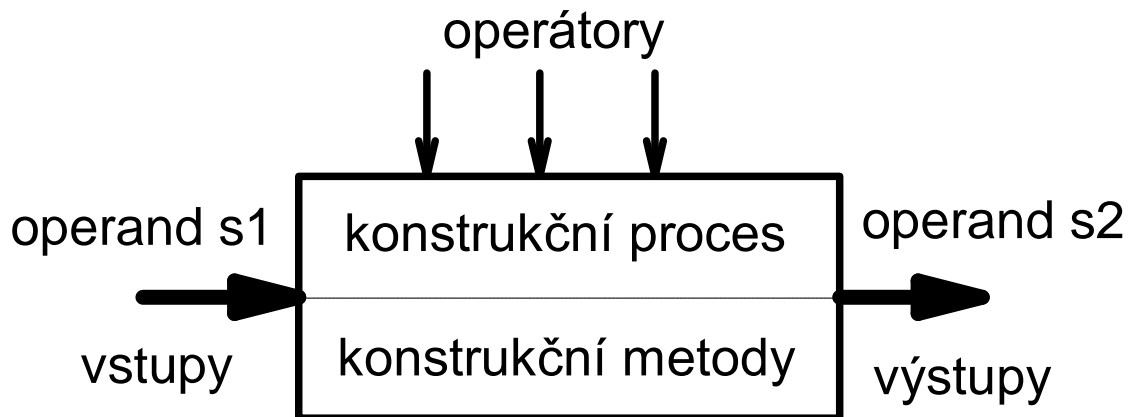
VNEJŠÍ VLASTNOSTI TS			
<p><b>VZTAH K ČLOVĚKU</b></p> <p>ergonomie bezpečnost obsluhy vzhled design, barevnost aj.</p>	<p><b>FUNKCE</b></p> <p>splnění funkcí, účinků funkční parametry výkon, rychlost, zrychlení, síla do volené zátěže do volené deformace do volené nepřesnosti funkční rozměry aj.</p>	<p><b>PROVOZ</b></p> <p>ovladatelnost spolehlivost bezpečnost životnost vhodnost pro údržbu nároky na energii nároky na servis vedlejší výstupy aj.</p>	<p><b>REALIZOVATELNOST VHODNOST PRO (DFX)</b></p> <p>výrobu montáž užití nakupovaných komponent skladování dopravu testování měření aj.</p>
<b>VNITŘNÍ VLASTNOSTI TS</b>			
Elementární konstrukční vlastnosti			
Konstrukční znaky			
<p><b>VZTAH K OKOLÍ</b></p> <p>ekologická hlediska vyzařování hluku výfukování emisí aj.</p>	<p><b>Obecné konstrukční vlastnosti</b></p> <p>pevnost tuhost tvdost odolnost proti opotřebení odolnost proti korozi odolnost proti žaru aj.</p>	<p><b>Elementární konstrukční vlastnosti</b></p> <p>struktura prvky uspořádání tvar rozměry tolerance materiál druh výroby stav povrchu aj.</p>	<p><b>EKONOMIKA</b></p> <p>výrobní a montážní náklady provozní náklady celkové náklady produktivita návrhová investice efektivnost cena náklady na dopravu náklady na skladování aj.</p>
<p><b>ZÁKONY A PŘEDPISY</b></p> <p>zákony normy kodexy patenty licence aj.</p>	<p><b>DISTRIBUCE</b></p> <p>vhodnost pro balení transport skladování ustavování aj.</p>	<p><b>LIKVIDACE</b></p> <p>vhodnost pro recyklaci demontáž separaci zničení spálení prodej aj.</p>	<p><b>KVALITA</b></p> <p>jako st konstrukce jako st výroby jako st servisu ISO 9000 certifikáty aj.</p>
<p><b>SPECIFIČNOST</b></p> <p>vyhovění specifickým požadavkům jina funkce na okolí aj.</p>			

2.

Obr. 1.2.2. – 2 Přehled vlastností TS

Při vzniku nového nebo inovovaného produktu musíme vzít v úvahu nejen obtížnost řešení základního technického rozporu, ale i složitost výsledného produktu (obr. 1.2.2 - 2). Nelze proto z tohoto důvodu jít přímou cestou od vzniku nápadu ke konečné podobě produktu, nebo jen za cenu mnoha chyb, nákladů a ztrát času, případně s využitím nepřijatelného kopírování cizích řešení, patentů či vynálezů.

Konstrukční proces je nezbytné posuzovat jako jiné procesy a proto lze použít výše uvedené terminologie pro jeho analýzu (obr. 1.2.2. - 3).



Obr. 1.2.2 - 3 Konstrukční proces jako transformace

Výstupem konstrukčního procesu je optimálně navržený výrobek, zatímco za vstup považujeme zadání – soupis požadavků (požadavkový list). Úkolem konstrukčního procesu je pak transformace požadavků zadání na popis technického systému prostřednictvím relevantní technické dokumentace.

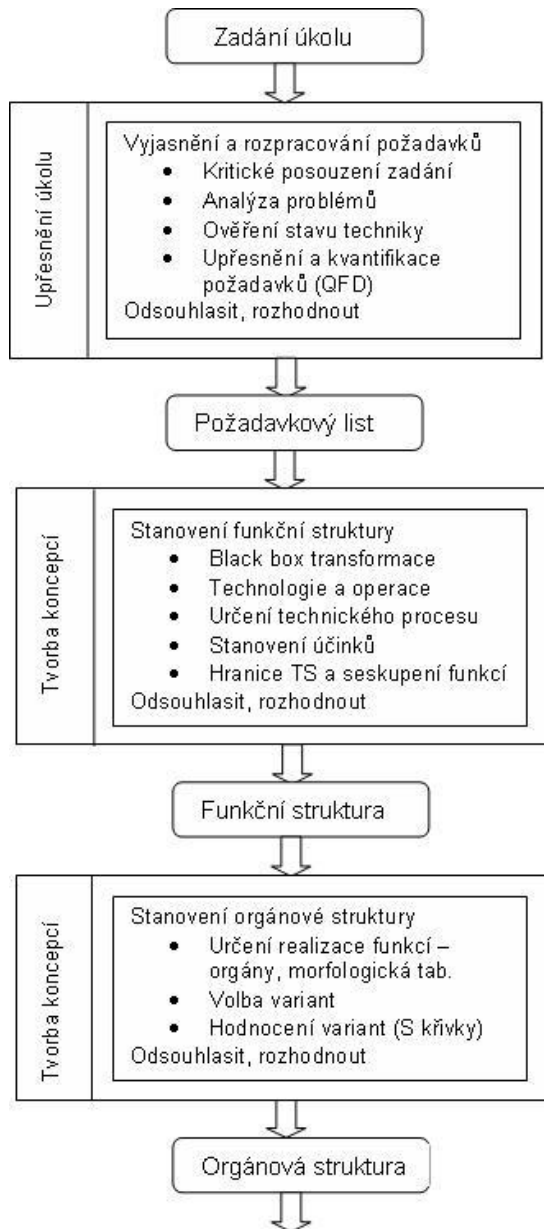
Operandem konstrukčního procesu je informace, kterou měníme v jeho průběhu v uvedeném rozsahu. Operátory konstrukčního procesu jsou: konstruktéři, technické prostředky pro konstruování, informace pro konstruování, řízení konstruování.

V rámci konstrukčního procesu lze identifikovat jako nejfrekventovanější činnosti – stanovení úkolu, hledání řešení, hodnocení řešení a rozhodnutí o dalším postupu. Žádná z těchto činností není jednoduchá avšak jednoznačně nejobtížnější a na druhé straně rozhodující z hlediska úspěšného výsledku návrhu je hledání řešení. Existuje mnoho modelů od mnoha autorů, které byly a mohou být úspěšně používány v praxi. Podle obtížnosti tvůrčí úlohy se mohou osvědčit i zcela triviální postupy na jedné straně a jsou úlohy, na které žádná z metodik neuspěje. Neúspěch je jednoznačně spojen s etapou hledání řešení. Modely postupu při konstruování jsou založeny především na principu rozdělení složitého úkolu (návrhu TS) na řadu úkolů jednodušších.

Historicky nejčastěji užívaným postupem je postup iterační, kdy se vychází z předběžně předpokládaných určitých znaků (účinků) a několika důležitých vlastností hledá se přibližné řešení, které se v dalších krocích zpřesňuje. Nevýhodou je časová náročnost a nejistota docílení úspěšného výsledku.

Pokusy o propracování a zobecnění postupu při konstruování vedly k návrhu tzv. obecného modelu tohoto postupu, jehož struktura se objevuje u více autorů (obr. 1.2.2. – 4,5).





Obr. 1.2.2. - 4 Postup konstrukčního procesu v části tvorby koncepce



Obr. 1.2.2. - 5 Postup konstrukčního procesu v části navrhování TS

Naznačený postup umožňuje rozčlenit žádaný účinek TS (hlavní funkci) na funkce dílčí a tím i zjednodušit problémy při jejich realizaci konkrétními orgány. Variability můžeme docílit na různých úrovních konstrukčního procesu, především však v rámci návrhu funkční struktury, s využitím morfologické matice (obr. 1.2.2. – 6).

Dílčí funkce	Fyzikální realizace dílčích funkcí = orgány jako nositelé funkcí					Počet prvků
	1	2	3	4	n	
A	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> ...	A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>n</sub>	n
B	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>		4
C	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>			3
D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	5
E	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>		4
Varianty orgánových struktur	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	
Hodnocení technickými kritérii					Technicky nadějná řešení	
Hodnocení ekonomickými kritérii					Ekonomicky nadějná řešení	
Komplexní posouzení	Cílové řešení					

Obr. 1.2.2. – 6 Morfologická matice s výběrem a hodnocením variant orgánové struktury

### 1.2.3. Metody CAI - TRIZ

TRIZ - tvorba a řešení inovačních zadání je metodikou technické tvůrčí práce, která vznikala před 60 lety, na základě důkladného studia více než 1,5 mil. patentů a vynálezů. Autorem a vedoucím kolektivu byl G. S. Altšuller. Získané závěry pro tvůrčí technickou práci mohly být účinně využity až ve spojení s výpočetní technikou tak, aby mohla být okamžitě k dispozici, na základě vhodných pravidel a mocné databáze. Laboratoř v Minsku zpracovala základy expertního systému počítačové podpory Invention Machine nad částmi TRIZ. Mimořádná expanze TRIZ a expertního systému do velkých světových firem, škol a institucí začala po roce 1996, kdy byla práva na tento programový produkt převedena do USA.

Tvůrčí technická činnost se zabývá řešením úloh s neznámým postupem řešení. Dlouholeté pokusy o nalezení logického postupu, který by vedl spolehlivě k vyřešení takových úloh nevedly k úspěchu, byť literatura k tomuto problému je mimořádně bohatá. Vznik velkých vynálezů přinášejících významný prospěch lidstvu i životopisy jejich autorů vedly k opakovanému popisu situací, před a po vzniku nápadu na řešení. Nicméně identifikace rozhodujícího okamžiku vzniku tohoto nápadu zůstává zahalena tajemstvím a je otázkou zda může být smysluplně (tj. využitelně) vůbec někdy odhalena.

Metodika konstruování jako věda, která bez jakýchkoliv pochyb významně pomohla a pomáhá tvorbě nových technických systémů, se vztahuje především na algoritmizovatelné postupy z oblasti technické tvůrčí práce. Mezi ty ovšem nepatří právě proces zrodu nových myšlenek vedoucích k zásadním inovacím. Samozřejmě generace konstruktérů a vědců,

působících v této oblasti našly způsoby jak podpořit vznik nových nápadů, čehož svědkem je i intenzivní vývoj v technice posledních několika desetiletí.

TRIZ, jako metodika práce právě pro tuto oblast, přinesla něco řádově nového, pro podněcování invence a probouzení intuice člověka, což potvrzují informace o výsledcích její aplikace, ve světově významných výzkumných a vývojových centrech. Jen množství informací a publikací, uvedených na internetu za posledních několik let, zaznamenalo nebývalý nárůst.

Altšuller usiloval o získání silného řešení bez opakování velkých počtů neúspěšných řešení metodou pokus - omyl a protože jeho zkoumání patentů vlastně sledovalo cestu mnoha výzkumníků, kteří, na rozdíl od jiných, uspěli, mohl učinit závěry o způsobech které vedou k úspěchu při hledání nových myšlenek.

TRIZ je postaven na:

- zákonitosti objektivně existujících tendencí rozvoje technických systémů
- principech překonávání technických rozporů.

TRIZ obsahuje dvě základní součásti:

- FNA - funkčně nákladovou analýzu (kap. 3.4.2.), kterou chápeme jako strategii řešení, která hledá odpověď na otázky co a proč má být v technickém systému zdokonaleno a
- ARIZ - algoritmus řešení invenčních zadání, který je taktickým postupem, podporujícím hledání řešení zadání získaných v rámci FNA, odpovídá tedy na otázku jak hledat řešení.

Možnosti TRIZ byly umocněny aplikací algoritmů na výpočetní techniku a vytvoření expertního systému - počítačové podpory CAI (invence, myšlení), v současné podobě označované jako TechOptimizer .

Při práci s tímto systémem je řešitel expertním systémem veden k podrobnému rozboru technického problému (FNA), aby byla nalezena inovační úloha. K ní pak získává řešitel řadu relevantních doporučení a informací (ARIZ), které podněcují jeho myšlení k syntéze problému. V žádném případě tedy systém nevyřeší problém sám (k velkému zklamání uživatelů začátečníků), ale nabízí tvrdou práci, většinou již v těžišti problému, vyžadující mimořádnou koncentraci myšlení (což uživatel, který přistupuje k řešení zodpovědně, pozná psychickou únavou po 2 - 3 hodinách takové činnosti).

Přece jen existuje i možnost, že řešení je nalezeno přímo v rámci ARIZ. Je to v případě použití Internetového asistenta a dohledání řešení v databázi patentů USA, EU nebo Japonska a zahájení řízení o získání možnosti licenčního využití patentu pro vlastní TS.

Výsledkem funkčně-nákladové analýzy jsou správně formulovaná inovační zadání odvozená z analýzy prvků, vazeb, funkcí a nákladů na jejich realizaci. To je mimořádně důležitý výsledek, protože pochopitelně nesprávná formulace zadání znamená zbytečně vynaloženou intelektuální činnost, nákladové a časové ztráty.

Výsledkem FNA je přehled zadání na:

- likvidaci škodlivých funkcí, příp. důsledků působení škodlivých funkcí,
- posílení funkcí s nedostatečným stupněm plnění funkcí,
- oslabení funkcí s nadbytečným stupněm plnění funkcí
- automatické udržování souladu skutečného stupně plnění funkce s potřebným stupněm jejího plnění
- soulad hodnoty parametru s několika rozpornými požadavky.

Ideálnost TS je hodnocena na základě poměrné efektivní hodnoty vysvětlené v principech hodnotové analýzy. O jejíž zvýšení se snažíme různými postupy, či jejich kombinací. V etapě ukončené FNA je nejefektivnějším způsobem zvyšování ideálnosti TS odstraňování (funkce) těch prvků systému, které způsobují nežádoucí efekty, jsou málo funkčně významné a přitom je možné jejich užitečné funkce předat jiným, v TS již existujícím prvkům. Je zde třeba podotknout, že jde o možnost, nikoliv jistotu, že takovou operaci bude možno provést. V každém případě úprava struktury objektu trimováním vede ke zjednodušení systému, snížení nákladů na výrobu, ale i ke zvýšení jeho spolehlivosti.

Dalším postupem ke zvyšování ideálnosti je zvyšování počtu užitečných funkcí a stupně jejich plnění. Je nutné brát v úvahu i možné varianty, např. zvyšování funkčnosti, při zvyšování nákladů, kdy F roste rychleji (výrobek na trhu bude s další funkcí pro uživatele tak zajímavý, že je ochoten více zaplatit).

Je možné rovněž použít přenosu charakteristik konkurenčních TS, které se na základě analýzy těchto TS jeví jako výhodné-

V etapě syntézy TS je k dispozici řada zadání inovačních úloh, na základě analýzy problémových situací a po vyřešení některých z nich trimováním nebo zvýšením funkčnosti. Následuje aplikace proces jejich řešení podle druhé části metodiky TRIZ, podle algoritmu řešení inovačních zadání ARIZ.

Formulace inovačních úloh vede k odhalení technického, případně fyzikálního rozporu, k vytvoření modelu problému nebo k potřebě změny některé technické funkce. Odhalené technické rozpory lze překonávat doporučenými heuristickými postupy, fyzikální rozpory lze řešit doporučenými kombinacemi standardních postupů s přírodními jevy a efekty a potřebné funkce v TS lze porovnat s možnostmi poskytovanými jevy a efekty přírodních zákonitostí.

**Technické rozpory** - za odhalení technického rozporu považujeme tak formulované zadání inovační úlohy, že víme co změnit i jak to změnit, ale jen za cenu, že se nějaká vlastnost nebo parametr nepřípustně zhorší. Jestliže najdeme takové protikladné tendence v úloze, nabízí nám ARIZ pro jejich překonání 39 heuristických postupů, které v databázi poskytují asi 1250 typických způsobů překonání technických rozporů.

Př.: Chceme zvětšit tuhost ramene pohybové jednotky robotu, což je možné úpravou průřezu ramene, ale zhorší - zvětší - se jeho hmotnost. V tomto případě je zlepšováním parametrem tuhost a zhoršujícím se hmotnost, hledáme vhodné parametry, které jsou v databázi k dispozici. Hmotnost najdeme ve vyjádření "hmotnost pohyblivého objektu", zatímco tuhost v databázi nenajdeme, ale zástupným parametrem může být napětí. Pak jsou nám doporučeny k překonání rozporu principy:

- 10 - princip předběžného vykonání
- 36 - princip využití přechodů mezi fázemi
- 37 - princip využití tepelné roztažnosti
- 40 - princip použití kompozitních materiálů

Bez další podrobnější analýzy a vysvětlení všech těchto možností (samozřejmě nemusí být schůdná žádná, jde jen o možnost, která se již v praxi, podchycené v patentech, vyskytla a pomohla překonat srovnatelný technický problém), je jistě vhodný princip využití kompozitních materiálů, kterým se aktuálně výzkum také zabývá.

**Fyzikální rozpory** - hlubší analýzou technického rozporu (nenajdeme-li vhodný heuristický princip k jeho překonání) lze nalézt jeho podstatu, fyzikální rozpor. Jde o situaci, kdy víme co dělat a jak toho docílit, ale neznáme způsob dosažení tohoto cíle. Rozporný požadavek je kladen na stav hmoty jedné části nebo jednoho prvku systému. Fyzikální rozpory jsou řešitelné rozložením rozporných požadavků v čase nebo v prostoru nebo změnou struktury systému. ARIZ nabízí k řešení standardní postupy, které se osvědčily v modelově stejné

situaci ačkoliv mohlo jít o zcela jinou oblast techniky. Uplatňují se zde standardy např. typu - modifikace látek nebo polí, náhrada látek, segmentace prostoru aj., ve kterých se současně prosazují obecné trendy vývoje technických systémů

**Efekty** - řešení technického problému lze nalézt v některých případech také porovnáním požadované funkce s databází fyzikálních, chemických a geometrických jevů a efektů. Potřebné funkce přitom většinou identifikujeme na základě zjištěných fyzikálních rozporů. Každý efekt je v databázi výstižně popsán, včetně případů aplikací v technice a vazbami na databázi patentů. Je nezbytné posoudit jsou-li k dispozici potřebné zdroje látek a polí.

#### 1.2.4. Funkčně nákladová analýza

Tvorba a řešení inovačních zadání (TRIZ) je soubor metod podporujících hledání řešení technických problémů. Na tomto místě se zmíníme o Funkčně - nákladové analýze (FNA), která pomáhá konstruktérovi co a proč má být v technickém systému zdokonaleno. Ta vychází z principů hodnotové analýzy. Její postupy jsou realizovány prostředkem počítačové podpory TechOptimizer, jeho analytickými moduly (analýza produktu, analýza procesu).

FNA má poskytnout správné zadání pro inovaci výrobku nebo technologického procesu, na základě analýzy funkcí a nákladů na jejich realizaci. Nesprávně formulované zadání může být natolik zavádějící, že pokud vůbec je technický problém nakonec vyřešen, je to za cenu značných časových a finančních ztrát a především ztráty pozice na trhu.

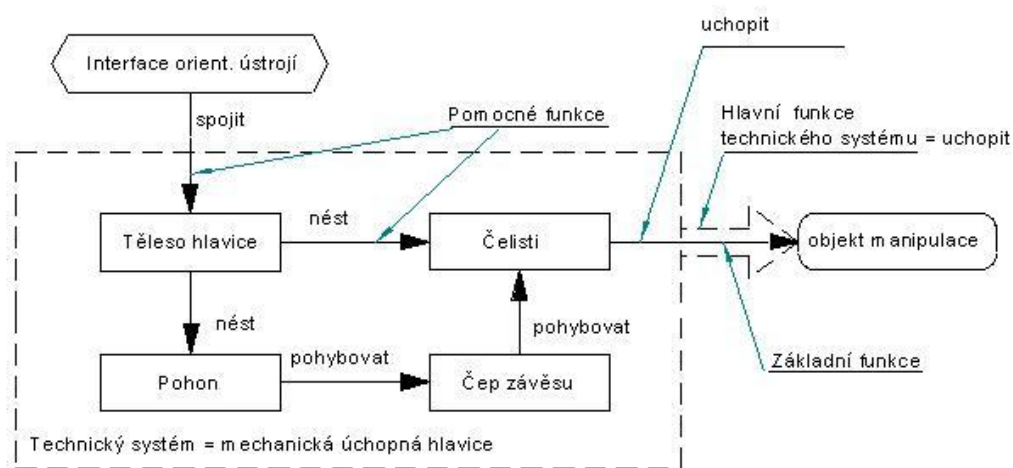
**Analýza komponent a struktury objektu** - objekt jako systém má svou hierarchickou strukturu – sestává ze subsystémů až několika úrovních a jejich prvků. Lze tedy vždy vytvořit hierarchický strom odpovídající zkoumanému objektu. Pro potřeby analýzy vytváříme komponentní model, který z celého objektu zahrnuje prvky (komponenty) jen jedné úrovně a případně prvky nejbližší nižší úrovně. Jinak se model stává nepřehledným. Do komponentního modelu zařazujeme také prvky nadsystému – do systému nepatří, ale s jeho prvky vcházejí nějakým způsobem do interakce. Analýza se přitom provádí vždy pro konkrétní podmínky – čas a místo, případně pro konkrétní etapu života objektu. Při vyjasňování komponentního modelu současně již vytváříme seznam nežádoucích efektů objektu. Následně vyšetřujeme vazby mezi prvky objektu (i nadsystémy), a to i s ohledem na časový faktor a zaznamenáváme do grafu. Při velkém počtu prvků je výhodné vypracovat matici vazeb mezi prvky. Vazba (působení) může mít mnoho forem – fyzická, tepelná, magnetická, elektrická, chemická, informační, aj. Posledním prvkem grafu je „výrobek“ vyšetřovaného komponentního modelu – čímž rozumíme prvek, který je nositelem účelu, účelové (příp. hlavní) funkce daného objektu, nebo jeho vyšetřované části. (Např. „výrobek“ mechanické úchopné hlavice jsou čelisti, pohonu – výstupní hřídel převodovky, ap.). Vyšetřování vazeb odhaluje užitečná i nežádoucí (škodlivá) působení mezi prvky. Odhalená nežádoucí působení již mohou být podněty pro jejich odstranění (a tím zlepšení objektu). Ne všechna působení mohou být hned odhalena a lze je kdykoliv doplnit.

**Analýza funkcí** - Vyšetřené vazby mezi prvky navzájem (a „výrobek“ i nadsystémy) jsou realizovány konkrétním působením mezi nimi. Konkrétní prvek je tedy nositelem funkce – jako projevu vlastností materiálního objektu, který vede ke změně nebo zachování parametrů (důkaz o existenci funkce) jiného prvku. Funkce znamená působení prvku na objekt za určitých okolností (podmínek, parametrů). Nutno zdůraznit, že pro jednotnost, stručnost a jasnost vyjádření se působení vyjadřuje buď slovesem v infinitivu nebo ve 3. osobě singuláru. Např. funkce – páka stlačovat (nebo stlačuje) pružinu. Po identifikaci funkcí vytvoříme model funkcí (graficky).

Stručné (jednoslovné) a výstižné vyjádření působení je zpočátku dosti obtížné. Avšak jádro příslušné slovní zásoby není příliš rozsáhlé, takže se doporučuje vytvořit si a doplňovat seznam vhodných sloves a postupně je upřesňovat. Ve srovnání s hodnotovou analýzou i metodikou konstruování se používá poněkud jiné klasifikace funkcí:

- hlavní funkce objektu – vystihuje jeho hlavní účel (ale zkoumaným objektem může být jak systém, tak i podsystem, součást, nebo i konstrukční prvek součásti (např. břit nože),
- základní funkce – zajišťující realizaci hlavní funkce,
- pomocná funkce – zajišťující realizaci základní funkce.

Z obr. 1.2.4. - 1 je zřejmé, jak je objekt členěn na prvky a jak se k nim váží jednotlivé funkce. Mimo hlavní funkce celého TS, jsou zde i hlavní funkce jednotlivých prvků - např. působení 3 je HF prvku 2. Působení 1 prvku 3 je základní funkcí (ZF), protože bezprostředně působí na výrobek a zajišťuje plnění HF TS. Prvky 2 a 4 realizují působení 3 a 2 na prvek 3 (čímž mu umožňují plnit ZF) a označují se v tomto smyslu jako pomocné funkce 1. řádu - A1. Prvek 2 tedy plní pomocnou funkci 1. řádu. Prvek 1 pak na prvek 2 musí realizovat pomocnou funkci 2. řádu pro základní funkci.



Obr. 1.2.4. – 1 Struktura prvků a funkcí objektu

Z uvedeného je zřejmé jak se určuje řád funkce; na němž závisí významnost jednotlivých prvků pro TS a závěry o potřebných změnách TS. Čím dále je prvek od výrobku, tím je jeho význam pro TS menší, protože méně ovlivňuje (podporuje) prvek se základní funkcí.

Funkční schéma může být někdy, pro velký počet prvků a vazeb, nepřehledné. Pak pracujeme pouze s prvky a vazbami, které pokládáme za nejdůležitější. Z analýzy funkcí lze přímo vypracovat soupis zadání na – likvidaci škodlivých funkcí, likvidaci důsledků působení škodlivých funkcí, na posílení funkcí s nedostatečným stupněm plnění funkcí, na oslabení funkcí s nadbytečným stupněm plnění a soupis návrhů na jejich řešení.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste si připomenuli dříve studované základní poznatky nezbytné pro pochopení nové látky. Týká se to především pojmů:

- Kinematické struktury PR, jejich ústrojí a prvky
- Obecný model postupu konstruování robotických systémů v posloupnosti – black box, technická transformace, technologie, dílčí funkce, orgány, morfologická matice, orgánová struktura a hodnotící metody
- Metody řešení technických rozporů a hledání inovací – TRIZ
- Funkční a nákladová analýza – její smysl a užití

Doporučuji projít záznam přednášek z předmětů prerekvizit



## Kontrolní otázky

- 1) Které jsou základní (nejvíce frekventované) kinematické struktury PR?
- 2) Jaká jsou kritéria pro volbu kinematické struktury?
- 3) Co je obecný model postupu konstruování a v čem je jeho význam?
- 4) Na čem je založena funkční a nákladová analýza?
- 5) Kdy je výhodné užít metodiku TRIZ?



## Úkol k řešení

Naskicujte základní struktury PR ve zvoleném souřadném systému, včetně odpovídajících pracovních prostorů!

## 1.3. SOUČASNÉ ROBOTICKÉ SYSTÉMY

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY budete umět:

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Popsat základní sortiment konstrukcí robotických systémů, které se dnes v praxi vyskytují</li> <li>▪ Definovat významné problémy a rozpory, s nimiž se konstruktér při návrhu robotických systémů setkává</li> <li>▪ Diskutovat překrytí problematiky robotických systémů a jiných mechatronických systémů, jejichž postupy návrhování a potřebné poznatky jsou shodné s robotickými</li> </ul>	Cíle kapitoly
--	---------------

<i>Roboty – koncepce sériové a paralelní, k-klouby, problémy, navrhování, mechatronické systémy.</i>	Klíčová slova
--	---------------



**Čas ke studiu:** 3 hodiny



### VÝKLAD

Vzhledem k tomu, že vývoj konstrukcí robotů pokračuje stále velkou rychlostí a navíc jsou rodiny robotů světových výrobců běžně dostupné na internetových stránkách, budou v této kapitole uvedeny jen vybrané typy robotů, představující to podstatné ze stávající produkce v určitém srovnání, na jehož základě se lze v dalších kapitolách odvolávat při volbě postupů pro konstrukční řešení. Zmíněny budou také typy robotů které nebyly předmětem výuky v předmětu Průmyslové roboty a manipulátory (které se zabývaly jen základními poznatky z konstrukce robotů).

### 1.3.1. Průmyslové roboty

V této kategorii si prioritu zachovává (co do rozsahu světové výroby) koncepce angulárních robotů i když s mnoha novinkami užitých prvků agregátů i subsystémů. Mimo tradičně největší rozšíření sériových koncepcí průmyslových robotů zaznamenáváme výrazné zvýšení počtu konstrukcí u paralelních typů robotů.

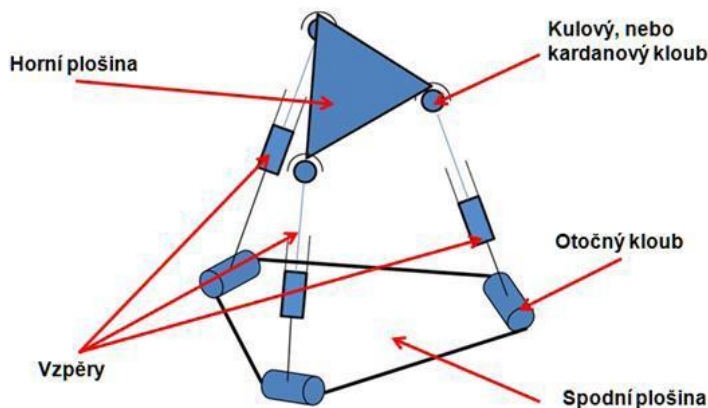
#### Paralelní koncepce robotů

První konstrukční řešení stroje s paralelní kinematickou strukturou se objevilo před více než padesáti lety. Základem pro tyto stroje je Stewartova plošina publikovaná v roce 1965 D. Stewartem. Jde o upořádání šesti délkově proměnných tyčí spojujících nepohyblivý rám stroje pomocí kardanových nebo kulových kloubů s pohyblivou plošinou. Snaha o snížení pohyblivých hmot a nasazení vysoce dynamických pohonů se stala cílem u nových strojů s paralelní kinematikou (PKM - Parallel Kinematic Machines). V letech 1970 - 1989



bylo neúspěšně vyrobeno několik modelů s touto strukturou, které narážely na technické obtíže. Tyto kinematické struktury se začaly poprvé používat u strojů obráběcích laserovým paprskem. Pro konstrukční řešení takových strojů však musela být vyvinuta také řada nových konstrukčních prvků.

U prvních konstrukcí strojů s paralelní kinematikou (obr. 1.3.1.-1) se objevily určité problémy konstrukční a to zejména z nedostatku komponent, které by umožňovaly realizovat požadavky kladené na tyto struktury. Až vývoj nových vhodných komponent umožnil prudký rozvoj těchto robotů a jejich realizaci, v nejrůznějších variantách a pro celou řadu aplikací.



Obr. 1.3.1. – 1 Časté řešení kinematického řetězce paralelního robotu

Podstatnými prvky pro úspěšnou konstrukci paralelních robotů jsou klouby a tyče, které ovlivňují zásadně přesnost robotu. Klouby nejsou zcela novou záležitostí, byly již běžně používány také v automobilovém a zemědělském průmyslu, avšak požadavky kladené na jejich použití při stavbě těchto strojů jsou dosti odlišné od již používaných aplikací. Jsou to především vysoká tuhost, vysoká statická únosnost, nízká hmotnost,

vysoká přesnost, malé opotřebením, dlouhá životnost a v neposlední řadě již zmiňované dostatečně velké úhlové rozsahy.

Pro konstrukci paralelních kinematických struktur je zapotřebí kloubů se dvěma i třemi stupni volnosti. Specifické požadavky na různé aplikace hexapodů vedly k vývoji různých typů. U aplikací pro obráběcí stroje je nutné dosáhnout maximální tuhosti a přesnosti kloubů, u manipulačních zařízení je zase třeba velkých úhlových rozsahů, k získání velkého pracovního prostoru a důležitá je i nízká hmotnost kloubů kvůli požadované velké rychlosti polohování. Tyto základní požadavky vedly k vývoji tří druhů kloubů.

### Kulové klouby (3 stupně volnosti)

Kontakt kuliček v kulovém kloubu představuje v podstatě valivé vedení na kulové ploše. Velký počet malých kuliček, které jsou použity jako valivá tělíska, způsobuje nízké hodnoty Hertzova tlaku mezi vnějším pouzdrem kloubu a kuličkami a také mezi kuličkami a spodní kulovou plochou. Avšak tyto příznivé podmínky mohou být dosaženy jen při velmi vysoké geometrické přesnosti kontaktních kulových ploch. Vysoká únosnost a tuhost těchto kloubů umožňuje jejich využití především u obráběcích strojů. I přes pouze bodový kontakt je dosahována vysoká tuhost nižším předpětím díky příznivému rozložení zatížení. Tyto klouby nabízejí nejvyšší hodnoty tuhosti a únosnosti. Dokonalé těsnění kloubu je nezbytné k jeho dlouhodobé činnosti.

### Univerzální klouby (2-3 stupně volnosti)

Univerzální kloub je vhodný pro aplikace u manipulačních zařízení. Jeho nízká hmotnost a velké geometrické rozsahy umožňují konstruovat struktury vystavené vysokým zrychlením a rychlostem ve velkých pracovních prostorech. K udržení tuhosti v příslušném

úhlovém rozsahu kloubu je limitována koncová poloha kloubu v druhé ose otáčení. Malá opěrná plocha valivých tělísek a použití jehlových ložisek způsobují značné snížení tuhosti v porovnání s kulovými klouby.

### Univerzální klouby

Kardanové klouby jsou obvykle používány k přenosu krouticích momentů a spojení hřídelí s osovou výchylkou. U paralelních struktur musí být tahové a tlakové síly zachycovány právě klouby, u nichž je třeba zajistit vysokou tuhost. Pro tento účel byl náboj kloubu optimalizován metodou konečných prvků pro tahové a tlakové zatížení. Použitá ložiska jsou typu radiálně-axiálních jehlových ložisek. Tato poskytují nejvyšší dosahované tuhosti, mají dokonalé těsnění a jsou dnes standardním prvkem na trhu s valivými ložisky. Kardanové klouby vyplňují mezeru mezi kulovými klouby na straně jedné a univerzálními klouby na druhé. Při vysoké tuhosti dovolují klouby velké úhlové rozsahy. Opět zde však platí diagram omezení úhlových rozsahů. Kardanové klouby jsou vhodné pro použití u velkých pracovních prostorů a při požadavcích vyšší tuhosti.

Uvedené klouby pracují v prostředí od  $-30$  do  $120$  °C a jsou mazány speciálními tuky, kterými jsou naplněny již od výrobce. Po přibližně dvou letech užívání je doporučeno opět klouby namazat.

### Tyče pro paralelní struktury

Princip tyče je podobný hydraulickému válci. Vnitřní tubus se posouvá ve vnějším pomocí předepnutého valivého uložení. V závislosti na požadované tuhosti je pohon tubusu řešen kuličkovým nebo planetovým šroubem. Šroub je jednostranně uložen v ložisku. Namáhání plošiny je přenášeno na tahové a tlakové zatížení kloubů. Příčná síla ve valivém vedení se objevuje jen při zrychlování teleskopu. Rozhodujícím faktorem tuhosti tyče je její zdvih.

### Druhy paralelních koncepcí (kinematických struktur)

Základní rozdělení paralelních kinematických struktur je dle počtu stupňů volnosti a to na:

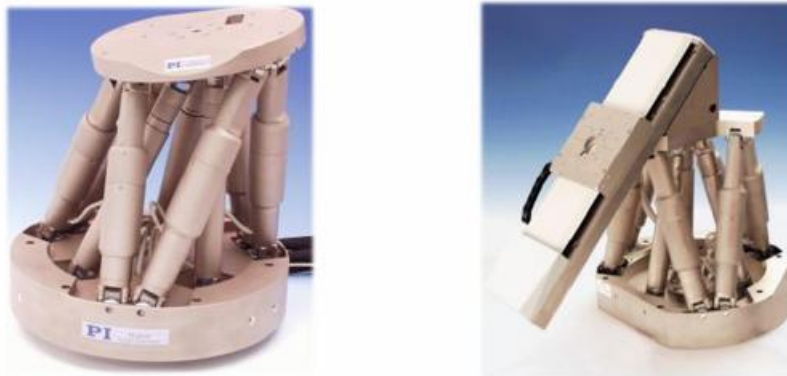
- 3 stupně volnosti - TRIPOD (obr. 1.3.1.-2)
- 6 stupňů volnosti – HEXAPOD (obr. 1.3.1.-3)
- více než 6 stupňů volnosti – NANOPOD (obr. 1.3.1.-4)



Obr. 1.3.1.-2 TRIPODY



Obr. 1.3.1.-3 HEXAPODY



Obr. 1.3.1.-3 NANOPODY

### 1.3.2. Servisní roboty

Servisní roboty zaznamenaly v posledních letech velmi rychlý rozvoj ve všech svých subsystémech i prvcích, přičemž mnohé přebírají z vývoje průmyslových robotů, což dává nové možnosti i výrobcům PR. Oblasti nasazení servisních robotů se stále, s jejich rostoucí technickou úrovní, rozšiřují. Složitost prostředí a proměnlivost pracovní scény i nároky servisních činností, které mají vykonávat, vedou k odpovídající velké složitosti konstrukcí robotů a jejich subsystémů i formulaci nových úkolů, které před tvůrčími pracovníky při jejich návrhu stojí.

V této kapitole nejde o vyčerpávající přehled existujících konstrukcí, ale o představení variability servisních robotů z hlediska cílů i problémů, které musí konstruktér řešit. Z toho pak vyplývají požadavky na nástroje a prostředky pro jejich tvorbu. Náročnost je tím větší, že u mechatronických systémů, kterými roboty jsou v bezpochyby nejkomplexnějším pojetí tohoto pojmu, že složitost mechanické konstrukce samotné musí respektovat požadavky a limity dalších subsystémů – řídicích, sensorických, navigačních, aj.

Mechanický systém SR zahrnuje přitom subsystémy, které staví před konstruktéra velmi náročné úlohy, Pro pohyb servisních robotů slouží mobilní subsystémy, u nichž jsou variabilita a úlohy k řešení odvozeny od složitosti a druhu terénů, po kterých se má pohybovat. Rovněž možnosti pohybů adekvátní terénu jsou realizovatelné značně odlišnými postupy, kterých je dnes rozvinuto velmi mnoho. Přitom nejde jen o schopnost pohybu v terénu, ale také o dobrou manévrovatelnost a možnosti řízení pohybu (mechanika řízení).

Další složité problémy vznikají v oblasti manipulačního subsystému, ať již manipuluje čímkoliv – efektory, nástroji, přístroji, agregáty, lidmi, aj. Mnohé lze převzít z manipulačních subsystémů průmyslových robotů, ale vznikají zde i nové požadavky a nová omezení.

Specifické problémy vznikají při realizaci servisních činností, jejichž spektrum je i do budoucna prakticky neomezené a případ od případu s velkým spektrem požadavků i limitů. Servisní činnosti jsou realizovány technologickými subsystémy, které nemohou být jednoduše převzaty z dosud známých strojů pro konkrétní druhy servisních činností.

Další technické problémy vznikají z potřeby zajistit pohyb elektropohony bez vnějšího přívodu energie a tedy s dostatečnou kapacitou baterií. Podstatnou otázkou je také zajištění bezpečnosti provozu vzhledem k lidem i zařízením.

Následující příklady mají poukázat na technické problémy se kterými se konstruktéři při návrhu servisních robotů musí vyrovnávat.

### **Mobilní subsystémy – příklady problémů při návrhu**

#### ***Pásový podvozek - požadavky***

Při návrhu pásového podvozku je třeba brát v úvahu různé konstrukční požadavky, které se mohou lišit dle účelu, pro který je podvozek navrhován. Některé možné požadavky kladené na konstrukci jsou:

- minimalizace hlučnosti pásového podvozku
- minimalizace hmotnosti pásového podvozku
- délka podvozku a délka kontaktu pásu s terénem
- minimalizovat šířku pásového podvozku z hlediska průjezdnosti dveřmi
- s ohledem na konkrétní aplikaci zvolit vhodný typ pásů
- zajistit stálou napnutost pásu
- odolnost pásového podvozku proti chemickým či bojovým prostředkům
- odolnost pásového podvozku proti radiaci
- odolnost pásového podvozku proti vyšším teplotám (např. nad 100°C)
- zvýšit nosnost pásového podvozku s ohledem na aplikaci
- odpružení kol pásového podvozku
- velikost překážek a terénních nerovností, které může pásový podvozek překonávat
- možná změna kinematiky pásů
- stabilita pásového podvozku či objektu manipulace při jízdě a v klidovém stavu
- maximalizovat délku provozu pásového podvozku na jedno nabití baterií
- další možné požadavky (výbušné prostředí, kontaminované prostředí, písečné prostředí...)

Každý z uvedených požadavků se dále rozpadá na další okruh subproblémů, které se ovšem mohou ukázat jako ještě obtížnější k řešení než výše uvedené.

#### ***Překonávání překážek (obr. 1.3.2. – 1,2):***

Indoor – schody, prahy, dveře, okna, výlohy, mříže, nábytek, omezené prostory, kanálové vpustě, zhroucené části budov, aj.

Outdoor – dřeviny, močály, písečné duny, sprašový terén, obrubníky, zídky, ploty, koleje, uzamčené nebo havarované automobily, tramvaje a další dopravní prostředky, vodní nádrže, aj. Podvozek odpovídající různým překážkám lze vidět na obr. 1.3.2. – 3,4. Zatímco

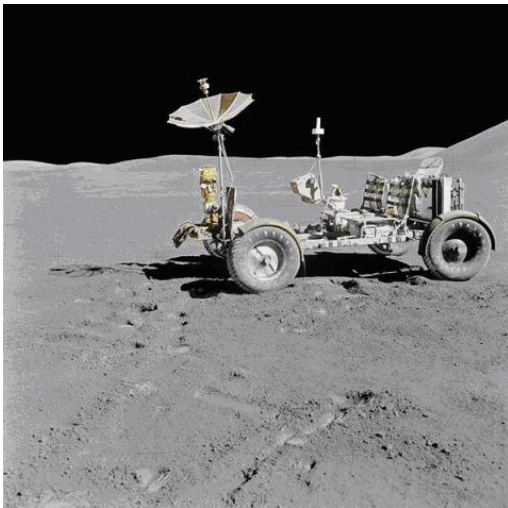
pro nasazení robotu Rover na měsíci bylo možné předpokládat pohyb po sypkém povrchu, v plánované oblasti nasazení rovinatém a tedy postačoval jednoduchý kolový podvozek, pro nasazení na Marsu už byla zřejmá potřeba překonávat terén s dosti velkými jednotlivými kameny, čemuž i odpovídal složitější kinematický řetězec kolového podvozku robotu Pathfinder.



Obr. 1.3.2. – 1 Překonávání dveří



Obr. 1.3.2. – 2 Překonávání schodu, valu



Obr. 1.3.2. – 3 Robot Rover



Obr. 1.3.2. – 4 Robot Pathfinder

***Manipulační subsystém (ve vztahu k mobilnímu subsystému):***

Kinematický řetězec zajišťující nosnost, rychlost, zrychlení, přesnost, dostupnost pracovního prostoru a orientaci k provedení požadované činnosti, nízká hmotnost a momenty setrvačnosti, kompaktnost, malé rozměry, skladnost v přepravní poloze, aj.

***Technologický subsystém (ve vztahu k mobilnímu subsystému):***

Servisní činnost podle druhu je zajišťována velkým spektrem naprosto odlišných technologických subsystémů, které opět kladou specifické požadavky na manipulační i mobilní subsystém.

Jako příklad poslouží robot pro překonávání překážek a odstraňování různých zábran, či záměrný odstřel pyrotechniky – robot destrukční (disrupter), obr. 1.2.3. -5,6.



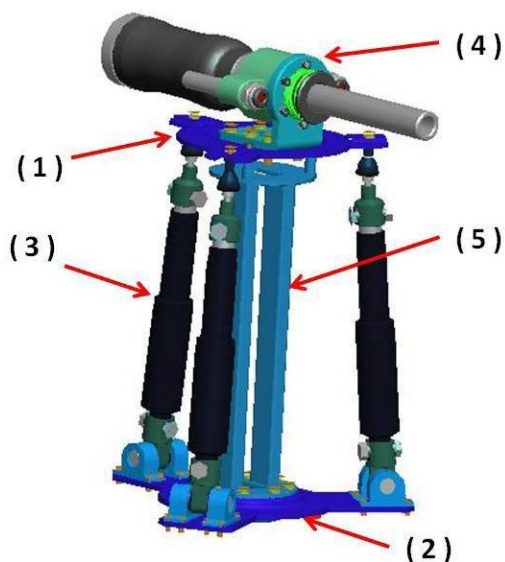
Obr. 1.3.2. – 5 Robot disrupter



Obr. 1.3.2. – 6 Robot s různými disruptery

Požadavky kladené na technologický subsystém – tuhost, zamíření, přesnost, zachycení rázových účinků, aj. se promítanou do požadavků na manipulační subsystém i mobilní subsystém.

V následujícím příkladu vedly požadavky aplikace (rozstřelu) k nové konstrukci technologického subsystému - disrupteru, která při zvoleném typu mobilního subsystému si vyžádala návrh nového manipulačního systému s paralelním kinematickým řetězcem (obr. 1.3.2. – 7)



Obr. 1.3.2. – 7 Paralelní manipulační systém s disrupterem

K usnadnění přepravy je třeba zajistit pojezd s určitými parametry, manévrování, překonávání překážek a často i polohování pacienta. Mezi realizované systémy tohoto typu patří řada lůžkových manipulátorů americké firmy Medical Positioning Inc.. Příkladem je lůžkový manipulátor EP HUT Table (obr. 1.3.2. – 8), který slouží pro invazivní elektrofyziologii a kromě nastavení výšky a naklápění umožňuje také translační pohyby lůžka v horizontální

### 1.3.3. Mechatronické systémy robotického typu

Technické systémy, které sice přesně neodpovídají definici robotu, ale mají mnoho společného s manipulátory a roboty a lze je tedy řešit podle zásad uvedených v tomto studijním materiálu, je mnoho. Některé z nich jsou postupně rekonstruovány tak, že je posléze pod pojem nebo manipulátor lze zařadit. Příklady uvedeme v této kapitole. Mohou být mimo jiné inspirací pro další rozvoj servisní robotiky.

#### Lůžkové manipulátory

Jde o lůžka pro transport pacientů, často v traumatizovaném stavu, která musí mít více funkcí – z hlediska přepravního i lékařského.

rovině. Pohony naklápění a zdvihu jsou elektrické. Tento lůžkový manipulátor umožňuje zvednutí lůžkové části do kolmé polohy pro pohodlné položení pacienta.



Obr. 1.3.2. – 8 Lůžkový manipulátor EP HUT Table



Obr. 1.3.2. – 9 S 4018 Mobile C-Arm Imaging Table



Obr. 1.3.2. – 10 Stryker, M-Series Stretcher



Obr. 1.3.2. – 11 Savion Industries, Medi-Cruiser MS777

Uvedené lůžkové manipulátory nejsou určeny pro delší transport pacientů – vazba na záchranné dopravní prostředky není, nemají vlastní pohon a mají příliš malá kola. Jejich cena odpovídá robotickým zařízením a pohybuje se podle typu od 20 tis. \$ do 50 tis. \$.

Dalším příkladem může být transportní lůžko S 4018 Mobile C-Arm Imaging Table americké firmy Gendron Inc. (obr. 1.3.2. – 9), které umožňuje motorové naklopení lůžka (hydraulické pohony) a nastavení výšky, cena tohoto zařízení je 11430 \$.

Motorizované lůžko pro převoz pacientů M-Series americké společnosti Stryker (obr. 1.3.2. – 10) je uzpůsobené pro rychle se měnící prostředí pohotovostních oddělení nemocnic. Lůžko je plně vybavené a přizpůsobitelné, jeho ergonomický design usnadňuje celkovou manipulaci, avšak poháněná kolečka nejsou vhodná do terénu.

Izraelská společnost Savion Industries (obr. 1.3.2. – 11) se výrobě vybavení pro lékařské zařízení věnuje již od 60. let 20. století a v současné době nabízí motorizované transportní lůžko Medi-Cruiser. Toto samohybné a všestranné lůžko usnadňuje převoz pacientů na různých typech povrchů a při různých sklonech terénu tak, aby usnadnilo práci nemocničního personálu. Základní model je koncipován pro přesun v lékařských zařízeních.

## Záchranářské transportní systémy

V České republice i v Evropské unii chybí v oblasti bezpečnostní a záchranářské techniky robotický víceúčelový lehký transportér navrhovaných parametrů, využitelný ve variantách s operativní změnou parametrů, jak pro záchranu osob i materiálních hodnot v krizových situacích, protiteroristických akcích, katastrofách a haváriích včetně tunelových staveb s kolejovou dopravou, tak i jako dálkově řízený účelový robotický transportér nebo transportér průzkumník.

Záchranářské a hasičské jednotky využívají běžné modely terénních vozidel (např. Land Rover u horské služby), čtyřkolek, sněžných roleb.

V současné době využívají hasičské sbory zásahovou čtyřkolku na známém terénním podvozku značky Polaris, typ Ranger 4x4, rakouského výrobce požární techniky Rosenbauer, (obr. 1.3.2. – 12) vybavenou podnikem Škoda Mladá Boleslav. Zásahová vozidla Polaris, a to jak 4x4, tak i 6x6 jsou ve službách mnoha hasičských sborů světa, zejména však v USA. Používají se při hašení lesních porostů, při zásazích ve stísněných prostorech, v horském terénu apod. Jejich určení je tedy poměrně různorodé - od vozidla prvního zásahu, po záchranářský speciál. Od toho se odvíjí i jejich vybava.



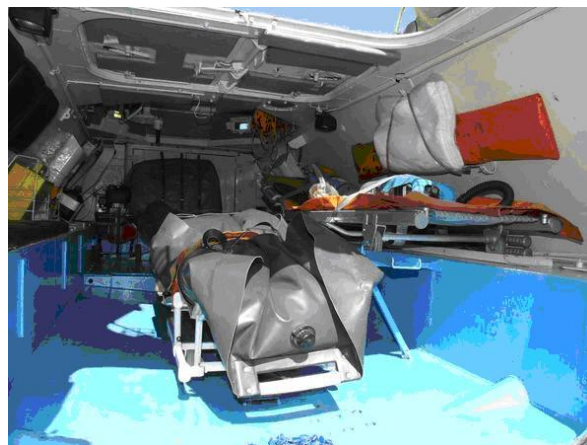
Obr. 1.3.2. – 12 Rosenbauer Polaris, typ Ranger 4x4

možné převážet 5 sedících nebo 2 pacienty ležící na nosítkách upevněných na speciální nosný rám. Na svou dobu se transportér vyznačoval velmi dobrou konstrukcí, bojovými a jízdními vlastnostmi, např. pohonem všech osmi kol, uzávěrkou diferenciálu předních a zadních náprav, dvěma



Obr. 1.3.2. – 13 OT-64 – ZDRAV

Českým počinem v oblasti vývoje užitkového terénního vozidla pro záchranářské účely byl obrněný kolový obojživelný transportér OT-64 SKOT (střední kolový obrněný transportér) T813 8x8, jehož prototyp byl zkonstruován v roce 1951 pro potřeby mechanizovaných, spojovacích a dalších speciálních jednotek. První zkušební série byla vyrobena v roce 1961. OT-64 – ZDRAV (obr. 1.3.2. – 13,14) bez výbroje byl používán jako sanitní verze. Sanitní provedení obrněného transportéru OT-64 mělo demontovanou věž a vnitřní vybavení pak bylo přizpůsobeno pro práci lékaře. Uvnitř bylo



Obr. 1.3.2. – 14 Úprava vnitřního prostoru



řiditelnými předními nápravami, centrálním huštěním pneumatik, planetovou převodovkou Praga Wilson a další. Pohon vozidla byl uskutečňován diesellovým, vzduchem chlazeným motorem Tatra, který zabezpečoval bezproblémovou jízdu v terénu i po komunikacích. Na komunikaci bylo vozidlo schopno dosáhnout rychlosti kolem 100 km/h.

Vozidla nejsou schopna zvládnout transport a zásahy v těžkých terénech, jejich parametry neumožňují využívat potřebné technologie a zásahovou výbavu v krizových situacích, nespojují výhody robotického systému se systémem ovládaným člověkem, nebo jsou příliš robustní bez pokročilých technologií, které odpovídají současným výsledkům výzkumu a vývoje v oblasti záchranné a záchranářské techniky a technologií

Švédská firma BAE Systems Hägglunds (obr. 1.3.2. – 15) vyrábí terénní vozidlo podobné sněžné rolbě. Tato pásová vozidla jsou využívána u hasičských sborů, záchranných služeb a armád. Hägglund terénní vozidlo (ATV) se skládá ze dvou pásových vozů (s laminátovou, zesílenou karosérií) spojených kloubem. Vozidlo pracuje ve sněhu a v horských oblastech. Jeho operační rámec zahrnuje pátrací a záchranné akce, omezeně i práci s nebezpečnými materiály a protipožární využití. Vozidlo je schopno provozu v extrémních podmínkách. Přední část vozidla byla navržena tak, aby mohla nést protipožární vybavení, včetně dvou sad dýchacích přístrojů a náhradního válce.



Obr. 1.3.2. – 15 Hägglunds terénní vozidlo

Systém s jeho typem konstrukce není schopen zvládnout těžký terén se zvláště obtížnou dostupností a neposkytuje možnost víceúčelovosti a operativní změny parametrů

– například využití v tunelových stavbách – neposkytuje výhody robotického systému a dálkového ovládání.

Firma Land Tamer, USA (obr. 1.3.2. – 16, 17) vyrábí pro účely pátracích, záchranných, či hasičských akcí dálkově řízená terénní vozidla usnadňující přístup

k obětem nehod a úrazů.



Obr. 1.3.2. – 16 Vozidlo Land Tamer

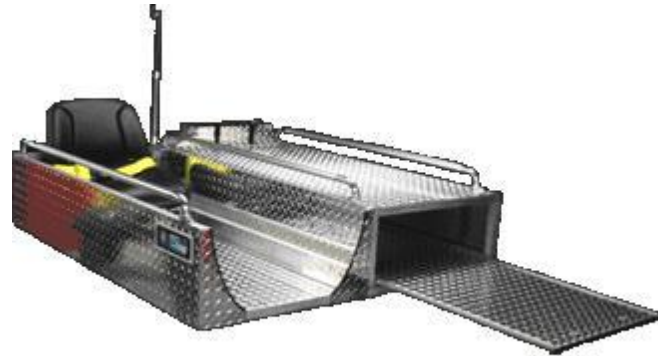


Obr. 1.3.2. – 17 Prostor pro zachráněné

Ve Spojených státech vyrábí firma Kimtech, Vermont, výsuvné jednotky pro užitková terénní vozidla (obr. 1.3.2. – 18, 19). Tyto jednotky umožňují přítomnost záchranáře i s vybavením v těžko dostupném terénu a asistenci zdravotníka vedle pacienta, při převozu na užitkovém vozidle, nebo z těžko dostupných míst. Univerzální uplatnění těchto jednotek je umožněno jejich celkovým designem, který vyhovuje prakticky všem užitkovým terénním vozidlům.



Obr. 1.3.2. – 18 Kimtech



Obr. 1.3.2. – 19 Jednotka pro raněné

MEDLITE™ Transport (MTS-09) je navržen pro přepravu jednoho pacienta, jednoho záchranářského pracovníka a rozmanitého záchranářského vybavení. Nosítka se lehce nasadí na přepravní jednotku, pomocí uchycovacích popruhů, které jsou součástí jednotky. Sedadlo pro doprovod pacienta s bezpečnostním pásem s úchytkami na kolečkách po celé délce jednotky může být uzamčeno ve třech různých polohách v délce kolejnic (pro jakoukoli naléhavou situaci). Jednotka má úschovný prostor o objemu cca 25 m<sup>3</sup> umístěný pod prostorem pro pacienta (pro uložení záchranářských brašen, pomocná materiál nebo kyslík). Jednotka má také zasouvací tyč. Vyrábí se i rozšířená verze MEDLITE™ Transport Deluxe (MTD-09), která má navíc výsuvnou desku skladovacího prostoru, držák na zdravotnické lahve a kolejničky pro sedadlo třetí osoby.

Speciální výsuvná jednotka pro užitková vozidla neumožňuje vazbu na modul mobility s parametry navrhovaného víceúčelového transportéru, neobsahuje možnost instalace komplexní sady resuscitačních prvků.

Z hodnocení nedostatků vyplývá jaký prostor zbývá pro zlepšování konstrukcí a zejména pro využití konstrukčních principů robotických systémů.

### 1.3.4. Mechanické subsystémy, agregáty a prvky robotů

Řešení rotačních jednotek je zpravidla z konstrukčního i technologického hlediska výhodnější oproti lineárním avšak technologie výroby si našla nové výrobní postupy a nové druhy strojů čímž již mnohá omezení odpadla. Jednak jde o případ jak obecně v konstrukci strojů, tak i v konstrukcích robotů převládající (viz kinematické koncepce robotů), jednak výroba rotačních ploch je technologicky jednodušší. Rovněž skutečnost, že v naprosté převaze jsou dnes u robotů aplikovány rotační klouby. Všechny podstatné mechanické prvky i agregáty a subsystémy byly probrány v PRaM a jsou uvedeny v příslušném studijním materiálu.



## Shrnutí kapitoly

V rámci kapitoly jsme blíže popsali principy řešení PR paralelních koncepcí a jejich odlišnosti od koncepcí sériových. Dále jsme poukázali na rozvoj a potenciální možnosti servisních robotů, ale zejména na problémy, které se vyskytují při jejich navrhování.

Upozorňuji, že zde řešíme problémy při jejich návrhu! Vlastní konstrukce servisních robotů je náplní samostatného předmětu: Servisní roboty. Proto je opět nezbytné zopakovat si poznatky z tohoto předmětu!

Ukázali jsme dále na příkladech mechatronické systémy, které v mnohém připomínají servisní roboty a lze pro jejich návrh použít postupů v tomto předmětu studovaných.

Dále jsme doplnili poznatky o vývoji některých specifických prvků, agregátů a subsystémů robotů.



## Kontrolní otázky

- 1) Jaké jsou základní shody a odlišnosti mezi sériovými a paralelními koncepcemi průmyslových robotů?
- 2) Jaké jsou základní shody a odlišnosti mezi průmyslovými a servisními roboty?
- 3) Jaké rozpory a problémy se vyskytují při návrhu jednotlivých druhů robotů?
- 4) Jaké jsou rozdíly mezi roboty a jinými mechatronickými systémy?



## Úkol k řešení

Najděte na internetu výrobce servisních robotů k určitému účelu (např. pro čištění bazénů, sklizeň zeleniny, apod.). Srovnajte koncepce aspoň 3 vyráběných typů SR různých výrobců a porovnejte funkce, parametry, konstrukční shody a rozdíly i možné problémy při řešení!

Řiďte se příklady v textu kapitoly! Rovněž dohleďte na internetu mechanické prvky a agregáty vyráběné v současné době pro robototechniku.



## CD-ROM

K doplnění poznatků z této kapitoly si prohlédněte videa – soubory: Servisní roboty, Modulární průmyslové roboty a Efektory průmyslových a servisních robotů. Ve všech třech souborech jsou demonstrovány příklady moderních řešení a konstrukcí Servisních robotů, dále uplatnění modulů v konstrukcích průmyslových robotů, ale dnes již také u servisních robotů a také řešení efektorů, která se dnes vyznačují velmi sofistikovanými koncepcemi, přebírajícími řadu doplňkových funkcí původně svěřených vlastnímu manipulátoru robotu [PRaM Skařupa 2007].

## 2. MECHANICKÁ ÚSTROJÍ ROBOTŮ

### Po úspěšném a aktivním absolvování tohoto BLOKU

<p>Prostudováním druhého přednáškového bloku, členěného do dvou částí, se seznámíte:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ s druhy vyvažovacích systémů průmyslových robotů a jejich aplikacemi</li><li>▪ s dalšími převodovými mechanismy průmyslových robotů</li></ul>	<p>Cíle přednáškového bloku</p>
--	---------------------------------

<p><i>Vyvažovací ústrojí, rotační pohybové jednotky, lineární pohybové jednotky, kvalita vyvážení, paralelogramy, pantografy, návrh, pohony, silové poměry.</i></p>	<p>Klíčová slova</p>
---	----------------------



**Čas ke studiu:** 9 hodin

## 2.1. VYVAŽOVACÍ ÚSTROJÍ ROBOTŮ

### Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

<p>Budete umět vysvětlit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ principy vyvažování rotačních pohybových jednotek a interpretovat příslušné výpočtové kroky</li> <li>▪ principy vyvážení lineárních pohybových jednotek a rozhodnutí kdy je aplikovat</li> </ul> <p>dále diskutovat a interpretovat:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pojem kvality vyvážení a základní kroky odvození i závěry z nich vyplývající.</li> </ul>	Cíle kapitoly
<p><i>Vyvažovací ústrojí, rotační pohybové jednotky, lineární pohybové jednotky, kvalita vyvážení, pružinový systém, konstanta tuhosti pružiny, vyvažovací momenty, sférická struktura, angulární struktura, Archimedova spirála, absolutní vyvážení manipulátoru robotu, know how pro kvalitu vyvážení manipulátoru robotu, základní kroky analýzy pro kvalitu vyvážení.</i></p>	Klíčová slova



**Čas ke studiu:** 5 hodin

Vyvážení jednotlivých členů polohovacího ústrojí hraje velmi důležitou roli pro získání velmi dobrých parametrů a chování průmyslových robotů. Jde o otázku, která musí být řešena již při zvažování konstrukčního řešení vlastního ramena – rozložení hmot a polohy těžiště vůči ose rotace ramena. Vyvážením eliminujeme statické (gravitační) účinky na hmoty ramena, motor pro příslušný rotační pohyb pak může mít nižší výkon a menší rozměry a tím i hmotnost, což opět přispívá k lepší energetické bilanci. Dalším benefitem jsou lepší poměry pro řízení pohybu.

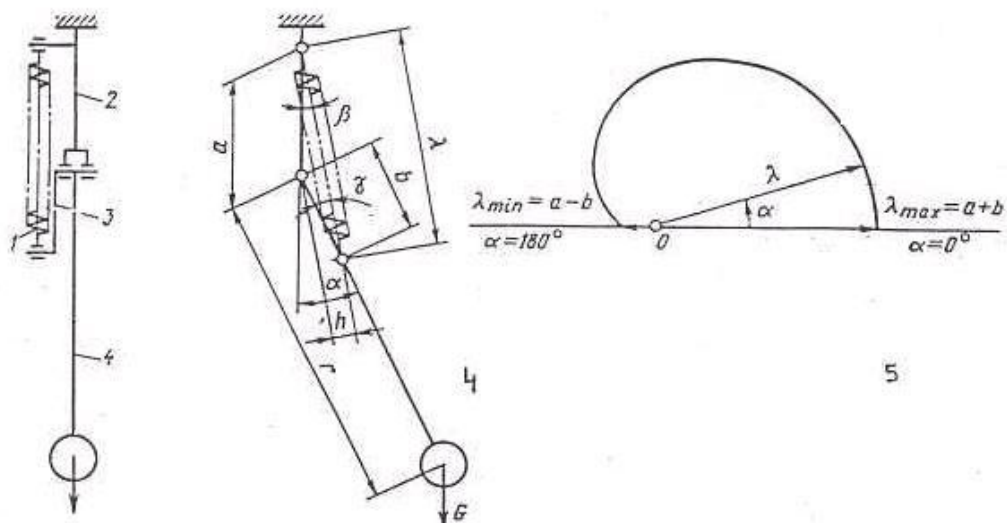


### VÝKLAD

#### 2.1.1. Vyvažování rotačních pohybových jednotek

Pro vyvážení těchto jednotek se osvědčil vyvažovací systém pružinový s harmonickou zatěžovací charakteristikou. Běžné je užití pružin konstantní tuhosti  $c$ . Tuto hodnotu zjišťujeme výpočtem. A k ní pak navrhuje vhodné rozměry pružiny. Vyvažovací systém

sestává z pružiny a vhodně zvoleného mechanismu, který dává harmonickou závislost vyvažovacího účinku. Nejčastěji se užívá klikového mechanismu, protože je konstrukčně jednoduchý a dává přesnou charakteristiku. Schéma pro pochopení funkce vyvažovacího systému a odvození potřebných vztahů je na obr. 2.1.1.-1.



Obr. 2.1.1.-1 Schéma k výpočtu poměrů při vyvážení

Pro výpočet uijeme hodnoty

- c konstanta tuhosti pružiny
- $\lambda$  deformace pružiny
- a, b kóty připojení pružiny
- $M_{vs}$  moment vyvažovací

Při rotaci ramena pohybové jednotky se zátěžný noment z gravitačního účinku stanoví:

$$M_{(G\alpha)} = M_{\max} \cdot \sin\alpha$$

Pro vyvážení platí:

$$M_G = M_{vs}$$

$$G \cdot r \cdot \sin\alpha = F \cdot h = F \cdot a \cdot \sin\beta$$

kde

$$F = \lambda \cdot c,$$

z geometrie (viz obr. 2.1.1.-1) vyvažovacího systému vyplývají vztahy

$$h = a \cdot \sin\beta = b \cdot \sin\gamma$$

$$\lambda = a \cdot \cos\beta + b \cdot \cos\gamma$$

$$\alpha = \gamma + \beta$$

po dosazení do  $F = \lambda \cdot c = (a \cdot \cos\beta + b \cdot \cos\gamma) \cdot c$

lze vyjádřit  $c$

$$c = \frac{F}{a \cdot \cos\beta + b \cdot \cos\gamma} = \frac{M_G \cdot \frac{\sin\alpha}{a \cdot \sin\beta}}{a \cdot \cos\beta + b \cdot \cos\gamma} = \frac{M_G \cdot \sin\alpha}{a \cdot \sin\beta (a \cdot \cos\beta + b \cdot \cos\gamma)}$$

$$c = M_G \cdot \frac{\sin(\gamma + \beta)}{a \cdot \sin\beta \cdot a \cdot \cos\gamma + a \cdot \sin\beta \cdot b \cdot \cos\gamma} = \frac{\sin(\gamma + \beta)}{a \cdot b \cdot \sin\gamma \cdot \cos\beta + a \cdot b \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma}$$

$$c = M_G \cdot \frac{\sin(\gamma + \beta)}{a \cdot b \cdot (\sin\gamma \cdot \cos\beta + \sin\beta \cdot \cos\gamma)}$$

kde  $\sin(\gamma + \beta) = (\sin\gamma \cdot \cos\beta + \sin\beta \cdot \cos\gamma)$

$$c = \frac{M_G}{a \cdot b} \text{ resp. } \frac{M_{\max}}{a \cdot b}$$

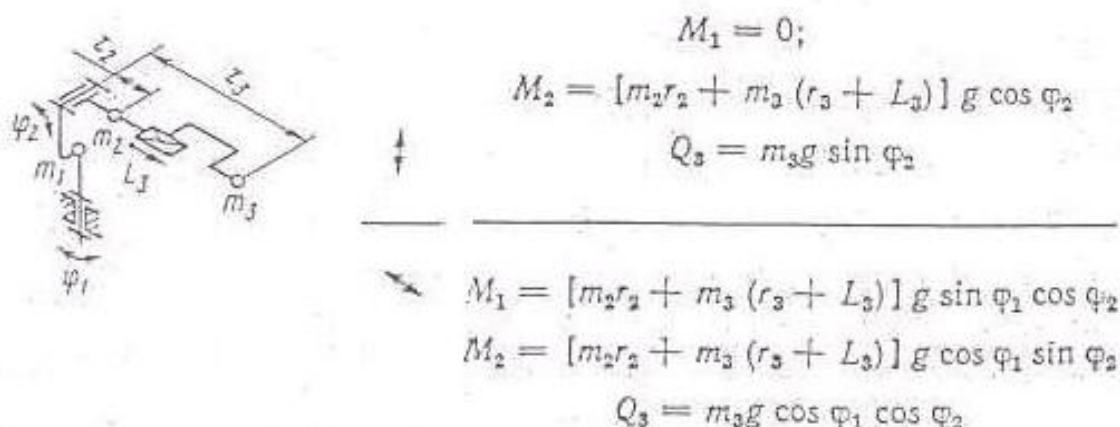
$$\lambda_2 = a + b$$

$$F_2 = \lambda_2 \cdot c = (a + b) \cdot \frac{M_G}{a \cdot b} \text{ maximální síla v pružině}$$

$$F_1 = \lambda_1 \cdot c = (a - b) \cdot \frac{M_G}{a \cdot b}$$

Při vyvažování různých kinematických řetězců robotů (různých koncepcí) je vyvážení různě složité, viz složitější případy typových robotů opakovaně v praxi užívaných (obr. 2.1.1.-2)

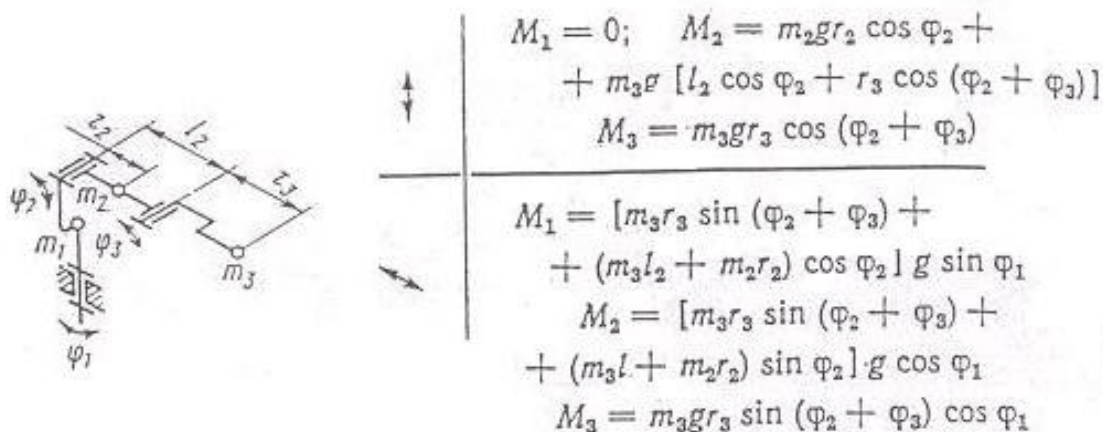




Obr. 2.1.1.-2 Vyvážení sférické koncepce robotu

Zde je sférická koncepce robotu, orientovaná vůči gravitačnímu poli podle šipek - v horním řádku je vyvážení realizováno účinky  $M_2$  a  $Q_3$ , ve spodním řádku při orientaci vůči gravitačnímu poli pootočené o  $90^\circ$  je vyvážení složitější s hodnotami vyvážení  $M_1, M_2$  a  $Q_3$ .

Ještě složitější je vyvážení robotů angulárních koncepcí (obr. 2.1.1.-3)

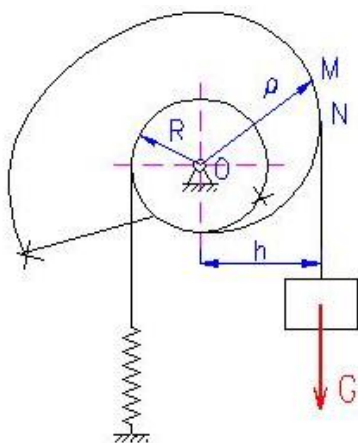


Obr. 2.1.1.-2 Vyvážení angulární koncepce robotu

Při této koncepci platí – v horním řádku vyvážení hodnotami účinků  $M_2$  a  $M_3$ , ve spodním řádku hodnotami  $M_1, M_2$  a  $M_3$

## 2.1.2. Vyvažování lineárních pohybových jednotek

Pro těžké manipulátory (vysokých nosností) může být výhodné vyvažovat i některé lineární pohybové jednotky. Je pak nutné zajistit vyvažovací systém s konstantní charakteristikou. Opět se jako hlavní prvek užívá pružina doplněná vhodným mechanismem. Princip vyvážení je zřejmý z obr. 2.1.2.-1.



Obr. 2.1.2.-1 Vyvážení lineární jednotky

K vyvážení se využívá lankový systém. Jedno lanko je připevněno na kladku po které se odvíjí, na opačném konci lanka je připevněna pružina. Kladka je na společné hřídeli s vačkou tvořenou Archimedovou spirálou. Na té je zafixováno další lanko spojené s vyvažovanou lineární jednotkou zde reprezentovanou závažím G.

Při navíjení nebo odvíjení lanka se mění deformace (aktuální délka) pružiny a tudíž i odpovídající síla v pružině. Síla přitom působí na konstantním poloměru R kladky. Na pravé straně od osy rotace pak působí konstantní tíha polohovací jednotky (G) ale rameno k ose rotace (h) se naopak mění v závislosti na poloměru křivosti Archimedovy spirály. Pro rovnováhu (vyvážení) je nezbytné, aby změna F (síly v pružině) a vzdálenosti h byly stejné, případně s co nejmenší

odchylkou.

Vhodnost mechanismu k vyvážení tedy doložíme právě posouzením velikosti této odchylky.

Při vertikálním pohybu vyvažované jednotky (G) platí

$$G \cdot h = F \cdot R$$

Kde G a R jsou konstanty a h a F jsou proměnné.

Prozkoumejme změny h v závislosti na poloměru křivosti Archimedovy spirály  $\rho$ .

Pro poloměr křivosti Archimedovy spirály platí vztah

$$\rho = a \cdot \varphi \text{ kde } a \text{ je konstanta spirály a } \varphi \text{ úhel odvinutí spirály z počátku}$$

Na vačce s Archimedovou spirálou lze najít takovou její část pro rozsah  $\varphi$ , pro niž platí  $h \sim \rho$ .

To je možné dokázat následujícím postupem:

Podle obr. 2.1.2.-1 se lanko odvíjí v bodu M, pro který platí, že

$$\overline{OM} = \rho$$

$$\overline{ON} = h$$

$\mu$  je úhel mezi  $\rho$  a tečnou v  $M$

z  $\triangle OMN$  plyne  $h = \rho \cdot \sin \mu$

dále

$$1 \quad \rho = a \cdot \varphi$$

$$2 \quad h = \rho \cdot \sin \mu$$

$$3 \quad \operatorname{tg} \mu = \frac{\rho}{\rho'} = \frac{\rho}{\frac{d\rho}{d\varphi}}$$

a z poslední rovnice vyplyne

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = \frac{\rho}{\operatorname{tg} \mu} = \frac{a \cdot \varphi}{\operatorname{tg} \mu}$$

$$\frac{d\rho}{d\varphi} = \frac{d \ a \cdot \varphi}{d\varphi} = a$$

$$\frac{a \cdot \varphi}{\operatorname{tg} \mu} = a \Rightarrow \frac{\varphi}{\operatorname{tg} \mu} = 1 \Rightarrow \mu = \operatorname{arctg} \varphi$$

pak dosazením do 2

$$h = \rho \sin \mu = a \cdot \varphi \sin \operatorname{arctg} \varphi$$

rozdíl mezi  $h$  a  $\rho$  je pak dán  $\sin \mu$ ,

resp.  $\sin(\operatorname{arctg} \varphi)$

potřebujeme, aby se tato hodnota rovnala 1

nebo se od ní jen málo odchýlila

Dosazením do posledního vztahu zjistíme, že počáteční úhel použité křivky na Archimedově spirále by měl být  $\varphi_0 \geq 2\pi$ .

Dále upřesníme postup při návrhu pružiny – výpočtem konstanty její tuhosti  $c$ .

Základní výše uvedený vztah bude tedy platit pro zvolenou část Archimedovy spirály

$$G \cdot h = F \cdot R, \text{ když } h = \rho$$

Do vztahu je nutné dosadit  $F$ , které obsahuje i konstantu tuhosti  $c$

$F = F_1 + \Delta F$ , kde  $F_1$  je počáteční předepnutí pružiny

$\Delta F = \Delta l \cdot c = R(\varphi - \varphi_0) \cdot c$   $\Delta l$  se rovná odvinutí lanka z kladky o poloměru  $R$ , v rozsahu úhlu  $(\varphi - \varphi_0)$ ,

Nyní lze psát  $G \cdot \rho = \{ F_1 + R(\varphi - \varphi_0) \cdot c \} R$  pro určitou délku odvinutí lanka a tím natažení pružiny

Původně bylo  $G \cdot \rho_0 = F_1 R$

Odečtením obou rovnic získáme

$$G(\rho - \rho_0) = cR^2(\varphi - \varphi_0)$$

Dále dosazením za  $\rho = a \cdot \varphi$ ,  $\rho_0 = a \cdot \varphi_0$

dostaneme

$$G \cdot a = c \cdot R^2$$

a konečně vyjádření c

$$c = \frac{G \cdot a}{R^2}$$

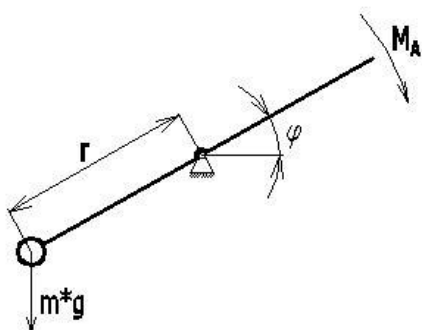
Pro předepsaný zdvih H polohovací jednotky se zátěží G je nutné stanovit délku odpovídající části Archimedovy spirály vačky S v rozsahu počátečního a koncového úhlu  $\rho_0$ ,  $\rho_k$   
platí  $S = H$

$$S = \frac{a \left[ \varphi_k \sqrt{\varphi_k^2 - 1} - \varphi_0 \sqrt{\varphi_0^2 + 1} + \ln(\varphi_k + \sqrt{\varphi_k^2 + 1}) \right]}{2(\varphi_0 + \sqrt{\varphi_0^2 + 1})}$$

### 2.1.3. Kvalita vyvážení

Posouzení kvality vyvážení tak jak ho zde zavádíme má dvojí význam. Jednak poslouží jako nově zacedené kritérium pro hodnocení výsledku práce konstruktéra a dále ukazuje jeden z postupů vytváření vlastního know how analýzou souvislostí mezi jednotlivými parametry konstrukce.

Zaveďme nejdříve pojem a poměry při absolutním vyvážení rotujícího členu manipulátoru podle obr. 2.1.3., kde toto vyvážení zajistíme protizávažím o hmotnosti  $m^*$ .



Zde je

$M_A$  – velikost momentu nevyvážení vlastních hmot konstrukce

$M_{VS}$  – velikost momentu vyvozeného vyvažovacím systémem (VS)

Absolutního vyvážení tedy dosáhneme bude-li

$$M_{VS} = M_A$$

$$M_{VS} = - m^* \cdot g \cdot r \cdot \cos\phi = - M_O \cdot \cos\phi$$

Obr. 2.1.3.-1 Vyvážení protizávažím

manipulátoru (konstanta)

$M_O$  - označujeme jako parametr nevyvážení členu

Kvalitu vyvažovacího systému pak zaveďme vztahem:

$$\theta = 1 - \left| \frac{M_A + M_{VS}}{M_O} \right|$$

Při zavedení protizávaží, kdy platí  $M_{VS} = M_A$

$$\theta = 1 - \left| \frac{0}{M_O} \right| = 1 \Rightarrow \text{vysoká (absolutní) kvalita vyvážení}$$

Pokusme se nyní tento vztah blíže analyzovat při zvážení geometrických poměrů ve vyvažovacím systému (obr. 2.1.3.-2).

Z kosinové věty uplatněné na trojúhelník ADC v obrázku

$$L = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)} = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \sin\phi}$$

A dále z plochy kosoúhelníku nad tímto trojúhelníkem

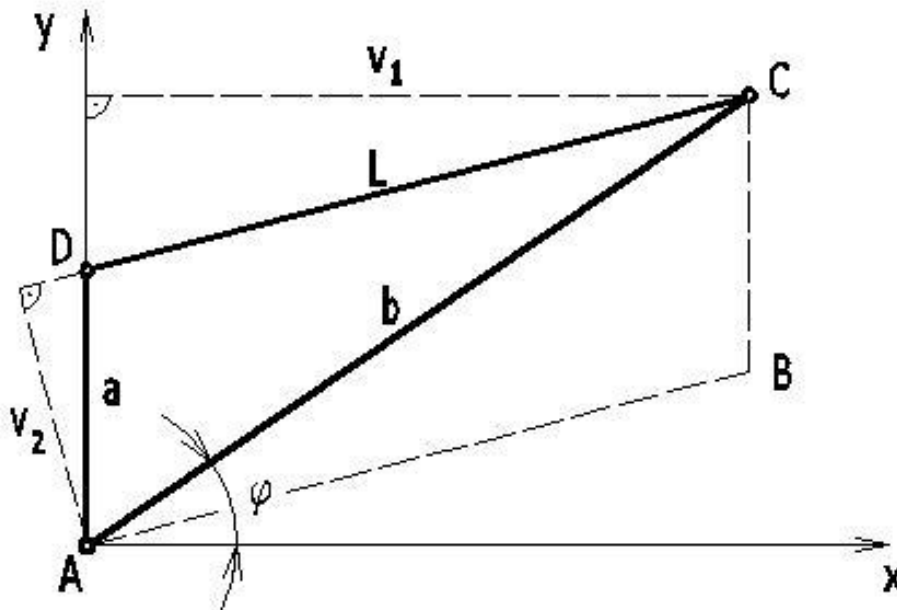
$$S_{ABCD} = a \cdot v_1 = a \cdot b \cdot \cos\phi = L \cdot v_2$$

Lze vypočítat

$$v_2 = \frac{a \cdot b \cdot \cos \phi}{L}$$

A vyvažovací moment pak zjistíme jako součin síly v pružině  $F_p$  a ramene k ose rotace  $v_2$

$$M_{vs} = -F_p \cdot v_2 = -\Delta L \cdot c \cdot v_2 = -\Delta L \cdot c \cdot \frac{a \cdot b \cdot \cos \phi}{L}$$



Obr. 2.1.3.-2 Připojení vyvažovací pružiny (L) mezi otočný člen manipulátoru (b) a rám (a)

jestliže  $\Delta L = L - L_0$

$$M_{vs} = -a \cdot b \cdot c \cdot \cos \phi \frac{L - L_0}{L} = -a \cdot b \cdot c \cdot \cos \phi \left( 1 - \frac{L_0}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \sin \phi}} \right)$$

Požadujeme-li absolutní vyvážení, musí  $\theta = 1 \Rightarrow M_A + M_{vs} = 0$

protože  $M_A = M_0 \cdot \cos \phi$

bude

$$M_o \cdot \cos \phi - a \cdot b \cdot c \cdot \cos \phi \left( 1 - \frac{L_o}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \sin \phi}} \right) = 0$$

$$M_o - a \cdot b \cdot c + \frac{a \cdot b \cdot c \cdot L_o}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \sin \phi}} = 0$$

$$M_o - a \cdot b \cdot c = \frac{-a \cdot b \cdot c \cdot L_o}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \sin \phi}}$$

$$\sqrt{a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \sin \phi} = \frac{-a \cdot b \cdot c \cdot L_o}{M_o - a \cdot b \cdot c}$$

$$a^2 + b^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \sin \phi = \left( \frac{a \cdot b \cdot c \cdot L_o}{M_o - a \cdot b \cdot c} \right)^2$$

$$\sin \phi = \frac{1}{2 \cdot a \cdot b} \left[ a^2 + b^2 - \left( \frac{a \cdot b \cdot c \cdot L_o}{M_o - a \cdot b \cdot c} \right)^2 \right]$$

$$\phi = \phi_0 = \arcsin \left\{ \frac{1}{2 \cdot a \cdot b} \left[ a^2 + b^2 - \left( \frac{a \cdot b \cdot c \cdot L_o}{M_o - a \cdot b \cdot c} \right)^2 \right] \right\}$$

Pro tento úhel  $\phi$  platí, že  $\theta = 1$ . Ve všech ostatních případech úhlů z intervalu mezi počátečním úhlem  $\phi_p$  a konečným úhlem  $\phi_k$  naopak neplatí, že  $\theta = 1$ , protože  $M_A + M_{VS} \neq 0$ .

Kvalita vyvažovacího systému je dána nejnepříznivějším případem, charakterizovaným maximální hodnotou funkce  $\Phi$

$$\phi = \frac{M_A + M_{VS}}{M_o}$$

Z tohoto důvodu je nutné výraz podrobně analyzovat.

$$\phi = \frac{M_A + M_{VS}}{M_o} = \frac{M_o \cdot \cos \phi - a \cdot b \cdot c \cdot \left( 1 - \frac{L_o}{L} \right) \cdot \cos \phi}{M_o} = \left( 1 - \frac{a \cdot b \cdot c}{M_o} + \frac{a \cdot b \cdot c}{M_o} \cdot \frac{L_o}{L} \right) \cdot \cos \phi$$

$$\phi = \left( 1 - \frac{a*b*c}{M_o} + \frac{a*b*c}{M_o} * \frac{L_o}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2*a*b*\sin\varphi}} \right) * \cos\varphi$$

Tento výraz je nepřehledný kvůli zlomku s odmocninou ve jmenovateli, proto ho zjednodušíme rozvojem v řadu podle Taylora když platí, že

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} \cong 1 - \frac{1}{2} * x + \frac{3}{8} * x^2 - \frac{15}{48} * x^3 + \dots \quad \text{pro } -1 < x \leq 1$$

$$\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2*a*b*\sin\varphi}} = \frac{1}{b * \sqrt{1 + \frac{a^2}{b^2} - 2*\frac{a}{b}*\sin\varphi}} \cong \frac{1}{b} * \left[ 1 - \frac{1}{2} * \left( \frac{a}{b} \right)^2 + \frac{a}{b} * \sin\varphi + \dots \text{zanedbáme} \right]$$

Protože z realizovaných konstrukcí víme, že

$$a/b < 1$$

$$a^2/b^2 \ll 1 \Rightarrow \text{můžeme zanedbat}$$

$$\sin\varphi = (041)$$

$$\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2*a*b*\sin\varphi}} \cong \frac{1}{b} * \left( 1 + \frac{a}{b} * \sin\varphi \right)$$

$$\phi = \left( 1 - \frac{a*b*c}{M_o} + \frac{a*b*c}{M_o} * \frac{L_o}{b} + \frac{a*b*c}{M_o} * \frac{L_o}{b} * \frac{a}{b} * \sin\varphi \right) * \cos\varphi$$

Vstupní parametry můžeme pro zjednodušení výrazu nahradit parametry  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,

$$K_1 = \frac{a*b*c}{M_o} \quad K_2 = \frac{L_o}{b} \quad K_3 = \frac{a}{b}$$

$$\phi = \left( -K_1 + K_1 * K_2 + K_1 * K_2 * K_3 * \sin\varphi \right) * \cos\varphi$$

Úloha syntézy je v daném případě optimalizační úloha. Jedná se o nalezení parametrů, při kterých je maximální hodnota  $\phi$  v daném intervalu ( $\varphi$  p,  $\varphi$  k) minimální.

Další zjednodušení výrazu:

$$A_1 = 1 - K_1 + K_1 * K_2$$

$$\phi = A_1 * \cos\varphi + K_1 * K_2 * K_3 * \sin\varphi * \cos\varphi = A_1 * \cos\varphi + K_1 * K_2 * K_3 * \frac{\sin 2\varphi}{2}$$



$$A_2 = 0.5 * K_1 * K_2 * K_3$$

$$\varphi = A_1 * \cos \varphi + A_2 * \sin 2 * \varphi \quad / A_2$$

$$\frac{\varphi}{A_2} = \frac{A_1}{A_2} * \cos \varphi + \sin 2 * \varphi$$

$$\bar{\varphi} = A \cos \varphi + \sin 2 * \varphi \quad \text{kde} \quad \bar{\varphi} = \frac{\varphi}{A_2} \quad \text{a} \quad A = \frac{A_1}{A_2}$$

$$\varphi = \bar{\varphi} * A_2 \quad \Rightarrow \quad \varphi_{\min} = \bar{\varphi}_{\min} * A_2 \quad \text{Hledáme } \varphi = \varphi_0, \text{ pro které je } \bar{\varphi} = \bar{\varphi}_{\varphi_0} = 0!$$

Pak platí, že  $\varphi = 0$ .

$$\bar{\varphi} = A * \cos \varphi + \sin 2 * \varphi = A * \cos \varphi * \left(1 + \frac{2}{A} \sin \varphi\right) = 0$$

$$\Leftrightarrow \cos \varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$1 + \frac{2}{A} \sin \varphi = 0 \quad \Rightarrow \quad \varphi_0 = \arcsin\left(-\frac{A}{2}\right)$$

Funkce arcsin(x) je definována pro  $x \in \langle -1, 1 \rangle \Rightarrow |A| \leq 2$

Oblast hledaných hodnot A leží v rozsahu  $\langle -2, 2 \rangle$  a rozsah úhlu  $\varphi \in \left\langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right\rangle$ , přicházející prakticky v úvahu pro polohovací ústrojí, vždy zahrnuje  $\varphi_0$ , při kterém  $\bar{\varphi}_{\varphi_0} = 0$ .

Grafy průběhů funkcí  $\varphi_0(A)$ ,  $\varphi_1(A)$ ,  $\varphi_2(A)$  pro  $\varphi \in \left\langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right\rangle$  a  $|A| \leq 2$  jsou v obr. 2.1.3.-3.

Nyní zjistíme extrémů funkce  $\bar{\varphi}$  (1. derivaci položíme rovnu nule):

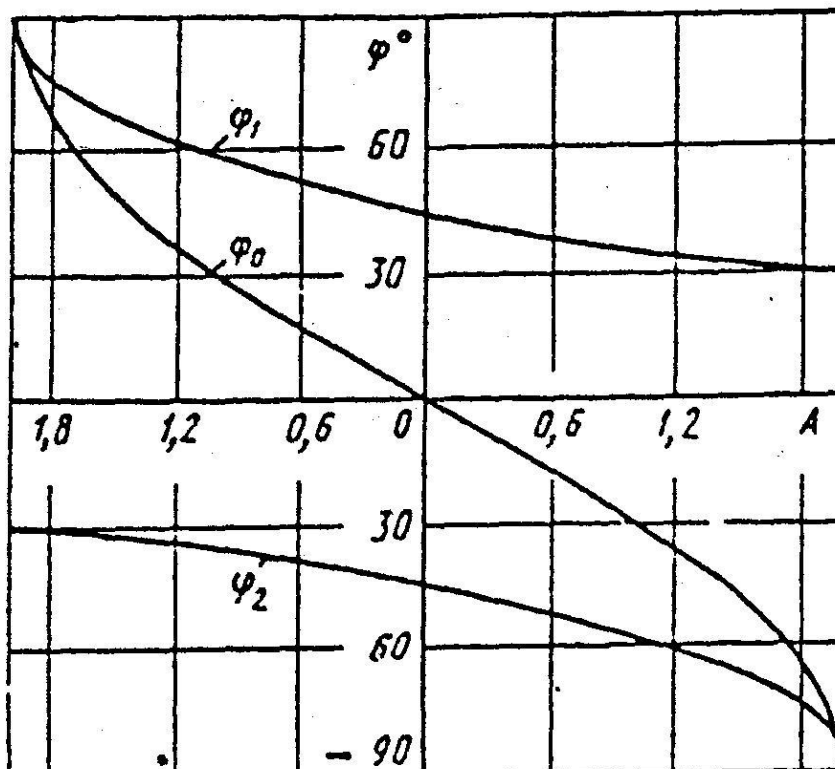
$$\bar{\varphi} = A \cos \varphi + \sin 2 * \varphi$$

$$\bar{\varphi}' = -A \sin \varphi + 2 * \cos 2 * \varphi = -A \sin \varphi + 2 * \cos^2 \varphi - 2 * \sin^2 \varphi = -A \sin \varphi + 2 - 2 * \sin^2 \varphi - 2 * \sin^2 \varphi$$

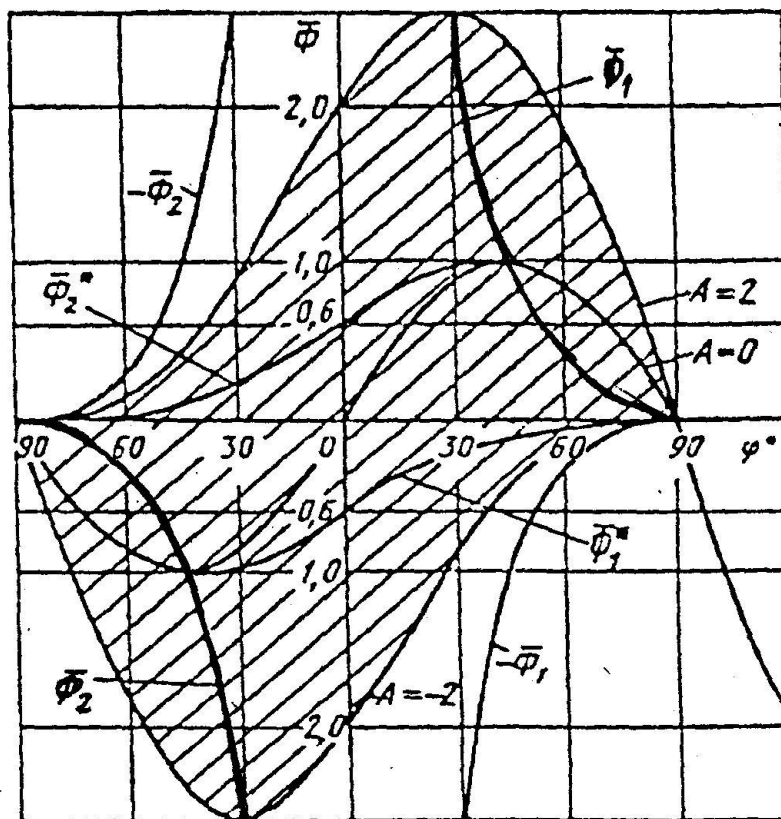
$$\bar{\varphi}' = -4 * \sin^2 \varphi - A \sin \varphi + 2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \sin \varphi_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 32}}{8}$$

$$\bar{\varphi}_{\varphi_1} = \bar{\varphi}_{\varphi_1} = \bar{\varphi}_{\max} \quad \text{kde} \quad \varphi_1 = \arcsin \frac{-A + \sqrt{A^2 + 32}}{8}$$

$$\bar{\varphi}_{\varphi_2} = \bar{\varphi}_{\varphi_2} = \bar{\varphi}_{\min} \quad \text{kde} \quad \varphi_2 = \arcsin \frac{-A - \sqrt{A^2 + 32}}{8}$$



Obr. 2.1.3.-3 Průběhy funkcí  $\varphi_{0,1,2}$



Obr. 2.1.3.-4 Extrémy funkcionálu  $\Phi$  v oblasti  $|A| \leq 2$

V oblasti, kde určujeme  $\varphi_0$  (tj. při  $|A| \leq 2$ ) nabývá  $\varphi_1$  hodnot  $\left\langle \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{6} \right\rangle$  a  $\varphi_2$  hodnot  $\left\langle -\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{6} \right\rangle$ . Dosazením  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  do  $\bar{\phi} = A * \cos \varphi * \left(1 + \frac{2}{A} \sin \varphi\right)$  získáme křivky  $\bar{\phi}_1$  a  $\bar{\phi}_2$  spojující body s extrémními hodnotami  $\bar{\phi}$  (Obrázek 4).

V grafu vyšrafovaná plocha obsahuje všechny hodnoty  $\bar{\phi}$  pro  $|A| \leq 2$ . Platí, že  $\bar{\phi} = A$  při  $\varphi = 0$ . Pro každou hodnotu  $A$  existuje hodnota úhlu  $\varphi = \varphi^*$ , při které je  $\bar{\phi}$  rovno nejmenšímu z extrémů, ale s opačným znaménkem.  $\bar{\phi}_{1,2}^* = \bar{\phi}_{1,2}^*$ , tedy vymezují oblasti  $\bar{\phi}_A$ , v nichž se uplatní pouze menší z extrémů mezi  $\varphi \in \left\langle -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right\rangle$ . Pro reálné konstrukce nepřevyšuje rozsah změn úhlu sklonu ramene pantografu  $\Delta\varphi = \varphi_k - \varphi_p$  hodnotu  $\frac{\pi}{2}$  a funkce  $\bar{\phi}$  v takovém intervalu má dva extrémy pouze při  $A = 0$ . Při jiných hodnotách  $A$ , v intervalu o velikosti  $\frac{\pi}{2}$ , se dva extrémy nevyskytnou.  $\Rightarrow$  nezbytnou podmínkou optimálnosti parametru  $A$  v intervalu  $\varphi \in \langle \varphi_p, \varphi_k \rangle$  je výskyt  $\varphi_0$  v tomto intervalu a rovnost mezních hodnot funkcí  $\bar{\phi}_A$  v případě, že extrém se v intervalu nevyskytuje, nebo rovnost extrémní hodnoty v tomto intervalu a hraniční hodnoty. Pak pro libovolný interval  $\varphi \in \langle \varphi_p, \varphi_k \rangle$  existuje jediná hodnota  $A_{opt}$ , daná poměrem mezi koeficienty  $K_1, K_2, K_3$  (v těch jsou zahrnuty parametry SMV:  $a, b, c, L_0$ ), při kterém je kvalita vyvážení  $\phi$  maximální.

V první etapě syntézy SMV se z grafů stanoví podle rozsahu  $\langle \varphi_p, \varphi_k \rangle$  z grafů na obr. 2.1.3- 3 až 5 hodnoty  $A_{opt}$  a  $\varphi_0$  a dále pak  $\Phi_{max}$  a  $\varphi_1$  nebo  $\varphi_2$ .

$$\theta = 1 - \left| \frac{M_A + M_{VS}}{M_O} \right|, \quad \phi = \frac{M_A + M_{VS}}{M_O}, \quad \theta = 1 - |\phi_{max}|, \quad \phi_{max} = \bar{\phi}_{max} * A_2,$$

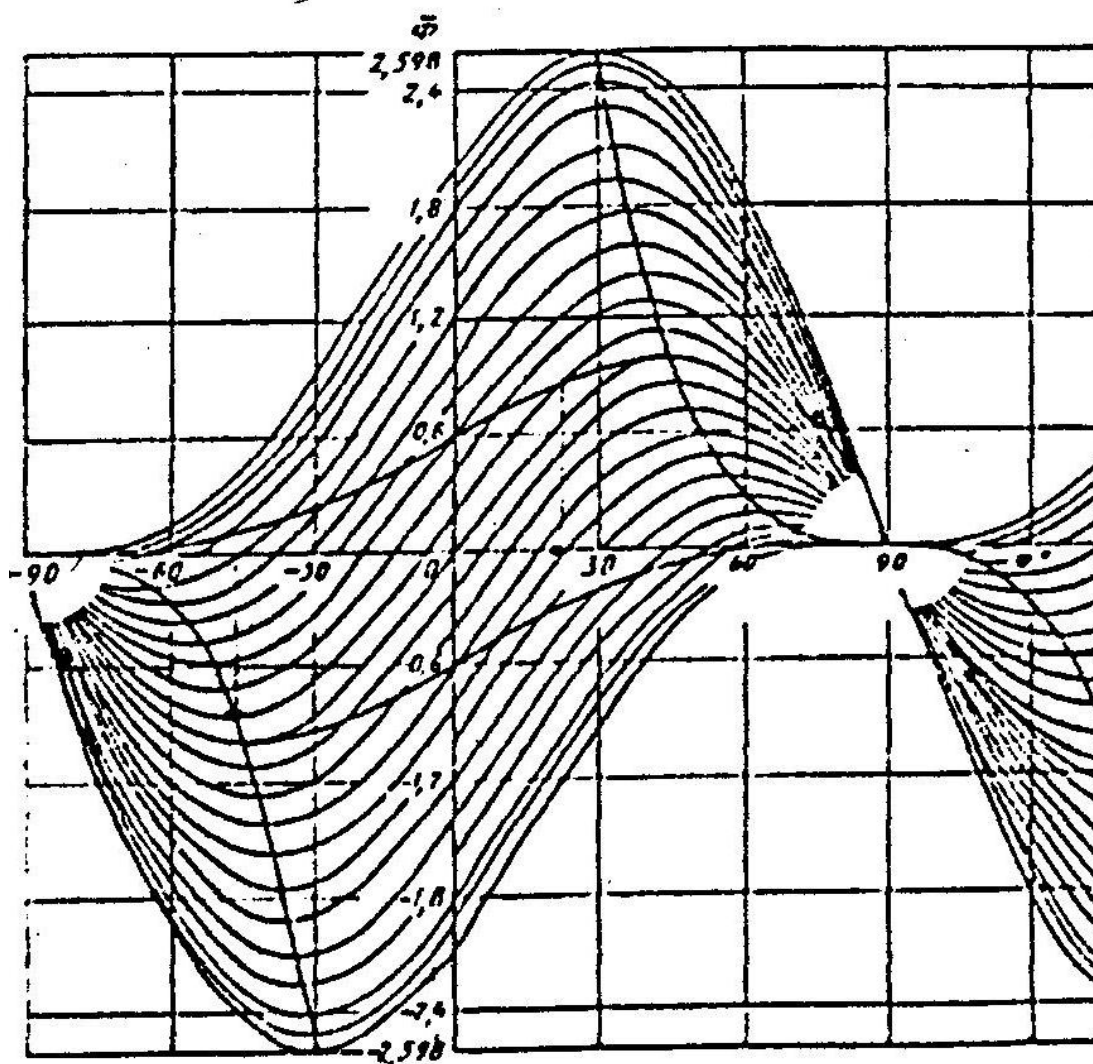
přičemž  $\bar{\phi}_{max}$  je jednoznačně určeno intervalem  $\langle \varphi_p, \varphi_k \rangle \Rightarrow$  abychom dosáhli co nejvyšší kvality SMV, snažíme se minimalizovat hodnotu  $A_2$ .

$$A_2 = 0.5 * K_1 * K_2 * K_3 = \frac{1}{2} * \frac{a^2}{M_O} * \frac{L_0 * c}{b}$$

kde  $a, b, c, L_0$  jsou proměnné parametry a  $M_O$  je konstanta.  $a = K_3 * b$

$$A_2 = \frac{K_3^2 * b * L_0 * c}{2 * M_O}$$

$b$  je zpravidla 0,8 až 0,9 délky členu nesoucího pružinu a závisí na konstrukci úchyty  $\Rightarrow$  zbývá minimalizovat parametry  $a, c, L_0$ . Jak bylo ukázáno výše, při  $\varphi = \varphi_0$  (ideální vyvážení) je  $L_0 = L_{\varphi_0}$  a  $M_{VS} + M_A = 0$ .


 Obr. 2.1.3.-5 Grafy průběhu  $\Phi_{(\varphi, A)}$  pro  $|A| \leq 2$ 

$$K_1 = \frac{a \cdot b \cdot c}{M_o}, \quad M_{VS} = -M_o \cdot \cos \varphi, \quad M_{VS} = -a \cdot b \cdot c \cdot \cos \varphi \frac{L - L_0}{L} \Rightarrow$$

$$M_o = a \cdot b \cdot c \cdot \frac{L - L_0}{L_0} \Rightarrow K_1 = \frac{L_{\varphi 0}}{L_{\varphi 0} - L_0} > 1$$

$$A_2 = 0.5 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = \frac{A_1}{A} = \frac{1 - K_1 + K_1 \cdot K_2}{A} \Rightarrow K_2 = \frac{K_1 - 1}{K_1 \cdot (-0.5 \cdot A \cdot K_3)}$$

Vyvažovací moment lze vyjádřit jako součin síly pružiny  $F_p$  a vzdálenosti  $v_2$ :  $M_{VS} = F_p \cdot v_2$ .  
 Při přesném vyvážení je potřebná síla  $F_{\varphi 0}$ :

$$M_{VS} = -M_o \cdot \cos \varphi = F_p \cdot v_2, \quad F_{\varphi 0} = \frac{M_o \cdot (1 + 0.5 \cdot A \cdot K_3)}{b \cdot K_3}$$

Protože v praxi je u konstrukcí koeficient  $K_3$  zpravidla 0,04 – 0,2, lze při hodnocení (odhadu) hodnoty potřebné síly předpokládat, že je nepřímo úměrná  $K_3$ . ( $K_3 = a/b$ ) Čím větší

$a$ , tím menší sílu potřebujeme, což je celkem vidno z obr. 2.1.3.-1 a je to dobře, ale na druhou stranu se s růstem  $a$  zhoršuje ukazatel kvality  $\theta$  a naopak.

### Analýza souvislostí technologických a konstrukčních

Použití výkonných pružin je spojeno s konstrukčními a technologickými problémy, složitostí výroby i ustavení, potřebou navrhnout ložiskové uzly a úchyty velkých rozměrů a vznikem velkých reakcí v kloubech, velké ztráty třením a v důsledku toho zvětšení síly k přemístění břemene a tím i motoru. Kvalita potřebná síla jsou protikladné vzhledem k parametru  $a$ . Tato dvě kritéria si konkurují podél tzv. kompromisní křivky. Grafickou interpretací tohoto případu může být soubor křivek (obr. 2.1.3.-6) relativní potřebné síly  $F^*$  jako funkce  $K_3$  pro zvolené  $\varphi_0$ .

$$F^* = \frac{b * F_{\varphi_0}}{M_O} = \frac{1 + 0.5 * A * K_3}{K_3}$$

Tento soubor umožňuje posoudit všechny ověřované optimální návrhy konstrukčního řešení podle dvou kritérií efektivnosti.

Další závislosti pro analýzu optimálního návrhu vyplývají z grafického průběhu síly  $F$  v pružině, při její určité délce (obr. 2.1.3.-7). Při délce  $L = L_{\varphi_0}$ , což odpovídá  $\varphi = \varphi_0$ , je síla  $F = F_{\varphi_0}$ . SMV s optimálním poměrem parametrů vyvolává v tomto bodě moment  $M_{VS} = M_A$  a sílu  $F_{\varphi_0} = c(L = L_{\varphi_0})$ .

Porovnejme dále pracovní diagram reálné pružiny a s diagramem hypotetické pružiny nulové počáteční délky ( $L_0 = 0$ ) a s tuhostí  $c^*$ . Při aktuální délce  $L_{\varphi}$ , odpovídající  $\varphi = \varphi_p$ , bude síla  $F_{(M_A)max}$  menší, než síla  $F_{max}$ , vyvinutá pružinou reálného vyvažovacího systému.

Při vybraných hodnotách  $K_3$  a  $F^*$  podle kompromisních křivek (obr. 2.1.3.-6) je minimum  $A_2$  závislé na součinu  $c^*L_0$ . ( $c$  = tuhost pružiny,  $F^*$  je známá a největší přípustná deformační síla pružiny)

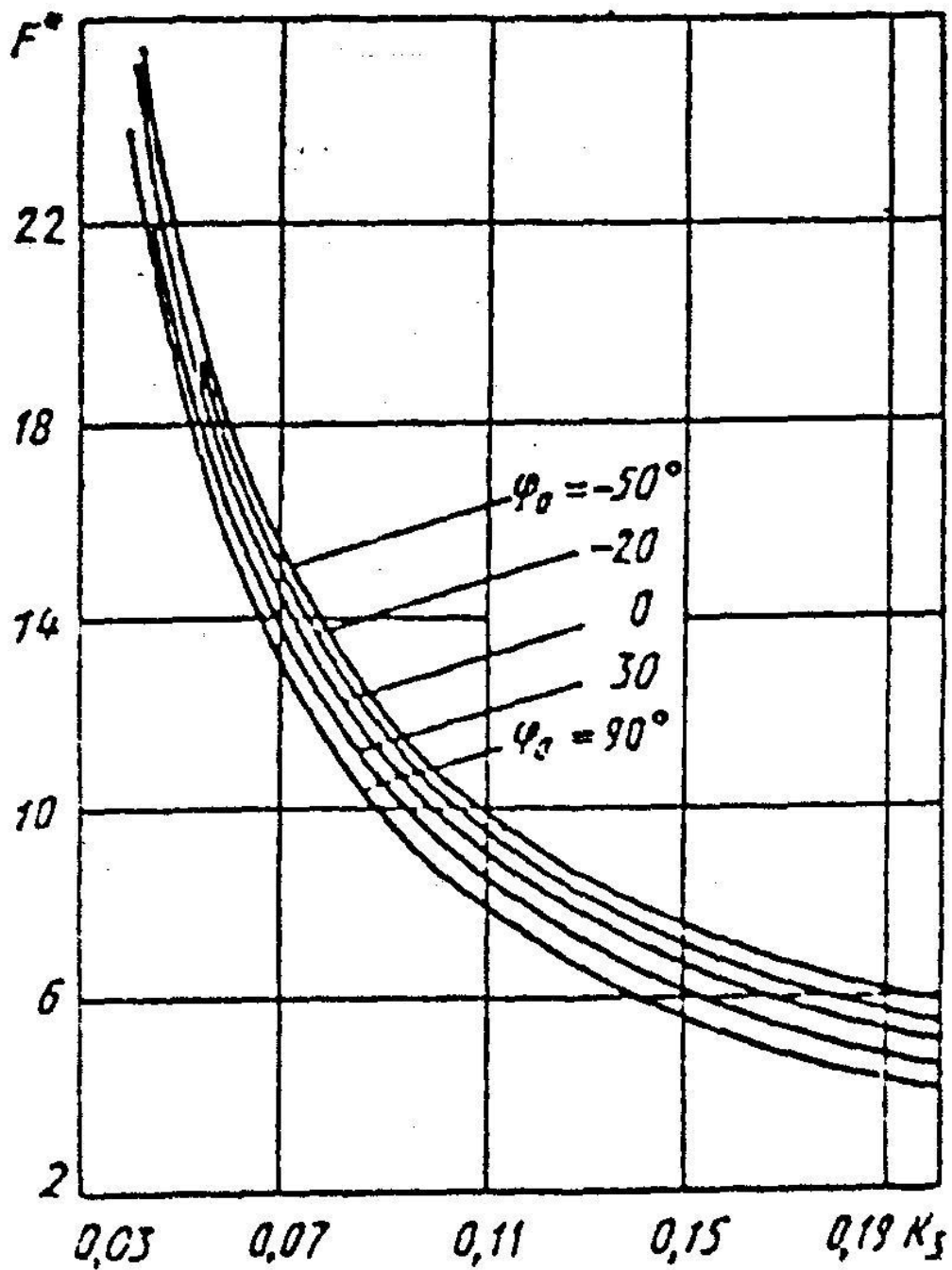
I kritérium dané obrysovými rozměry a složitostí konstrukce SMV (velikost pružin, počet pružin, ...) je v protikladu ke kritériu kvality.

Nemožnost získání optimální konstrukce SMV současně podle tří kritérií, vede k volbě kompromisního řešení, vyhovujícímu tomu z požadavků, který je určující v konkrétním případě.

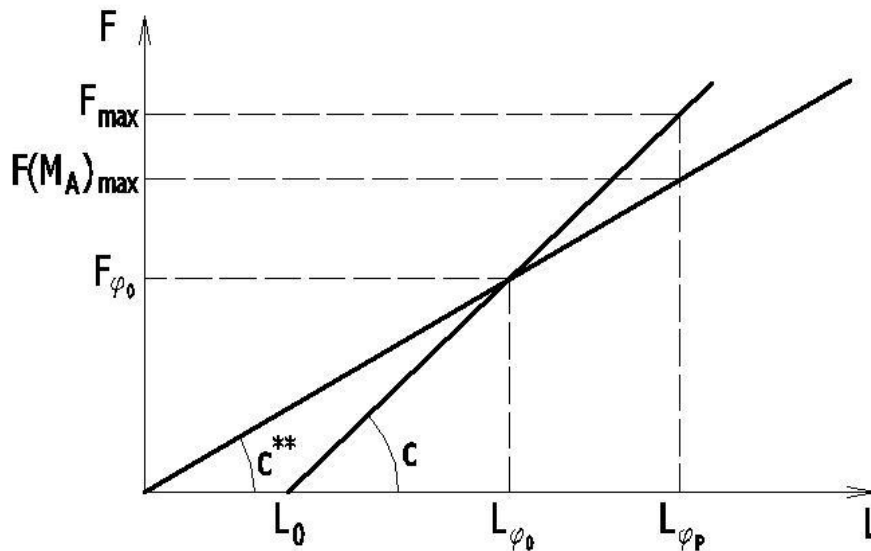
Podle zadaného intervalu  $\varphi \in \langle \varphi_p, \varphi_k \rangle$  úhlů sklonu ramene polohovacího zařízení se určuje koeficient  $A_2$  (koeficient optimálního poměru parametrů) a podle grafů na obr. obr. 2.1.3.-3 až 6 hodnoty  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, |\overline{\Phi}_{max}|$ .

Dále se syntéza provádí nejčastěji podle maximální síly, kvality a omezení kladených na pružiny a jejich závěs – tj, počet pružin, jejich maximální průměr nebo požadavek na použití standardních pružin.

**Návrh vyvažovacího pružinového systému, na základě uvedené analýzy a získaného přehledu o všech existujících souvislostech, získaných z teoretických úvah i praktických zkušeností, s technologií i konstrukcí vyvažovacích systémů, vede k tomu, že hned v prvních úvahách o řešení těchto systémů víme jak dosáhnout optimálního výsledku. Rovněž víme jaká jsou omezení pro takový návrh.**



Obr. 2.1.3.-6 Závislost potřebné síly v pružinách na  $K_3$  a  $\varphi_0$



Obr. 2.1.3.-7 Optimalizace síly v pružině



### Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se seznámili s následujícími pojmy: vyvažovací systémy průmyslových (a servisních) robotů, principy jejich výpočtu, jejich zástavbou do kinematického řetězce robotů a pojmem kvalita vyvážení manipulátoru robotu. Analýzou geometrických a silových poměrů při různých konfiguracích kinematického řetězce byly získány závěry pro návrh či volbu základních parametrů pro návrh vyvážení.



### Kontrolní otázka

- 1) Které jsou výchozí parametry při návrhu vyvážení rotační pohybové jednotky?
- 2) Který je výstupní parametr pro konstrukční návrh pružinového vyvažovacího systému?
- 3) Jak je definováno  $\lambda$  při vyvážení rotační pohybové jednotky PVS (pružinovým vyvažovacím systémem)?
- 4) Kterých základních vlastností Archimedovy spirály využijete pro vyvážení manipulátoru robotu?
- 5) Jak je definována kvalita vyvážení?
- 6) Kdy dosáhnete absolutního vyvážení?



### Úkol k řešení

Vypočtete vyvažovací účinky pro sférický a angulární kinematický řetězec manipulátoru robotu ve všech realizovatelných polohách vůči gravitačnímu poli (potřebné parametry manipulátoru si zvolte pro konkrétní katalogový typ robotu).



## 2.2. PŘEVODOVÁ ÚSTROJÍ – KLOUBOVÉ MÉCHANISMY

### Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

<p>Budete umět interpretovat</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ principy sestavení pantografu a odvození základních rozměrů jeho jednotlivých členů</li> <li>▪ sestavení rovnic pro silový výpočet</li> </ul> <p>a uskutečnit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ návrh pantografu</li> </ul>	Cíle kapitoly
<p><i>Pantograf, paralelogram, horizontální a vertikální pohyb, konfigurace pantografu, geometrické poměry, pracovní přímka, pracovní body, silová analýza, stanovení reakcí v kloubech, návrh pantografu, převodový poměr, konstrukční parametr, poháněcí síly a momenty pro základní aplikované koncepce kinematických řetězců.</i></p>	Klíčová slova



**Čas ke studiu:** 4 hodiny

V rámci bakalářského studia bylo pojednáno o základních druzích převodů využívaných u průmyslových a případně servisních robotů. Zde se seznámíte s dalším významným mechanismem, který se často v různých variantách využívá – pantografem, který je odvozen od čtyřkloubového mechanismu – paralelogramu.



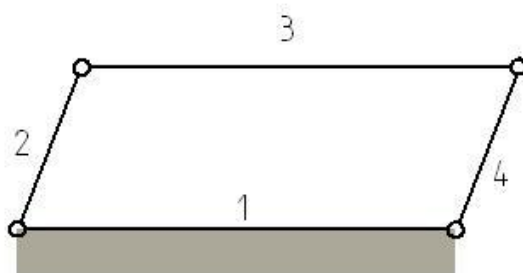
### VÝKLAD

#### 2.2.1. Paralelogramy, pantografy

K doplnění poznatků o převodech zvláštního významu z hlediska užití v konstrukcích robotů pojednává tato kapitola o vybraných čtyřkloubových mechanismech – paralelogramech a pantografech s tím, že kapitola vyžaduje prostudování příslušných kapitol z mechaniky.

Kloubové mechanismy – 4členné (4kloubové) – klikové, klikovahadlové, dvojklikové, dvojavahadlové, kulisové, paralelogramové, aj. se mohou vyskytnout v různých konstrukcích robotů, manipulátorů i efektorů. Mimořádnou důležitost s častým výskytem lze zaznamenat v případě pantografů, jako jednoho z typických převodů polohovacího ústrojí.

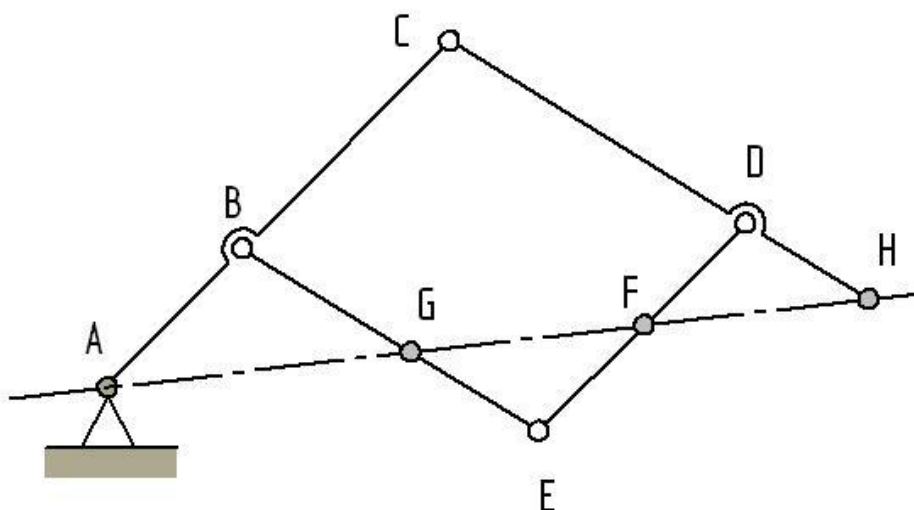
Paralelogram (obr. 2.2.1. – 1)



Obr. 2.2.1. – 1 Paralelogram

Pro paralelogram jako čtyřkloubový mechanismus platí o délkách stran

$$l_2 = l_4 \quad l_1 = l_3$$



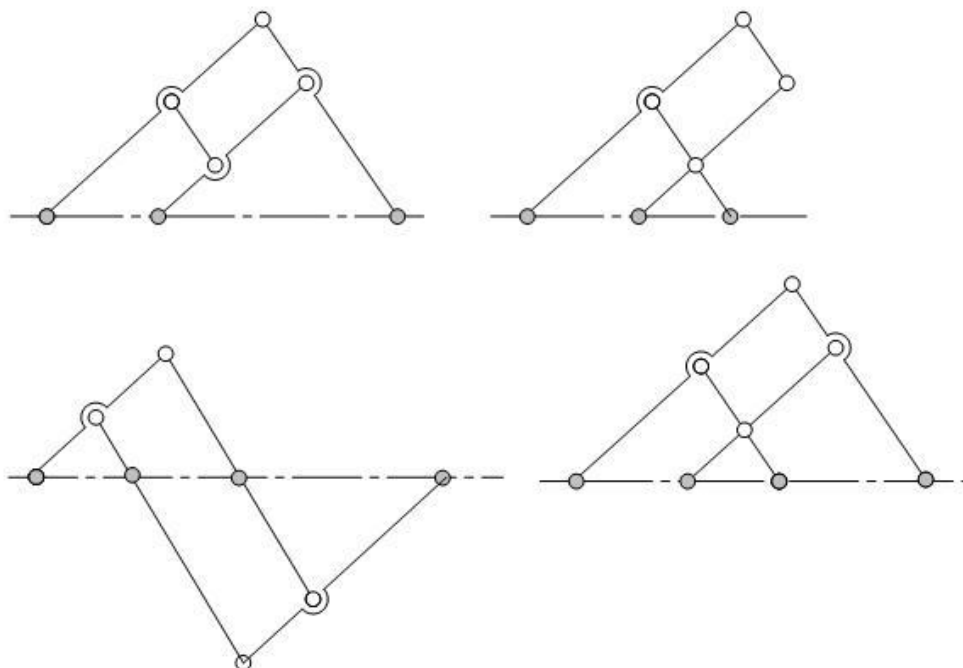
Obr. 2.2.1. – 2 Pantograf

Pantograf vytvoříme z paralelogramu tak, že prodloužíme některé jeho členy s využitím pracovní přímky, což je přímka procházející zvolenými body na těchto prodloužených členech. Body, které takto vzniknou se označují pracovní body. Pracovním bodem je každý bod ležící na průsečíku pracovní přímky s jakýmkoliv členem pantografu. Na obr. 2.2.1. – 2 prochází pracovní přímka body AGFH.

Důležitá vlastnost pracovních bodů (PB):

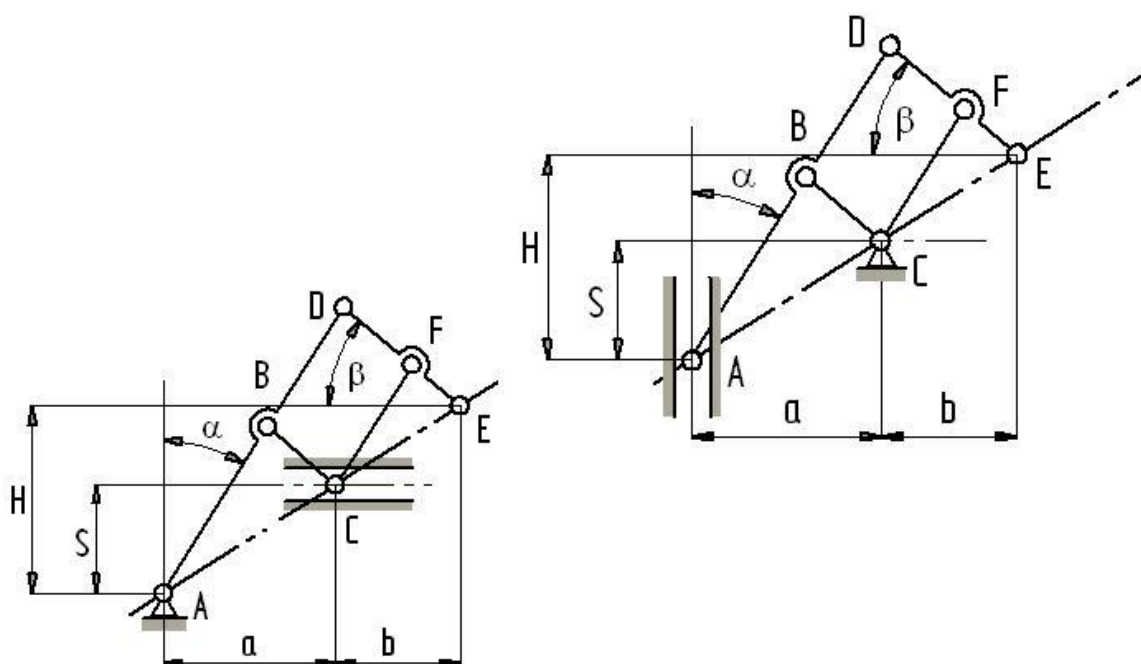
Jestliže spojíme jeden z pracovních bodů kloubově s rámem, pak při přemístování libovolného jiného PB opíše ostatní PB podobnou trajektorii, s koeficienty podobnosti, rovnajícími se převodu mechanismu pantografu.

Příklady pantografů s různým počtem pracovních bodů jsou na obr. 2.2.1. – 3. Pantografy mohou mít 3 nebo 4 PB. Dále vyšetříme některé podstatné vlastnosti pantografů pro jejich uplatnění u pohybových jednotek manipulátorů robotů.



Obr. 2.2.1. – 3 Příklady pantografů

Zajímá nás zda je možné pantografem snadno realizovat přesný pohyb po horizontále nebo vertikále, což je častý požadavek kladený na pohyb efektoru robotu, například při montážních operacích. Samozřejmě je tento pohyb realizovatelný i řízeným pohonem kloubů, v jiných koncepcích manipulátorů robotů, ale jen za vyšší výpočetní náročnosti pro řídicí systém a mnohdy i vyšší nepřesnosti, která musí být opravena s využitím zpětné vazby.



Obr. 2.2.1. – 4 Pohyb bodu E po horizontále (vlevo), po vertikále (vpravo).

Vyšetřeme nejdříve situaci pro obrázek vlevo (horizontální pohyb), kde zřejmě platí: pro vzdálenost H na vertikále mezi PB - AE

$$H = \overline{AB} \cos \alpha - \overline{BC} \sin \beta + \overline{CF} \cos \alpha - \overline{EF} \sin \beta$$

z podobnosti  $\Delta ABC, CFE, ADE$  pak vyplýne

$$\frac{\overline{CF}}{\overline{FE}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{BC}} \Rightarrow \frac{\overline{CF}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{FE}}{\overline{BC}} = k$$

$$\overline{CF} = k \overline{AB}$$

$$\overline{FE} = k \overline{BC}$$

$$H = \overline{AB} \cos \alpha - \overline{BC} \sin \beta + \overline{CF} \cos \alpha - \overline{FE} \sin \beta$$

$$= 1 + k \overline{AB} \cos \alpha - \overline{BC} \sin \beta$$

$$H = 1 + k S$$

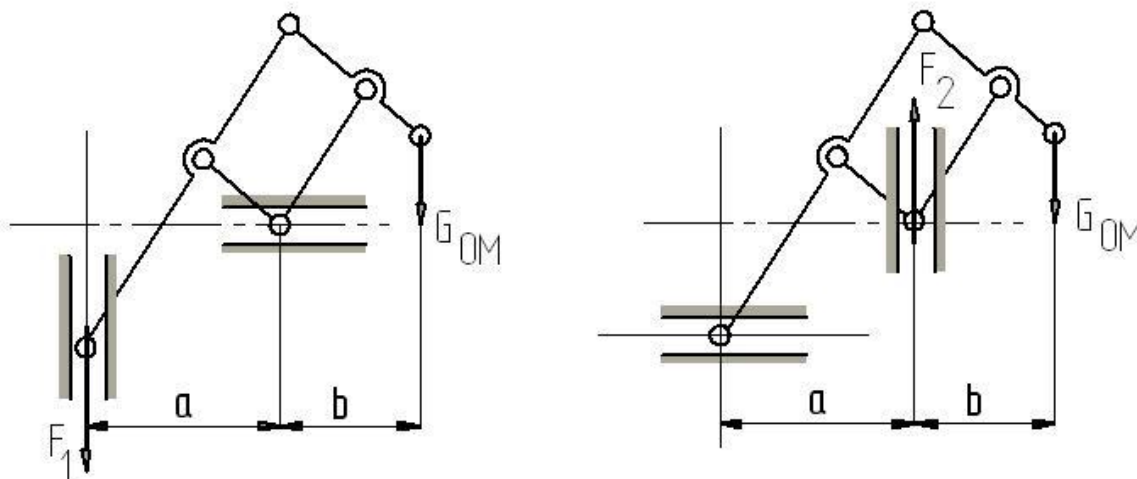
Pracovní bod E se musí pohybovat po horizontále (H = konstantě), protože S = konst.

Podobně při pohybu A po vertikále platí

$$\frac{b}{a} = \frac{\overline{FE} \cos \beta - \overline{FC} \sin \alpha}{\overline{BC} \cos \beta - \overline{AB} \sin \alpha} = k$$

$$b = k a \quad \text{kde } a = \text{konst.}$$

Dále nás bude zajímat situace na pantografu při vyvažování užitečné zátěže realizované v místě připojení efektoru.



Obr. 2.2.1. – 5 Možnosti vyvážení zátěže  $G_{OM}$  silou  $F_1$  nebo  $F_2$

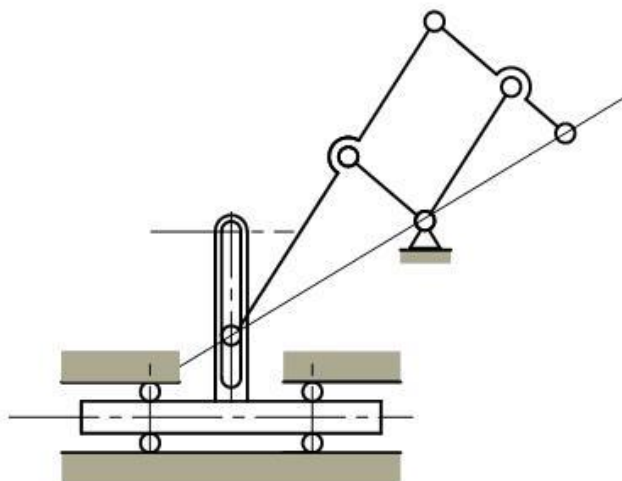
Jednoduchý výpočet dokládá výhodnost řešení podle obr. 2.2.1. – 5 vlevo.

$F_1 = G_{OM} \frac{b}{a}$  vyvážení objektu podle obrázku vlevo, v jakékoliv poloze

$F_2 = G_{OM} \frac{a+b}{a}$  vyvážení pro zobrazení vpravo

$F_2 > F_1$

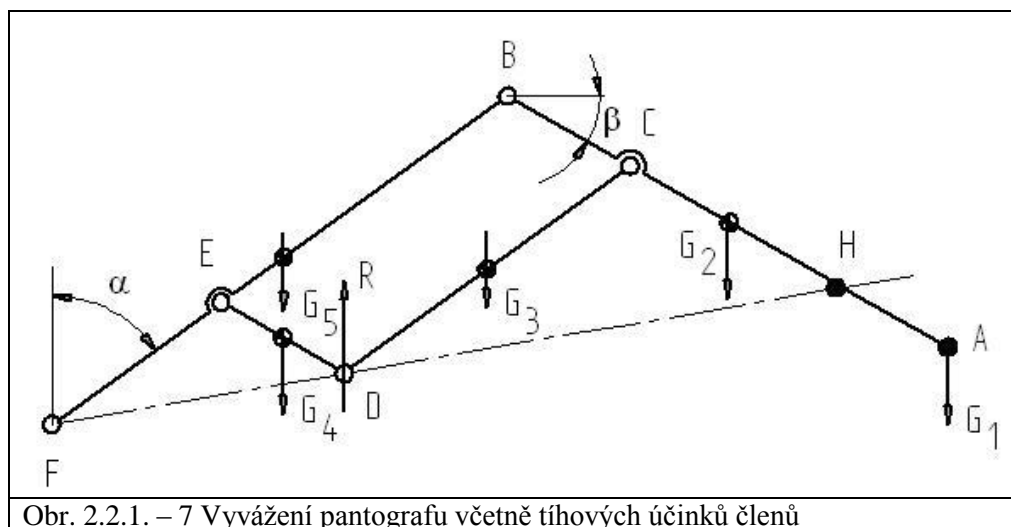
Výhodné konstrukční řešení pantografu z hlediska snadného zajištění přímočarých pohybů vertikálních i horizontálních a tím i snadného řízení v těchto případech je uvedeno na obr. 2.2.1. – 6.



Obr. 2.2.1. – 6 Konstrukční řešení kloubu pro horizontální i vertikální pohyb efektoru

Situace při vyvážení nejen objektu manipulace (s efektořem), ale i členů mechanismu je obecně podstatně složitější než při výše uvedeném vyvažování pouze užitečné zátěže manipulátoru robotu:

Snažíme se dokázat zda mechanismus může být vyvážen konstantní vertikální silou  $R$ . V bodu  $A$  působí tíha objektu manipulace  $G_1$ . Pro zjednodušení předpokládáme, že tíhové



Obr. 2.2.1. – 7 Vyvážení pantografu včetně tíhových účinků členů

účinky členů pantografu působí v polovině jejich délky (členy konstantního průřezu), obr. 2.2.1. – 7.

Podmínky rovnováhy (momentů k F):

$$G_1 \overline{AB} \cos \beta + \overline{BF} \sin \alpha + G_2 \overline{T_2B} \cos \beta + \overline{BF} \sin \alpha + G_3 \overline{T_3D} \sin \alpha + \overline{DE} \cos \beta + \overline{EF} \sin \alpha + G_4 \overline{T_4E} \cos \beta + \overline{EF} \sin \alpha + G_5 \overline{T_5F} \sin \alpha = R \overline{DE} \cos \beta + \overline{EF} \sin \alpha$$

Ve vztahu jsou zanedbány třecí účinky v kloubech. Těžiště hmot členů jsou zavedeny uprostřed členů konstantního průřezu ( $T_x$ ).

Po úpravě rovnice získáme

$$\left( G_1 \overline{AB} + G_2 \overline{T_2B} + G_3 \overline{DE} + \frac{1}{2} G_4 \overline{DE} \right) \cos \beta + \left[ G_1 \overline{BF} + G_2 \overline{BF} + G_3 \left( \frac{1}{2} \overline{CD} + \overline{EF} \right) + G_4 \overline{EF} + G_5 \overline{T_5F} \right] \sin \alpha = R \overline{DE} \cos \beta + R \overline{EF} \sin \alpha$$

Rovnost bude platit, jestliže koeficienty při  $\cos \beta$  a  $\sin \alpha$  na obou stranách rovnice budou stejné.

Pak reakce R pro vyvážení mechanismu

$$R = \frac{G_1 \overline{AB} + G_2 \overline{T_2B}}{\overline{DE}} + G_2 \frac{1}{2} G_4$$

Z této rovnice vyplývá, že R je konstantní a nezávislé na poloze členů pantografu.

Obě získané rovnice umožňují nalézt poměr mezi délkami členů  $\overline{DE}$  a  $\overline{EF}$ , při nichž lze dosáhnout vyvážení mechanismu.

Například při známé délce  $\overline{EF}$  získáme porovnáním obou rovnic pro R a úpravou

$$\overline{DE} = \frac{G_1 \overline{AB} + G_2 \overline{T_2B} \overline{EF}}{G_1 \overline{BF} + G_2 \overline{BF} + 0,5 G_3 \overline{CD} + G_5 \overline{T_5F} + 0,5 G_4 \overline{EF}}$$

Jestliže jsou známy délky členů  $\overline{CD}, \overline{DE}, \overline{BF}$ , pak může být ze stejných rovnic nalezena vzdálenost mezi klouby A a B, při které je zajištěno vyvážení mechanismu:

$$\overline{AB} = \frac{\overline{BF} \overline{DE}}{\overline{EF}} + \frac{G_2 \overline{BF} \overline{DE}}{G_1 \overline{EF}} + \frac{1}{2} \frac{G_2 \overline{CD} \overline{DE}}{G_1 \overline{EF}} + \frac{G_5 \overline{T_5F} \overline{DE}}{G_1 \overline{EF}} + \frac{1}{2} \frac{G_4 \overline{DE}}{G_1} - \frac{1}{2} \frac{G_2 \overline{T_2B}}{G_1}$$

Upravme tuto rovnici pro další úvahy o možnostech vyvážení mechanismu:

Z podobnosti trojúhelníků  $\triangle DEF$  a  $\triangle HBF$  platí

$\frac{\overline{BH}}{\overline{DE}} = \frac{\overline{BF}}{\overline{EF}} \Rightarrow \overline{BH} = \frac{\overline{BF} \overline{DE}}{\overline{EF}}$ , což spolu se vztahem pro  $\overline{AB}$  umožní jeho vhodnější vyjádření

$$\overline{AB} = \overline{BH} + \frac{G_2}{G_1} \overline{BH} - \frac{G_2}{G_1} \overline{T_2 B} + \frac{1}{2} \frac{G_3}{G_1} \frac{\overline{CDDE}}{\overline{EF}} + \frac{G_5}{G_1} \frac{\overline{BHT_5D}}{\overline{BF}} + \frac{1}{2} \frac{G_4}{G_1} \frac{\overline{BHEF}}{\overline{BF}}$$

Ze struktury vztahu pro  $\overline{AB}$ , v porovnání s obrázkem (jde o porovnání velikosti  $\overline{AB}$  a  $\overline{BH}$ ), vyplývá, že je-li těžiště  $T_2$  mezi B a H nebo mezi H a A vždy platí, že  $\overline{AB} > \overline{BH}$  a mechanismus lze přesně vyvážit konstantní velikostí R. Avšak bod A není pracovním bodem a jeho dráha není ekvidistantní vůči pracovním bodům.

Jestliže však ztotožníme H a A bude  $\overline{AB} = \overline{BH}$  a podle výše uvedené rovnice nelze takový mechanismus vyvážit konstantní vertikální silou.

Vyvážení polohovacího systému s pantografem je proto jedním z problémů, které musí být při jeho návrhu řešeny. V případě aplikace pantografu u balancerů (jako jednoduchých manipulačních zařízení ovládaných operátorem a pracujících malými rychlostmi) umožňuje vyvážení závaží v rámci celého pracovního prostoru.

U zařízení s velkou nosností a velkým pracovním prostorem, případně při pohybech velkou rychlostí (zrychlením) by moment setrvačnosti závaží ztěžoval činnost operátora, či při aplikaci na polohovací ústrojí robotu by pak zbytečně vyžadoval vyšší momentové účinky motoru pohonu.

## 2.2.2. Kinematické struktury a geometrické poměry polohovacích ústrojí s pantografy

Přes principiální jednoduchost pantografu mohou být jeho aplikace v polohovacích ústrojích robotů velmi rozmanité a variabilní z různých hledisek a možností, zejména z hlediska technologičnosti konstrukce. Následující příklad analýzy řešení a odvození důsledků má demonstrovat směr úvah při návrhu konstrukce pantografu.

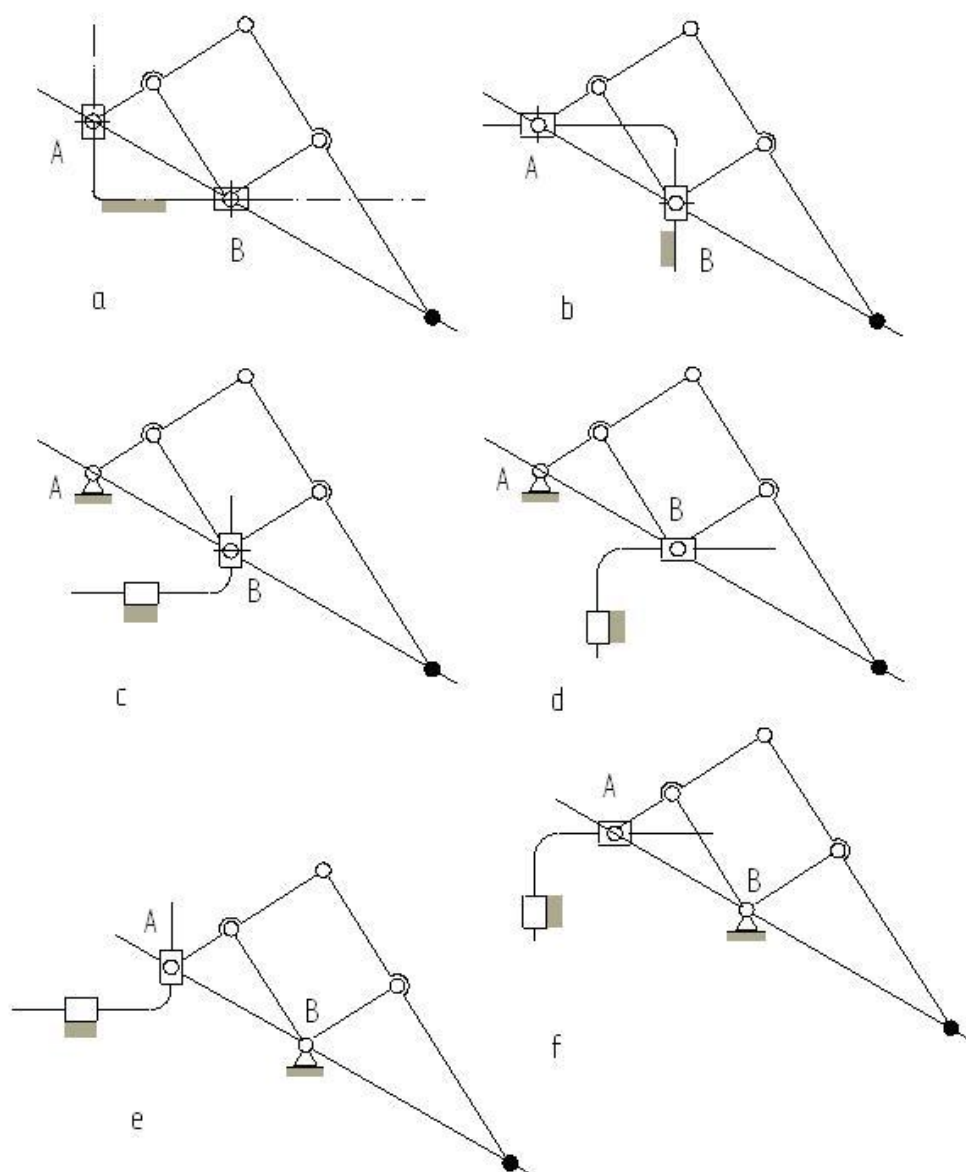
Variabilitu ukažme na jednom, často využívaném schématu konstrukčního uspořádání pantografu (obr. 2.2.2.-1):

V jednotlivých případech a – f lze pro pohon využít motorů rotačních nebo lineárních, čímž se variabilita řešení dále rozšiřuje.

V dalších úvahách pro odvození rozměrů pantografu budeme pracovat se schématem podle varianty a.

Konfigurace pantografu (obr. 2.2.2. – 2) je dána úhly  $\varphi$  a  $\psi$  polohou členů spojených s rámem 5 (S), 6 (T). Zvláštní roli při konstrukci mají poměry v obrazci znázorněném v obr. 2.2.2. – 3, viz hodnotu  $\lambda$  a délku členu BE, který se volí v jednotkové délce.

Člen 1 se označuje jako počáteční, člen 2 jako uzavírací a členy 3, 4 jako vložené.



Obr. 2.2.2. – 1 Zobrazení možných variant řešení vybraného schématu pantografu

### Stanovení rozměrů jednotlivých členů pantografu

Délky členů pantografu 1 – 4 lze odvodit z podobnosti trojúhelníků konstruovaných nad pracovní přímkou procházející pracovními body A, B. Jedná se o trojúhelníky ACD, AEB a BFC.

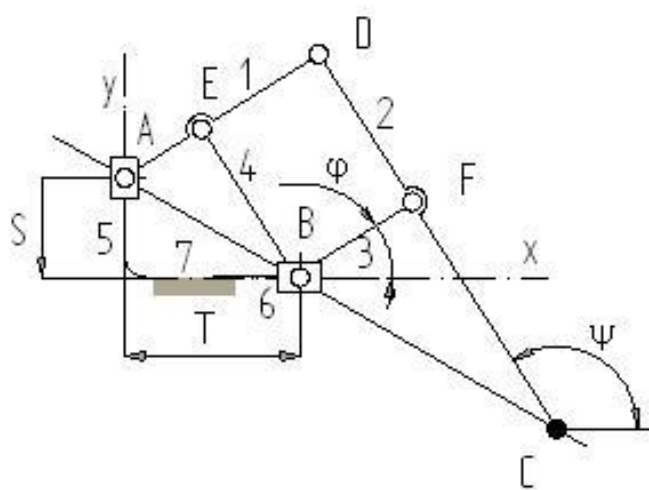
Převodový poměr pantografu je definován jako

$$i_p = \frac{AC}{AB} = \frac{l_2}{l_4} = \frac{l_1}{l_1 - l_3}$$

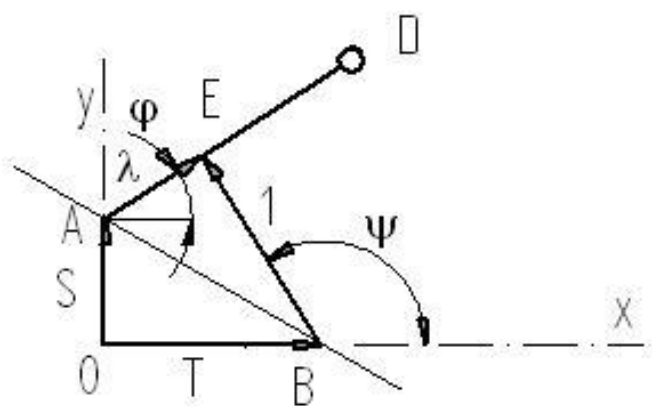
Konstrukční parametr  $\lambda$  se zavádí jako další důležitá charakteristika jeho konstrukce



$$\lambda = \frac{\overline{AD}}{\overline{DC}} = \frac{l_1}{l_2} = \frac{l_1 - l_3}{l_4} = \frac{l_3}{l_2 - l_4}$$



Obr. 2.2.2. - 2 Popis pantografu



Obr. 2.2.2. - 3 Vektorový obrazec

Délky jednotlivých členů jsou pak

$$l_1 = (l_1 - l_3) i_p = \lambda l_4 i_p$$

$$l_2 = l_4 i_p$$

$$(l_1 - l_3) = \lambda l_4 = \overline{AE} \Rightarrow l_3 = l_1 - \lambda l_4 = \lambda l_2 - \lambda l_4 = \lambda (l_2 - l_4)$$

$$l_3 = \lambda (l_2 - l_4)$$

$$l_4$$

Do výpočtu vstupují jako volitelné hodnoty -  $\lambda, l_4, i_p$

Jestliže z praktických důvodů pro předběžný návrh zvolíme  $l_4 = 1$ , pak se nám vztahy pro výpočet délek členů zjednoduší na

$$l_1 = \lambda i_p$$

$$l_2 = i_p$$

$$l_3 = \lambda (i_p - 1)$$

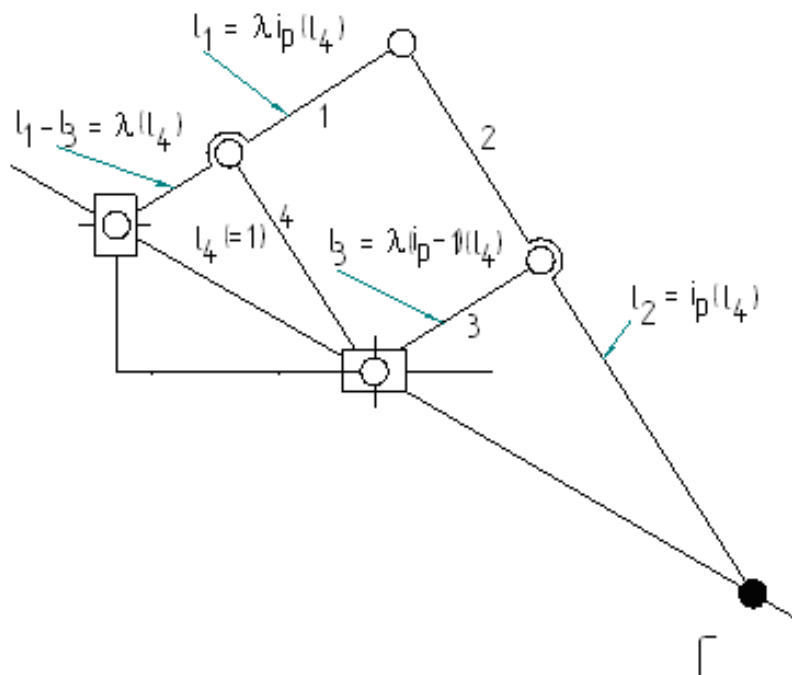
Po volbě skutečné velikosti  $l_4$  pronásobíme délky ostatních členů v měřítku touto hodnotou (obr. 2.2.2. - 4).

### 2.2.3. Silové poměry v pantografu – reakce

Polohovací ústrojí manipulátoru robotu, využívající pantograf, lze vyšetřovat jako systém hmotných bodů s ideálními vazbami za předpokladu, že:

- Všechny členy jsou absolutně tuhé
- Tíhové účinky jsou zavedeny v těžištích členů
- Všechny klouby jsou ideální (v dalším lze třecí síly zavést do rovnic jako neznámé aktivní síly).

V rámci předběžného návrhu zahrneme dynamické účinky opravnými koeficienty, postupně upřesňovanými.



Obr. 2.2.2. – 4 Délky jednotlivých členů pantografu

### Výpočet reakcí v kloubech pantografu

Neznámé složky reakcí je vhodnější rozkládat do os souřadného systému než do os členů pantografu (obr. 2.2.3. – 1). Jako  $R_{nk}$  budeme označovat reakci působící ze členu  $k$  na  $n$ .

Reakce v kloubech A, B

Z podmínek rovnováhy celého paralelogramu platí:

$$\begin{aligned}\sum F_x = 0 &\Rightarrow R_{Ax} = R_{Bx} = \underline{\underline{0\text{ N}}} \\ \sum M_B = 0 &\Rightarrow R_A = R_{Ay} = G_{OM} \cdot (i_p - 1) \\ \sum M_A = 0 &\Rightarrow R_B = R_{By} = G_{OM} \cdot i_p\end{aligned}$$

Pozn. Velikost reakcí v kloubu A a B je pro všechny polohy paralelogramu stejná.

Reakce v kloubu F

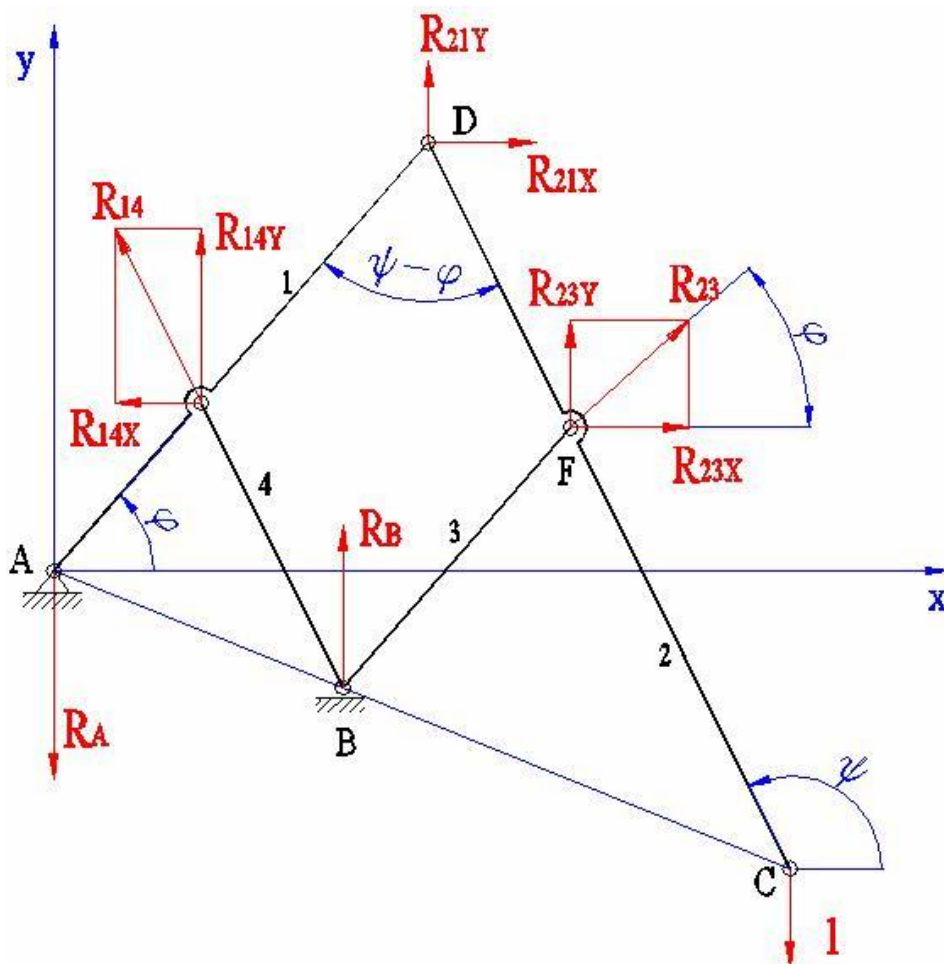
Z podmínky rovnováhy pro člen 2 platí:

$$\sum M_D = 0 \dots R_{23} \cdot l_4 \cdot \sin(\psi - \varphi) + G_{OM} \cdot l_2 \cdot \cos\psi = 0$$

$$\Rightarrow R_{23} = \frac{-G_{OM} \cdot l_2 \cdot \cos\psi}{l_4 \cdot \sin(\psi - \varphi)}$$

$$- R_{23x} = R_{23} \cdot \cos\varphi$$

$$- R_{23y} = R_{23} \cdot \sin\varphi$$



Obr. 2.2.3. – 1 Zavedení reakcí do kloubů pantografu

Reakce v kloubu D

Z podmínek rovnováhy pro člen 2 platí:

$$\sum F_x = 0 \dots R_{23x} + R_{21x} = 0 \Rightarrow R_{21x} = -R_{23x}$$

$$\sum F_y = 0 \dots R_{23y} + R_{21y} - G_{OM} = 0 \Rightarrow R_{21y} = G_{OM} - R_{23y}$$

$$- R_{21} = \sqrt{R_{21x}^2 + R_{21y}^2}$$

Reakce v kloubu E

Z podmínky rovnováhy pro člen 1 platí:

$$\sum M_D = 0 \dots R_A \cdot l_1 \cdot \cos \varphi - R_{14} \cdot l_3 \cdot \sin(\psi - \varphi) = 0$$

$$\Rightarrow R_{14} = \frac{R_A \cdot l_1 \cdot \cos \varphi}{l_3 \cdot \sin(\psi - \varphi)}$$

$$- R_{14x} = R_{14} \cdot \cos \psi$$

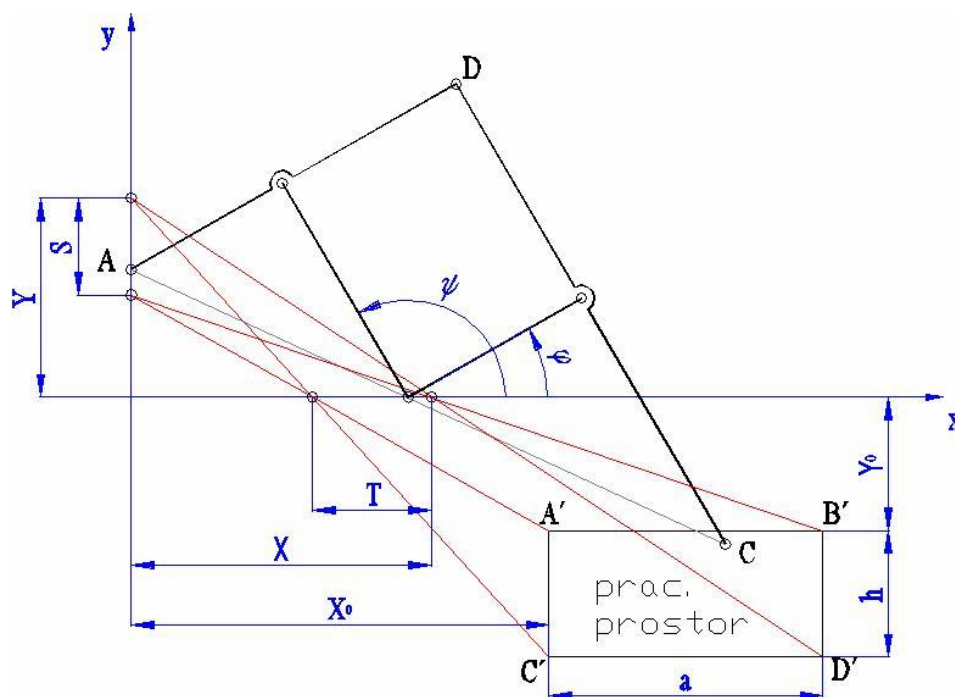
$$- R_{14y} = R_{14} \cdot \sin \psi$$

Reálné hodnoty reakcí by měly být modifikovány započtením dynamických účinků, tíhy členů pantografu a silových účinků z vyvažovacího zařízení (což je možné až po návrhu rozměrů členů pantografu a vyvažovacího ústrojí, a to v rámci kontrolního výpočtu).

## 2.2.4. Návrh pantografu

Při návrhu pantografu je třeba stanovit délkové rozměry jeho členů podle zadaných rozměrů pracovního prostoru, a to při omezeních vzhledem ke koliznímu prostoru (např. omezení výškou podhledu). Žádaná je také minimalizace délek členů a spotřeba materiálů (minimalizace průřezu členů).

Při geometrické syntéze je nutné uvažovat trvalé reakce v podporách a kloubech, které závisí na  $\varphi$ ,  $\psi$  a délkách členů, rozměrem pracovního prostoru a souřadnicemi  $X_0$ ,  $Y_0$  bodu pracovního prostoru, který je nejbližší k počátku souřadného systému.



Obr.2.2.4.–1 Návrh rozměrů pantografu podle požadovaného pracovního prostoru

Pro syntézu jsou důležité parametry:

a, h

$Y_0$

$y_{Dmax}$

$i_p = l_2 / l_4$

S, T

$l_j$  při  $l_1 = l_4 \lambda i_p$

$l_2 = l_4 i_p$

$l_3 = (i_p - 1) \lambda l_4$

$\lambda = l_1 / l_2$

$\phi, \psi$

$G_z$  – vypočtená hodnota užit. zařízení z OM

$R_{ji \max}$  = maximální přípustná hodnota reakcí v kloubech

Pro univerzální manipulátory jsou dány: a, l,  $G_z$ ,  $R_{ji \max}$

Kromě toho mohou být uplatněny doplňkové požadavky a omezení na polohu pracovního prostoru a jeho rozměry  $X_o, Y_o, H, y_o$  – výška spodní hranice pracovního prostoru.

## 2.2.5. Pohony – druhy, silové a momentové účinky

Polohovací ústrojí (pantograf) lze vyšetřovat jako systém hmotných bodů s ideálními vazbami za předpokladu, že:

- členy jsou absolutně tuhé
- tíhové účinky jsou zavedeny v těžištích  $k_j$
- všechny klouby jsou ideální (v dalším lze třecí síly do rovnice zanést jako neznámé aktivní síly).

Vzhledem k tomu, že dynamické účinky některých manipulátorů (viz např. balancéry) nejsou velké, lze výpočtový model vyšetřovat jako statický.

V obr. 2.2.5.-1 až 8 jsou schémata možného uspořádání pohonů pro polohovací ústrojí manipulátorů na bázi pantografu. Jednotlivé poháněcí účinky – síly či momenty lze zjistit z podmínek rovnováhy pro užitečnou zátěž objektem manipulace v efektoru a také tíhovými účinky jednotlivých členů pantografu. Hodnoty  $\rho_i$  jsou ramena těžišť pro jednotlivé tíhové účinky členů.

Pro jednotlivé případy pak platí pro rotační nebo lineární motory v kloubech:

$$1) M_A \phi, \psi = G_1 \cdot \rho_1 - \lambda \cdot l_4 + G_2 + G_7 \cdot i_p - 1 \cdot \lambda \cdot l_4 + G_3 \cdot \rho_3 - G_5 \cdot \lambda \cdot l_4 \cdot \cos \phi$$

$$M_B \phi, \psi = \left[ G_1 \cdot l_4 - G_2 \cdot \rho_2 + G_4 \cdot \rho_4 + G_5 \cdot l_4 - G_7 \cdot i_p - 1 \cdot l_4 \right] \cdot \cos \psi$$

kde  $G_7$  je tíha objektu manipulace a efektoru.

$$2) M_A \phi, S = G_1 \cdot \rho_1 - G_2 \cdot \rho_2 \cdot \lambda + G_2 \cdot i_p - 1 \cdot \lambda \cdot l_4 + G_3 \cdot \rho_3 + G_4 \cdot \rho_4 \cdot \lambda \cdot \cos \phi$$

$$F_A \phi, S = G_1 - G_2 \cdot \frac{\rho_2}{l_4} + G_4 \cdot \frac{\rho_4}{l_4} + G_5 - G_7 \cdot i_p - 1$$

3)

$$M_A \phi, T = G_1 \cdot \rho_1 - \lambda \cdot l_4 + G_2 + G_7 \cdot i_p - 1 \cdot \lambda \cdot l_4 + G_3 \cdot \rho_3 - G_5 \cdot \lambda \cdot l_4 \cdot \cos \phi + \\ + G_1 \cdot l_4 - G_2 \cdot \rho_2 + G_4 \cdot \rho_4 + G_5 \cdot l_4 - G_7 \cdot i_p - 1 \cdot l_4 \cdot \lambda \cdot \sin \phi \cdot \cot g \psi$$

$$F_B \phi, T = G_1 - G_2 \cdot \frac{\rho_2}{l_4} + G_4 \cdot \frac{\rho_4}{l_4} + G_5 - G_7 \cdot i_p - 1$$

4)

$$M_B \psi, S = \left\{ \frac{G_1 \cdot \rho_1}{\lambda} + \frac{G_2 \cdot \rho_3}{\lambda} + G_4 \cdot \rho_4 - G_3 \cdot \rho_2 + G_2 \cdot i_p - 1 \cdot l_4 \right\} \cdot \cos \psi$$

$$F_A \psi, S = G_1 \left[ 1 - \frac{\rho_1}{\lambda \cdot l_4} \right] - G_2 \cdot i_p - 1 - \frac{G_3 \cdot \rho_3}{\lambda \cdot l_4} + G_5 - G_7 \cdot i_p - 1$$

5)

$$M_B \psi, T = G_1 \cdot l_4 - G_2 \cdot \rho_2 + G_4 \cdot \rho_4 + G_5 \cdot l_4 - G_7 \cdot i_p - 1 \cdot l_4 \cdot \cos \psi + \\ + \left\{ G_1 \left( \frac{\rho_1}{\lambda} - l_4 \right) + G_2 \cdot i_p - 1 \cdot l_4 + G_3 \cdot \frac{\rho_3}{\lambda} - G_5 \cdot l_4 + G_7 \cdot i_p - 1 \cdot l_4 \right\} \cdot \sin \psi \cdot \cot g \phi$$

$$F_B \psi, T = \left\{ G_1 \left[ 1 - \frac{\rho_1}{\lambda \cdot l_4} \right] - G_2 \cdot i_p - 1 - \frac{G_3 \cdot \rho_3}{\lambda \cdot l_4} + G_5 - G_7 \cdot i_p - 1 \right\} \cdot \cot g \phi$$

6)

$$F_A S, T = G_1 + G_5 - G_7 \cdot i_p - 1 + \left( G_4 \cdot \frac{\rho_4}{l_4} - G_2 \cdot \frac{\rho_2}{l_4} \right) \cdot \frac{\sin \phi \cdot \cos \psi}{\sin \phi - \psi} + \\ + \left[ G_1 \cdot \frac{\rho_1}{l_4} + G_2 \cdot i_p - 1 + G_3 \cdot \frac{\rho_3}{\lambda \cdot l_4} \right] \cdot \frac{\cos \phi \cdot \sin \psi}{\sin \phi - \psi}$$

$$F_B S, T = \left[ G_1 \cdot \frac{\rho_1}{\lambda \cdot l_4} + G_2 \cdot \left( i_p - 1 - \frac{\rho_2}{l_4} \right) + G_3 \cdot \frac{\rho_3}{\lambda \cdot l_4} + G_4 \cdot \frac{\rho_4}{l_4} \right] \cdot \frac{\cos \phi \cdot \cos \psi}{\sin \phi - \psi}$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že výrazy v závorkách jsou konstantami, v některých případech jsou i pohonné účinky konstantní, jindy pak jednodušší až velmi složitou goniometrickou funkcí. Z hlediska vyvážení a řízení jsou složité výrazy nevýhodné!

Konstrukčně nejjednodušší jsou realizace schémat, ve kterých pohonné účinky jsou buď konstantní nebo funkcemi nejvíce jedné proměnné.

Pro schéma podle 1) momenty závisí na konfiguraci mechanismu a také na užitečném zatížení  $G_7$ , ostatní parametry jsou konstantní.

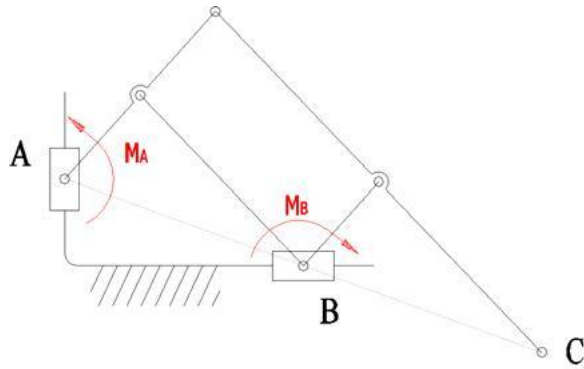
Odpovídající konstrukce musí mít 2 systémy momentového vyvážení spojené se členy 1 a 4 a kompenzující moment nevyvážení vlastních tíhových účinků pantografu, a také pohony vyvozující doplňkové momenty úměrné užitečnému zatížení.

U konstrukce podle 2) nezávisí  $F_A$  na konfiguraci mechanismu a odpovídající konstrukce zahrnuje jeden vyvažovací systém s  $M_A$ . Toto řešení vyhovuje jednomu ze základních požadavků na polohování. Ústrojí – zatížení pohonu je invariantní vzhledem k souřadnicím bodů pracovního prostoru a závisí na tíhových a geometrických charakteristikách polohovacího ústrojí (konstrukcích pro každý model) a hodnotě užitečného zatížení, které je zpravidla konstantní

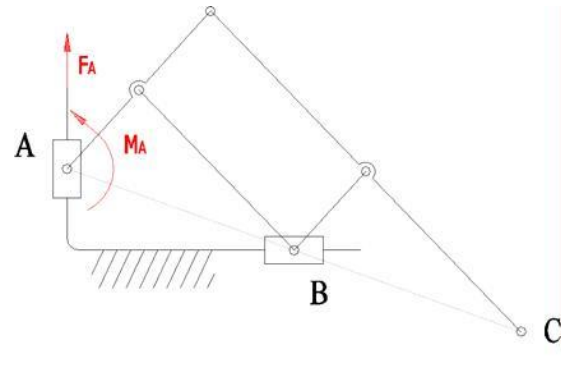
v průběhu jedné technologické operace. Moment  $M_A$  nezávisí na užitečném zatížení a jen na jednom proměnném parametru  $\varphi$ .

Pro ostatní modely jsou statická zatížení hnacích členů funkcí nejméně jednoho proměnného parametru a hodnoty užitečného zatížení, což komplikuje jejich praktickou realizaci.

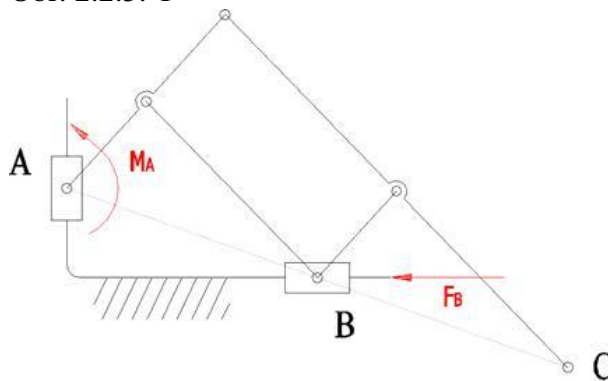
Sestavu se dvěma pohonnými posuvnými dvojicemi našla uplatnění v několika modulech průmyslových robotů, což je podmíněno dosti jednoduchou konstrukcí pohonů a také tím, že díky lineární funkci polohy se podstatně zjednoduší programování pohybu polohovacího ústrojí robotu.



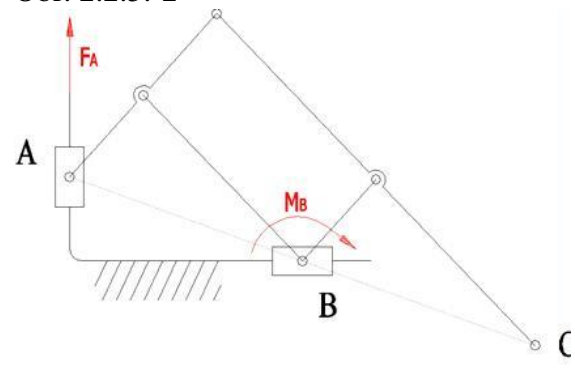
Obr. 2.2.5.-1



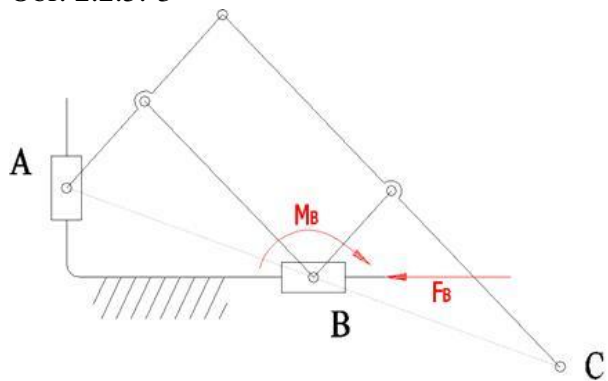
Obr. 2.2.5.-2



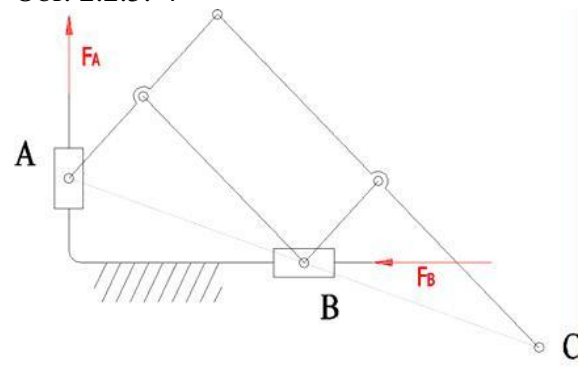
Obr. 2.2.5.-3



Obr. 2.2.5.-4



Obr. 2.2.5.-5



Obr. 2.2.5.-6



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se seznámili s následujícími pojmy:

Paralelogram

Pantograf

Pracovní přímka, pracovní body

Výpočet a návrh pantografu



## Kontrolní otázka

- 1) Jak se liší pantograf od paralelogramu?
- 2) Z čeho vychází stanovení délek na pantografu?
- 3) Které jsou základní parametry pro návrh pantografu?
- 4) Jaké jsou možné konfigurace pohonů pantografu a odpovídající poháněcí síly a momenty?



## Úkol k řešení

Stanovte si k obrázkům pantografu podle 2.2.5.-1 až 6 rozměry jednotlivých členů a zátěž v bodu C a vypočtěte jednotlivé síly a momenty na pohonech. (použijte ramena konstantního profilu a zanedbejte účinky kloubů)!



## CD-ROM

K doplnění poznatků o užití průmyslových robotů si prohlédněte videa v souborech: Prevodovky a Roboty s kulovými klouby.

Videosoubor Prevodovky představuje nový typ planetové převodovky a také převodovky cykloidní s výhodnými parametry pro uplatnění v robototechnice. Jejich konstrukce a výhody i nevýhody jsou uvedeny u jednotlivých konstrukcí.

Roboty s kulovými klouby pak ukazují moderní řešení kloubů robotů jako modulů univerzálně využitelných k různým konstrukcím ramen manipulačních jednotek (které lze dnes navrhovat také v modulární řadě s různými typorozměry)..



### 3. PRINCIPY A METODIKA VÝPOČTU AKČNÍHO SUBSYSTÉMU ROBOTŮ

Po úspěšném a aktivním absolvování tohoto BLOKU

<p>Budete schopni analyzovat a aplikovat:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ vhodný výpočtový postup</li><li>▪ analytický výpočet</li><li>▪ výpočet s podporou počítače</li><li>▪ funkční výpočet</li></ul>	<p>Cíle přednáškového bloku</p>
--	---------------------------------

<p><i>Deformační výpočty, analytické výpočty, výpočty s podporou PC, software, akční subsystém, funkční výpočty, robot, akční subsystém</i></p>	<p>Klíčová slova</p>
---	----------------------



**Čas ke studiu:** 3 hodiny

### 3.1. DRUHY VÝPOČTŮ AKČNÍHO SUBSYSTÉMU ROBOTŮ A MOŽNÉ POSTUPY

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

<p>Budete umět aplikovat:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ analytický deformační a pevnostní výpočet pro prvky akčního subsystému robotu</li> <li>▪ deformační a pevnostní výpočet s podporou PC a užitím vybraného software pro prvky akčního subsystému robotu</li> <li>▪ funkční výpočty akčního subsystému robotu</li> </ul>	Cíle kapitoly
--	---------------

<p><i>Deformační výpočty, analytické výpočty, výpočty s podporou PC, software, akční subsystém, funkční výpočty, robot, akční subsystém</i></p>	Klíčová slova
---	---------------



**Čas ke studiu:** 3 hodiny



#### VÝKLAD

Manipulátor robotu – podle definice (viz PRaM) akční subsystém robotu, sestávající z nosného a výkonného subsystému, musí být pro správný návrh doložen výpočty funkčními, návrhovými a kontrolními. Ty jsou aplikovány v různých fázích návrhu robotu a zpracování jeho technické dokumentace. Jejich rozsah je značný. Navíc se překrývají výpočty obvyklé pro strojní zařízení a svým způsobem standardizované a výpočty z oblasti řízení – to je specifická záležitost pro mechatronické systémy a tedy i pro roboty.

Je třeba si uvědomit a promyslet kdy které postupy jsou potřebné a kdy jsou a v jaké hloubce a šíři využitelné. V každém případě je nutno znát a užívat všechny poznatky z pružnosti a pevnosti, mechaniky a částí strojů. Mnohé z nich (zejména z Částí strojových) jsou dnes standardizovány zavedením a vyžíváním systémů počítačové podpory. CAD systémy jsou také velkou podporou návrhářům robotů i při statických a dynamických výpočtech i složitých kinematických řetězců stávajících typů robotů.

Je zřejmé, že při návrhu zcela nového manipulátoru robotu nelze užít postupů stanovení sil a momentů užívaných při řízení robotů – tehdy již známe podrobně rozložení hmot, momenty setrvačnosti, polohy těžišť, užívané motory, převody a jejich parametry, atd. To samozřejmě v prvních fázích návrhu známo není a nastupuje tedy využití znalostí a zkušeností z předešlých vlastních nebo cizích konstrukcí, formulovaných do určitých souborů dat a závislostí – vytvoření know how.

Je zde také nutné poukázat, že systémy počítačové podpory, které jsou velmi významnými nástroji současných konstruktérů mají i svá omezení a analytické výpočty studované v pružnosti a pevnosti, byť neoblíbené, jsou stále významným kontrolním nástrojem k výsledkům získaným z CADů a také nástrojem pro podporu tvorby know how.

V této kapitole se dost dobře nemůžeme vrátet ke všem tématům z předchozích disciplin a k jejich podrobnému uplatnění v konstrukci manipulátorů robotů, ale ukážeme na příkladech některé souvislosti. Mnohé výpočty byly uvedeny již ve skriptu PRaM a v tomto studijním materiálu v jiných kapitolách. Je nezbytné na základě těchto úvodních poznámek se k nim je znovu vrátet.

### 3.1.1. Deformační výpočty

U manipulátorů robotů, až na výjimky, nejsou mezní stavy dány velikostí napětí v průřezích jednotlivých prvků konstrukce, ale omezením velikostí deformací. Ty se projevují v přesnosti dosažené polohy a orientace objektu manipulace, zejména při dynamických zatíženích, které jsou u robotů běžné. Také kmitání konstrukce s určitou frekvencí a maximální výchylkou a tlumením je nutné stanovit, analyzovat a podle potřeby omezit

Pro výše uvedenou konfrontaci mezi analytickým výpočtem a výpočty s podporou některého z CAD systémů uveďme konkrétní příklad.

#### Kontrolní výpočty prvků nosného subsystému

Kontrolním výpočtům prvků nosného subsystému robotu předchází předběžný návrh akčního subsystému:

- topologie (kinematické struktury) akčního subsystému
- geometrie akčního subsystému
- kinematiky akčního subsystému
- zátěžných sil a momentů (statických i dynamických)
- tvary (průřezy) a materiály jednotlivých prvků (ramen) akčního subsystému.

Kontrola prvků nosného subsystému zahrnuje výpočty **tuhosti** a **pevnosti**. Z důvodu dosažení vysoké přesnosti polohy efektoru je u manipulátorů robotů z hlediska dimenzování rozhodující **tuhost** konstrukce. Mezními stavy jsou tedy přípustné deformace jednotlivých prvků nosného subsystému robotu. Z hlediska pevnosti při použití konvenčních materiálů obvykle vychází poměrně velký koeficient bezpečnosti.

#### Příklad kontrolního výpočtu nosných prvků translačních členů polohovacího ústrojí cylindrického ( $R_z T_{x(y)} T_z$ ) systému

##### *Analytické řešení*

Výpočet se provádí postupně od užitečné zátěže k základu.

Deformace jednotlivých prvků se za účelem vyřešení vektoru přemístění koncového bodu polohovacího ústrojí sčítají.

Pro názornost a průhlednost výpočtu jsou uvažovány pouze gravitační účinky.

**Q** – tíha objektu manipulace (OM), efektoru (E) a orientačního ústrojí (OÚ)

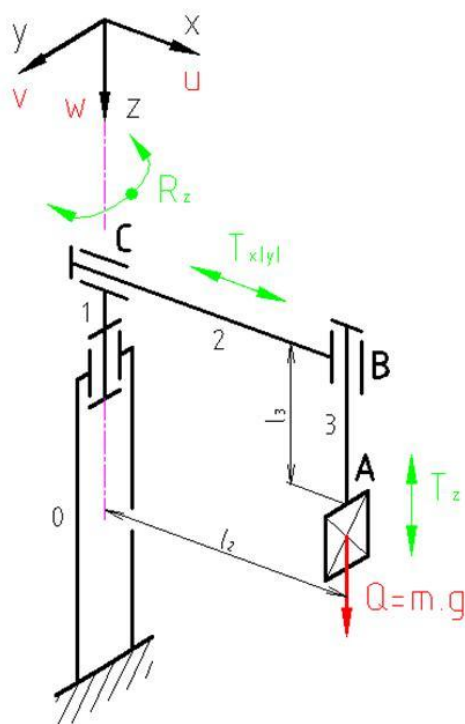
**q<sub>i</sub>** – měrná tíha i-tého článku vyjadřující vlastní tíhu délkové jednotky profilu i-tého článku

**l<sub>i</sub>** – délka i-tého článku

**S<sub>i</sub>** – plocha průřezu i-tého článku

**W<sub>o<sub>iy</sub></sub>** – kvadratický modul průřezu i-tého článku v ohybu (k ose y)

$J_{iy}$  – osový moment setrvačnosti plochy průřezu i-tého článku (k ose y)



Obr. 3.1.1. – 1 Výpočet členů cylindrického ústrojí

### Článek 3 – $T_z$

Způsob namáhání: **TAH** od  $Q$  a  $q_3$

Vyřešit:  $\sigma_3(z)$ ,  $\Delta l_3 = w_{3A}$

Průběh tahového napětí:

$$\sigma_3(z) = \frac{Q}{S_3} + \frac{q_3}{S_3} \cdot z$$

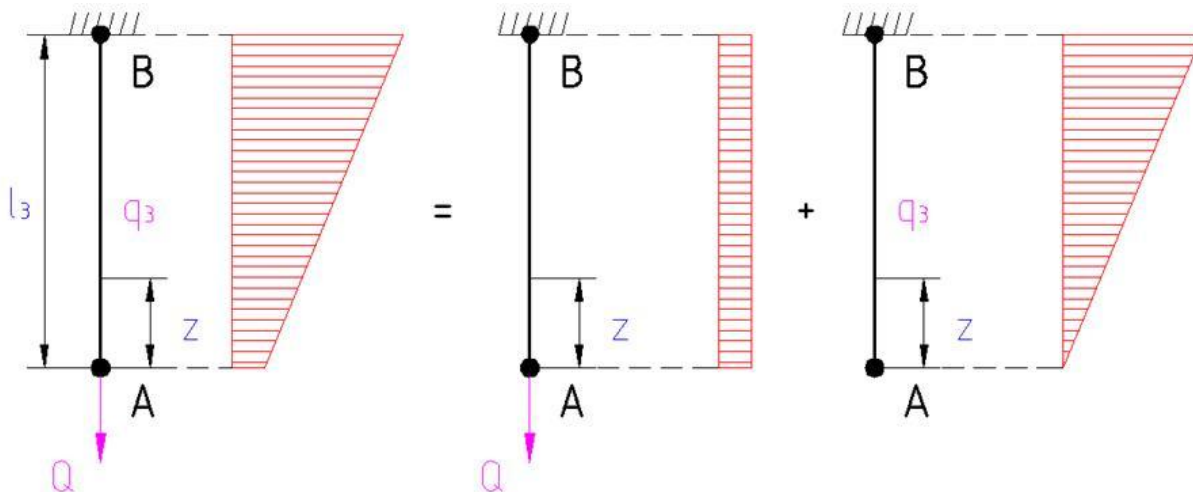
Prosté prodloužení článku 3:

$$w_{3A} = \Delta l_3 = \frac{Q \cdot l_3}{E \cdot S_3} + \frac{q_3 \cdot l_3^2}{2 \cdot E \cdot S_3}$$

### Článek 2 – $T_{x(y)}$

Způsob namáhání: **OHYB** od  $Q + q_3 \cdot l_3$  a  $q_2$

Vyřešit:  $\sigma_2(x)$ ,  $w_{2B}$ ,  $\varphi_{2B}$



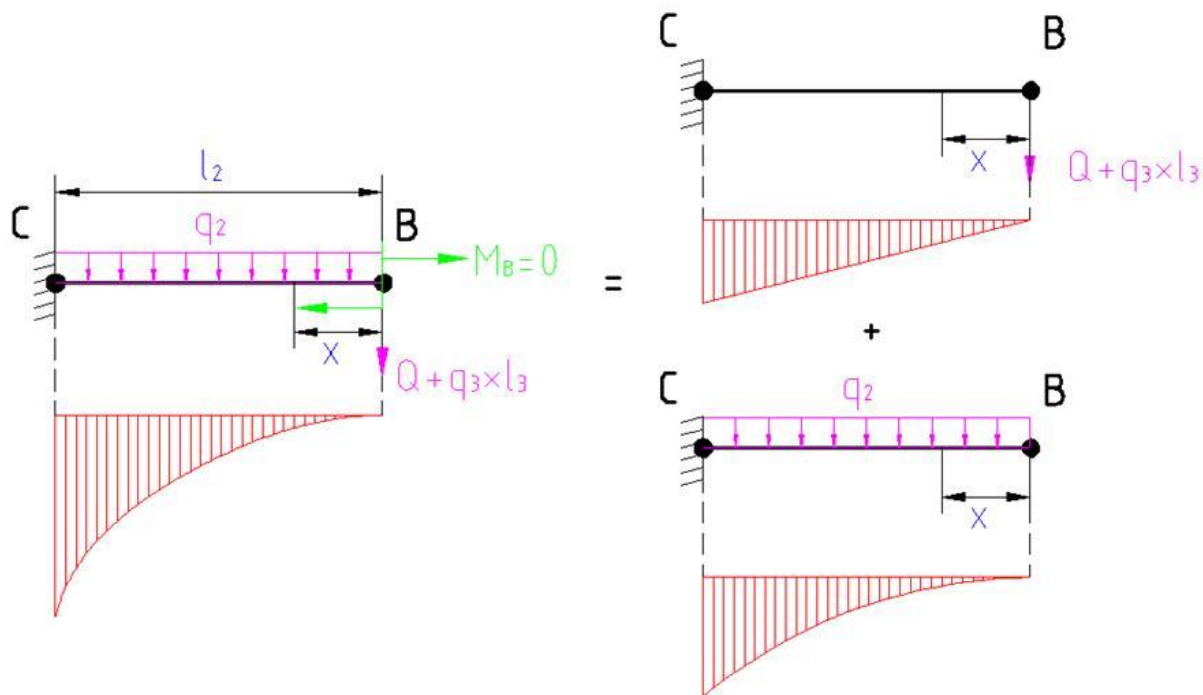
Obr. 3.1.1. – 2 Průběh napětí v článku 3 –  $T_z$

Průběh ohybového napětí v krajních vláknech průřezu článku 2:

$$\sigma_2(x) = \frac{M_{o(Q+q_3 \cdot l_3)}(x)}{J_{2y}} \cdot z_{2\max} + \frac{M_{o(q_2)}(x)}{J_{2y}} \cdot z_{2\max} = \frac{Q + q_3 \cdot l_3}{W_{o2y}} \cdot x + \frac{q_2}{2 \cdot W_{o2y}} \cdot x^2$$

Průhyb článku 2 v místě B:

$$w_{2B} = \frac{\partial W_2}{\partial (Q + q_3 \cdot l_3)} = \frac{1}{E \cdot J_{2y}} \cdot \left( \frac{Q + q_3 \cdot l_3}{3} \cdot l_3^3 + \frac{q_2}{8} \cdot l_2^4 \right)$$


 Obr. 3.1.1. – 3 Průběh napětí v článku 2 –  $T_{x(y)}$ 

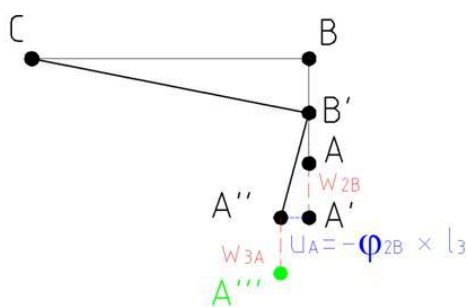
Úhel natočení článku 2 v místě B:

$$\varphi_{2B} = \frac{\partial W_2}{\partial M_B} = \frac{1}{E \cdot J_{2y}} \cdot \left( \frac{Q + q_3 \cdot l_3}{2} \cdot l_2^2 + \frac{q_2}{6} \cdot l_2^3 + M_B \cdot l_2 \right)$$

### Vyšetření přemístění koncového bodu A polohovacího ústrojí robotu

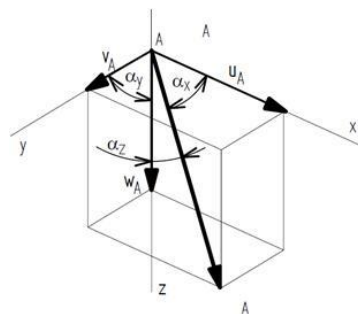
Přemístění koncového bodu A v jednotlivých osách:

$$\begin{aligned} u_A &= -\varphi_{2B} \cdot l_3 \\ v_A &= 0 \\ w_A &= w_{3A} + w_{2B} \end{aligned}$$



Vektor (celkového) přemístění koncového bodu a jeho směrové úhly:

$$\begin{aligned} \delta_A &= \sqrt{u_A^2 + v_A^2 + w_A^2} \\ \cos \alpha_x &= \frac{u_A}{\delta_A}; \cos \alpha_y = \frac{v_A}{\delta_A}; \cos \alpha_z = \frac{w_A}{\delta_A} \end{aligned}$$



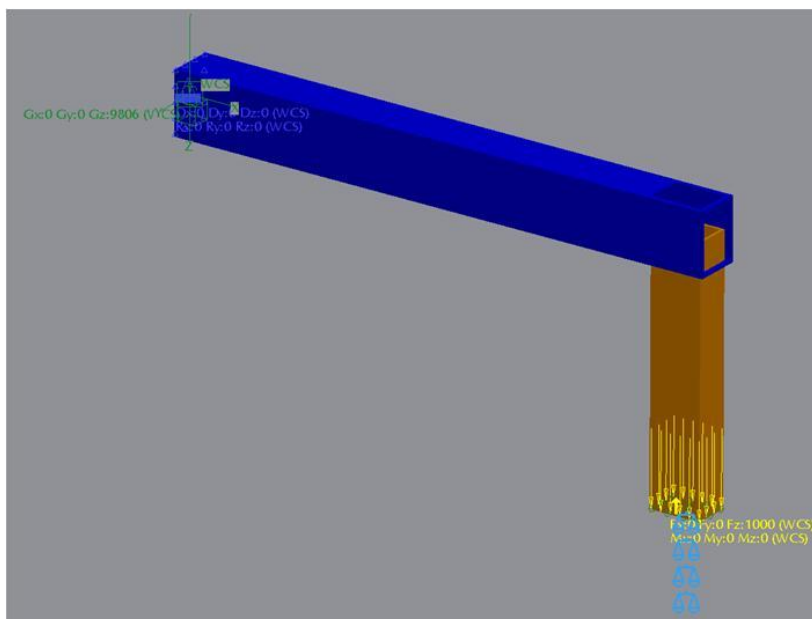
Pro konkrétní předběžně navržené a vypočítané hodnoty nosného subsystému (analytické řešení v programu MathCad):

<p><b>Dáno:</b></p> <p><math>Q := 1000\text{N}</math>  <math>E := 2.1 \cdot 10^5 \text{MPa}</math>  <math>\rho := 7850 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}</math></p> <p><math>l_3 := 500 \text{mm}</math>  <math>B_3 := 70 \text{mm}</math>  <math>H_3 := 100 \text{mm}</math>  <math>b_3 := 60 \text{mm}</math>  <math>h_3 := 90 \text{mm}</math>  <math>S_3 := B_3 \cdot H_3 - b_3 \cdot h_3</math>  <math>q_3 := S_3 \cdot \rho \cdot g</math></p>	<p><math>l_2 := 1000 \text{mm}</math>  <math>B_2 := 90 \text{mm}</math>  <math>H_2 := 120 \text{mm}</math>  <math>b_2 := 80 \text{mm}</math>  <math>h_2 := 110 \text{mm}</math>  <math>S_2 := B_2 \cdot H_2 - b_2 \cdot h_2</math>  <math>q_2 := S_2 \cdot \rho \cdot g</math>  <math>W_{o2y} := \frac{B_2 \cdot H_2^3 - b_2 \cdot h_2^3}{6 \cdot H_2}</math>  <math>J_{2y} := \frac{B_2 \cdot H_2^3 - b_2 \cdot h_2^3}{12}</math></p>
<p><b>Řešení:</b></p> <p><math>\sigma_{3B} := \frac{Q}{S_3} + \frac{q_3}{S_3} \cdot l_3 \quad \sigma_{3B} = 0.663 \text{MPa}</math></p> <p><math>w_{3A} := \frac{Q \cdot l_3}{E \cdot S_3} + \frac{q_3 \cdot l_3^2}{2 \cdot E \cdot S_3} \quad w_{3A} = 1.534 \times 10^{-3} \text{mm}</math></p> <p><math>\sigma_{2C} := \frac{Q + q_3 \cdot l_3}{W_{o2y}} \cdot l_2 + \frac{q_2}{2W_{o2y}} \cdot l_2^2 \quad \sigma_{2C} = 16.716 \text{MPa}</math></p> <p><math>w_{2B} := \frac{1}{E \cdot J_{2y}} \cdot \left( \frac{Q + q_3 \cdot l_3}{3} \cdot l_2^3 + \frac{q_2}{8} \cdot l_2^4 \right) \quad w_{2B} = 0.435 \text{mm}</math></p> <p><math>\phi_{2B} := \frac{1}{E \cdot J_{2y}} \cdot \left( \frac{Q + q_3 \cdot l_3}{2} \cdot l_2^2 + \frac{q_2}{6} \cdot l_2^3 \right) \quad \phi_{2B} = 6.484 \times 10^{-4}</math></p>	<p><math>u_A := -\phi_{2B} \cdot l_3 \quad u_A = -0.324 \text{mm}</math>  <math>v_A := 0 \quad v_A = 0 \text{mm}</math>  <math>w_A := w_{3A} + w_{2B} \quad w_A = 0.436 \text{mm}</math>  <math>\delta_A := \sqrt{u_A^2 + v_A^2 + w_A^2} \quad \delta_A = 0.544 \text{mm}</math>  <math>\alpha_x := \arccos\left(\frac{u_A}{\delta_A}\right) \quad \alpha_x = 126.615 \text{deg}</math>  <math>\alpha_y := \arccos\left(\frac{v_A}{\delta_A}\right) \quad \alpha_y = 90 \text{deg}</math>  <math>\alpha_z := \arccos\left(\frac{w_A}{\delta_A}\right) \quad \alpha_z = 36.615 \text{deg}</math></p>

### Řešení s využitím počítačové podpory s vhodným software (více možností)

Řešení analytické srovnáme s řešením v modulu Structure CAD systému ProENGINEER Wildfire 4.0.

K tomu účelu byl vytvořen model nosných prvků translačních členů.



Run Status (Static\_Analysis\_Transl\_Links.rpt) Not Running

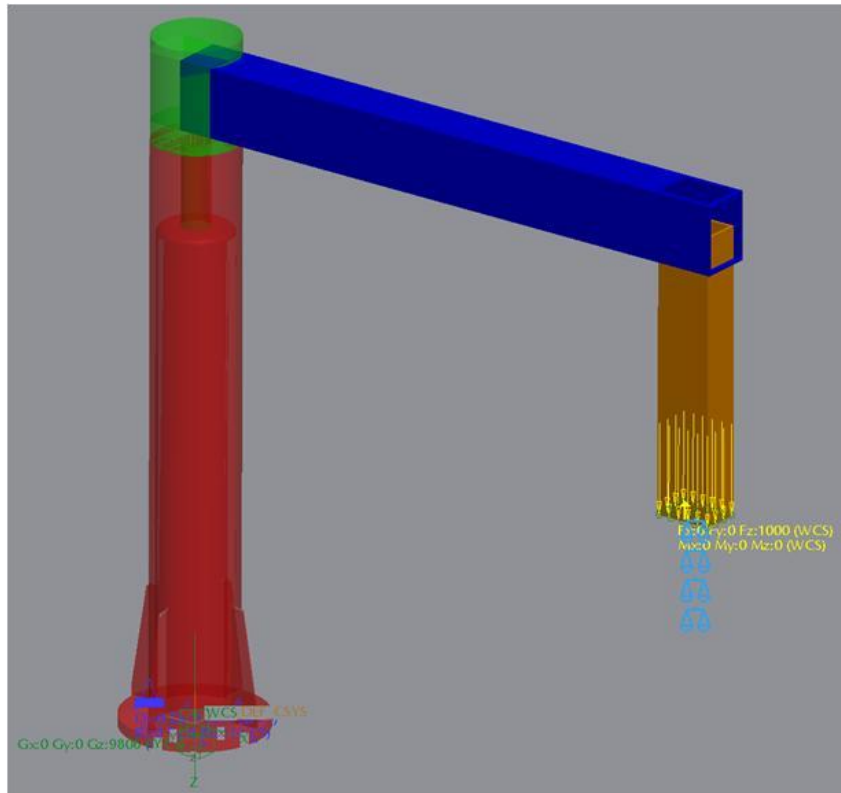
Measures:

Name	Value	Convergence
max_beam_bending:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_tensile:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_torsion:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_total:	0.000000e+00	0.0%
max_disp_mag:	5.852788e-01	0.1%
max_disp_x:	-3.301434e-01	0.1%
max_disp_y:	2.447264e-03	14.5%
max_disp_z:	4.888301e-01	0.1%
max_prin_mag*:	-3.652605e+01	11.9%
max_rot_mag:	6.612504e-04	0.1%
max_rot_x:	5.537226e-07	10.0%
max_rot_y:	-6.612501e-04	0.1%
max_rot_z:	3.164002e-07	28.6%
max_stress_prin*:	3.387725e+01	14.0%
max_stress_vm*:	2.570083e+01	13.4%
max_stress_xx*:	-3.344539e+01	12.1%
max_stress_xy*:	6.278413e+00	11.5%
max_stress_xz*:	5.963809e+00	15.4%
max_stress_yy*:	-1.241024e+01	8.2%
max_stress_yz*:	-4.832690e+00	11.7%
max_stress_zz*:	-1.249275e+01	9.0%
min_stress_prin*:	-3.652605e+01	11.9%
strain_energy:	2.529947e+02	0.1%
Displacement_EP:	5.582678e-01	0.1%
Displacement_EP_x:	-3.301323e-01	0.1%
Displacement_EP_y:	-1.962942e-04	6.8%
Displacement_EP_z:	4.501950e-01	0.1%

Detailed Summary

Close

Posunutí viz poslední 4 řádky



Run Status (Static\_Analysis.rpt) Not Running

Measures:

Name	Value	Convergence
max_beam_bending:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_tensile:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_torsion:	0.000000e+00	0.0%
max_beam_total:	0.000000e+00	0.0%
max_disp_mag:	1.043634e+00	0.1%
max_disp_x:	3.418926e-01	0.0%
max_disp_y:	-2.651637e-03	0.2%
max_disp_z:	9.877569e-01	0.1%
max_prin_mag*:	-7.262921e+01	9.9%
max_rot_mag:	1.132102e-03	0.1%
max_rot_x:	-9.015827e-07	8.8%
max_rot_y:	-1.132102e-03	0.1%
max_rot_z:	-8.539931e-08	14.1%
max_stress_prin*:	3.094975e+01	8.2%
max_stress_vm*:	5.553841e+01	9.0%
max_stress_xx*:	-3.667536e+01	9.4%
max_stress_xy*:	-1.113904e+01	10.4%
max_stress_xz*:	2.418331e+01	10.9%
max_stress_yy*:	-2.372337e+01	10.3%
max_stress_yz*:	-1.336168e+01	0.3%
max_stress_zz*:	-5.375815e+01	9.6%
min_stress_prin*:	-7.262921e+01	9.9%
strain_energy:	5.222609e+02	0.1%
Displacement_EP:	9.659141e-01	0.1%
Displacement_EP_x:	-2.916098e-01	0.1%
Displacement_EP_y:	3.134304e-04	24.7%
Displacement_EP_z:	9.208440e-01	0.1%

Detailed Summary

Close

Výsledné posunutí koncového bodu viz poslední 4 řádky



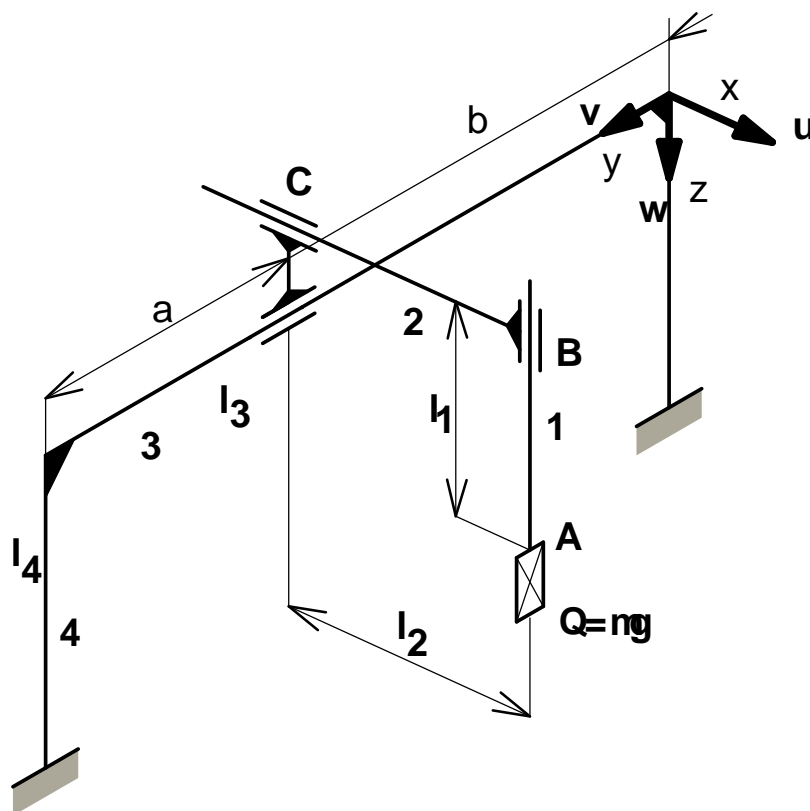
### 3.1.2. Analytický deformační výpočet kartézského manipulátoru

Kontrolní výpočet následuje po dokončení předběžného návrhu akčního subsystému robotu, kdy jsou známy tvary prvků a materiály, z nichž jsou vyrobeny a vyšetřeny síly a momenty na ně působící. Mezními stavy, které musíme respektovat a výpočtem prokázat jejich dodržení jsou deformace, které pro určitou skupinu úloh v praxi jsou maximálně přípustné. Kontrola tedy musí prokázat určitou tuhost konstrukce. Kontrola pevnosti zpravidla prokáže, při splnění podmínky tuhosti, velkou bezpečnostní rezervu, nicméně průkaz pevnosti jsme povinni provést a doložit.

V současné době je již běžné provádění všech výpočtů s podporou výpočetní techniky a speciálních softwarových systémů. Nicméně je třeba znát i základní analytické postupy, potřebné pro kontrolu výsledků dosažených na počítači a také pro vyjasnění správnosti zadání pro výpočet.

Pro provádění analytických výpočtů je samozřejmě nezbytné oživit a případně doplnit poznatky z mechaniky a pružnosti a pevnosti ze základu studia.

Jako příklad uveďme postup kontrolního výpočtu prvků polohovacího ústrojí kartézského systému s příčником.



Obr. 3.1.2. – 1 Výpočtové schéma manipulátoru  $T_y$ ,  $T_x$ ,  $T_z$ ,

Výpočet provádíme ve směru od užitečné zátěže, tj. objektu manipulace včetně efektoru a orientačního ústrojí, což jsou nejvýznamnější zátěžové účinky. V našem případě budeme brát v úvahu pouze gravitační účinky. To by mohl být v praxi případ pro roboty pracující s velkými nosnostmi a malými hodnotami zrychlení v jednotlivých osách. Pro roboty s vysokými dynamickými parametry bychom tyto účinky museli započítat, avšak

podstata výpočtu zůstane stejná. Do účinků zahrneme i vlastní tíhu jednotlivých prvků nosného subsystému. Klouby uvažujeme jako absolutně tuhé a v praxi bychom si testováním svých konstrukcí museli ověřit nakolik jsme tento předpoklad splnili, případně jak bychom museli nesplnění tohoto požadavku promítnout do výpočtu. Existuje řada modelů tohoto výpočtu. V současných konstrukcích většinou platí, že reálná tuhost kloubů je řádově stejná jako tuhost nosných prvků.

Výpočtem zjišťujeme (obr. 3.1.2. – 1 až 3.1.2. – 16.) postupně deformace jednotlivých prvků a na závěr zjistíme vektor výsledné deformace. Vertikální člen 1 je namáhán tahem v ose z (obr. 5.2.3 – 2).

člen 1 : tah

$q_1$  - tíha délkové jednotky

$$\text{posuv } \Delta l_{AB} = Q \frac{l_1}{ES_1} + \frac{1}{2} q_1 l_1 \frac{l_1}{ES_1}$$

$$\text{napětí } \sigma_1 = \frac{Q}{S_1} + \frac{q_1 z_1}{S_1}$$

Kontrolujeme vertikální člen 1 na tah od kumulované zátěže Q na konci polohovacího ústrojí a tíhového účinku konstrukce tohoto členu při maximálním vysunutí

Deformace (posuv) mezi místy AB a napětí v místě B

Obr. 3.1.2. – 2 Kontrola prvku 1 polohovacího ústrojí (v ose z)

Prvek 2 je namáhán ohybem z kumulované zátěže včetně tíhy členu 1 a samozřejmě i příslušného započítání tíhových účinků prvku 2 (obr. 3.1.2. – 3). Tento prvek uvažujeme jako vetknutý (je nutné konstrukčně zajistit a ověřit) v místě C (obr. 3.1.2. – 1 a 3).

Průhyb a úhel natočení v místě B, na konci prvku 2, z Mohrova – Maxwellova integrálu pro průhyb platí

$$\delta = \int_s \frac{M \overline{M}_F}{EJ} ds$$

pro úhel natočení

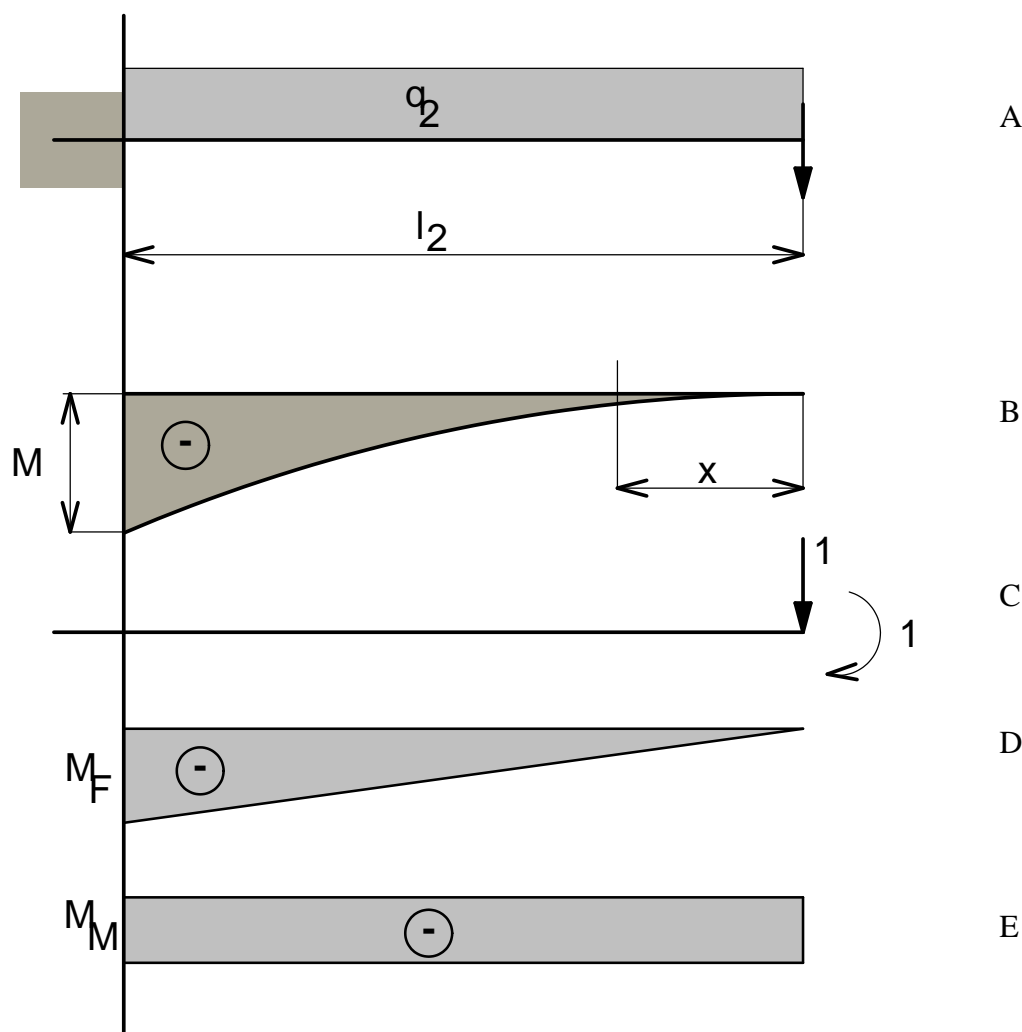
$$\varphi = \int_s \frac{M \overline{M}_M}{EJ} ds$$

$M_x$  je moment od vnějšího zatížení

$\overline{M}_F$  je fiktivní moment od jednotkové síly v místě a směru hledaného průhybu

$\overline{M}_M$  je fiktivní jednotkový moment v místě a směru hledaného úhlu natočení

Obr. 3.1.2. – 3 Použitý aparát pro výpočet



Obr. 3.1.2. – 4 Schémata k výpočtu prvku 2

Potřebné vztahy (obr. 5.2.3 – 5) vyjádříme pomocí schémat obr. 5.2.3 – 4 A – E.

v místě  $x$  ...

$$M_x = -Q + q_1 l_1 x - \frac{q_2 x^2}{2}$$

$$\bar{M}_{F \leftarrow} = 1 \cdot \leftarrow x \rightarrow = -x$$

$$\bar{M}_{M \leftarrow} = -1$$

$$\begin{aligned} \delta = w_{2,B} &= \frac{1}{EJ_2} \int_0^{l_2} \left[ Q + q_1 l_1 x + \frac{q_2 x^2}{2} \right] x dx = \\ &= \frac{1}{EJ_2} \left[ Q + q_2 l_2 \left[ \frac{l_2^3}{3} + \frac{q_2 l_2^4}{8} \right] \right] \end{aligned}$$

Na pravém konci nosníku (obr. 3.1.2. A) působí síla  $Q + q_1 l_1$  a po délce členu 2 jednotkové zatížení  $q_2$

Na fiktivním nosníku (obr. C) fiktivní síla a moment

Průběhy momentů pro místo  $x$  jsou vlevo s maximálními hodnotami na levém okraji nosníku (obr. B, D, E)

Průhyb v místě B o velikosti  $w_{2,B}$  a úhel natočení tamtéž

E modul pružnosti v tahu

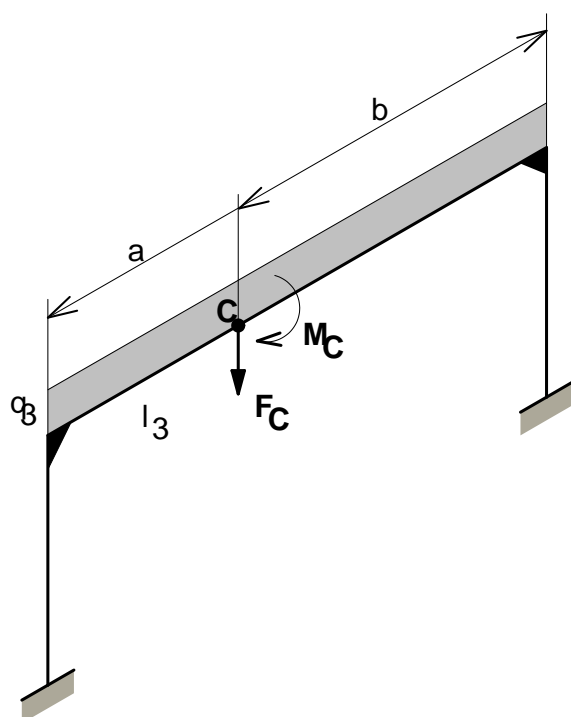
$J_2$  moment setrvačnosti vzhledem k ose  $y$

$$\begin{aligned}\varphi_{2,B} &= \frac{1}{EJ_2} \int_0^{l_2} \left[ Q + q_1 l_1 x + \frac{q_2 x^2}{2} \right] \cdot 1 \cdot dx = \\ &= \frac{1}{EJ_2} \left[ Q + q_1 l_1 \frac{l_2^2}{2} + \frac{q_2 l_2^3}{6} \right] \\ \sigma_{2,x} &= \frac{M_x}{\omega_{02}} = \frac{Q + q_1 l_1 x + \frac{q_2 x^2}{2}}{\omega_{02}}\end{aligned}$$

Napětí v prvku 2, v místě x

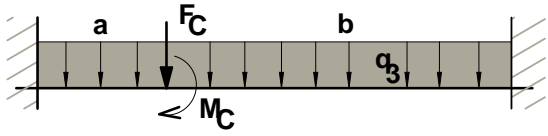
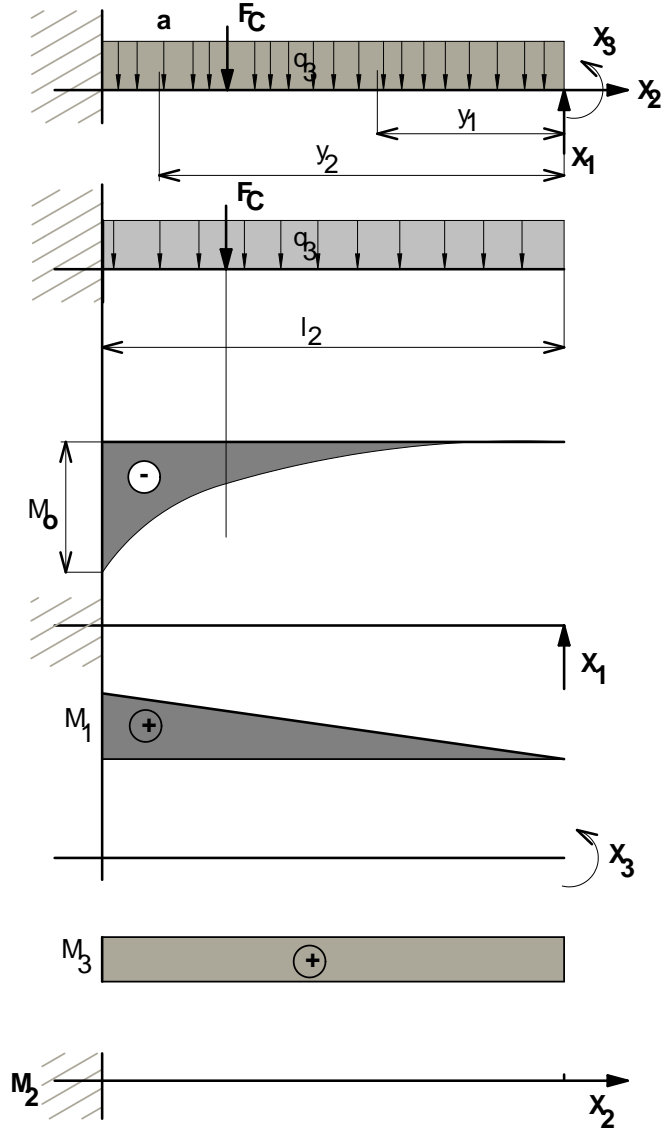
Obr. 3.1.2. – 5 Vztahy pro výpočet momentů, průhybu a úhlu natočení na prvku 2

K posouzení příčnicku – prvku 3 – podle obr. 3.1.2. – 6 uplatníme model nosníku na obou stranách vetknutého, což je nutné opět konstrukčně zajistit vyztužením vazeb mezi stojany a příčnickem a tím, že stojany mají podstatně větší tuhost než příčnick. Příčnick je zatížen silou  $F_C$  a momentem  $M_C$ , které lze stanovit z předchozího postupu.



$$\begin{aligned}F_c &= Q + q_1 l_1 + q_2 l_2 \\ M_c &= Q + q_1 l_1 l_2 + \frac{q_2 l_2^2}{2} \\ q_3 & \text{ - tíha délkové jednotky}\end{aligned}$$

Obr. 3.1.2. – 6 Zatížení a příprava modelu výpočtu příčnicku

	<p>Vetknutý nosník je 3x staticky neurčitý, je ohýbán a kroucen. K řešení použijeme metody kanonických rovnic (metody minima deformační energie).</p>
	<p>Vetknutí na jedné straně nahradíme 3 neznámými staticky neurčitými veličinami <math>X_1</math>, <math>X_2</math>, <math>X_3</math>, a zavedeme 3 systémy</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ekvivalentní (základní)</li> <li>- nulový (pomocný)</li> <li>- jednotkový (pomocný)</li> </ul> <p>Ekvivalentní systém řeší problém statické neurčitosti zavedením neznámých <math>X_i</math>. Jednotkový systém spočívá v zavedení velikosti neznámých <math>X_1 = 1</math>. A nulový systém dosáhneme zavedením některé z veličin <math>X_i</math> tak, že výsledný účinek bude 0 (<math>M_2 = 0</math>).</p>

Obr. 3.1.2. – 7 Schémata k výpočtu příčnicku

K aplikaci metody kanonických rovnic potřebujeme vyjádřit průběhy všech zavedených ohybových momentů podle obr. 3.1.2. – 7.

$$F_c = Q + q_1 l_1 + q_2 l_2$$

$$M_c = Q + q_1 l_1 l_2 + \frac{q_2 l_2^2}{2}$$

Na příčnick působí síla, vyvolávající jeho ohyb  $F_c$  a moment  $M_c$ , který příčnick zkrucuje

$$M_{0 y_1} = -\frac{q_3 \cdot y_1^2}{2}$$

pro  $0 \leq y_1 \leq b$

$$M_{1 \langle \epsilon_1 \rangle} = 1 \cdot y_1$$

$$M_{2 \langle \epsilon_1 \rangle} = 0$$

$$M_{3 \langle \epsilon_1 \rangle} = 1$$

$$M_{0 y_2} = -\frac{q_3 \cdot y_2^2}{2} - F_c y_2 - b$$

pro  $b \leq y_2 \leq a + b$

$$M_{1 \langle \epsilon_2 \rangle} = y_2$$

$$M_{2 \langle \epsilon_2 \rangle} = 0$$

$$M_{3 \langle \epsilon_2 \rangle} = 1$$

Obr. 3.1.2. – 8 Ohybové momenty po délce příčnicku

K dalšímu postupu připomeňme podstatu metody kanonických rovnic.

Každá z rovnic vyjadřuje podmínku, že ve staticky neurčité soustavě jsou zobecněné posuvy, odpovídající každé z neznámých zobecněných sil  $X_i$  rovny 0.

$a_{ij}$  - jsou zobecněné posuvy v základní soustavě ve směru  $i$ -té neznámé zobecněné síly  $X_i$  a také od působících sil  $X_j$ , což pro  $j = 0$  znamená sílu  $F_c$

Zobecněné posuvy  $a_{ij}$  lze určovat libovolným známým způsobem.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{10} = 0$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{20} = 0$$

$$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{30} = 0$$

$a_{ij}$  od síly  $F$  (např.  $a_{10}$ ) závisí na zadaných silách, na geometrii soustavy a výběru základní soustavy a mohou být kladné, záporné i 0.

$a_{ij}$  od síly  $X$  nezávisí na zadaných silách, závisí na geometrii soustavy a výběru neznámých staticky neurčitých veličin a platí, že

$a_{ij}$  pro  $i = j$  (tzv. hlavní součinitel) je vždy větší než 0

$a_{ij}$  pro  $i \neq j$  (tzv. postranní součinitel) může být kladný, záporný i 0.

Při výběru soustavy usilujeme o to, aby co nejvíce prvků bylo 0.

Obr. 3.1.2. – 9 Uplatnění metody kanonických rovnic

Výpočty součinitelů  $a_{ij}$  provedeme pomocí Mohrova – Maxwellova integrálu

$$a_{ij} = \int_s \frac{M_i \delta M_j}{EJ} ds$$

$$a_{11} = \frac{1}{EJ_3} \left[ \int_0^b y_1^2 dy_1 + \int_b^{a+b} y_2^2 dy_2 \right] = \frac{1}{3} \frac{a+b^3}{EJ_3}$$

$$i=1, j=1$$

$$a_{12} = a_{21} = 0 \quad (M_2 = 0)$$

$$a_{23} = a_{32} = 0$$

$$a_{20} = 0$$

$$a_{13} = a_{31} = \frac{1}{EJ_3} \left[ \int_0^b y_1 \cdot 1 \cdot dy_1 + \int_b^{a+b} y_2 \cdot 1 \cdot dy_2 \right] = \frac{1}{2} \frac{a+b^2}{EJ_3}$$

$$a_{22} = 0$$

$$a_{10} = \frac{1}{EJ_3} \left[ \int_0^b y_1 \left( -q_3 \frac{y_1^2}{2} \right) dy_1 + \int_b^{a+b} y_2 \left\{ -q_3 \frac{y_2^2}{2} - F_c y_2 - b \right\} dy_2 \right] =$$

$$= -\frac{q_3}{8EJ_3} a+b^4 - F_c \frac{a^2}{6EJ_3} 2a+3b$$

$$a_{30} = \frac{1}{EJ_3} \left[ \int_0^b 1 \cdot \left( -q_3 \frac{y_1^2}{2} \right) dy_1 + \int_b^{a+b} 1 \cdot \left\{ -q_3 \frac{y_2^2}{2} - F_c y_2 - b \right\} dy_2 \right] =$$

$$= -\frac{q_3}{6EJ_3} a+b^3 - F_c \frac{a^2}{2EJ_3}$$

$$a_{33} = \frac{1}{EJ_3} \left[ \int_0^b 1 \cdot 1 \cdot dy_1 + \int_b^{a+b} 1 \cdot 1 \cdot dy_2 \right] = a+b = l_3$$

Obr. 3.1.2. – 10 Výpočet hodnot  $a_{ij}$ 

Dosazením součinitelů  $a_{ij}$  do kanonických rovnic stanovíme neznámé veličiny  $X_1$  a  $X_3$

$$\begin{aligned} 8 a+b^3 X_1 + 12 a+b^2 X_3 &= 3q_3 a+b^4 + 4F_c a^2 2a+3b && \text{Po dosazení do kanonických} \\ 3 a+b^2 X_1 + 6 a+b X_3 &= q_3 a+b^3 + 3F_c a^2 && \text{rovnic a eliminaci } X_2 \end{aligned}$$

$$X_1 = \frac{1}{2} q_3 a+b + F_c a^2 \frac{a+3b}{a+b^3}$$

$$X_3 = -\frac{q_3}{12} a+b^2 - F_c \frac{a^2 b}{a+b^2}$$

Stanovíme neznámé veličiny

Obr. 3.1.2. – 11 Výpočet neznámých veličin  $X_1$  a  $X_3$

Výsledný průběh ohybových momentů v jednotlivých polích příčnicku je pak následující

$$y_1: M_{y_1} = X_1 y_1 + X_3 - \frac{q_3 y_1^2}{2}$$

Průběh ohybových momentů po délce příčnicku

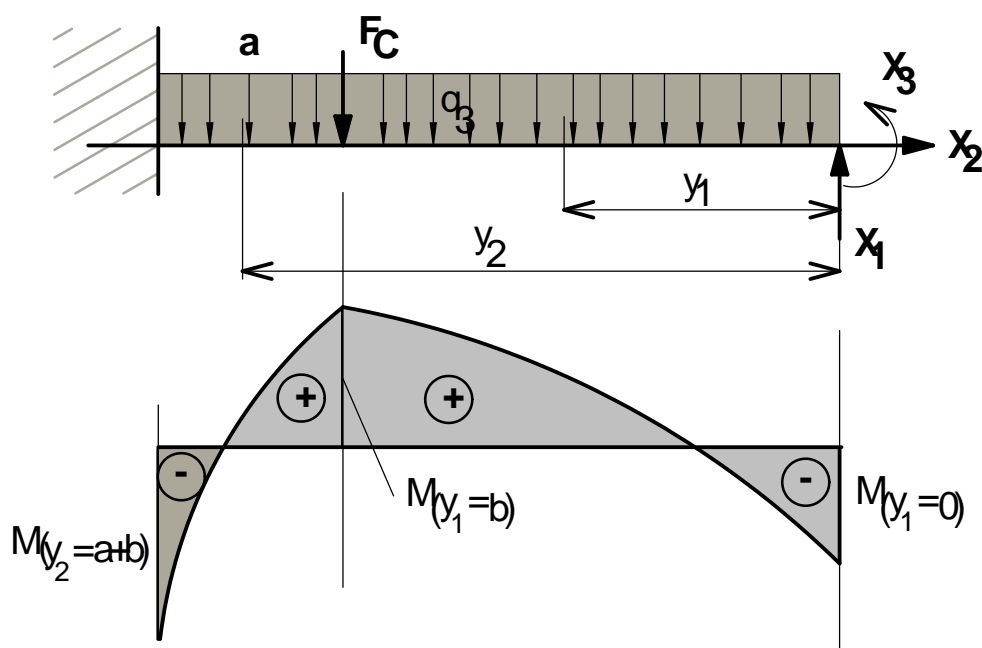
$$y_2: M_{y_2} = X_1 y_2 + X_3 - \frac{q_3 y_2^2}{2} - F_c y_2 - b$$

$$M_{y_1=0} = X_3$$

Pro vybrané body po délce příčnicku určíme hodnoty momentů

$$M_{y_1=b} = X_1 \cdot b + X_3 - \frac{q_3 \cdot b^2}{2}$$

$$M_{y_2=a+b} = X_1 (a+b) + X_3 - \frac{q_3 (a+b)^2}{2} - F_c \cdot a$$



Obr. 3.1.2. – 12 Stanovení průběhu ohybového momentu po délce příčnicku

Stanovení průhybu a úhlu natočení příčnicku v místě C, s využitím zjištěného průběhu ohybového momentu lze provést Mohrovou metodou (statická analogie):

$$\delta = \frac{M_f}{EJ};$$

$$\varphi = \frac{T_f}{EJ};$$

$\delta$  je průhyb dle Mohrovy metody  
 $\varphi$  je úhel natočení  
kde  $M_f$  je fiktivní moment  
a  $T_f$  je fiktivní posouvající síla ve vyšetřovaném místě C



$$q_f \cdot y_1 \equiv M$$

obě hodnoty stanovíme z fiktivního zatížení po délce příčnicku  $q_f$ , které se rovná zjištěnému ohybovému momentu.

$$q_f y_1 = M y_2 = X_1 y_1 + X_3 - q_3 \frac{y_1^2}{2}$$

$$= \frac{1}{2} q_3 (a+b) y_1 + F_c \frac{a^2 + a + 3b}{a+b} y_1 - \frac{q_3}{12} (a+b)^2 -$$

Viz obr. 3.1.2.

$$-F_c \frac{a^2 b}{a+b} - \frac{q_3}{2} y_1^2$$

$$T_{f,c} = \int_0^b q_f y_1 dy_1 = \frac{1}{12} q_3 a b (b-a) + \frac{F_c}{2} \frac{a^2 b^2 (b-a)}{a+b^3}$$

Provedení integrace po dosazení za  $q_f$

$$M_{f,c} = \int_0^b q_f y_1 (b-y_1) dy_1 = \frac{q_3 a^2 b^2}{24} + F_c \frac{a^3 b^3}{3(a+b)^3}$$

A dosazení do vzorců pro průhyb a úhel natočení zjistíme

$\delta_C$

$\varphi_C$

Obr. 3.1.2. – 13 Stanovení průhybu a úhlu natočení b bodu C příčnicku

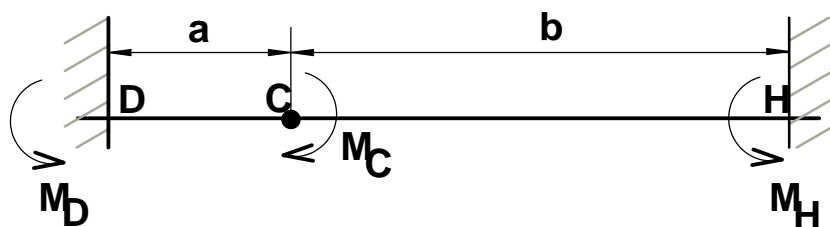
Výpočet deformací příčnicku doplníme výpočtem napětí ve zvoleném místě příčnicku

$$\sigma_3 y_1 = \frac{M y_1}{w_{3\sigma}} \quad 0 \leq y_1 \leq b$$

$$\sigma_3 y_2 = \frac{M y_2}{w_{3\sigma}} \quad b \leq y_2 \leq a+b$$

Obr. 3.1.2. – 14 Stanovení napětí v krajních vláknech příčnicku

Posledním zdrojem deformace příčnicku je moment  $M_C$ , který jsme vypočítali v obr. 3.1.2. – 6 a který vyvolává jeho kroucení.



Momenty působí kolmo k ose nosníku a platí pro ně momentová podmínka

$$M_H - M_C + M_D = 0 \quad M_H, M_D = ?$$

$$\varphi_{k,HD} = 0$$

úloha je jednou staticky neurčitá  
Proto doplníme deformační podmínku

$$\varphi_{k,HD} = \varphi_{k,HC} + \varphi_{k,CD} = 0$$

$$\phi_{k,HC} = \frac{M_{k,HC} \cdot b}{G J p_3} = \frac{M_H \cdot b}{G J p_3}$$

$$\phi_{k,CD} = \frac{M_H - M_C}{G J p_3} a$$

$$M_H \cdot b + M_H - M_C a = 0$$

$$M_H = \frac{M_C \cdot a}{a+b}; \quad M_D = \frac{M_C \cdot b}{a+b}$$

$$\varphi_{k,C} = \varphi_{k,HC} = \frac{M_H \cdot b}{G J p_{III}}$$

$$= \frac{M_C \cdot a \cdot b}{(a+b) G J p_{III}}$$

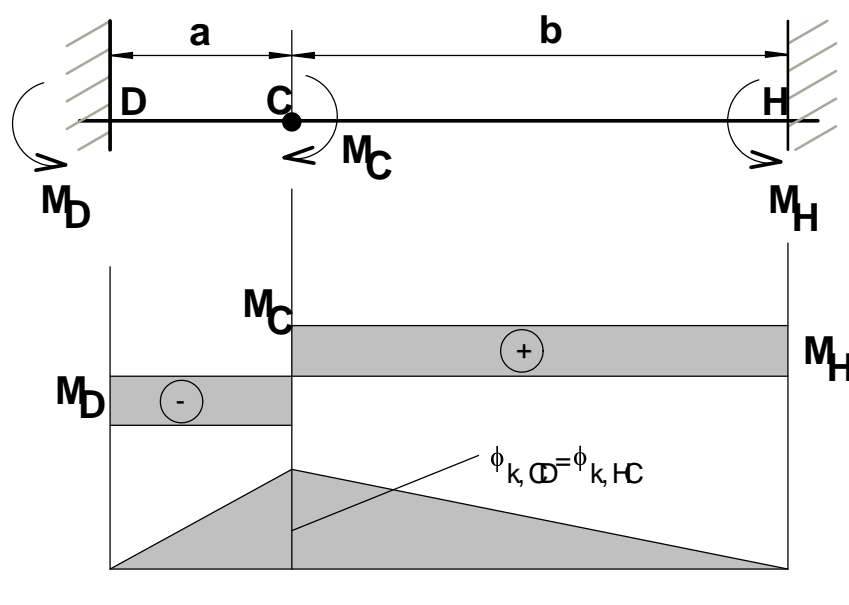
$$\tau_C = \frac{M_k}{w_k} = \frac{M_C}{w_k}$$

z principu  
superpozice platí

což dosadíme do  
deformační  
podmínky

pak úhel zkroucení  
průřezu v místě C

a vyvolané  
smykové napětí  
tamtéž



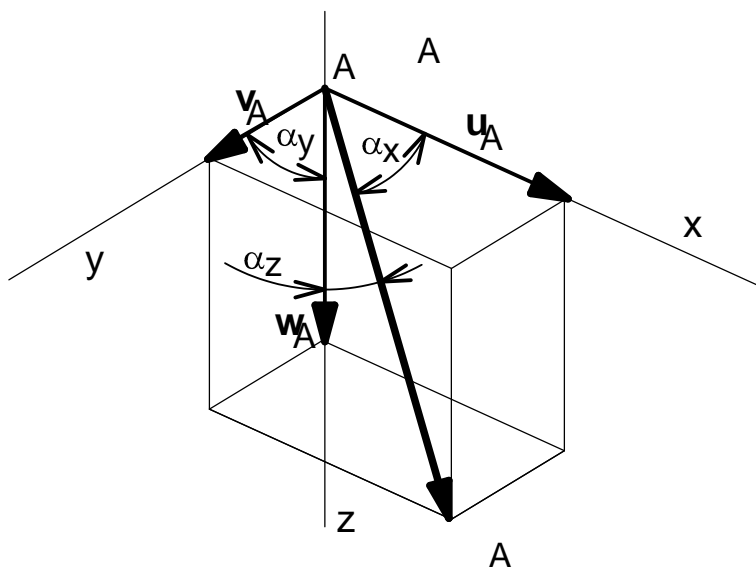
Průběh momentů

Průběh úhlu  
zkroucení

Obr. 3.1.2. – 15 Stanovení momentů a úhlů zkroucení

Na závěr kontrolního výpočtu, při němž jsme zjistili velikosti napětí a můžeme je porovnat s hodnotami přípustnými pro zvolený materiál průřezu, musíme zjistit výslednou deformaci na konci posledního ramene (bod A), kde připojujeme přes orientační ústrojí efektor. Evidentně musí být tento údaj doplněn o vlivy těchto částí manipulátoru.

Podle obr. 3.1.2. – 1 jsme zavedli kartézský souřadný systém a pojmenovali deformace v jednotlivých osách u, v, w a jejich směrové úhly

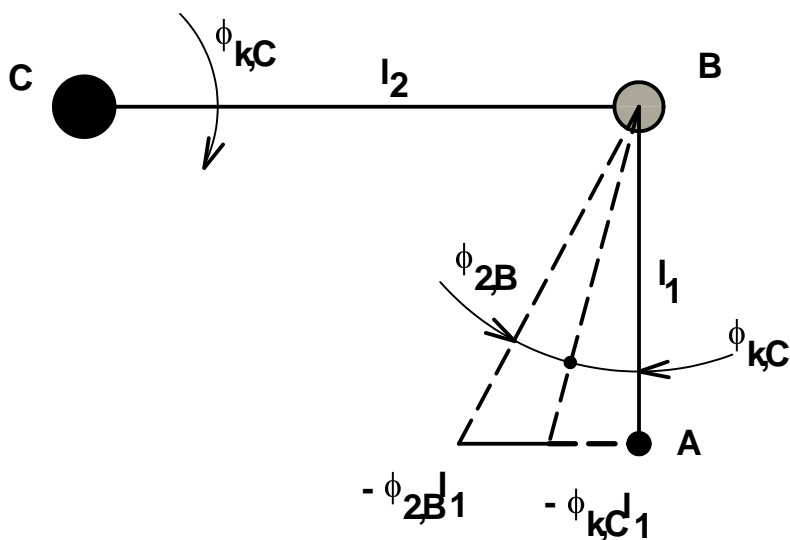


$$u_A = -\varphi_k, cl_1 - \varphi_{2, B} l_1$$

$$v_A = \varphi_k cl_1$$

$$w_A = \Delta l_{1AB} + w_{2, B} + w_C + \varphi_k, cl_2$$

Z obrázku je zřejmé jak jsme z vypočtených hodnot ve výše uvedeném postupu dospěli k vyjádření jednotlivých výsledných deformací  $u_A, v_A, w_A,$



$$\delta_A = \sqrt{u_A^2 + v_A^2 + w_A^2}$$

$$\cos \alpha_x = \frac{u_A}{\delta_A}; \cos \alpha_y = \frac{v_A}{\delta_A}; \cos \alpha_z = \frac{w_A}{\delta_A};$$

Celková odchylka  
(deformace)  $\delta_A$  a  
směrové úhly  $\alpha$

Obr. 3.1.2. – 16 Výsledná deformace polohovacího ústrojí manipulátoru

Demonstrace postupu kontrolního výpočtu manipulátoru robotu, polohujícího v kartézském souřadném systému se může sice zdát poněkud těžkopádná, nicméně je založena na standardních postupech známých z pružnosti a pevnosti a je bez problémů algoritmizovatelná a vytvořením programu např. v MatCadu je možné velmi rychle změnou vstupních parametrů zjistit vhodnější konfiguraci (pokud by předběžný návrh z hlediska tuhosti, resp. přípustných odchylek nevyhověl).

Vzhledem k velkému počtu možných kinematických koncepcí není pochopitelně možné všechny probírat podrobně jako výše uvedený příklad a tím spíše je potřebné vracet se k základům pružnosti a pevnosti.

K zavedené zátěžné síle poznamenejme, že v praxi budeme převážně počítat s dynamickými účinky, které buď převažují nad gravitačními nebo jsou řádově stejné – postup výpočtu zůstává stejný, ale důsledky jsou z hlediska provozu robotu jiné. Statické účinky (gravitační) můžeme vyřešit z hlediska požadované přesnosti pro konkrétní úlohu přeprogramováním úlohy. U dynamických účinků tomu tak není a je nutno činit jiná opatření – změnou tuhosti konstrukce počínaje. O dalších se zmíníme v souvislosti s analýzou kritických parametrů robotů.

### 3.1.3. Funkční – předběžné výpočty

Tyto výpočty jsou velmi důležité pro založení konstrukce, splňující požadavky zadání ve výsledku celého návrhového postupu. zde se projeví zkušenost a schopnosti konstruktéra nejvíce, a to především jeho schopnost vytvoření databáze a postupů know how oboru.

Konkrétní výpočty jsou doloženy v kapitolách 2.1, 2.2, 4.2.3, 4.2.4., 5.2.



#### Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se seznámili s následujícími pojmy:

- Akční subsystém robotu a potřebné výpočty
- Deformační a pevnostní výpočty akčního subsystému robotu
- Výpočty analytické
- Výpočty s podporou počítače

Byla provedena identifikace potřebných výpočtu pro praxi s odvolávkou na obnovení poznatků z mechaniky a pružnosti i pevnosti a předmětů zabývajících se počítačovou podporou těchto výpočtů.



### Kontrolní otázka

- 1) Proč u akčního systému provádí přednostně deformační výpočet prvků?
- 2) K čemu slouží následný pevnostní výpočet?
- 3) Jaký má dnes význam analytický výpočet?
- 4) O co jde při funkčním výpočtu?



### Úkol k řešení

Realizujte deformační výpočet – stanovte velikost výsledných deformací v koncovém bodu manipulátoru a velikosti napětí v kritických místech manipulátoru podle Obr. 3.1.2. – 1

## 4. METODIKA A PROSTŘEDKY PŘEDBĚŽNÉHO NÁVRHU ROBOTŮ

Po úspěšném a aktivním absolvování tohoto BLOKU

<p>Budete schopni aplikovat:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Obecnou metodiku návrhu mechatronických systémů na návrh servisních robotů</li> </ul> <p>Specifikovat a objasnit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• kritické kroky předběžného návrhu</li> </ul>	<p>Cíle přednáškového bloku</p>
---	---------------------------------

<p><i>Metodika, technický systém, mechatronický systém, předběžný návrh, inovace, variabilita, servisní roboty, analýza, servisní činnosti.</i></p>	<p>Klíčová slova</p>
---	----------------------



**Čas ke studiu:** 6 hodin

S odvoláním na obecné poznatky o metodách návrhu technických systémů, probírané v předmětu Metodika konstruování v oboru, které jsme stručně připomenuli v kapitole 1.2.2. a 1.2.3. se budeme zabývat konkrétními aplikacemi vybraných postupů a prostředků pro návrh nových koncepcí a konstrukcí robotů nebo pro jejich významné inovace.

## 4.1. METODY NÁVRHU SERVISNÍCH ROBOTŮ

Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

<p>Budete umět objasnit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ návrhový postup servisních robotů na základě analýzy konkrétní servisní činnosti</li> <li>▪ variabilitu konstrukcí servisních robotů na příkladech</li> <li>▪ základní kroky návrhu</li> </ul> <p>Po jejich prostudování porozumíte jejich funkci a konstrukci a budete schopni samostatně efektovy navrhovat.</p>	Cíle kapitoly
<p><i>Servisní činnosti, předběžný návrh, inovace, variabilita, servisní roboty, analýza, servisní činnosti.</i></p>	Klíčová slova



**Čas ke studiu:** 3 hodiny



### VÝKLAD

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2. je možné pro návrh nových konstrukcí robotů, podle úrovně vnesených inovací, použít různých metod a prostředků, probíraných v předmětu Metodika konstruování v oboru. Půjde nám nyní o to doporučit pro konkrétní práci začínajících konstruktérů co použít pro první kroky a pokusy v tomto směru s tím, že další praxí a zkušenostmi mohou svůj vlastní soubor metod a prostředků obohacovat a upřesňovat. Konkretizovaný postup ukážeme v zaměření na servisní roboty, protože zde je prostor pro inovace a vývoj principiálně i koncepčně nových konstrukcí výrazně větší, a to i do budoucnosti (prakticky bez omezení).

#### 4.1.1. Charakteristika výchozí situace v servisní robotice

Servisní roboty (SR) jako technické systémy jsou studovány v předmětu téhož názvu. Zde se budeme zabývat pouze postupem jejich vývoje a okolnostmi významnými pro jejich úspěšný návrh.

Jednotná a obecně uznaná definice servisních robotů zatím chybí; jedna z možných zní: SR je volně programovatelné mobilní zařízení, které zčásti nebo zcela automaticky provádí servis (služby). Servis jsou přitom činnosti, které neslouží přímo k výrobě hmotných statků, ale k působení na lidi a technické systémy i jiné objekty.

Obecně je struktura SR tvořena mobilní platformou a jedním či více aplikačními moduly. Všeobecně sestává servisní robot z mobilní platformy a/nebo jednoho nebo několika aplikačních modulů.

Aplikačním modulem rozumíme zpravidla manipulační pohybové jednotky a koncový efektor. Mobilní platformou se rozumí každý systém, který konstrukčními vlastnostmi může

zajistit jeho pohyblivost. Může se pohybovat na kolech, pásech, kráčením, vznášením, létáním nebo plaváním či jakkoliv jinak. Mezi další moduly resp. subsystémy patří moduly informační, komunikační, řídicí, navigační, bezpečnostní aj.

Jak již bylo zmíněno (kap. 1.1.), mezi hlavní podněty pro rozvoj servisní robotiky patří především razantní posilování terciální sféry hospodářství vyspělých států, rozvoj informačních a komunikačních technologií, poptávka firem i domácností po službách. Vedle tlaku na racionalizaci je hlavním motorem vývoje zaměření účastníků soutěže na použití moderních technologií a zařízení. Velký tlak zde vyvíjí firmy, které se dosud věnují výrobě průmyslových robotů a jejich komponent. Je zřejmé, že ty budou (jakož i další subsystémy) v konstrukcích SR využitelné ve značném rozsahu, ať již přímo nebo po inovacích.

Vstup nových technologií do služeb vede obecně k růstu produktivity a kvality. Aby se automatizace servisu organizačně zvládla budou se podstatně měnit struktury podnikání ve službách. Jako výhody lze uvést - snížení nákladů, služby mohou využít průmyslových racionalizačních opatření (hromadná výroba, normalizace, standardizace aj.), větší spolehlivost při zajišťování služeb, odlehčení vykonavatelů služeb od rutinních úloh, zvýšení diskrétnosti, zvýšení pohotovosti ke službám. Naopak mezi nevýhody patří – je nezbytná výuka pro kontakt a akceptaci automatů, odpadla individualita a jedinečnost činností, zákazník ztrácí pocit osobní péče, služby se redukují na věcné plnění, pocit uspokojení sociálních a psychologických potřeb odpadá.

Z hlediska Vědy o navrhování je situace v segmentu servisní robotiky mimořádná a charakteristická velkým podílem koncepčně i principiálně nových technologií i konstrukcí, a to při využívání výsledků řady moderních disciplin a jejich produktů, přičemž i v nich je velmi dynamická situace z hlediska vývoje. Podíl novosti je těžko srovnatelný s jinou oblastí a je nutné předpokládat, že tato situace se udrží dlouho. Potřeba hledání nových metod a prostředků a jejich periodického konstituování je tím dostatečně zdůvodněna.

#### 4.1.2. Analýza servisních činností

Žádný vývoj nové konstrukce robotu nebo hledání inovace nelze zahájit bez analýz, které ukážou, co je tím podstatným problémem na nějž je nutné se zaměřit. Pro analýzu služeb a definici nasazení jsou možné různé postupy, které mohou významně ovlivnit jak prosazení automatizace služeb obecně, tak i úspěšnost, či neúspěšnost jednotlivých firem působících v této oblasti. V této souvislosti je důležité vysvětlit samotný pojem servisní činnost. Tento pojem vystihuje jednotlivé profesní činnosti ve službách. Při jejich klasifikaci je pro každou profesi uvedeno různé členění a různé úrovně členění. Činnosti se přitom musí od sebe lišit, ale nikoliv zásadně (např. čištění, údržba aj.). Tak lze na dolním klasifikačním stupni najít práce přesahující mezi profesemi. Tyto činnosti zpravidla nepřispívají k procesu vytváření hodnot a budou ve vzrůstající míře z podniků a institucí vyčleněny do externích služeb. Podstatným prvkem při hledání racionalizačních možností je najít pro tento druh manuálních úkonů a činností vhodné technické systémy.

Mimo to je možné jít např. cestou analýzy již existujících jednotlivých pracovních postupů a technologií, které přesahují z oboru do oboru, ale základ technologie (i když s modifikacemi) i/nebo aplikačního technického systému zůstává stejný.

K vyšetření dat uvnitř těchto oblastí mohou být zvoleny dva základní postupy. Ve statisticky dobře zpracované a popsané oblasti může být použita k vyšetření činností metoda Top - Down (TD, shora - dolů). Zde se hledá nejdříve podle zajímavých podskupin na základě existujících databází. Tyto zase mohou být začleněny do jednotlivých profesí a konečně do



jednotlivých činností. Hodnocením vyšetřených činností pak lze posoudit zásadní vhodnost pro zahájení technického vývoje. Jde o metodu, která by měla mít do budoucna jasnou prioritu vzhledem k tomu, že v rámci vývoje, jsou posuzovány a hodnoceny aplikační možnosti v širokém rozpětí, takže mohou být ihned posuzovány varianty a modifikace pro podobné aplikace z jiných oblastí a oborů.

Zatím však byla a je zpravidla používána metoda Bottom – Up (BU, zdola - nahoru), a to kvůli chybějící databázi, jejíž získání v širokém rozpětí je nákladné i časově náročné. V tomto případě jsou odkrývány racionalizační možnosti pomocí expertních pohovorů v úzkých oblastech. V praxi bude zřejmě také využívána kombinace postupů BU a po postupné sumarizaci poznatků z širší oblasti ji bude možné posoudit komplexněji metodou TD. Je však jisté, že řada společenských potřeb signalizujících možnost či nutnost automatizace procesu a užití SR se bude dlouho vyskytovat náhodně a s velkou naléhavostí. Jako příklad budiž uvedeno žádoucí užití SR k odstraňování protipěchotných min z oblastí bývalých bojů (celosvětová potřeba, velký počet, krátká životnost, finanční prostředky k dispozici, politická a společenská podpora aj.).

Při hodnocení je třeba aplikační možnosti tedy vyšetřovat z hledisek politických, technických, ekonomických a ze specifických hledisek nabídkových a akceptačních.

Tím lze extrahovat základní uspořádání vyšetřovaných služeb z hlediska jejich potřebnosti na okolnosti individuální (např. privátní osoby, firemní zájmy aj.), skupinové (skupiny podle povolání, sociální okrajové skupiny aj.), společenské (spolkové, komunální, otevřené služby aj.). Konkrétní postup přípravy analýzy, vypracování závěrů ve smyslu doporučení k předběžnému zadání úkolu a ověření rizik je ve stadiu diskusí. Avšak nenormované postupy jsou samozřejmě běžně uplatňovány již dnes.

Především v Japonsku, USA a SRN byly věnovány na výzkum metod v této oblasti velké prostředky, včetně firemních dotací a prostředků EU. Velký význam má také projevený zájem o automatizaci služeb a formulování požadavků ze strany podniků, ve službách dnes podnikajících, směrem k výzkumu a založení výzkumného profilu automatizace služeb. Mimo to bude podobně jako u PR vývoj probíhat od pouhých jednotlivých SR - jako ostrůvků - k periferiím a přizpůsobování objektů.

Tak např. lze očekávat, že kvůli velkým nákladům na udržování budov, budou tyto navrhovány vhodněji z hlediska údržby a čištění. Zde je velká úloha pro management, přizvat v plánovací fázi dalších staveb podniky a specialisty v oblasti služeb a hledat efektivní a nákladově vhodné scénáře pro údržbu a čištění pomocí SR.

Nasazení SR vyvolá také řadu oprávněných otázek. Tak není např. vyjasněno komu by příslušelo schvalování SR. Předpisy platné pro PR zde mohou být uplatněny jen podmíněně. Zabrany obvyklé u PR jsou u SR jen těžko představitelné. Bude třeba vycházet z toho navrhovat SR tak, aby z hlediska bezpečnosti a přijatelnosti byly splněny všechny podstatné požadavky. Obdobně jako na počátku století při zavádění automobilů bude potřebné vytvořit pravidla pro provoz SR.

Kvalifikační struktura zaměstnanců ve službách při nasazení SR se bude měnit, čímž se změní společenské postavení služeb. Služby budou pracovat s nejmodernějšími prostředky a odpadne velký podíl tělesně namáhavých či dokonce nebezpečných prací. Struktura podnikání ve službách se přiblíží provozu moderních závodů a bude lépe pochopena potřeba inovací. Započaté změny jsou již dnes v oboru služeb identifikovatelné. Nasazením SR budou staré struktury narušeny. Nyní je třeba diskutovat a působit k realizaci těchto cílů. I zde je prostor pro tvůrčí technické pracovníky a nové inovační postupy.

### 4.1.3. Variabilita konstrukcí servisních robotů

Vzhledem k výše uvedenému lze tvrdit, že klasifikace SR je značně nejednotná a teprve jejich další rozvoj dodá dost podkladů pro provedení systematického řazení podle rozhodujících znaků. V současné době se klasifikace liší podle autorů, např. se používají kritéria podle typu servisní úlohy – technologická činnost, netechnologická činnost a pomocná činnost, nebo kritéria podle typu prostředí – nepřirozené, nebezpečné, veřejné, domácí a osobní, případně i podle typu podvozku – kolesové, pásové, krácející a netradiční. Všechna tato kritéria jsou však pro potřeby návrhu a hodnocení konstrukcí velmi hrubá. (Schraft, Volz 1996) zavádí klasifikaci podle oblastí (medicína, stavebnictví, bezpečnost, obchod, domácnost aj.) a v nich podle činností (doprava, čištění, hlídání, opravy, aj.). To se jeví jako dobrý základ k dalšímu strukturování klasifikačního systému. Pro ilustraci dnešních možností k založení klasifikace, ale především pro rozhodnutí o analýze typu TD nebo BU uveďme aspoň jako příklad variability servisních robotů základní přehled o oblastech uplatnění SR pro inspekční činnost.

#### Oblasti nasazení inspekčních robotů

Inspekční roboty již dnes pokrývají poměrně širokou oblast aplikací a některé činnosti jsou dnes bez nich nepředstavitelné. Jedná se především o průzkum dna moří a oceánů ve velkých hloubkách, v oblastech zamořených radiací či jinak nebezpečných pro člověka. Jde o inspekci, při níž může dojít k ohrožení lidského zdraví nebo života, případně ji sám člověk ani vykonávat nemůže. V mnoha případech se jedná o plně autonomní roboty, které mohou rozhodovat např. o svém pohybu v neznámém terénu. Existují však také roboty řízené dálkově operátorem, zcela nebo částečně; s řídicím stanovištěm jsou spojeny buď pomocí kabelu nebo radiomodemu.

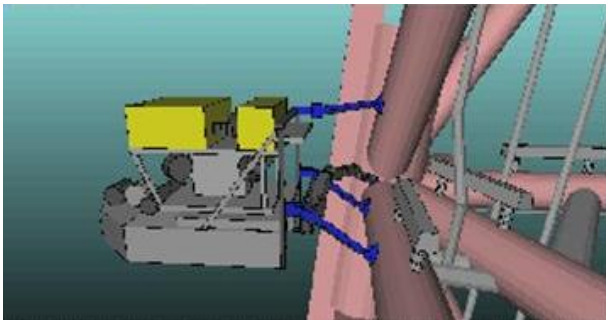
Inspekční činnost vyžaduje splnění specifických požadavků na konstrukci, v závislosti na prostředí, ve kterém se bude SR pohybovat. Roboty se musí samy rozhodovat o dalším pohybu, umět překonávat terénní překážky či mapovat neznámý terén. Dalším důležitým požadavkem je, aby získané informace (obraz z videokamery, data ze senzorů a čidel) byly v reálném čase k dispozici na stanici operátora. Plně autonomní roboty musí navíc s sebou nést řídicí systém a zdroj energie.

#### Prostředí pod vodou

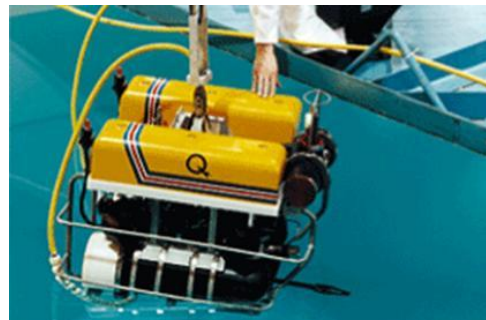
Tyto roboty mají nahradit nebezpečnou práci potápěčů, kteří jsou i při provádění rutinních inspekčních činností vystaveni řadě nepříznivých podmínek - vysokému tlaku podle hloubky pod hladinou, snížené nebo nulové viditelnosti, přílivovým a odlivovým proudům a možnosti napadení mořskými predátory. Roboty jsou využívány především pro geologický, biologický nebo archeologický průzkum mořského dna. Zatímco potápěči mohou kvůli dekompresi a vysokému tlaku operovat pouze do hloubky několika málo stovek metrů, průměrná hloubka oceánu je zhruba 4 kilometry. Pro speciální hlubinné ponorky s lidskou posádkou sice není problém takových hloubek dosáhnout, ale jsou schopné zkoumat pouze malou část dna a jejich provoz je velmi nákladný.

Konstrukce robotů, operujících pod vodou vychází v podstatě z konstrukcí malých ponorek. Roboty mají vlastní pohon, jsou osazeny kamerami a světlomety, případně dalším zařízením, sloužícím k inspekci nebo manipulaci. Oproti hlubinným ponorkám disponují

řadou výhod. Obsluha neriskuje život, jsou podstatně levnější, doba strávená pod vodou není závislá na množství vzduchu v kyslíkových nádržích a také doprovodná loď je menší.



Obr. 4.1.3. – 1 Podvodní robot



Obr. 4.1.3. – 2 Podvodní robot

Běžně používané typy robotů nejsou v současné době ještě zcela autonomní a proto musí být s mateřskou lodí spojeny dlouhým kabelem, což značně omezuje jejich akční rádius. Použití radiomodemu není možné, neboť elektromagnetické vlny se pod vodou špatně šíří. V roce 1996 však byl testován plně autonomní podmořský robot Theseus (USA). Připlul z 400 km vzdáleného pobřeží Severní Ameriky na určené místo v Arktidě a po celou dobu plavby, v hloubce okolo 350 metrů, pod metrovou vrstvou ledu, jej nikdo neřídil. Stroj se orientoval pouze podle svých ultrazvukových čidel a dle vlastního navigačního systému.

Další významnou oblastí použití je inspekce podpěr ropných plošin (obr. 4.1.3. - 1). V současné době je ve světě přes 6000 ropných plošin, z nichž mnoho je již provozu přes 20 let a je nutné jejich nosné části – svařované konstrukce z trubkové oceli pravidelně kontrolovat. Největším nebezpečím pro tyto konstrukce jsou únavové lomy v místě svarů, proto jsou pomocí speciálních efektorů prováděny nedestruktivní materiálové zkoušky. Mimo to jsou tyto roboty obvykle vybaveny ještě dalším efektozem, který slouží k čištění konstrukce od mořských řas a nánosů, které mohou podporovat vznik koroze.

Roboty se také používají k inspekci stěn přehradních hrází. Firma Hydro Quebec vyvinula podvodní robot (obr. 4.1.3. - 2), který je osazen dvěma digitálními kamerami s extrémním rozlišením, které detekují i velmi malé trhliny v betonových strukturách hráze a jejich 3D modely ukládají na harddisk. Součástí systému je software pro 3D analýzu trhlin a děr. Vzhledem k poměrně malé hloubce je tento robot řízen a napájen prostřednictvím kabelu ze servisního vozidla, také jeho nároky na konstrukci nejsou tak velké jako je tomu u podmořských robotů.

### Jaderná a chemická zařízení

V oblasti průmyslu se inspekční roboty používají pro inspekci uvnitř jaderných elektráren, dolů, chemický provozů a všude tam kde pracovníkům hrozí bezprostřední ohrožení života. Hlavní oblastí využití jsou především jaderné elektrárny. V současné době se nejvíce využívají roboty pro kontrolu palivových článků uvnitř reaktoru. Protože jsou články ponořeny ve vodě, jedná se v podstatě o částečně autonomní ponorky s digitální kamerou.

Do budoucna se počítá s tím, že statická radiační čidla umístěná např. na podpěrách nebo sloupech zcela nahradí autonomní roboty, vybavené radiačním detektorem. Jedním z prvních takovýchto robotů, je NUPEC, vyvinutý stejnojmennou japonskou firmou. Jedná se o robot na kolovém podvozku, který se pohybuje po předem naprogramované trase na podlaží budovy a v případě výskytu radiace se pokusí lokalizovat zdroj záření a automaticky přivolá

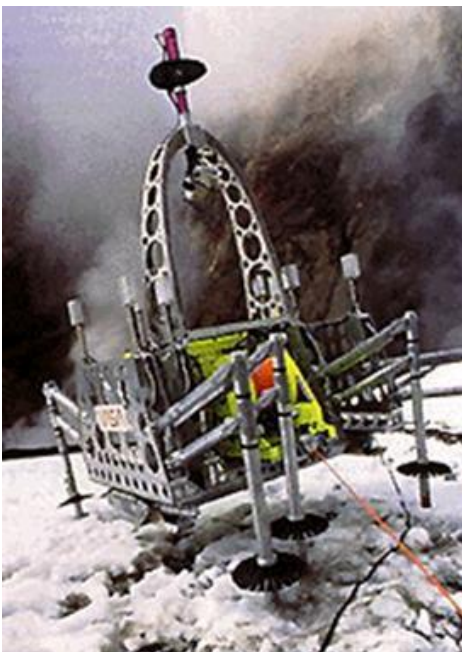
obsahu. Američané pracují na vývoji šestinožého kráčejího robotu (obr. 4.1.3. – 3), který se dokáže pohybovat po schodišti a může tedy pracovat i ve vícepodlažním objektu.



Obr. 4.1.3. – 3 Šestinohý kráčejí robot

v explozivním nebo vlhkém prostředí. Robot je ovládán jedním operátorem a s řídicí jednotkou je spojen pomocí kabelu.

### Geologický průzkum



Obr. 4.1.3. – 4 Šestinohý kráčejí robot

Nejnámějšími dosud uskutečněnými projekty jsou italský IST a americký Dante I a Dante II (obr. 4.1.3. – 4).

### Armáda

V oblasti vojenské techniky se inspekční roboty využívají především k průzkumu nepřátelského území a detekci min. Jejich výhodou je relativně nízká cena, ale především skutečnost, že ztráty na životech se prakticky snižují na nulu.



Obr. 4.1.3. – 5 Robot pro vyhledávání min



Obr. 4.1.3. – 6 Cyberguard

Asi nejnámějším příkladem inspekčních robotů jsou bezpilotní letouny, jež jsou v současnosti hojně využívány americkou armádou. Díky kamerám, fotoaparátům a radarům jsou zdrojem informací za opět relativně nízkou cenu bez ohrožení pilota života. Ovládají se buď na dálku, nebo je jejich trasa předem naplánována. Díky nejnovějším technologiím mohou tyto letouny dodávat informace i z terénu stovky kilometrů vzdáleného a v poměrně dobré kvalitě. Americké bezpilotní letouny „Predator“ operují ve výškách přibližně sedmatisíc kilometrů a kromě špionážních úkolů slouží také jako radarové rušičky nebo jako útočné zbraně, vybavené raketami vzduch-země. Nejnovějším bezpilotním letounem je „GlobalHawk“. Je poháněn tryskovým motorem při rozpětí křídla 34 metrů. Díky napojení na satelity a moderním technologiím dokáže během jediného dne propátrat oblast, velkou jako ČR a přímý přenos umožňuje velitelům sledovat pohyby ve zkoumaném terénu prakticky online.

Americká armáda má také k dispozici autonomní vozidlo na kolovém podvozku pro vyhledávání protitankových min (obr. 4.1.3. – 5) a na Carnegie Mellon university byl sestaven robot pro vyhledávání protipěchotních min. Jedná se v podstatě o kolový podvozek, na němž je umístěno dlouhé rameno s efektozem, určeným pro detekci kovů, z jehož pomoci se naprogramovaným algoritmem prohledá celý prostor. Efektor je osazen senzory, pracujícími na principu elektromagnetické indukce, a termálními čidly.

### Ostraha objektů a budov

Monitorování a permanentní ostraha rozsáhlých komplexů budov jsou často drahé a pro člověka nebezpečné. Inspekční robotické systémy pro tuto činnost se skládají z několika mobilních robotů na kolovém podvozku, vybavených kamerovým systémem, které neustále monitorují určenou oblast. Tyto roboty předčí klasické bezpečnostní kamery, protože nemají žádný „mrtvý bod“ a jsou schopny opticky pokrýt několikanásobně větší oblast. Signál z kamery je posílán pomocí radiomodemu na dispečink, kde sedí operátor. Pokud operátor zahlédne na monitoru nepovolanou osobu či nepředvídanou událost, má možnost přepnout robota z autonomního módu na manuální ovládání a tak udržet objekt sledování na monitoru, dokud nezasáhne přivolaná ochranka.

Komerčně se těmito roboty zabývají firmy Cybermotion a Microrobotix, Cybermotion vyvinula robot Cyberguard (obr. 4.1.3. – 6), který může být kromě kamery osazen mnoha různými senzory, jako jsou tepelná čidla, čidla pro měření vlhkosti, koncentraci plynů ve vzduchu a čidla pro detekci požáru, což značně rozšiřuje oblasti použití zejména o průmyslové objekty, sklady, atd. Robot dokáže během noci urazit až 20 kilometrů a jeho provoz stojí zhruba 2 dolary na hodinu. Vzhledem k tomu, že se hodinová mzda hlídače pohybuje kolem 13 dolarů (USA), je zde úspora značná. Firma uvádí, že návratnost takovéto investice jsou necelé dva roky.

## Havárie a živelné pohromy

V poslední době se začíná využívat vlastností robotů také při vyhledávání živých osob, uvězněných pod troskami budov, které se zřítily následkem zemětřesení či výbuchu, nebo osob uvězněných v závalech po důlních neštěstích.



Obr. 4.1.3. – 7 Robot had

Pro tuto činnost jsou nejideálnější plaziví roboti, kteří svou konstrukcí a pohybem napodobují živého hada (obr. 4.1.3. – 7). Pohybují se s minimálním dopadem na okolí a dostanou se i do míst, která jsou pro roboty na kolovém nebo pásovém podvozku nedostupná. Proto je zde vysoká pravděpodobnost, že se dostanou například poměrně hluboko do nitra zřícených budov. Standardně jsou osazeny tepelnými senzory, infračervenými kamerami a citlivými mikrofony. Kamery jsou schopny pokrýt celý 360° úhel. Tyto roboty již byly nasazeny v praxi a to například po zemětřeseních

v roce 1998 v Turecku a na Taiwanu.

Oblastí, kde se roboty již běžně používají jsou letecká neštěstí, kdy se letadlo zřítí do oceánu. Jedná se hlavně o nalezení vraku letadla na dně moře a lokalizace černé skříňky. Pro tuto činnost se používají plně autonomní nebo dálkově řízené ponorky.

## Zdravotnictví

V současné době se začínají používat inspekční roboty při laparoskopické chirurgii. Princip zákroku spočívá v tom, že na místo řezu se do pacientova těla vsunou jen několika otvory nástroje, kamera a zdroj světla. Robot se nahrazuje asistentem, který doposud držel kameru. Výhoda spočívá v tom, že se odstraní třas rukou chirurga a po nějakém čase vzniklá nestabilita obrazu. Chirurg robota ovládá hlasem. Na speciální zvukové kartě jsou uloženy přesné zvukové vzorky, a samotné ovládání spočívá v tom, že chirurg jednoduchými povely sděluje robotu jak má kamerou otočit.

## Inspekce potrubí

Speciální robotické systémy se taktéž využívají pro nedestruktivní inspekci kanalizačních systémů, plynového potrubí nebo v potrubních strukturách rafinérií a chemických závodů. Hlavním úkolem robotů je detailní inspekce vnitřní potrubní stěny, a to i několik set metrů od místa vstupu do potrubí. Protože je nutno zajistit bezproblémové vyproštění robota z potrubí při nenadálé poruše, je robot spojen s dispečinkem pomocí speciálního kabelu nebo ocelového lana. Zdroj energie a řídicí systémy jsou kvůli nutnosti minimalizace a co nejmenší hmotnosti robota umístěny v servisním voze.

V současné době se tyto systémy využívají k celé škále činností. Od inspekce starých potrubních systémů před rekonstrukcí, přes nedestruktivní zkoušky svarů až po detekci koroze a průsaku odpadních vod nebo olejů. Společně s příslušnými senzory bývá obvykle robot osazen ještě videokamerou a malými světlomety.

Konstrukce robotů je vesměs založena na kolovém nebo pásovém podvozku (obr. 4.1.3. – 8), avšak s nestandardním a zajímavým řešením přišla americká firma CAT, která vyvinula



šestinohý systém pro inspekci chladírenského potrubí. Tři páry nohou, rozmístěných v úhlovém rozmezí 120° se pomocí pneumatického mechanismu vzpírají do stěn trubky a pomalu se pohybují vpřed. Pneumatické motory jsou umístěny ve středové části robotu. Oproti robotům s kolovými podvozky, dokáže toto zařízení bez obtíží překonávat například náhlou změnu průměru potrubí a je flexibilnější při pohybu v jeho ohybech.

Obr. 4.1.3. – 8 Robot pro inspekci potrubí

### Databáze

Z uvedených příkladů je zřejmý rozptyl koncepcí i provedení a účelových funkcí SR, využívaných pro inspekční činnosti. Zachycený přehled jednotlivých příkladů není zdaleka úplný (z běžně dostupných na internetu). Je tedy představitelný rozsah prací pro inventarizaci prostředí, funkcí a variant provedení prvků i sestav pro konečné závěry o určité unifikaci a variabilitě modulů ke konkrétnímu účelu. Z hlediska struktury (pojednáváme přitom stále o mechanickém subsystému SR) bychom rozlišovali subsystém mobility, subsystém manipulační s nějakým druhem efektoru a subsystém technologický, realizující servisní činnost – např. čištění, hašení, detekci chemických látek, aj.

Při této činnosti bude nezbytné uplatnit jednak principy funkční a hodnotové analýzy k charakteristice silných a slabých míst jednak uplatňovaných postupů (technologie) inspekce, jednak konkrétních funkcí a orgánů již provedených konstrukcí. Dále je nutné pečlivě zvážit volbu některého z databázových systému pro tento účel. Systém spojuje počítačovou podporu konstrukce, technologie i výroby pomocí znalostních bází typových, konstrukčních a technologických řešení, realizovaných v konkrétním podniku a vyznačuje se zpravidla značnou variabilitou.

Takové systémy jsou samozřejmě využitelné pro jakékoliv produkty. Vzhledem k náročnosti postupů pro navrhování mechatronických systémů a trendům při jejich výrobě a aplikacích, se jeví aplikace klasifikačních systémů jako mimořádně efektivní pro výrobce i uživatele. Grafická obálka dat pak samozřejmě bude zahrnovat všechny vyráběné moduly (včetně řídicích, senzorických, periferních aj.) a jejich prvky, včetně jejich parametrů, vlastností, technologie a výkresové dokumentace. Touto formou může být pochopitelně integrována také celá poznatková základna získaná z výzkumu a vývoje v oblasti, která je předmětem dalšího řešení - ve výše uvedených případech to budou údaje vztažené k inspekčním činnostem realizovaným prostřednictvím SR. Je tedy uskutečnitelné vytvoření předběžných variant struktur pro dané zadání, ověření pomocí vícekritériální analýzy a následné propracování a podrobné ověřování pomocí jednotlivých segmentů CAD/CAM.

V souladu se zásadami metodiky konstruování si všimněme především tvorby variant koncepčního návrhu produktu. Zde je významnou pomůckou obálka dat, příp. Pro/PDM aj. Nad těmito databázemi lze vytvářet koncepční návrhy, vycházející z parametrů světových konkurenčních produktů nebo směřující k parametrům lepším. Realizovatelnost variant a dosažitelnost jejich parametrů lze kontrolovat velmi rychle pomocí speciálních postupů.

Pro koncepční řešení lze využít možností zjednodušené prezentace při vytváření sestav dvěma způsoby: shora - dolů (top - down) a zdola - nahoru (bottom - up). (Pozn.: je nutné odlišit od stejného označení pro jiný účel v kap. 6.1, pro odlišení používáme písmena malé abecedy).

V raných fázích řešení, kdy informační neurčitost je značná, byly dosud užívány zjednodušené postupy hledání variant řešení, silně závislé na vytvořených databázích, které svým způsobem konzervovaly i překonané možnosti řešení. Postupy navazující na předběžný návrh pak byly nutně iterativní, časově i finančně náročné. Optimalizační výpočty a ověřování konstrukcí pomocí MKP a důsledná analýza chování konstrukce byly možné až ve fázi dosti detailního prokonstruování jednotlivých stavebních prvků a zpřesnění parametrů, které vstupují do těchto analýz. Rovněž změny vnášené do konstrukce byly velmi časově náročné.

Zmíněné techniky (top - down, bottom - up), které se uplatňují k některým specifickým účelům (průmyslový design), lze využít i pro koncepční etapy řešení mechatronických systémů. V zásadě jde o variantní tvorbu návrhů, která využívá zjednodušené prezentace rozhodujících stavebních uzlů a prvků, buď formou „obálek“ nebo „skeletonů“.

Pojem obálky odpovídá intuitivnímu chápání významu tohoto slova. Jestliže jsme již dříve vytvořili konstrukce sestav, podsestav, agregátů, či složitých dílů, pak Pro/Engineer umožňuje libovolnou úroveň zjednodušení takové konstrukce, s potlačením vybraných prvků, přičemž atributy zůstanou zachovány (těžiště, momenty setrvačnosti aj.). Např. při konstrukci SR, máme k dispozici několik modulů a dalších prvků a také jejich obálky. Návrháři jednotlivých skupin pak mohou pracovat nezávisle na sobě (concurrent engineering), při zachování vybraných parametrů. Skeletony jsou naopak nehmotné obrysy těles (vnějších rozměrů), skupin, nebo agregátů, kterým však lze libovolné atributy „přidělit“, a simulovat za těchto zvolených podmínek chování konstrukce. K získaným modelům, pokud nám vyhovují můžeme dokomponovat postupně reálné agregáty a prvky tak, abychom zvolené atributy dodrželi nebo se jim nejvíce přiblížili. Můžeme ovšem a budeme logicky co nejvíce používat, v databázi již uložených obálek existujících prvků s eventuelními úpravami. Zadané úpravy, případně i ve variantách, může souběžně konstruovat samostatná konstrukční skupina. Čím širší bude databáze obálek, tím rychleji se dostaneme k výslednému řešení a tím více variant, podle zadaných požadavků zvládnem. Potřebné analýzy a optimalizace konstrukce a následné úpravy jsou již velmi přesně cílené a proto rychlé.

Části konstrukce ve kterých se objevují výraznější disproporce mezi atributy obálek a skeletonů, pak zkoumáme dál, s využitím systému pro podporu inovačního myšlení při tvůrčích technických činnostech - Invention Machine a metodami funkční analýzy.

Mechatronické systémy se vyznačují tendencemi k vytváření modulárních struktur, což uvedeným postupům napomáhá.

#### 4.1.4. Předběžný návrh - studie

##### Základní kroky – charakteristika a postup

Návrh SR je odpovědí na vznik určité potřeby, přičemž představa se odvíjí od účelové funkce, zpravidla tedy transformace realizované známou nebo neznámou technologií. Samozřejmě může být na začátku i první impuls dán z činnosti již existujícího SR, který by variantně mohl plnit podobnou účelovou funkci. I v tomto případě se musíme vrátit k analýze technologie a k provedení její optimalizace.



První nápady musí být nejdříve nějak zachyceny a představeny - popíší se základní úkoly k podchycení účelové funkce, oblast nasazení, předběžný požadavkový profil systému, state of art (aktuální stav provádění).

Pokud se týká specifikace uvedených atributů je nutné vždy kontaktovat tři důležité subjekty k jejich upřesnění:

Provozovatele (osoba či firma) - představuje potenciálního kupce SR , jehož služby nabízí.

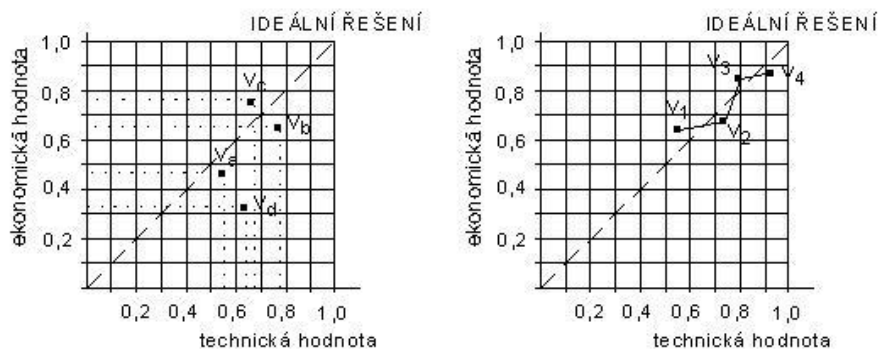
Obsluhu SR - je zodpovědná za manipulaci a řízení systému. Definuje také kvalifikační požadavky, které se pro manipulaci se systémem musí stanovit.

Uživatele - nárokuje služby SR.

Může jít o stejné nebo rozdílné osoby nebo okruhy osob.

Užitný profil systému umožňuje odstupňování a hodnocení žádoucích předností (výhod) při nasazení SR. Profil je strukturován z hledisek - finančních, kvalitativních, sociálněetických (velmi důležitý aspekt u většiny SR) a image (společenská akceptace). Umožňuje konfrontaci předností SR s dosud používanými postupy (srovnatelnými službami). Z ekonomického hlediska je nutný odhad a porovnání nákladů na základě tržního potenciálu a operačního času (doby provedení).

Pro rozvoj komunikace nad všemi aspekty možného návrhu je nutné se rychle dopracovat k vizualizaci návrhu. To ovšem až po etapě návrhu funkční struktury, kdy se důsledně držíme zásady abstrahování od konkrétních představ (při jednání s uživatelem to nelze vždy dodržet). K vizualizaci existují jako vhodné nástroje dnešní ICAD systémy, které umožňují vytváření představ o produktu v různých úrovních komplectace a propracování, počínaje jednočárovými schémata, přes využití „prázdných prvků“, obálek, zjednodušených reprezentací aj. Je možné již v této fázi vyšetřovat kolize, modelovat funkci mechanismů, ověřovat hmotnostní parametry, těžiště, optimalizovat konstrukční parametry i rozdělení napětí a deformací, to vše za cenu nepříliš velkých nákladů a časových nároků.



Obr. 4.1.4. – 1 S diagramy

Vizualizace také pomáhá upřesnit, které funkce mají být systémem plněny a mimo to se již v této fázi získává přehled o kritických prvcích, agregátech nebo subsystémech.

Technickoekonomická analýza a hodnocení má principiálně prokázat technickou realizovatelnost a ekonomickou realizovatelnost. Protože pro tyto první analýzy je údajů velmi málo je nutné stavět zejména na funkční a nákladové analýze TechOptimizeru, případně existují-li již srovnatelné produkty, pak na srovnání s nimi a konečně si lze vypomoci vytvářením modelových prototypů, ve kterých bude použito částečně známých prvků a systémů (nebo srovnatelných) a nebo dílčí „kritické“ uzly budou ověřovány počítačovou simulací, případně na fyzikálních modelech měřením, kde zvláště uplatnění Rapid prototypingu s následným testováním může vyjasnit cestu k překonání problému.

Při prvních odhadech ekonomických aspektů řešení vycházíme ze srovnání charakteristik současného stavu provádění služeb s odhady pro aplikaci nově navržených servisních robotů. Jedná se především o porovnání provozních a pořizovacích (případně výrobních) nákladů, času k provedení služby, počet specifických služeb poskytovaných SR, tržní potenciál vztahovaný na segmenty trhu, jiné výhody či přínosy.

K systematickému posuzování výsledků lze užít i poměrně jednoduchých hodnotících metod a ke zpracování výsledků použít např. „S“ diagramu (obr. 4.1.4. – 1). V levé části obrázku jsou naznačeny výsledky předběžného hodnocení variant, v pravé postupné hodnocení vybrané varianty v různých etapách vývoje.

### Příklad postupu při předběžném návrhu

Relativně rychlé nenáročné zpracování předběžných návrhů SR pro určitou oblast aplikací lze vypracovat různými způsoby i když jednotlivé základní kroky budou vždy obsaženy. Jde vesměs o podklady určené pro předběžná jednání se zainteresovanými subjekty v dané oblasti, jimiž může být výsledek značně ovlivněn. Schéma postupu je podchyceno v tab. 4.1.4. – 1, 2.

Charakteristiky	Upřesnění
Stručná představa o principu	Klíčové představy o oblasti uplatnění SR
Současné stav provádění činnosti	Jak a za jakých okolností je služba aktuálně prováděna, výhody, problémy
Hlavní funkce, základní údaje o výkonech	Údaje o výkonech (odhad) požadovaných po navrhovaném robotu
Prostředí nasazení	Specifika okolí a prostředí, ve kterých by SR pracoval
Technický scénář, vývojový popis	Popis servisu realizovaného navrhovaným SR
Skica řešení	Vstupní představy o řešení ve 2D
Model	Hrubý návrh ve 3D
Kritické dílčí funkce (klíčové komponenty)	Charakteristiky DF a klíčových komponent
Užitná hodnota/ tržní potenciál	Četnost potenciálních úloh SR v tržním prostoru a identifikace užitné hodnoty (funkčnosti)
Inovace /aspekty uvedení na trh	Popis aspektů, které ovlivní uvedení na trh
Vynaložené vývojové náklady	Odhad nákladů na podstatné vývojové položky

Tab. 4.1.4. – 1 Příprava předběžného návrhu - studie

Z oblasti uvedených inspekčních činností byly zpracovány podklady a jeden z předběžných návrhů SR se základní specifikací. Na obr. 4.1.4. – 2,3 je celková sestava drátového i stínovaný modelu inspekčního potrubního robotu vytvořený v Pro/ENGINEERu, charakterizovaný v tabulce základními atributy. Dále je v obr. 4.1.4. – 4 obdobně vytvořen model mobilní báze SR jako jedna z dalších verzí pro realizaci.

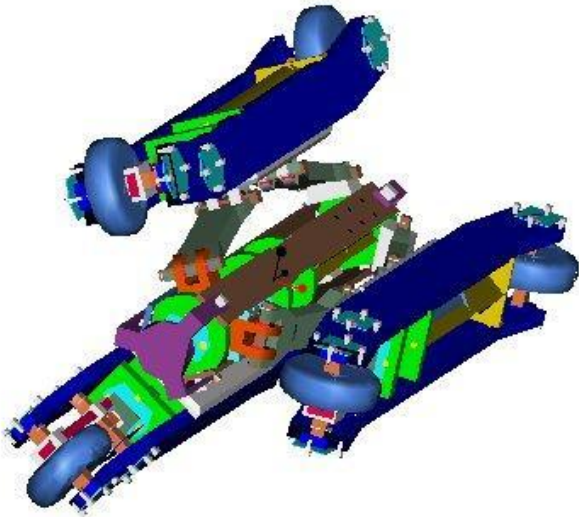
Charakteristiky	Upřesnění
Stručná představa o účelu	Inspekce vad a celkového stavu potrubí – parovodů, plynovodů, vodovodních řádů, bez výkopu potrubí, vstup v místě připojení regulačních armatur v šachticích
Současné provádění činnosti	Zatím nezbytný výkop a tím vysoké náklady, jednak přímé, jednak nepřímé (např. narušení dopravy nebo provozu ve výrobních prostorách atd.), opravy až po poruše znamenají rovněž vysoké náklady.
Hlavní základní údaje o výkonech	Rychlost pojezdu $v = 6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , zrychlení $a = 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , nosnost 20 kg ve vertikální poloze, délka pojezdu 80 m.
Prostředí nasazení	Rozeř potrubí – vnitřní průměr 250 – 400 mm, suché potrubí, kovový povrch, možnost nánosů, zbytky vlhkosti, případně průsak. Teploty prostředí $-5^\circ$ až $+15^\circ\text{C}$ .
Technický scénář, vývojový popis	SR pojíždí po montáži potrubím a identifikuje vady – trhliny a mikrotrhliny, místa průsaku vody, korozi, nánosy, vodní kámen, velikost nerovností, deformace. K tomuto účelu bude opatřen vhodnými senzory a CCD kamerou. Dálkové ovládní z montážního vozu. Dodávka elektrické energie odvíjeným kabelem.
Skica řešení	Formou skici zpracován pouze layout k řešení poměrů v mechanismu – viz obr.
Model	Hrubý návrh ve 3D – proveden v Pro/Engineer, drátový model i stínovaný, možnost prohlížení z různých směrů, možnost animace pohybu, vyšetření kolizí.
Kritické dílčí funkce (klíčové komponenty)	Rozpěrací mechanismus, zajištění bezpečného držení ve vertikálním potrubí (změny součinitele tření), zajištění proti pádu.
Užitná hodnota/ /tržní potenciál	Vzhledem ke stavu potrubí v ČR velký tržní potenciál, rychlá návratnost, prevence havárií a velkých škod, případně úrazů. Dostupnost finančních prostředků. Dlouhá životnost.
Inovace /aspekty uvedení na trh	Možnost dalšího vývoje k aplikacím oprav, zajišťování servisu těchto strojů a především zisky z dodávky prvků a hmot k opravám.
Vynaložené vývojové náklady	Mechanická konstrukce – vývoj 300 tis. Kč, řídicí systém nákup, sensorický systém nákup prvků, vývoj systému 120 tis. Kč, motory nákup 180 tis. Kč.

Tab. 4.1.4. – 2 Konkretizace tvorby studie na příkladu

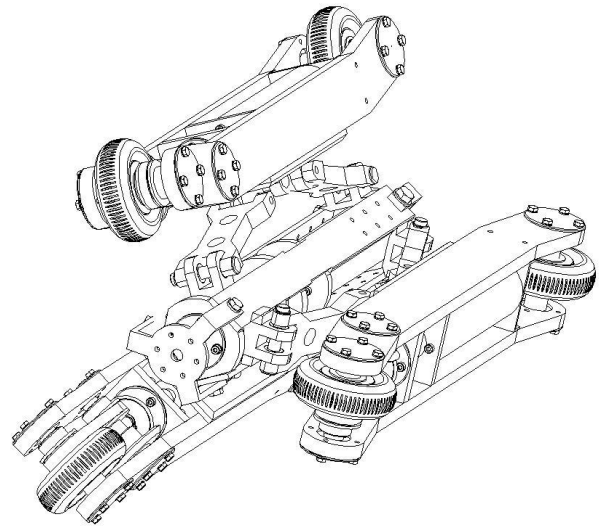
#### 4.1.5. Vlastní postup návrhu servisních robotů

Na základě dosud uvedených výchozích úvah a údajů uvedme do souvislosti získané poznatky. Je dána globální situace průmyslového a hospodářského vývoje s objektivně formulovanými požadavky trhu, které se promítají do tvůrčí a výrobní činnosti konkrétních firem a odvětví. Jsou k dispozici soubory poznatků Vědy o konstruování, Integrované metody z různých oblastí, nové poznatky o tvůrčí činnosti zahrnuté do metod TRIZ, ARIZ, dále řada prostředků (a do nich promítnutých metod) počítačové podpory návrhu – typu TechOptimizer, ICAD, MKP, PROENGINEER, SolidWorks, aj., organizační software jako doplňkové, ale významné prostředky (Project).

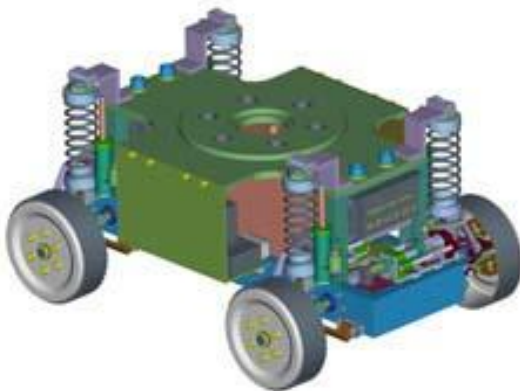
Jde nám o racionální řešení přechodu od zadání úkolu (vysoká informační neurčitost a tedy nejistota o dosažení cíle), který se jeví jako zcela nový, k nalezení popisu nového technického systému (jeho stavební struktury), který realizuje požadované výstupní účinky (účelové funkce) optimálně.



Obr. 4.1.4. – 2 Stínovaný model



Obr. 4.1.4. – 3 Drátový model



Obr. 4.1.4. – 4 Další varianta řešení

konkretizujeme pomocí morfologické matice. V ní hledáme k funkcím vhodné orgány, realizující funkční principy fyzicky, na základě vyhovujících fyzikálních efektů. Výsledkem je, v rámci koncipování, vytvořená orgánová struktura. Jak funkční, tak i orgánová struktura, umožňují tvorbu variant a musí být, na základě hodnocení podle zvolených kritérií, optimalizovány. Pro definitivní popis nově navrhovaného technického systému pak orgánovou strukturu převádíme na strukturu stavební.

### Od vyjasnění úkolu k optimalizaci technologie

Úkol může být v servisní robotice založen různým způsobem. Může jít o konkrétně projevový zájem skupiny zákazníků na trhu, zájem konkrétního zákazníka projevový k výrobci, přípravu výrobce na uspokojení identifikované potenciální potřeby automatizovaného servisu v různých oblastech aj.

Ve všech případech bude nutné pro vyjasnění úkolu komunikovat se zainteresovanými stranami a je tedy vhodné zpracovat předběžný záměr (studii), jejíž pracnost není příliš velká (viz předchozí kapitola). Lze předpokládat, že pro konstruktéra servisních robotů budou jak dosud užívaná technologie servisní činnosti, tak i prostředí a speciální poznatky oboru zcela nové a potřebný průzkum se bude dotýkat poměrně velkého počtu osob (případně i firem, úřadů a institucí). Pokud bude snahou firmy pokrýt svými produkty celou jednu oblast servisních činností pak je nezbytné založit vhodnou databázi na zvoleném software a uplatnit vhodný klasifikační systém, do kterého lze výsledky vyšetřování zavést a podle charakteristických znaků srovnávat s již realizovanými konstrukcemi do databáze zavedenými. Databáze bude zahrnovat jak schémata struktur, tak varianty modulů a prvků.

Významnou součástí stanovení úkolu je vyšetření profilu požadavků, a to transformací zákaznických požadavků do vlastností výrobků, aplikací metody QFD, která sama o sobě zahrnuje splnění dalších úkolů, jako je srovnání zjištěných požadavků s konkurencí, zjištění významnosti jednotlivých vlastností a konkretizace rozsahu hodnot parametrů vlastností. Výstupem je seznam požadavků, který však bude ještě v dalším postupu zpřesňován. V této fázi se zakládá projektové řízení úkolu a naplňuje databáze sw Microsoft Project.

### **Optimalizace technologie**

Vzhledem k požadavku abstrahování od konkrétních představ o konkrétním fyzickém provedení SR (stavební struktura), začínáme vždy (bez ohledu na předběžnou studii a různé představy, plynoucí z prvních expertních pohovorů se zainteresovanými subjekty) od návrhu technologie, resp. technického procesu.

Důsledné využívání modulu Product Analysis TechOptimizeru, dává možnost již v této etapě posuzovat vzájemné ovlivňování jednotlivých prvků systému, z hlediska žádaného cíle, formulovat představy o působení (druzích i úrovni) užitečných i škodlivých vlivů, o problémech a nákladech atd.

Je možné založit více variant (jako samostatné projekty TO) technického procesu, nebo vycházet z jedné varianty a její modifikací (trimováním, zlepšováním funkcí) a následným hodnocením se blížit k optimálnímu řešení, ve fázi zatím verbálního vyjádření funkcí.

Výsledkem je inventura problémů, které jsou podle závažnosti hodnoceny a připraveny pro formulaci zadání úloh, které v rámci projektu musí být řešeny (zde je namístě doplnit databázi projektového řízení).

### **Orgánová struktura**

Přechod od funkcí formulovaných v rámci navržené struktury technického procesu k orgánové struktuře, tj. k možným fyzikálním realizacím funkcí je proveditelný (racionálně) pouze přes morfologickou matici. Každou z vybraných variant (navzájem porovnaných na základě vhodné hodnotící metody hodnotové analýzy HA) zavedeme jako samostatný projekt do Product Analysis TO. Tato analýza je dalším stupněm optimalizace již konkrétně pojmenovaných orgánů – při kreslení grafů komponentní struktury, vazební a funkční struktury je nezbytné současně zpřesňovat nebo znovu vykreslit hrubý 3D model(y).

Vybrané problémy, které posléze zůstávají k řešení jsou přesouvány do modulů syntézy (Efekty, Principy, Prognózy).

## Návrh stavební struktury

Stavební struktura v nejhrubší podobě je ve variantách k dispozici vlastně již od předběžné studie. Po formulaci a sestavení orgánové struktury ji můžeme doplnit jako model ICAD systému do různé úrovně (podle okolností – některé prvky mohou být převzaty úplně, jiné modifikovány, další vytvořeny přímo v sestavě, lze použít „prázdných“ prvků, obálek, zjednodušené reprezentace prvku, podsestavy, uzlu. Dále využíváme ke tvorbě unifikovaných prvků funkci Family Table, k založení principu funkce mechanismů, jejich schéma, pomocí funkce Layout.

Jednotlivé části stavební struktury mohou být optimalizovány funkcí Behavior Modeler, vyšetřovány kolizní situace v sestavě a podle konstrukčního záměru upřesňována parametrizace v závislosti na zvolených základních parametrech.

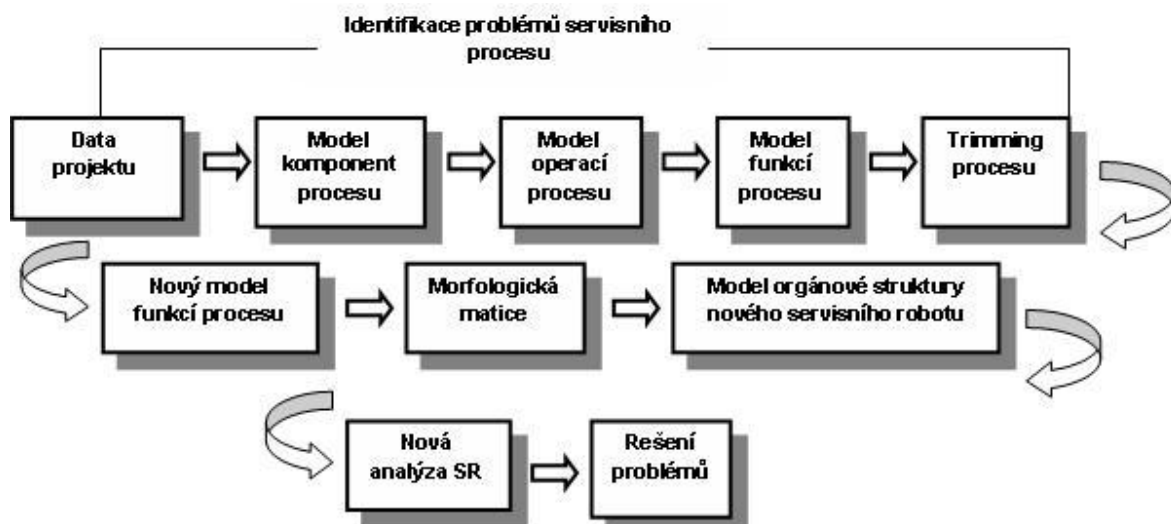
## Kontrola návrhu

Ještě před úplným dokončením struktury, tam kde je nejistota o úspěšném řešení problémů, nebo prvků, lze i na hrubém modelu provést předběžné kontroly, využitím např. modulů Motion a Structure, na základě vytvořeného modelu v Pro/ENGINEERu.

Podrobnou kontrolu pak provedeme na základě postupů – kinematické a dynamické analýzy (Skařupa, Mostýn 2001) po úplném dokončení stavební struktury, s přípustným zjednodušením vyšetřovaných modelů v Pro/MECHANICE, WorkingModelu, ap.

### 4.1.6. Celkový přehled návrhu servisních robotů

Schématicky je postup návrhu nového SR, v části která využívá TO, vyjádřen v obr. 4.1.6.-1 a v tab. 4.1.6.-1., z nichž jsou zřejmé souvislosti mezi všemi kroky postupu a použitými hlavními metodami a prostředky.



Obr. 4.1.6.-1 Graf postupu

Název etapy	Základní kroky	Metody a prostředky
Stanovení úkolu	Upřesnění typu úkolu (požadovaných účinků)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expertní pohovory</li> <li>• Vypracování předběžných návrhů (studie)</li> <li>• Hrubý model</li> <li>• Expertní pohovory ke studii</li> <li>• Termínové, kapacitní a nákladové plánování, příprava concurrent engineeringu, síťové plánování, upřesnění zdrojů – založení projektového řízení, sw MS Project.</li> </ul>
	Stanovení cílů	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QFD a související činnosti</li> </ul>
	Stanovení požadavků	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Požadavkový list</li> </ul>
Tvorba koncepcí	Návrh technického procesu – varianty, analýza a optimalizace (technologický princip a postup)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funkčně nákladová syntéza a analýza</li> <li>• TRIZ, ARIZ</li> <li>• Založení potřebného počtu projektů v TechOptimizeru v. x., modul analýzy procesu (aplikace požadavkového listu)</li> </ul>
	Stanovení funkční struktury	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TechOptimizer v. x., modul analýzy procesu</li> </ul>
	Stanovení orgánové struktury	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplikace morfologické matice</li> <li>• Hodnocení variant</li> <li>• Úprava a doplnění hrubých modelů (ICAD)</li> <li>• Přejít k analýze konkrétních variant modelu v modulu analýzy produktu (TechOptimizeru), vyhodnocení problémů, trimování a zlepšení funkčnosti</li> <li>• Zlepšení struktury a částečné odstranění problémů pomocí modulu záměny prvků.</li> <li>• Aplikace Manažera problémů k řešení nejvýznamnějších problémů v modulech syntézy TechOptimizeru.</li> <li>• Internetový asistent (předběžné ověření právní čistoty řešení)</li> </ul>
Navrhování	Vypracování hrubé stavební struktury	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplikace Layoutu – upřesnění parametrizace, Behavior modeleru</li> <li>• Rozpracování 3D modelů na základě orgánové struktury) – ICAD, Pro/ENGINEER, doplnění parametrů, stanovení předběžných hmotnostních parametrů, převzetí modelů SR nebo jejich částí do Pro/MECHANIKY, dílčí optimalizace rozměrů v modulu Motion, Structure</li> <li>• Předběžné výpočty a ověřování</li> </ul>

		základních parametrů <ul style="list-style-type: none"> <li>• Varianty a optimalizace SS</li> <li>• Analýza problémů v TO, modul analýzy produktu</li> </ul>
	Vypracování úplné stavební struktury	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ICAD – Pro/ENGINEER</li> <li>• Upřesnění technických vlastností při využití simulací, Pro/MECH, WorkingModel, DYMOLA</li> <li>• Kontrolní výpočty (viz postupy lit. Teorie průmyslových robotů)</li> </ul>
Detailování úplné stavební struktury		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolní výpočty</li> </ul>

Obr. 4.1.6.-1 Přehled postupu postupu



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se seznámili s následujícími pojmy:

- Servisní činnosti
- Analýza servisních činností
- Studie předběžného návrhu
- Celkový přehled návrhu

Analýzou servisní činnosti, kterou chceme automatizovat získáme základní orientaci ve struktuře funkcí a odpovídajících prvků, které bude robot muset realizovat pro úspěšný návrh koncepčního řešení.



## Kontrolní otázka

- 1) Co je to servisní činnost?
- 2) Jaké struktury pro návrh robotu potřebujeme zpracovat z analýzy servisních činností?
- 3) Co to jsou S křivky a k čemu slouží?
- 4) Jaké jsou základní položky studie – scénáře pro předběžný návrh servisního robotu?





## Úkol k řešení

Sestavte studii - scénář pro návrh servisního robotu navrhovaného pro konkrétní technologii. Použijte některý z již realizovaných servisních robotů s dokumentací zvolenou z internetu, ale pro změněný objekt servisní činnosti (např. sklizeň rajčat změňte na sklizeň jiné plodiny a porovnejte odchylky v konstrukci)!

## 4.2. METODY NÁVRHU PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

### Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

Budete umět specifikovat: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Požadavky a kritéria pro konstrukci průmyslových robotů</li> <li>▪ Základní úkoly a stanovení koncepcí</li> <li>▪ Předběžné funkční výpočty průmyslových robotů</li> <li>▪ Postupy návrhu a výpočtů modulárních robotů</li> </ul>	Cíle kapitoly
<i>Požadavky, kritéria, konstrukce, průmyslové roboty, volba koncepcí, předběžné výpočty, funkční výpočty, modulární roboty.</i>	Klíčová slova



**Čas ke studiu:** 3 hodiny



### VÝKLAD

Mnohé z poznatků o návrhu servisních robotů lze přímo využít i pro průmyslové roboty s tím, že prostředí ve kterém robot působí a úlohy, které řeší jsou většinou jednodušší a prozkoumanější, čili přenos poznatků (know how) je lépe zvládnutelný a uplatnitelný. Avšak i zde vznikají mnohdy zásadní inovace, které vyžadují metody návrhu popsané u servisních robotů.

#### 4.2.1. Požadavky a kritéria pro konstrukci průmyslových robotů

Konstruktéři robotů musí využívat propracovanější nástroje i k definici požadavků na konstrukci, ke stanovení profilu požadavků, a to zvláště se zřetelem k rychle se měnícím potřebám trhu.

Zásadním přínosem k rychlému převodu poznatků na řešení zařízení je vytvoření odpovídajícího systému počítačové podpory pro návrh geometrického, kinematického a dynamického modelu k volbě kinematického řetězce z hlediska optimalizace systému, k poznání slabých míst a k přezkoušení fyzikálních omezení výkonu zařízení při programování.

Značný význam má co nejpřesnější vystižení chování zařízení při zohlednění strojních komponent. Pro návrh se používají dosud různé metody, které však se různým způsobem kombinují mezi sebou i s dříve obvyklými inženýrskými postupy, protože ne všechny moderní metody pro daný účel vyhovují nebo jsou nedostatečně rozvinuty, nehledě k utajování firemního know how.

Jde zejména o metody pro:

- návrh koncepcí PR
- definování globálních požadavků
- profil požadavků (požadavkový list)
- interakci s charakteristikami ovlivňujícími náklady

vytvoření geometrického modelu

- vyšetření pracovního a kolizního prostoru
- vyšetření geometrických souvislostí pro konkrétní typ robotu
- vyšetření inverzní transformace pro příslušný počet stupňů volnosti
- stanovení geometrických rozměrů podle definovaných úkolů
- znázornění pohyblivosti kinematického řetězce

vytvoření kinematického modelu

- určení charakteristik řízení při provozu PTP
- určení charakteristik řízení při provozu CP
- optimalizace podle času
- srovnání různých kinematických řetězců
- přepočet na pohyby tuhých těles
- kinematické dimenzování pro zadané výpočty

vytvoření dynamického modelu

- sestavení pohybových rovnic
- zatížení systému a jednotlivých komponent
- zohlednění pohonů v pohybových rovnicích
- analýza chování systému z hlediska poddajnosti

Konstrukce robotu vyjadřuje cíle výrobce a požadavky uživatele na koncepci zařízení. Výrobci své cíle zpravidla formulují podle své pozice na trhu (tab. 4.2.1.-1,2).

Mimo tyto obecně platné požadavky je třeba vyšetřovat požadavky specifické z obou hledisek.

Vycházíme z předpokladu, že bude v zásadě opakována některá z již známých a využívaných koncepcí průmyslových robotů s případnou dílčí inovací (v koncepci). V případě aplikace nových technologií a z toho vyplývajících nových koncepcí PR lze aplikovat postup uvedený u servisních robotů.

## 4.2.2. Volba koncepce

Základním koncepčním rozhodnutím při návrhu průmyslových robotů je volba kinematického řetězce se všemi jeho základními atributy a přizpůsobení požadovaným úkolům (tab. 4.2.1.-3). Potřebné prostředky počítačové podpory by měly být užity k těmto úkolům co nejdříve již ve fázi návrhu.

Kritérium	Popis	Formulace řešení	Účinek
Jednodušší stavba robotu	Výběr nejjednodušších návrhů, které splní požadovaný profil požadavků dostatečně	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Výběr vhodných kinematických řetězců a omezení rozměrů robotu</li> <li>• Přiměřené výrobní tolerance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zmenšení výrobních nákladů, zvláště na montáž</li> <li>• Zvýšení spolehlivosti</li> </ul>
Normalizace a standardizace	Odpovídající použití standardních komponent	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zmenšení počtu dílů</li> <li>• Použití osvědčených komponent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zmenšení nákladů na konstrukci, výrobu, testování a skladování</li> <li>• Zjednodušené užití náhradních dílů</li> </ul>
Flexibilita	Rozšíření oblasti aplikací	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Univerzální koncepce</li> <li>• Stavebnicové (modulární) řešení</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zpravidla vyšší materiálové náklady</li> <li>• Nižší náklady při konstruování, výrobě a testování</li> <li>• Kratší dodací lhůty</li> <li>• Vyšší sériovost</li> </ul>
Lehká konstrukce (tenkostěnná)	Zlepšení poměrů hmotnost vs. užitečné zatížení	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyšetření relace tuhosti os k tuhosti hnacích komponent</li> <li>• Aplikace metody systémů s více tělesy</li> <li>• Nasazení metod konečných prvků</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zmenšení spotřeby energie a nákladů na pohony a výkonové prvky</li> <li>• Zmenšení materiálových výdajů</li> <li>• Snížení časů pro přemístění</li> </ul>

Tab. 4.2.1.-1 Cíle konstrukce robotů z hlediska výrobců

Kritérium	Popis	Formulace řešení	Účinek
Přiblížení aplikaci	optimální přizpůsobení úkolu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aplikace expertní dotazníkové metody, analýza pracovní scény a systému</li> <li>• přizpůsobení daným manipulačním úkolům</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• účelné vynaložení nákladů</li> <li>• zvýšení výkonnosti</li> <li>• jednodušší obsluha</li> </ul>
Spolehlivost a bezpečnost	bezpečnější provoz bez rušivých vlivů z hlediska definovaných nároků zařízení	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hw a sw opatření ke snížení přetížení</li> <li>• provedení analýzy k vyhledání slabých míst konstrukce</li> <li>• příprava a návrh funkční diagnostiky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• lepší využitelnost a pokles</li> <li>• zvýšení bezpečnosti pro obslužný personál</li> </ul>
Snadná údržba a obsluha	zjednodušení obslužných a údržbářských prací	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dostupnost elektrických zařízení a rozvodů, převodových prvků a pohonů</li> <li>• jednoduché seřízení</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• širší využitelnost a pokles nákladů na údržbu</li> <li>• jednodušší montáž</li> </ul>
Příznivá energetická bilance	minimalizace spotřeby energie pro daný úkol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• volba vhodných kinematických řetězců</li> <li>• volba optimálních převodových poměrů</li> <li>• lehké konstrukce</li> <li>• vyšetření optimálních</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pokles spotřeby energie u výrobce i u uživatele</li> <li>• pokles nákladů na pohony i výkonné prvky</li> </ul>

		trajektorií	
Tab. 4.2.1.-2 Požadavky na konstrukci robotů z hlediska uživatelů			

Tabulka odvozuje dílčí funkce prvků od koncepčních dílčích úkolů, což v důsledku vede k volbě odpovídajících prvků.

Koncepční dílčí úkoly	Dílčí funkce prvků	Dílčí prvky
Určení zařízení pro pohyb kinematického řetězce a efektoru	Přivedení kinematického řetězce a efektoru k pracovnímu místu	Pojezdová jednotka
Určení mechanického zařízení k pohybu objektu manipulace (OM)	Pohyb OM k pracovnímu místu	Kinematický řetězec
Určení zařízení k zajištění dané polohy a orientace OM	Držení, případně uvolnění OM	Efektor
Určení zařízení k zapamatování, transformaci, výpočtu a vydání signálu	Data podle zadaného programu přeměnit v příkazy k pohybu pro kinematický řetězec a pojezdovou jednotku	Řízení
Určení zařízení pro změnu na signál vyššího výkonu	Energii měnit	Výkonová část
Určit interface člověk-stroj	Interface k manuálnímu zadání úkolů člověkem a vazba na program pohybu	Obslužná část
Vyškolit personál k programování a kontrole testovacího cyklu	Spojit program pohybu online s člověkem, offline s počítačem	Člověk, počítač
Určit senzory a sensorické řízení a spojit s řízením	Automatické zpracování a převedení do programu pohybu	Senzory, sensorické řízení

Tab. 4.2.1.-3 Koncepční dílčí úkoly při vývoji systému robotu se známými dílčími prvky a jejich funkcemi

## Základní úkoly

Ve fázi koncepce identifikujeme dílčí koncepční úkoly pro návrh PR; mezi dílčími subsystémy existují důležité vztahy, které je třeba brát v úvahu, protože tvorba koncepce a vlastní vývoj se většinou odehrávají v oddělených pracovních skupinách.

Patří sem:

- Stavba a chování systému kinematického řetězce v závislosti na výkonnosti řídicího systému.
- Zatížení kinematického řetězce v závislosti na parametrech a nákladech výkonových částí.
- Koncepce efektoru v závislosti na kinematickém řetězci a vlastnostech řízení.

Kombinací translačních a rotačních kinematických dvojic lze dosáhnout velkého počtu možných řešení. Při zvážení různých závislostí a omezení však počet efektivních řešení značně klesne.

Nejdůležitější omezení:

- Počet os - každá osa zvyšuje výrobní náklady kinematického řetězce, řízení i výkonových částí a vede zpravidla ke snížení přesnosti polohování nebo dráhy (vzhledem ke sčítání chyb).
- Uspořádání polohovacích a orientačních pohybů - zkušenosti ukazují, že je účelné kinematický řetězec v hlavních a vedlejších osách oddělit. Hlavní osy jsou podstatné pro vytvoření pracovního prostoru (bez orientace), vedlejší osy

jen málo ovlivňují polohu a slouží pro orientaci. Tímto oddělením úloh je možné jednotlivým osám přiřadit velmi odlišné parametry výkonu.

- Souvislost mezi manipulačními úkoly, počet programovatelných os a jejich uspořádání - ve výrobě často existují úkoly, kde postačuje méně než 6 stupňů volnosti. Proto je možné kombinací kartézských os realizovat pohyby po přímkách v prostoru, při provozu PTP. Podobně to platí pro struktury s paralelogramy a rotačními osami.
- Druh provedení os - rotační osy jsou zpravidla výrazně levnější i když dnes to již nehraje tak výraznou roli.

## Postup při koncipování PR

Základním předpokladem při koncipování konstrukce je určení, které kinematické řetězce a jakými mezními parametry splní dané manipulační úkoly z hlediska geometrie - pak lze nalézt jednoznačné řešení z hlediska minimálních požadavků na uspořádání os, vzdáleností os a rozsahu jejich pootočení (tab. 4.2.1.- 4).

V dalším kroku můžeme, podle toho, zda má být robot provozován v PTP (point to point) nebo CP nebo v obou režimech, stanovit kinematické charakteristiky aspoň přibližně (otázky 2, 3 tab. 4.2.1.- 4), v tom smyslu, že se pokoušíme minimalizovat počet variant pro minimalizaci doby přemístění (při PTP provozu) nebo pro minimalizaci kloubových rychlostí a zrychlení (při CP provozu).

Taková vyšetřování nám ukážou tendence, ale nedají jednoznačná řešení. Abychom problematiku zjednodušili může být potřebné operovat s jednotkovými hodnotami při maximálně přípustných rychlostech a zrychleních v těžišti efektoru a určovat jen relativní poměry osových rychlostí a zrychlení a příslušných osových vzdáleností. Na základě získaných rozsahů charakteristik je třeba určit konečnou koncepci nulté série při zohlednění dynamických charakteristik (tab. 4.2.1.- 5). Podobně to platí pro provozní a další uživatelské charakteristiky (tab. 4.2.1.- 6,7).

Otázka	Krok řešení	Parametry pro upřesnění řešení	Parametry robotu
1. Jaké kinematické řetězce a při jakých rozměrech mohou splnit dané geometrické manipulační úlohy?	Volba kinematických řetězců	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polohovací a orientační vektor <math>\bar{X}</math></li> <li>• Náklady spojené s uspořádáním os</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Počet řízených os</li> <li>• Uspořádání os</li> <li>• Mechanická synchronizace os</li> </ul>
	Volba geometrických dat os a polohy os	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polohovací a orientační vektor <math>\bar{X}</math></li> <li>• Objekty v kolizním prostoru</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vzdálenosti os a rozsahy pohybů</li> <li>• Pohyblivost kinematického řetězce</li> <li>• Kolizní prostor</li> </ul>
2. Jaká koncepce uzlů při provozu PTP může minimalizovat doby pohybu ?	Volba kinematických dat os	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Najížděcí (startovací) polohy a orientace v kolizním prostoru</li> <li>• Maximální rychlost a zrychlení v těžišti efektoru</li> <li>• Počet přemístění</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rychlosti a zrychlení vztahované k osám</li> <li>• Mechanická synchronizace os</li> <li>• Přejížděcí funkce</li> </ul>

	Volba vhodného nastavení os	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximální rychlost a zrychlení v těžišti efektoru</li> <li>• Počet přemístění</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provoz PTP</li> <li>• Synchronní PTP provoz</li> </ul>
	Přezkoušení geometrických dat os a nastavení radiusvektorů	Návrat k otázce 1	
	Přezkoušení kinematických řetězců	Srovnání různých kinematických řetězců Návrat k otázce 1	
3. Jaká koncepce robotu při CP provozu nepřekračuje zadané kinematické parametry?	Volba kinematických dat os	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Najížděcí (startovací) polohy a orientace v kolizním prostoru (nebezpečném)</li> <li>• Druh vazby a trajektorie mezi startovacími (výchozími) body v kolizním prostoru</li> <li>• Maximální rychlost a zrychlení v těžišti efektoru</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rychlosti a zrychlení vztahované k osám</li> <li>• Mechanická synchronizace os</li> </ul>
	Volba vhodných interpolačních metod	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximální rychlost a zrychlení v těžišti efektoru</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paulova metoda</li> <li>• Taylorova metoda</li> </ul>
	Přezkoušení geometrických dat os a nastavení radiusvektorů	Srovnání různých kinematických řetězců Návrat k otázce 1	

Tab. 4.2.1.-4 Postup a pravidla pro určení geometrických a kinematických charakteristik

Další tabulka řeší volbu dynamických charakteristik:

4. Jaká koncepce vede k vyváženému řešení odpovídajícímu manipulačním úlohám?	Volba užitečných zatížení a jejich styčných (počátečních) bodů	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stanovené výhodné poměry užitečného zatížení/velikost zdvihu z analýzy pracovní plochy</li> <li>• Maximální síla držení v těžišti efektoru</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Užitečné zatížení v závislosti na nastavení os a kinematických osových dat určených v otázkách 2 a 3</li> </ul>
	Volba osových (kloubových) skříní	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Princip uložení os</li> <li>• Maximální namáhání (napětí, statická deformace, dynamická poddajnost) tělesa kloubu a uložení hřídele kloubu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rozměry a zadání tvaru os ( momenty setrvačnosti, hmotnosti, těžiště hmot) a uložení os s ohledem na rezervy hnacích prvků</li> </ul>

	Volba a umístění hnacích prvků a vyvažovacích systémů	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximální řídicí (?) moment v hnací větvi os</li> <li>• Maximální namáhání tělesa kloubu a nosníku kloubu</li> <li>• Maximální přípustná statická deformace celého systému</li> <li>• Maximální přípustná dynamická poddajnost celého systému</li> <li>• Řešení odměřovacího systému</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rozměry, radiusvektory a hmotnosti hnacích prvků pevně spojených s tělesem kloubu</li> <li>• Radiusvektor, hmotnosti, momenty setrvačnosti a převody rotačních prvků včetně odměřovacího systému</li> <li>• Elektrický pohon (výkon, proud)</li> <li>• Pole charakteristik gravitačního vyvažovacího systému</li> <li>• Mechanická synchronizace os</li> </ul>
	Přezkoušení geometrických dat os a nastavení radiusvektorů	Návrat k otázce 1	
	Přezkoušení kinematických dat os	Návrat k otázce 2 a/nebo 3	
	Přezkoušení seřízení os (?) a/nebo interpolační metody	Návrat k otázce 2 a/nebo 3	

Tab. 4.2.1.-5 Postup a pravidla pro určení dynamických charakteristik

Nyní je třeba řešit postup a pravidla k zajištění optimálního provozu robotu:

5. Jakými opatřeními může být zajištěn spolehlivější a bezporuchový provoz robotu a jeho přizpůsobení manipulačním úkolům?	Identifikace slabých míst robotu pomocí technických měření	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximální statická deformace při jmenovitém zatížení v těžišti efektoru</li> <li>• Maximální přesnost polohy a dráhy při jmenovitém zatížení v těžišti robotu</li> <li>• Maximální podíl tření na řídicím momentu vztaženém k ose</li> <li>• Mechanická frekvence (při objetí rohu) - rezonance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Na osy vztažená statická tuhost tělesa kloubu a prvků přenášejících sílu</li> <li>• Střední velikost rozptylu polohy a dráhy, střední převrácené rozpětí</li> <li>• Elektrický výkon a řídicí moment pohonu a sílu přenášejících prvků</li> <li>• Vlastní frekvence, tlumení a amplitudy celé konstrukce a jednotlivých komponent</li> </ul>
	Přezkoušení geometrických dat os a nastavení radiusvektorů	Geometrické přizpůsobení robotu k manipulační úloze (úlohám) - pokud je možné Návrat k otázce 1	



	Přezkoušení kinematických dat os, seřízení os a/nebo interpolačních metod	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Odstupňování řídicího momentu podle maximálního efektivního momentu a maximálního řídicího momentu</li> <li>• Životnost uložení os</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rychlost a zrychlení vztahené k osám</li> <li>• Vhodné metody pro provoz v režimu PTP a CP</li> </ul>
	Přezkoušení hnacích prvků vyvažovacího systému	Přizpůsobení pohonů robotu k manipulačním úlohám (je-li možné) Návrat k otázce 4	

Tab. 4.2.1.-6 Postup a pravidla k zajištění optimálního provozu robotu z hlediska některých základních charakteristik

A konečně řešíme uživatelské požadavky:

Kritérium	Popis	Formulace řešení	Účinek
Přiblížení k aplikaci	Optimální přizpůsobení k úkolu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Provedení expertních dotazů, analýza pracovního místa a systému.</li> <li>• Přizpůsobení zadanému úkolu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Účelné náklady.</li> <li>• Výkonnost.</li> <li>• Jednoduchá obsluha.</li> </ul>
Spolehlivost a bezpečnost	Bezpečnější provoz bez rušivých vlivů pro definované zatížení robotu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hardwarové a softwarové zásahy ke snížení přetížení.</li> <li>• Analýza slabých míst.</li> <li>• Příprava diagnostických funkcí.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyšší pohotovost.</li> <li>• Zvýšení bezpečnosti obsluhy.</li> </ul>
Vhodnost k obsluze a údržbě	Zjednodušení údržby a obsluhy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dostupnost elektrorozvodů, prvků převodů a pohonů.</li> <li>• Jednoduché seřízení.</li> <li>• Kvalitní dokumentace.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyšší pohotovost a snížení nákladů na údržbu.</li> <li>• Jednoduchá montáž u výrobce.</li> </ul>
Příznivá bilance energie	Minimalizace spotřeby energie pro daný úkol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volba vhodných kinematických řetězců.</li> <li>• Volba optimálních převodových poměrů.</li> <li>• Lehké konstrukce.</li> <li>• Vyšetření optimálních pohybových trajektorií.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pokles spotřeby energie u uživatele.</li> <li>• Pokles nákladů na pohony a výkonové prvky.</li> </ul>

Tab. 4.2.1.- 7 Uživatelské požadavky na konstrukci robotů

Ke stanovení specifických požadavků je nezbytná analýza trhu. Cílený průzkum trhu a z toho odvozený profil požadavků pro robototechnický systém má velký význam a často rozhoduje o úspěchu výzkumu a vývoje.

### 4.2.3. Předběžné výpočty

V rámci předběžného návrhu je třeba kombinovat nástroje počítačové podpory s předběžnými výpočty a odhady ke zpřesnění výchozí představy o parametrech zvolené koncepce PR (kinematického schématu a důležitých uzlů či agregátů). Patří sem především odhady kinematických parametrů a potřebného výkonu motorů i volba optimálního převodového poměru. Dále jde o odhady silových poměrů, přesností a tuhostí jednotlivých pohybových jednotek. Využíváme přitom dřívějších zkušeností z výsledků a ověřování vlastních konstrukcí i z analýzy konkurenčních výrobků. Postup využívající kombinace metody typových součinitelů a parametrického konstruování je naznačen podrobněji.

#### Předběžný návrh motorů pohybových jednotek

Po odhadu základních rozměrů kinematického schématu PR a rozsahu pohybu a před zahájením návrhu průřezů a tvarů těles pohybových jednotek je nezbytné stanovit předběžně potřebné výkony motorů a zvolit konkrétní výrobce a typorozměry.

Motory, resp. pohony tvoří významnou zátěž účinkem svých hmot. Přitom ovšem jejich určení probíhá v době kdy nemáme dostatek údajů pro jejich návrh – není známo rozložení a velikost hmot těles a jiných prvků pohybových jednotek.

#### Vstupní hodnoty pro návrh

V obr. 4.2.3.-1 jsou naznačeny vstupní parametry, z nichž vycházíme na odhady dalších hodnot předběžného návrhu. V daném případě pro PR, polohující v souřadnicovém sférickém systému, vyplnou ze zadání, resp. z požadavkového listu:

$m$  - nosnost PR [kg]

$r$  - max. poloměr [m]

$\varphi_{1,2}, S$  - max. přemístění objektu manipulace (OM) [rad, m]

$\omega_{1,2}, v$  – nominální rychlosti přemístění OM [ $s^{-1}$ ,  $m s^{-1}$ ]

#### Výkon motoru pro rotační pohybovou jednotku

Lze zjistit (odborně odhadnout) ze vztahu:

$$P_r = \frac{M_n + M_d}{\eta} \cdot \omega$$

$\eta$  - účinnost převodů mezi motorem a akčním členem

$M_n$  - moment nevyvážených hmot, včetně OM vzhledem k ose rotace

$M_d$  - dynamický moment při rozběhu,  $M_d = I \cdot \varepsilon$  - lze vyjádřit rovněž jen za cenu určitých zjednodušení

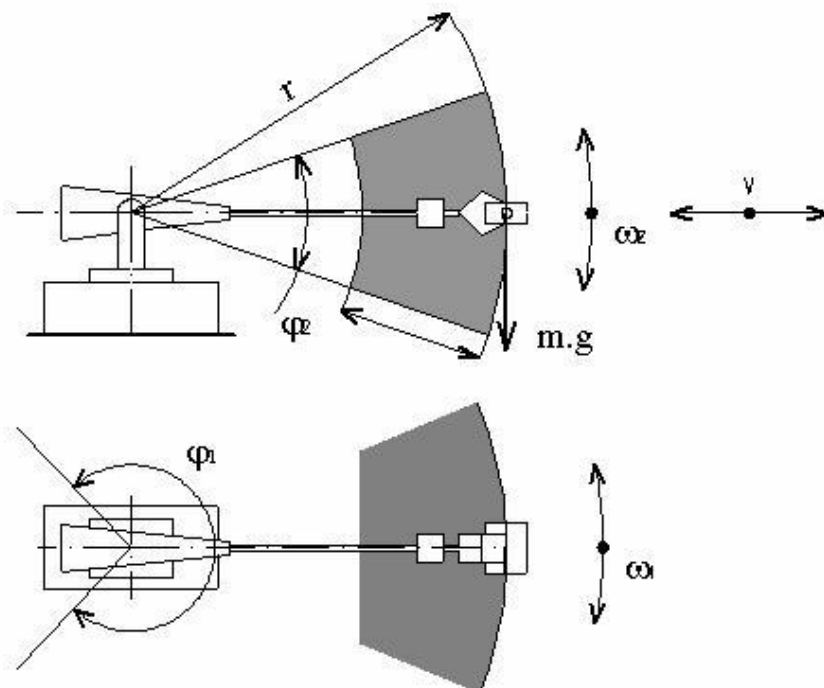
Rychlostní profil předpokládáme lichoběžníkový (konstantní zrychlení i zpomalení)

délka rozběhu  $\varphi_r = k_1 \cdot \varphi$

délka doběhu  $\varphi_b = k_1 \cdot \varphi$

podobně pro přímočarý pohyb  $S_r = S_b = k_1 \cdot S$

vyjadřujeme je podílem z celkové dráhy  $\varphi$  nebo  $S$



Obr. 4.2.3.-1 Příklad zadání parametrů PR pro výpočet motorů rotačních pohybových jednotek

Hodnotu  $k_1$  určíme z úvahy, že pro zadané  $\omega$  (resp.  $v$ ) jako rychlost přemístění OM bude doba přemístění kratší (tj. rychlost provedení funkce větší) bude-li  $k_1$  menší, ale důsledkem budou větší dynamická zatížení na mechanismech pohonů a menší životnost konstrukčních prvků, problémy s řízením (při kmitání) a případně i prodloužení doby přemístění OM (je-li nutné čekat na dokmitání). Jde o optimalizační úlohu.

Uvažujme normativní dynamické zatížení při zrychleních  $a$  [ $\text{ms}^{-2}$ ] na úrovni konkurenčních robotů stejné třídy a jako výpočtové připusťme 1,5 a.

Pro lineární pohon s běžně dosahovanými hodnotami zdvihu (výsuvu) ramene  $S = 1 \text{ m}$  a rychlosti  $v = 1 \text{ ms}^{-1}$  je pak možno dráhu při rozběhu odhadnout.

$$S_r = \frac{1}{2} a t_r^2 \quad \text{při} \quad t_r = \frac{v}{a} \quad \text{je}$$

$$S_r = \left(\frac{a}{2}\right) \left(\frac{v}{a}\right)^2 = \frac{v^2}{2a} = \frac{1^2}{2 \cdot 5} = 0,1 \text{ m} \quad \text{vezmeme-li jako příklad } a = 5 \text{ [ms}^{-2}\text{]}$$

pak lze odhadnout  $k_1 = \frac{S_r}{S} = \frac{0,1}{1} = 0,1$  a využívat pro předběžný výpočet.

Pro rotační pohyb

$$\varphi_r = \frac{\varepsilon}{2} t_r^2 = \frac{\varepsilon}{2} \left(\frac{\omega}{\varepsilon}\right)^2 \quad \text{z čehož dále plyne} \quad \varepsilon = \frac{\omega^2}{2\varphi_r} = \frac{\omega^2}{2k_1\varphi}$$

když  $t_r = \frac{\omega}{\varepsilon}$  čímž dostaneme  $\varepsilon$  vyjádřeno z parametrů zadání!

Pro odhad momentu setrvačnosti hmot pohybové jednotky

$$I = I_r + I_M = k_2 I_r$$

$$I_r = m_{OM} r^2 \quad \text{moment setrvačnosti z hmoty OM na max. } r !$$

$$I_M \quad - \quad \text{moment setrvačnosti hmot rotujících částí manipulátoru při max. } r$$

$k_2$  - koeficient provedení konstrukce, získán na základě analýzy PR podobného typu

jako příklad budiž  $k_2 = 1,8 - 2,3$

pak

$$M_d = I \cdot \varepsilon = k_2 I_r \frac{\omega^2}{2 k_1 \varphi} = k_2 m_{OM} r^2 \frac{\omega^2}{2 k_1 \varphi}$$

Moment z nevyvážení

$$M_n = k_3 m_{OM} g r \cos \alpha$$

a  $k_3$  zjistíme opět z dříve provedených konstrukcí

$$k_3 = \frac{M_n}{m_{OM} g r}$$

vyjadřuje závislost celkového nevyváženého momentu na nosnosti manipulátoru (rozložení hmot, podobnost konstrukčního řešení)

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{M_n + M_d}{\eta} \omega = \left( k_3 m_{OM} g r \cos \alpha + k_2 m_{OM} r^2 \frac{\omega^2}{2 k_1 \varphi} \right) \frac{\omega}{\eta} = \\ &= \frac{\omega r m_{OM}}{\eta} \left( k_3 g \cos \alpha + \frac{k_2 r \omega^2}{2 k_1 \varphi} \right) \end{aligned}$$

platí pro odhad výkonu při rotaci pohybové jednotky kolem horizontální osy.

Při rotaci kolem vertikály (osa z) nepůsobí na pohon nevyvážek  $M_n$

$$P_{r_z} = \frac{m_{OM} r^2 \omega^3}{\eta \varphi} \left( \frac{k_2}{2 k_1} \right) = \frac{m_{OM} r^2 \omega^3}{\eta \varphi} \left( \frac{2}{2 \cdot 0.1} \right) = 10 \frac{m_{OM} r^2 \omega^3}{\eta \varphi}$$

### Výkon motoru pro lineární pohybovou jednotku

$$P_l = \frac{F_d + F_n}{\eta} v$$

Setrvačné účinky při rozběhu a zpomalení

$$F_d = k_4 m_{OM} a$$

kde

opět  $k_4$  zahrnuje vliv pohyblivých prvků ramene

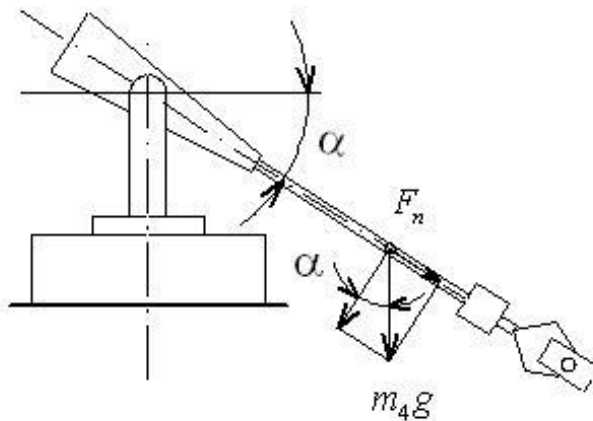
$$k_4 = \frac{m_4}{m_{OM}} \quad \text{z již provedených a analyzovaných konstrukcí PR}$$

kde  $m_4$  je hmotnost všech pohyblivých prvků včetně OM

Z obdobné úvahy (vzhledem k analogii použitých vztahů s rotačním pohybem) lze najít pro lineární zrychlení a  $F_d$

$$a = \frac{v^2}{2 k_1 S} \quad F_d = k_4 m_{OM} a = k_4 \frac{m_{OM} v^2}{2 k_1 S}$$

Největší výkon je potřebný pro max. naklonění pohybové jednotky (PJ), přičemž v obecné poloze platí pro osovou složku přitěžující motor



$$F_n = m_4 g \sin \alpha = k_4 m_{OM} g \sin \alpha$$

Výsledný potřebný výkon pro lineární pohyb

$$P_l = \frac{k_4 v m_{OM}}{\eta} \left( \frac{1}{2 k_1} \frac{v^2}{S} + g \sin \alpha \right)$$

Obr. 4.2.3.-2 Poměry na lineární pohybové jednotce

Pro pohony členů pouze v horizontální rovině ( pro cylindrický a kartézský s.s.) je

$$\alpha = 0; \quad \sin \alpha = 0; \quad k_1 = 0,1; \quad k_4 = 2,0$$

pak

$$P_{l x} = \frac{10 m_{OM} v^3}{\eta S}$$

(6.10)

pro pohony vertikálního pohybu

$$P_{l z} = \frac{k_4 v m_{OM}}{2} \left( \frac{v^2}{0,2 S} + g \right) = \frac{10 v m_{OM}}{\eta} \left( \frac{v^2}{2 S} + 1 \right)$$

### Volba optimálního převodového poměru

Při použití vysokootáčkových motorů je nezbytný převod mezi motorem a akčním členem PR.

Jestliže převládají v pohonu zatížení z nevyvážení hmot lze použít pro moment na hřídeli motoru vztah (převod dopomala  $i > 1$ )

$$M_M = \frac{M_n}{i \cdot \eta}$$

$$i = \frac{M_n}{M_M \cdot \eta}$$

Jestliže však převládají dynamická zatížení je možné řešení složitější. S rostoucím  $i$  klesá moment setrvačnosti přepočítaný na hřídel motoru (z hmot akčního členu) v poměru  $i^2$  a tím se zmenšuje rovněž potřebná doba rozběhu na  $\omega_{nom}$  nebo zpomalování na  $\omega = 0$  (je menší zátěž motoru). Současně, ale při větším  $i$  klesá rychlost ustáleného pohybu

$$\omega_{nom} = \frac{\omega_M}{i}$$

Při zmenšování  $i$  roste  $\omega_{nom}$ , ale doba zpomalování i rozběhu se zvětšuje; proto je nutné hledat  $i_{opt}$ , aby doba přemístění objektu byla minimální z obou hledisek.

K řešení je nutné znát vztah pro celkovou dobu přemístění OM v závislosti na  $i$ .

Pro rotační pohyb PJ v rozsahu  $\varphi$  je celková doba  $t_\varphi$

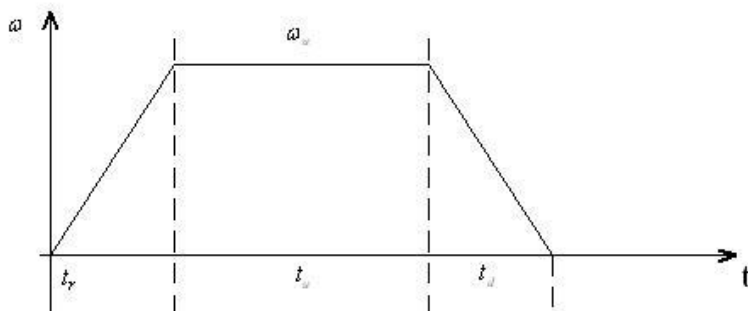
$$t_\varphi = t_r + t_u + t_d$$

$$t_r = t_d = \frac{\omega}{\varepsilon}$$

$$t_u = \frac{\varphi_u}{\omega}$$

$$\varphi_r = \frac{\omega_u^2}{2\varepsilon}$$

Pak



Obr. 4.2.3.-3 diagram průběhu rychlostí pohybové jednotky v jednom cyklu

$$t_\varphi = 2t_r + t_u = 2\frac{\omega_u}{\varepsilon} + \frac{\varphi_u}{\omega_u}$$

a pro

$$\frac{\varphi_u}{\omega_u} = \frac{\varphi - 2\varphi_r}{\omega_u} = \frac{\varphi - \frac{\omega_u^2}{\varepsilon}}{\omega_u} = \frac{\varphi}{\omega_u} - \frac{\omega_u}{\varepsilon}$$

je

$$t_\varphi = \frac{\omega_u}{\varepsilon} + \frac{\varphi}{\omega_u}$$

po dosažení výše uvedených vztahů

$$t_\varphi = \frac{\frac{\omega_M}{i}}{\frac{M_d}{I}} + \frac{\varphi}{\frac{\omega_M}{i}}$$

jestliže je

$$M_d = M_{dM} \cdot i \cdot \eta$$

a

$$I = I_M \cdot i^2 + I_z$$

je celkový čas pro vykonání rotačního pohybu PJ

$$t_\varphi = \frac{\frac{\omega_M}{i}}{\frac{M_{dM} i \eta}{I_M \cdot i^2 + I_z}} + \frac{\varphi}{\frac{\omega_M}{i}} = \frac{I_M i^2 + I_z}{M_{dM} i^2 \eta} + \frac{\varphi i}{\omega_M} =$$

$$t_\varphi = \frac{I_M i^2 + I_z \omega_M^2 + M_{dM} \varphi i^3 \eta}{M_{dM} \omega_M i^2 \eta}$$

kde

$I_M$  - moment setrvačnosti motoru včetně redukováného momentu převodovky

$I_z$  - moment setrvačnosti zátěže (hmot PJ)

$\omega_M$  - úhlová rychlost motoru

$M_{dM}$  - dynamická složka momentu na hřídeli motoru

Hledáme minimum funkce  $t_\varphi$ , tedy  $\frac{dt_\varphi}{di} = 0$

Pak

$$i_{opt} = \sqrt[3]{\frac{2\omega_M^2 I_z}{\varphi M_{dM} \eta}}$$

vztah je správný pouze pro lichoběžníkový průběh  $\omega$ , který je charakteristický pro pohony, u nichž moment setrvačnosti zátěže převyšuje moment setrvačnosti motoru, proto je nutné kontrolovat

$$\text{zda } \frac{I_{z \text{ red}}}{I_M} > 1, \text{ pokud je menší než } 1$$

volíme  $i$

$$i = \sqrt{\frac{I_z}{I_M}}$$

Protože u provozu PR jsou běžné měnící se cykly pohybů členů R nelze  $i_{opt}$  počítat z jediné konkrétní hodnoty  $\varphi$ , ale ze střední aritmetické hodnoty všech pootočení PJ, vytvářejících cyklus (případně podle modelu určitého typového cyklu charakteristického pro danou technologii)

$$i_{opt} = \sqrt[3]{\frac{2\omega_M^2 \sum_{k=1}^n I_{zk}}{\sum_{k=1}^n \varphi_k M_{dM} \eta}}$$

$I_{zk}$  - moment setrvačnosti  $I_z$  pro  $k$ -tý pohyb

$\varphi_k$  - velikost  $k$ -tého pootočení

$n$  - počet pootočení

Je zřejmé, že i koncepce kinematické struktury a typ PR mají vliv na  $i$  - např. koncepce pro bodové svařování, či zakládání polotovárů do obráběcích strojů, vyžadují různé velikosti pohybů  $\varphi_r, \varphi_d, \varphi_u, \varphi$ , a  $\omega_u$ .

Řešení optimálního převodového poměru pro lineární PJ

Úloha vede k volbě rychlosti přemístění členu a pro ověření platnosti lichoběžníkového průběhu rychlostí je opět nezbytná podmínka

$$I_{zred} > I_M$$

Pak doba pohybu

$$t_l = \frac{i^2 I_M + m_z \omega_M^2 + S i^3 M_{dM} \eta}{M_{dM} \omega_M i^2 \eta}$$

$$\text{kde } i = \frac{\omega_M}{v}$$



a

$$i_{opt} = \frac{\omega_M}{v} = \sqrt[3]{\frac{2\omega_M^2 m_z}{S M_{dM} \eta}}$$

nebo lépe vyjádříme přímo optimální rychlost PJ

$$v_{opt} = \sqrt[3]{\frac{S M_{dM} \omega_M \eta}{2m_z}}$$

Z  $i_{opt}$ , resp.  $v_{opt}$  lze odvodit parametry převodového mechanismu –  $\phi$ d ozubeného kola pro ozubený hřeben, nebo stoupání kuličkového šroubu. Souhrn postupu - Algoritmus výpočtu energetických parametrů pohonu:

1. Orientační výpočet výkonu motoru podle údajů (požadavkový list) technického zadání.
2. Výběr motorů (variantně) podle katalogů s různými  $M_M, \omega_M$ .
3. Výpočet  $i_{opt}$  pro každý motor.
4. Výběr motoru s nejkratší dobou potřebnou pro daný model cyklu pohybů, při co nejkompaktnější konstrukci.

#### 4.2.4. Návrh a výpočty modulárních průmyslových robotů

Již v úvodu tohoto studijního materiálu a pak ještě vícekrát v jednotlivých kapitolách jsme se zmínili, že pro úspěšnost nových řešení jsou potřebné nejen metody a prostředky, které nabízíme v jednotlivých kapitolách, ale i schopnost tvůrčích pracovníků vytvářet na základě zkušeností své vlastní know how, tedy postup jak modifikovat teorii a zkušenosti do databází faktů i postupů které vedou rychle a efektivně k úspěšnému řešení složitého technického problému. Níže uvedený postup ukazuje jednu z možností tvorby know how – přenosu získaných zkušeností na vývoj modulárních robotů.

Při navrhování nových robotů osvědčených typů (podle charakteristické kinematické struktury) je podmínkou konkurenceschopné řešení. K tomu je nezbytné provádět srovnání s nejlepšími konkurenčními produkty stejné třídy, a to již ve fázi předběžného návrhu jednotlivých polohovacích jednotek. Konstrukční řešení lze zpravidla popsat několika vybranými parametry, od nichž se odvozují další. Pokud správně tyto parametry zvolíme a aplikujeme na jednotlivá provedení polohovacích jednotek, můžeme vytvořit jejich (postupně doplňovanou) databázi. Lze si představit, že takto vytvořené know how bude využitelné k hodnocení ex post i ex ante.

Konstrukční parametry robotů volíme na základě kritéria omezení deformací a také chyb různého druhu, které v konkrétní konstrukci nesmí přesáhnout určitou hodnotu. První návrh konstrukčního řešení ještě nedává dosti podkladů pro výpočet hodnot deformací a přesto musíme i v tomto raném stadiu návrhu rozhodovat, aspoň na základě odhadu očekávaných parametrů. Takový odhad lze provést pomocí zmíněné databáze parametrů srovnatelných konstrukcí (dříve analyzovaných). Databáze tak zachycuje současnou světovou úroveň konstrukcí a může být doplňována také aplikací optimalizačních metod v rámci CAD systémů, na vlastní konstrukce.

Níže uvedené postupy jsou výhodné zejména pro roboty modulární koncepce, jejichž jednotlivé moduly jsou konstrukčně i funkčně samostatné. Ale i mnohé univerzální roboty mohou těchto postupů do značné míry využít.



Obr. 4.2.4.- 1 Modulární roboty, vlevo angulární, vpravo sférický

Modulární konstrukce jsou výhodné zejména pro možnost velmi dobrého přizpůsobení zvolené koncepce i konstrukce robotu a také všech subsystémů k zadané úloze. Mimo to jsou tyto roboty méně nákladné, jak pořizovací cenou (přizpůsobení úkolu) tak v provozu. Jednotlivé moduly mohou totiž být vyráběny v podstatně vyšších sériích než univerzální roboty. To současně umožňuje jejich vyšší kvalitu.

Počet firem, které je vyrábí i počet vyráběných typů stále roste a jde zřejmě o setrvalý trend. V obr. 4.2.4.- 1,2,3 jsou uvedeny jednak 3 provedení modulárních robotů velmi progresivní konstrukce, jednak prvky, z nichž se tyto (a další) struktury dají vytvořit. Za povšimnutí stojí, že až dosud jen velmi málo výrobců umožňovalo skladbou vyráběných modulů dosáhnout jiných struktur než kartézských nebo cylindrických. V tomto případě jsou uvedeny hned 2 angulární struktury a 1 cylindrická.



#### Databáze modulárních robotů

Obr. 4.2.4.- 2 Modulární robot angulární

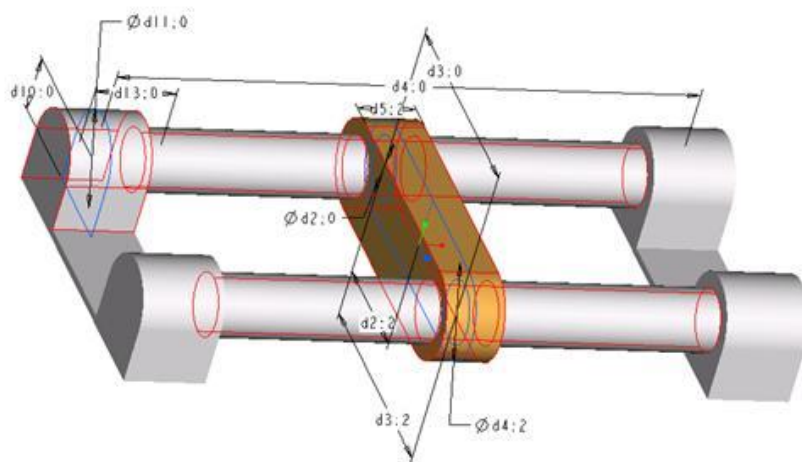
Vezmeme-li v úvahu, že počet nejčastěji vyráběných a v praxi využívaných typů PR se pohybuje do desítky, nabízí se využít pro návrh postupů, které využívají zkušeností získaných při konstrukci robotů aktuálně dosažené úrovně, zapracovaných do pravidelně aktualizované databáze připravené v PC. Jak vyplývá z příkladů modulů v obr. 4.2.4.- 2,3 (za mnohé další) je jejich provedení rozmanité, nicméně počet typů není příliš velký. Databázi typorozměrů v úvahu přicházejících prvků lze (obr. 4.2.4.- 2 a 3) vypracovat v ICAD (Pro/ENGINEER) jako modely, pomocí nástroje Family Table a Layout (celá řada modulů se odvíjí od výchozího, při dodržení konstrukčního záměru, daného závislostí dílčích parametrů na výchozích). Modely mohou řešit i variabilitu použitých

transformačních bloků, vložených do jednotlivých modulů a v případě změn automaticky přepočítávat změny hmotnostních parametrů a těžišť.



Obr. 4.2.4.- 3 Prvky modulárních robotů na obr. 4.2.4. – 1,2

Další možností, kterou poskytují ICAD systémy je optimalizace rozložení hmot v modulu pomocí Behavior Modeleru, v případě nezbytných úprav při přechodu k progresivnějším konstrukcím. Optimalizovat lze i celou strukturu PR složenou z modulů, přičemž máme díky vlastnostem ICAD systémů i možnost zcela opačnou – totiž začít zcela „prázdným prvkem“, který je tvořen jen interfejsy modulu a jeho osou, případně délkovými rozměry a přitom mu potřebné parametry předepsat a animací a simulací testovat příslušné vlastnosti. Následně pak provádíme konstrukční zásahy do modelu modulu tak, abychom podle okolností zvolené parametry prázdného prvku dodrželi (vyhovuje-li při testování), nebo naopak změnili.



Obr. 4.2.4.- 5 Schéma hlavních parametrů lineární pohybové jednotky

V obr. 4.2.4. - 5 je naznačen schématický princip závislosti mezi rozměry, vycházející z rozměrů určujících – rozteče mezi osami vodicích tyčí a jejich délky a průměru (provedení v Pro/ENGINEERu). Možnost využití relací pro vyjádření různých závislostí v modelu pohybové jednotky se může promítnout do mnoha dalších, ale odůvodněných rozměrů.

### Relace v ICAD systémech

Relace jsou uživatelsky definované rovnice mezi symbolickými kótami a parametry. Vytváří vztahy uvnitř prvků, součástí i mezi celými komponentami tak, že umožňují řídit vliv změn na model. Relace poskytují nástroj, jakým lze zachytit cíl návrhu. Řídí modely podobně jako parametry – změna relace má za následek změnu modelu. Relace lze použít ke kontrole změn prováděných na modelech, k definici hodnot kót v součástech a sestavách a jako podmínky kladené na konstrukci. Existují dva typy relací – rovnice, kdy parametru na levé



Zavedeme – li relace, zjištěné analýzou špičkových srovnatelných konstrukcí

$$k_r = \frac{t_r}{T}; \quad k_b = \frac{t_b}{T} \quad \Rightarrow \quad t_r = k_r T; \quad t_b = k_b T; \quad t_u = T - t_r - t_b$$

které

zahrnují nejen úroveň konstrukčního řešení, ale i vlivy použitých motorů, řídicího systému aj., lze vyjádřit

$$\begin{aligned} S &= v_u \left[ 0,5k_r T + (T - t_r - t_b) + 0,5k_b T \right] \\ &= v_u \left[ 0,5k_r T + T - k_r T - k_b T + 0,5k_b T \right] \\ &= v_u \left[ T - 0,5k_r T - 0,5k_b T \right] \\ &= v_u T \left[ 1 - 0,5k_r - 0,5k_b \right] \end{aligned}$$

a dále již získat odhad maximální rychlosti cyklu

$$v_u = v_{\max} = \frac{S}{T} \left[ \frac{1}{1 - 0,5k_r - 0,5k_b} \right]$$

a obdobně odhad maximálního zrychlení

$$a_b = a_{\max} = \frac{v_u}{t_b} = \frac{S}{T^2} \frac{1}{k_b \left[ 1 - 0,5k_r - 0,5k_b \right]}$$

Z těchto údajů vychází silový výpočet v nominálním pracovním režimu manipulátoru.

### Předběžná analýza silových účinků

V etapě předběžného návrhu bereme v úvahu očekávanou nejnepříznivější a možnou (a statisticky pravděpodobnou) konfiguraci zvoleného kinematického řetězce v pracovním prostoru. Zavedeme lokální souřadné systémy PJ s rovnoběžnými osami (obr. 4.2.4. 6), mezi kterými probíhá transformace souřadnic a silových účinků při postupu výpočtu od užitečné zátěže objektem manipulace a pokračuje přes efektor a pohybové jednotky PJ1 až PJn k bázovému souřadnému systému PR.

Transformace a stanovení silových účinků na výstupu z konkrétní PJ vychází ze známých účinků na vstupu a ze setrvačných účinků prvků daného modulu, které rozdělíme na pohyblivé v soustavě modulu (index p) a nepohyblivé v této soustavě (index n) a které působí v těžištích těchto skupin prvků

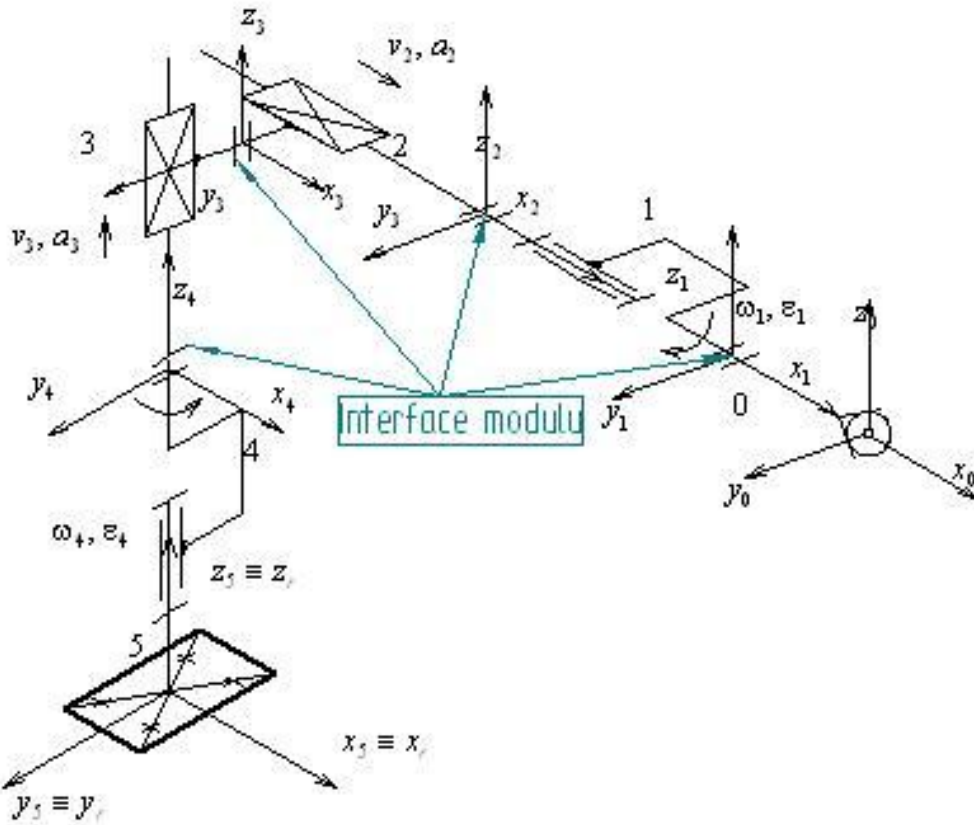
$$F_2^n, F_2^p$$

V tomto maticovém zápisu

$$F_3 = B_{23} F_2 + B_{23}^n F_2^n + B_{23}^p F_2^p$$

transformací jednotkou PJ 2 jsou zajímavé (pro výpočty manipulátoru) matice transformací B23, Bn23, Bp23, které jsou využitelné i pro výpočty přesnosti a tuhosti PJ i celé konstrukce.

Každá z těchto matic vyjadřuje relace mezi 6 složkami silových a momentových účinků



Obr. 4.2.4.- 6 Struktura kinematického řetězce konkrétního robotu

na vstupu do systému a obdobně zavedenými složkami na výstupu ze systému. Uvedená matice se vztahuje na transformaci vektoru  $F_2$  na  $F_3$ .

Zcela obecně pro  $n$  stupňů volnosti a pro síly na výstupu z  $n$ -tého stupně lze psát

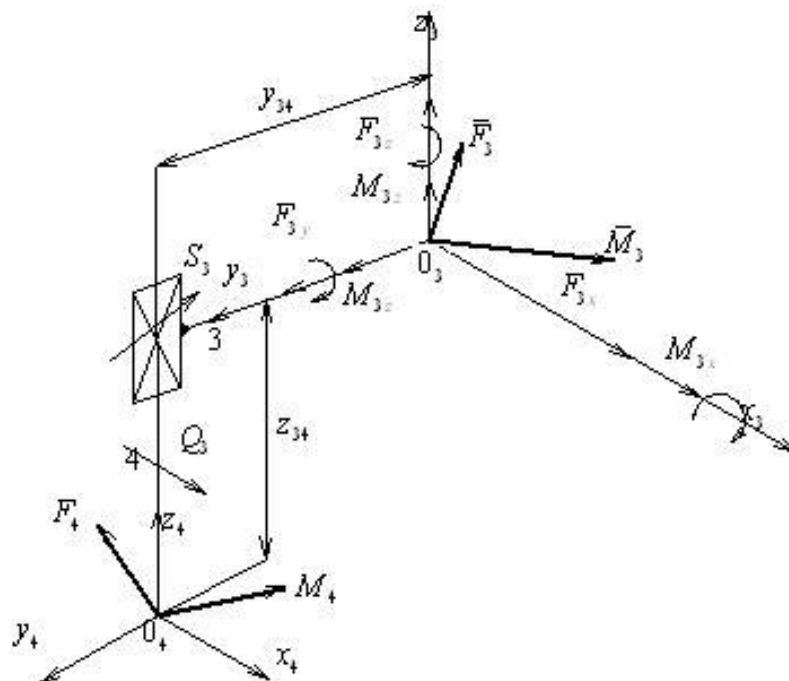
$$B_{23} = \begin{bmatrix} b_{xx} & b_{xy} & b_{xz} & b_{x\alpha} & b_{x\beta} & b_{xy} \\ b_{yx} & b_{yy} & b_{yz} & b_{y\alpha} & b_{y\beta} & b_{yy} \\ b_{zx} & b_{zy} & b_{zz} & b_{z\alpha} & b_{z\beta} & b_{zy} \\ b_{\alpha x} & b_{\alpha y} & b_{\alpha z} & b_{\alpha\alpha} & b_{\alpha\beta} & b_{\alpha\gamma} \\ b_{\beta x} & b_{\beta y} & b_{\beta z} & b_{\beta\alpha} & b_{\beta\beta} & b_{\beta\gamma} \\ b_{\gamma x} & b_{\gamma y} & b_{\gamma z} & b_{\gamma\alpha} & b_{\gamma\beta} & b_{\gamma\gamma} \end{bmatrix}$$

$$F_n = B_{n-1,n} F_{n-1} + B_{n-1,n}^n F_{n-1}^n + B_{n-1,n}^p F_{n-1}^p$$

a chceme-li ověřit setrvačné účinky z hmot objektu manipulace a efektoru do všech pohybových jednotek (první údaj, který je ze zadání k dispozici) pak platí

$$F_n = B_{0n} F_0 \quad \text{kde je}$$

$$B_{0n} = \prod_{i=1}^n B_{n-1,i}$$



Obr. 4.2.4.- 6 Struktura a silové poměry na pohybové jednotce

### Výpočet (odhad) přesnosti zvolené kinematické struktury

Stejným postupem a se stejnými daty můžeme provést předběžný odhad přesnosti použitého kinematického řetězce manipulátoru realizovaného PJ (obr. 4.2.4.- 6). Máme-li k dispozici údaje o vektoru chyb (nepřesnosti) na výstupu z každé PJ (v 6 složkách, podobně jako u sil a momentů), zjistíme vektor chyb na efektoru s využitím transformačních matic, které získáme inverzí matic pro silový výpočet. U transformace sil totiž postupujeme od efektoru k bázevému systému, kdežto při odhadu chyb na efektoru vycházíme od bázevého systému a postupujeme k efektoru.

Pak platí, že zjištěná sloupcová matice složek chyb na efektoru z chyb všech  $n$  pohybových jednotek  $\Delta_0$  je

$$\Delta_0 = \sum_n A_{0n} \Delta_n = \sum_n \begin{pmatrix} \Delta_0 \\ \Delta_n \end{pmatrix}$$

$$A_{0n} = \begin{bmatrix} b_{xx} & b_{yx} & b_{zx} & b_{\alpha x} & b_{\beta x} & b_{\gamma x} \\ b_{xy} & b_{yy} & b_{zy} & b_{\alpha y} & b_{\beta y} & b_{\gamma y} \\ b_{xz} & b_{yz} & b_{zz} & b_{\alpha z} & b_{\beta z} & b_{\gamma z} \\ b_{x\alpha} & b_{y\alpha} & b_{z\alpha} & b_{\alpha\alpha} & b_{\beta\alpha} & b_{\gamma\alpha} \\ b_{x\beta} & b_{y\beta} & b_{z\beta} & b_{\alpha\beta} & b_{\beta\beta} & b_{\gamma\beta} \\ b_{x\gamma} & b_{y\gamma} & b_{z\gamma} & b_{\alpha\gamma} & b_{\beta\gamma} & b_{\gamma\gamma} \end{bmatrix}$$

kde  $\vec{\Delta}_0$  je sloupcová matice složek chyb polohy efektoru (měřená na efektoru) vyvolaných chybou n-tého modulu a

$\Delta n$  je sloupcová matice složek chyb na výstupu z n-tého modulu a konečně

$A_{0n}$  je transformační matice pro přenos chyb n-té PJ na jimi vyvolané chyby efektoru, přičemž z porovnání prvků matice výše odvozené v silovém výpočtu  $B_{0n}$  a matice  $A_{0n}$

platí  $A_{0n} = B_{0n}^T$ .

Zcela obdobný postup a stejné prvky matice lze užít pro předběžné výpočty konstrukční tuhosti manipulátoru. Dále lze všechny tyto výpočty obdobně dovést až do úrovně pohybových jednotek a dopracovat transformační matice mezi konstrukčními prvky každé pohybové jednotky a souřadným systémem zavedeným na výstupu z této jednotky.

Jestliže parametry ověřené výpočtem nevyhovují je možné rychle a jednoduše provádět zásahy do konstrukce a identifikovat vlivy pro tyto zásahy. Rovněž je možné využít zkušeností z již navržených vlastních konstrukcí nebo z analýzy konkurenčních výrobků k zásahům do konstrukce a k její optimalizaci již v těchto raných fázích vývoje.

Vzhledem k tomu, že počet typů robotů (z hlediska použitého kinematického řetězce) je dosti omezený, není problémem si výše uvedené transformační matice pro výpočty připravit předem a pro určitou aplikační úlohu navrhnout několik variant řešení, s různými kinematickými strukturami.

## Rozložení chyb mezi moduly – přímá úloha

Chybu n-tého modulu PJ lze vyjádřit pomocí sloupcové matice, obsahující prvky, z nichž 3 jsou vyjádřením chyb měřených v osách souřadného systému a možným pootočením okolo těchto os

$$\vec{\Delta n} = \begin{bmatrix} \Delta x_n, \dots, \Delta \mu_n, \dots, \Delta \gamma_n \end{bmatrix}^T$$

$\mu = x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  - označení prvků matice

Celková chyba na efektoru je opět popsána maticí s prvky stejného druhu jako mají moduly

$$\vec{\Delta}_0 = \begin{bmatrix} \Delta x_0, \dots, \Delta v_0, \dots, \Delta \gamma_0 \end{bmatrix}$$

tj. každá složka celkové chyby efektoru je nějakou funkcí chyb modulů (jejich prvků)

$$\Delta v_0 = \varphi_v(\Delta x_1, \dots, \Delta \gamma_1, \dots, \Delta x_n, \dots, \Delta \gamma_n)$$

(6.42)

Jde o malé hodnoty chyby tudíž funkci lze linearizovat

$$\Delta v_0 = \sum_n \left( \frac{\partial \varphi_v}{\partial \Delta x_n} \Delta x_n + \frac{\partial \varphi_v}{\partial \Delta y_n} \Delta y_n + \dots + \frac{\partial \varphi_v}{\partial \Delta \mu_n} \Delta \mu_n + \dots + \frac{\partial \varphi_v}{\partial \Delta \gamma_n} \Delta \gamma_n \right)$$



$$\frac{\partial \varphi_v}{\partial \Delta \mu_n} = \frac{\partial \varphi_v}{\partial \mu_n} \cdot \frac{\partial \mu_n}{\partial \Delta \mu_n} = b_{\mu v}^n$$

(6.44)

$$b_{\mu v}^n = b_{g\sigma}^n$$

rozepsáním pro 6 složek celkové chyby efektoru dostaneme

$$\Delta x_0 = \sum_n \mathbf{A}_{x_0 n} \Delta_n = \sum_n (b_{xx}^n \Delta x_n + b_{yx}^n \Delta y_n + \dots + b_{\mu x}^n \Delta \mu_n + \dots + b_{\gamma x}^n \Delta \gamma_n)$$

$$\Delta y_0 =$$

⋮

$$\Delta v_0 = \sum_n \mathbf{A}_{v_0 n} \Delta_n = \sum_n (b_{xv}^n \Delta x_n + \dots + b_{\mu v}^n \Delta \mu_n + \dots + b_{\gamma v}^n \Delta \gamma_n)$$

kde

$\Delta v_{0n}$  je složka chyby polohování hlavice v  $\mu$ -tém směru vyvolaná chybami n-tého modulu

Lze tedy psát

$$\Delta_0 = \sum_N \mathbf{A}_{0n} \Delta_n = \sum_n \mathbf{A}_{0n}$$

$$\mathbf{A}_{0n} = \begin{bmatrix} b_{xx}^n & b_{yx}^n & \dots & b_{\mu x}^n & \dots & b_{\gamma x}^n \\ b_{xy}^n & \dots & & & & \dots \\ \vdots & & & & & \dots \\ b_{xv}^n & & & b_{\mu v}^n & & \dots \\ b_{xy}^n & \dots & & & & b_{\gamma v}^n \end{bmatrix}$$

je matice převodů chyb n-tého modulu na jimi vyvolané chyby polohování efektoru.

$\mathbf{A}_{0n}$  - složka chyby polohy hlavice vyvolaná chybou n-tého modulu

a platí  $\mathbf{A}_{0n} = \mathbf{B}_{0n}^T$

když

$\mathbf{B}_{0n}$  - matice převodů zatížení efektoru  $N_0$  na jím vyvolané zatížení  $F_n$  n-tého modulu (ze silového výpočtu).

Jestliže  $\mathbf{B}_{0n}$  známe z předchozího silového výpočtu a stanovíme stanovíme  $\Delta_n$ , lze

vypočítat  $\Delta_0$  a využít pro optimalizaci konstrukce za podmínky, že zjištěná chyba je menší než požadovaná.

$$\Delta_0 < \mathbf{A}_{0n}$$

Jedná se zde o přímou úlohu ověřování přesnosti. Tento postup postačí při návrhu struktury modulárního robotu na základě již vyráběných modulů.

**Rozložení chyb mezi moduly – inverzní úloha**

Je třeba provést volbu přípustných chyb konkrétních modulů  $\Delta_n^-$ , zabezpečujících zadanou přesnost polohování hlavice  $\Delta_0^-$ .

Při návrhu modulárního PR je třeba splnit podmínku výše uvedenou podmínku

$$\Delta_0^- < \Delta_0^-$$

Inverzní úlohou je vybrat přípustné chyby modulů  $\Delta_n^-$ -zabezpečující zadanou přesnost polohování hlavice  $\Delta_0^-$ .

Úlohu je třeba řešit po etapách:

Nejdříve se přípustná chyba efektoru dělí mezi moduly

$$\Delta_0^- \geq \sum_n \Delta_{0,n}^-$$

kde

$\Delta_{0,n}^-$  je složka přípustné chyby polohování efektoru vyvolaná chybami n-tého modulu

Úloha je nejednoznačná, řešení dostaneme podle toho jaká kritéria zvýhodníme; v počátečních etapách návrhu je však nedostatek údajů.

Složky chyby efektoru vyvolané n-tým modulem proto hledáme (vybíráme) podle tzv. typových vztahů (a typ. hodnot z databáze) pro daný typ PR

$$\Delta_{0,n}^- = K_{0n} \Delta_0^-$$

kde je

$K_{0n}$  matice koeficientů

$$K_{vn} = \frac{\Delta_{v,0,n}^-}{\Delta_{v,0}^-}$$

kteřé jsou dány poměrem složky přípustné chyby polohování hlavice PR vyvolané chybami n-tého modulu (složkami chyby n-tého modulu) k celkové přípustné chybě (složce chyby) polohování PR

$$v = x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$$

Pro toto rozdělování chyby zřejmě musí platit

$$\sum k_{vn} = 1 \quad \text{např.} \quad \sum k_{xn} = 1, \quad \sum k_{yn} = 1 \quad \text{atd.} \quad \text{např.}$$

takže pro řešený typ PR (viz obr. 59 se 4 moduly)

$$\begin{aligned} \Delta_{x_{0,1}}^- &= kx_1 \Delta_{x_0}^- \\ \Delta_{x_{0,2}}^- &= kx_2 \Delta_{x_0}^- \\ \Delta_{x_{0,3}}^- &= kx_3 \Delta_{x_0}^- \\ \Delta_{x_{0,4}}^- &= kx_4 \Delta_{x_0}^- \end{aligned}$$

$$\sum_n \Delta_{x_{0,n}}^- = \underbrace{(kx_1 + kx_2 + kx_3 + kx_4)}_1 \Delta_{x_0}^-$$

$$K_{0n} = \begin{bmatrix} kx_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & ky_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & kz_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k\alpha_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k\beta_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k\gamma_n \end{bmatrix} \quad (6.53)$$

Takto získané složky  $\Delta_{0,n}$  na efektoru jsou však podle dřívějšího odvození vyvolány přípustnými chybami pouze n-tého modulu

$$\begin{aligned} \Delta_{x_{0,n}}^- &\geq b_{xx} \Delta_{x_n}^- + b_{yx} \Delta_{y_n}^- + \dots + b_{\mu x} \Delta_{\mu_n}^- + \dots + b_{\gamma x} \Delta_{\gamma_n}^- \\ &\vdots \\ \Delta_{v_{0,n}}^- &\geq b_{xv} \Delta_{x_n}^- + b_{yv} \Delta_{y_n}^- + \dots + b_{\mu v} \Delta_{\mu_n}^- + \dots + b_{\gamma v} \Delta_{\gamma_n}^- \end{aligned}$$

Vzhledem k nejednoznačnosti řešení by vedl přechod od nerovnic k rovnicím k nesmyslným výsledkům. Proto k získání racionálních výsledků pro  $\Delta_{\mu_n}$  je nutné užít typových vztahů mezi jednotlivými složkami chyb modulu:

$$\begin{aligned} \Delta_{x_n}^- &= k_{x\mu} \Delta_{\mu_n}^- \\ \Delta_{y_n}^- &= k_{y\mu} \Delta_{\mu_n}^- \\ &\vdots \\ \Delta_{\gamma_n}^- &= k_{\gamma\mu} \Delta_{\mu_n}^- \end{aligned}$$

Pro stanovení složek přípustné chyby  $\Delta_{v_{0,n}}^-$  dosadíme typové vztahy do systému nerovností pro  $\Delta_{v_{0,n}}^-$  a pro každou z 6 ti nerovností vyjádříme  $\Delta_{\mu_n}$

$$\Delta_{\mu_n}^- = \frac{\Delta_{v_{0,n}}^-}{b_{xv}^n k_{x\mu} + \dots + b_{\mu v}^n k_{\mu\mu} + b_{\gamma v}^n k_{\gamma\mu}} \quad \square$$

Z 6 ti získaných hodnot  $\mu_{n,v}^-$  pro  $v = x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  vybereme nejmenší a dosadíme do

$$\begin{aligned} x_n^- &= k_{x\mu} \mu_{n,x}^- \\ &\vdots \end{aligned}$$

čímž je úloha splněna.

Výhodou postupu je užití stejných transformačních vztahů pro silovou i chybovou analýzu dané struktury a jak bylo uvedeno výše, pro malý počet v praxi se vyskytujících typových (tj. nečastěji opakovaných) struktur lze tyto transformační vztahy připravit jako programovou databázi, ve které se pak pracuje s konkrétními hodnotami.

### Analýza silových účinků a přesnosti jednotlivých modulů

Zcela principiálně stejného postupu jako v předchozích kapitolách lze užít pro typové konstrukce modulů, tedy užití stejných transformačních matic pro přenos silových účinků z prvků vedení a uložení, uchycení motoru a z dalších částí konstrukce, i pro přenos chyb různého druhu, a to včetně zahrnutí vlivů poddajnosti těchto prvků. Pro velký rozsah demonstrace tohoto postupu je zpracována jen souhrnná tabulka (kap. 3.5.5.) s přehledem základních kroků pro posouzení jak celé struktury PR, tak i jednotlivých modulů, s uvedením potřebného obsahu databáze k těmto úkolům. Vypracovaná databáze je velmi cennou součástí know how firmy. Vlastní realizace databáze je možná na bázi různých SW systémů.

### Volba konstrukčních parametrů podle kritéria omezení deformací

Poř.	Činnost	Databáze
1.	Celková koncepce M: formování požadavků, výběr celkové koncepce, druhu a rozmístění pohonů, ŘS, rychlostí a zrychlení	Koncepce M, druhy pohonů a ŘS, zákonů pohybu
2.	Rozdělení požadavků přesnosti (přípustné chyby na moduly) $\mu_{0,v}^- = k_{0n} \mu_{n,v}^-$	Matice koeficientů $k_{0n}$
3.	Návrh efektoru	Schémata a parametry, převodové závislosti
4.	Výpočet zatížení modulu v nominálním režimu a z proměnné složky hmotnosti OM $F_n = B_{n-1,n} F_{n-1} + B_{n-1,n}'' N_{n-1}'' + B_{n-1,n}^p N_{n-1}^p$ Zatížení na vstupu do n-tého modulu z účinků	Tvary matic $B_{n-1,n}$

	setrvačných sil pouze z hlavice a objektu manipulace $B_{0n} = \pi \prod_{n=1} B_{n-1,n}$	
5.	Volba požadavků přesnosti na modul $\Delta\mu_n = \frac{\Delta v_{0,n}}{b_{vx}k_{x\mu} + \dots + b_{vy}k_{y\mu}}$	Vztahy - relace $k_{x\mu}, \dots$
6.	Volba koncepce kinematického schématu modulu a vzdáleností mezi podporami $N_{ns}, N_b$	Schématu modulů a poměry $\frac{N_{ns}}{S}; \frac{N_b}{S}$
7.	Předběžný odhad zatížení v podporách a pohonu $Q_n = B_{iv}F_n a \Delta Q_n = B_{iv} \Delta F_n$	Tvar matic $B_{iv}$
8.	Rozdělení chyb modulu podle jejich druhu $[\Delta n'] = k_B' \Delta n'$ ; $[\Delta n''] =$	Matice koeficientů $k_B', k_B'', \dots$
9.	Volba rozměrů nosné konstrukce modulu podle kriteria vibračních deformací : - určení přípustných amplitud vibrací $\delta_0 \leq e^{hT k_3} [\Delta n'']$ - rozdělení přípustných deformací na prvky modulu $\delta_n = k_n \delta_0 ; [\delta_{pv}] = k_{pv} \delta_0$ - stanovení rozměrů nosné konstrukce $\delta_9 \geq \frac{1}{D_9^4} B_{i9}^T \lambda_9^* B_{i9} F_n$ $[\delta_{p9}] \geq \frac{1}{D_{p9}^4} B_{i9}^T \lambda_{p9}^* B_{i9} F_n$	Matice koeficientů $k_9, k_{p9}$ koeficienty a rozměry $n, k_3, \frac{e_9}{D_v}, \frac{e_{p9}}{D_{pv}}$
10.	Volba rozměrů nosné konstrukce z podmínky omezení nestability statických deformací: - rozdělení přípustných deformací na prvky modulu $\Delta\delta_{90} = k_9''' [\Delta n''']; [\Delta\delta_{pv}] = k_{pv}''' [\Delta n''']; \dots$ - stanovení rozměrů nosných konstrukcí $\Delta\delta_9 \geq \frac{1}{D_9^4} B_{i9}^T \lambda_9^* B_{i9} \Delta F_n$ $[\Delta\delta_{p9}] \geq \frac{1}{D_{p9}^4} B_{i9}^T \lambda_{p9}^* B_{i9} \Delta F_n$	Matice koeficientů $k_9''', k_{p9}'''$
11.	Volba typorozměrů nosných konstrukcí	Typorozměry
12.	Stanovení přípustných chyb podpor a pohonu $[\Delta^*] = \Delta\mu_n b_{1\mu} + b_{2\mu} + \dots + b_{5\mu} + k_6 b_{6\mu}^{-1}$	Poměry k6
13.	Volba typorozměru pohonu: - stanovení síly na pohonu $Q = B_{i9} F_n + B_{i9}' N_9 + B_{i9} F$	Typorozměry pohonů

	- volba typorozměru pohonu	
14.	Odhad rozměrů, hmotností, těžišť a momentů setrvačnosti, konstrukce pohonu	Opakovat pro všechny moduly
15.	Komplexní kontrolní výpočty R, volba parametrů odpovídajících prvků ŘS a pohonu	



### Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se seznámili s následujícími pojmy:

- Požadavky a kritéria pro konstrukci servisních robotů
- Postupy pro volbu koncepcí
- Předběžné funkční výpočty průmyslových robotů
- Modulární roboty a maticové metody výpočtu

Návrh průmyslových robotů vychází ze standardní sestavy požadavků a kritérií, které vstupují do volby variant možných koncepcí doporučenými postupy. Rovněž funkční výpočty jsou postaveny na požadovaných parametrech. Specifické metody lze výhodně využít pro modulární roboty a to na bázi maticového aparátu po stanovení odborného odhadu (výpočtu) sil a chyb v kinematickém řetězci manipulačního systému.



### Kontrolní otázka

- 1) Uveďte základní požadavky a kritéria pro návrh průmyslových robotů?
- 2) Ze kterých parametrů vychází funkční výpočet servisních robotů?
- 3) Jaké jsou principy maticového výpočtu sil a chyb modulárních robotů?
- 4) Jak lze této metody užít k vytvoření know how?



### Úkol k řešení

Proveďte funkční výpočet konkrétní kinematické struktury robotu zvolené podle katalogu současně vyráběných robotů!

## 4.3. PROSTŘEDKY NÁVRHU PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

### Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

<p>Diskutujte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Základní přínosy teorie TRIZ pro návrh nových technických systémů</li> <li>▪ Moduly analýzy TechOptimizeru</li> <li>▪ Moduly syntézy TechOptimizeru</li> </ul>	Cíle kapitoly
<p><i>TRIZ, TechOptimizer, analýza produktu, analýza procesu, trimování, trimovací koeficient, moduly syntézy, efekty, prognózy, principy, manažer problémů.</i></p>	Klíčová slova



**Čas ke studiu:** 3 hodiny



### VÝKLAD

Z prostředků studovaných v předmětu Metodika konstruování v oboru využijeme pro návrh robotu systém počítačové podpory tvůrčí práce vybudovaný na filozofii funkční a hodnotové analýzy a teorií označovaných jako TRIZ, ARIZ.

Tento nástroj byl navržen jako počítačová podpora tvůrčích inovačních procesů a může být používán pro stanovení a řešení problémů v mnoha různých oblastech výzkumu, vývoje, výroby aj. Systematicky směřuje řešitele úkolu na jednotlivé kroky jeho analýzy, až k definici a následně k eliminaci z hlediska úkolu podstatných problémů a k syntéze možných řešení. Souhrnně lze tento proces označit jako optimalizační, přičemž objektivita a úspěšnost je založena na expertní formě aplikace této metody. Velkou výhodou je, že může být využita ve kterékoli fázi života technického objektu. V souvislostech pojednávaných v této publikaci jde o ranné fáze návrhu, kdy údajů o předmětu řešení je velmi málo, často jde o odborné odhady, údaje ze srovnání s obdobnými díly, či situacemi apod.

V zásadě pokrývá TechOptimizer (dále jen TO) dvě oblasti optimalizací:

- Na základě provedené analýzy výchozí struktury objektu umožňuje postup označený Trimming vytvoření jednodušší a účelnější (optimální) struktury objektu.
- Definováním prvků objektu a jejich funkcí, vyhodnocováním interakcí mezi prvky systému a navrhováním způsobů ke zvýšení hodnoty systému TO tyto interakce optimalizuje.

### 4.3.1. Struktura systému

Struktura TO je tvořena 7 moduly – 2 analytickými, 4 syntetickými a 1 podpůrným (komunikačním a informačním):

- Analýza produktu - podporuje analýzu interakcí a funkcí mezi prvky technického systému.
- Analýza procesu - podporuje analýzu posloupnosti technologických operací.
- Efekty – modul podporuje syntézu řešení problému na základě databáze známých jevů (efektů) – např. využití kavitace, absorpce, mechanického kmitání aj.
- Prognózy – modul podporuje syntézu řešení problému na základě databáze vývojových tendencí promítnutých do standardních řešeních v praxi opakovaně používaných.
- Principy – modul podporuje syntézu řešení problému na základě databáze několika desítek principů extrahovaných z patentovaných řešení a opakovaně se v technické praxi vyskytujících. Systémy se skládají z prvků, které se navzájem ovlivňují a dávají systému různé vlastnosti. Zpravidla jestliže nějakou vlastnost potřebujeme zlepšit jiná se zhorší. Databáze principů ukazuje jak byly v technické praxi řešeny obdobné problémy.
- Transfer prvků – modul podporuje syntézu využitím osvědčených prvků a vlastností jiných systémů.

Oba analytické moduly zahrnují hodnotovou analýzu, nákladovou analýzu a funkční analýzu prvků.

Efekty, Principy a Prognózy jsou inteligentní řešitelské nástroje. Jsou-li správně používány, výsledky mohou vést k patentovatelným řešením. Mohou být použity k řešení problémů prakticky v kterékoliv oblasti techniky.

Při využívání Efektů, Principů a Prognóz popisuje uživatel problém v inženýrském systému a modeluje interakce mezi objekty nebo požadované funkce. Software zahrnuje doporučené invenční principy, standardní postupy a fyzikální, chemické a geometrické efekty (viz blíže kap. 3.5).

Modul Transfer prvků (nebo také charakteristik) umožňuje uživateli analyzovat řadu objektů, nebo částí objektů, které uskutečňují stejnou funkci. Uživatel definuje kritéria, charakteristiky objektu a jejich důležitost. Tento modul stanovuje nejvýhodnější objekty a doporučuje které charakteristiky nejvýhodnějších objektů by měly být zdokonaleny a jak.

TechOptimizer identifikuje ty oblasti v objektu, které jsou vhodné pro zdokonalení výrobku nebo procesu. Tyto oblasti jsou zachyceny ve zprávě, kterou může uživatel vygenerovat kdykoliv během práce s TO. Zpráva zahrnuje popis všech kroků učiněných během analýzy. Analýza struktury, stejně jako detailní popis vazeb jsou rovněž obsaženy ve zprávě.

Nejužitečnější informace ve zprávě:

#### **Seznam odhalených problémů.**

TO generuje seznam problémů, které by měly být řešeny pro zdokonalení objektu a procesu a uspořádává tyto problémy podle jejich naléhavosti. Uživatel se může rychle



zorientovat, protože získává informaci, jak vzroste efektivnost objektu, bude-li vyřešen ten který problém.

#### **Seznam uživatelem vygenerovaných námětů**

Náměty navržené uživatelem tvoří jednu z položek zprávy. Obsahuje i nové strategie k řešení technických rozporů.

#### **Změny struktury objektu**

Nová, optimálnější struktura objektu je rovněž ve zprávě uvedena.

#### **Doplňková vědecká informace**

V modulu Efekty se nachází rozsáhlá databáze jevů a příkladů jejich uplatnění, včetně výpočtových vzorců, klíčových slov a odkazů, což usnadňuje soustředění potřebných informací k dosažení cíle.

#### **Technologické trendy**

Umožňují uživateli konfrontovat svůj objekt zdokonalování s tendencemi rozvoje techniky a to za účelem formulování prognózy dalšího rozvoje objektu.

#### **Přenos charakteristik (Feature Transfer)**

Obsahuje řadu doporučení, jak zlepšit charakteristiky zdokonalovaného objektu.

#### **Statistiky**

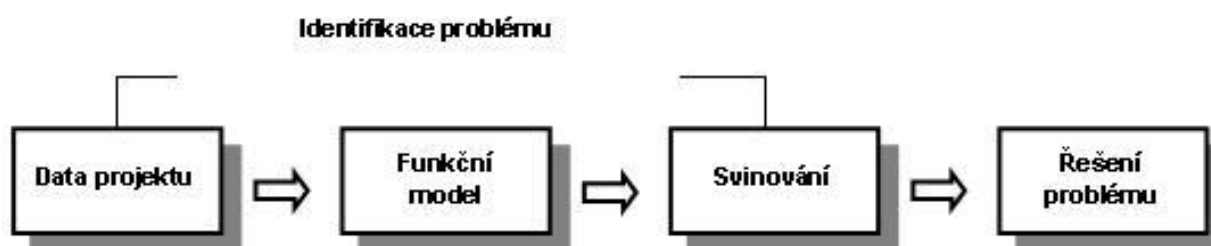
TO generuje statistiky, které poskytují objektivní informace o výsledcích práce s TO.

### **4.3.2. Analýzy**

#### **Analýza produktu**

Analýza produktu umožňuje rozdělit technický systém na části, které se analyzují a zdokonalují. Sestavuje se model funkcí, za účelem vizualizace identifikovaného technického systému, který obsahuje tzv. produkt, prvky a nadsystémy a model interakcí mezi prvky technického systému.

Analýza produktu probíhá ve čtyřech hlavních etapách. První tři etapy - data projektu, model funkcí a trimování - identifikují problémy, které je třeba řešit. Ve čtvrté etapě se hledá



Obr. 4.3.2. -1 Postup analýzy produktu jejich řešení (obr. 4.3.2.-1).

Práce na projektu je zahájena shromažďováním dat (obr. 4.3.2.-2). V první etapě analýzy zakládá uživatel počáteční informace o projektu, o produktu, který je analyzován, analyzované životní fázi produktu a o týmu, pracujícím na projektu. Uživatel definuje cíle analýzy a jejich významnost i okolnosti omezující jakkoliv projekt. Hodnoty významnosti přidělené k

**Project name**  
Type the name of project here

**Object name** **Life stage**  
operator

**Initial description of the situation**  
Type a brief description of the situation here. Describe how the object or system works and the main problems associated with the object or system, etc.

**Objectives**

Parameter	Condition	Unit	Current value	Desired value	Importance (1-10)
+	Up				1

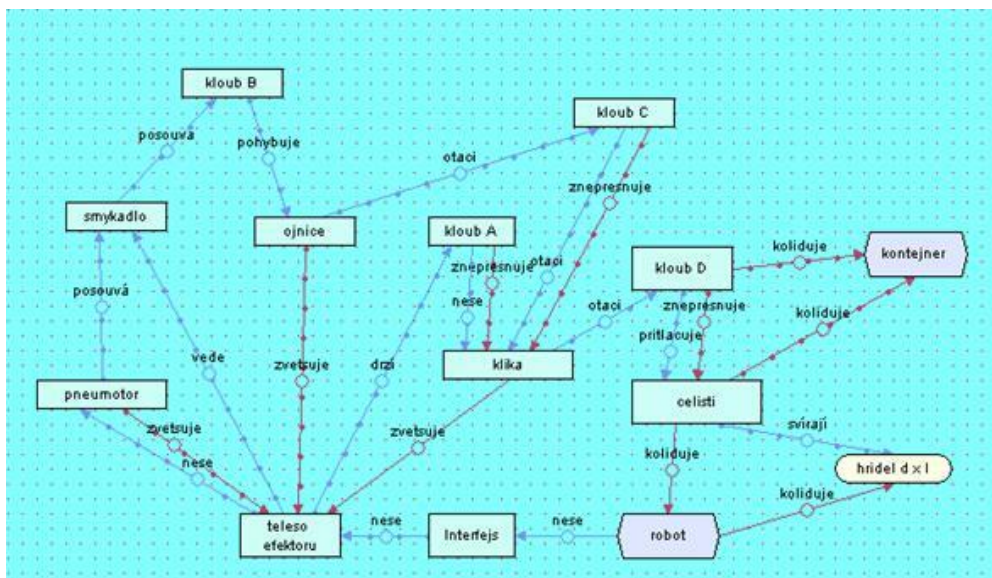
1-least important; 10-most important

**Limitations**

Parameter	Condition	Unit	Value
+	Not more		

Obr. 4.3.2. -2 Vstupní data projektu

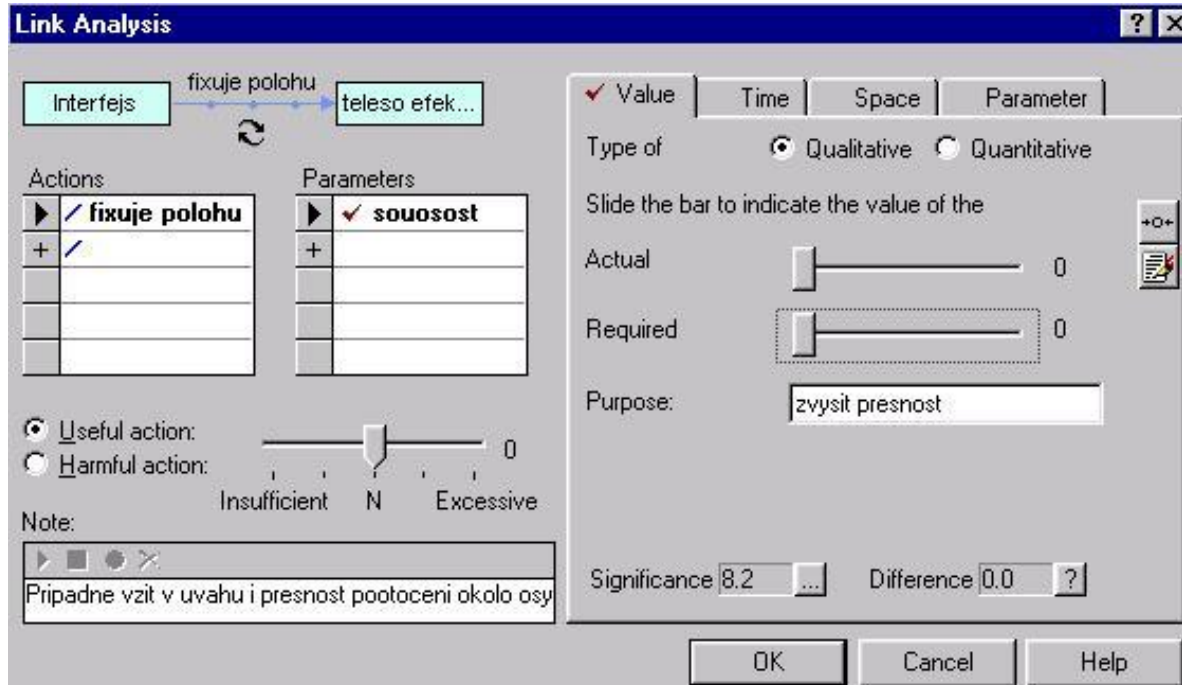
jednotlivým vytyčeným cílům projektu umožňují správně uspořádat problémy a počítat jejich problémovou významnost.



Obr. 4.3.2. -3 Vytvoření struktury produktu

Během druhé etapy analýzy – tvorby modelu funkcí, popíše uživatel strukturu produktů.

Model funkcí technického systému sestavuje pomocí grafu, který specifikuje a analyzuje interakce mezi komponenty dané struktury objektu (obr. 4.3.2.-4). Zakreslí se komponenty, výrobek a nadsystémové prvky výrobku, a stanoví se škodlivá působení a užitečná působení mezi nimi.



Obr. 4.3.2. -4 Hledání vazeb mezi prvky produktu

Analýza technického systému zahrnuje porozumění tomu, z jakých prvků se skládá systém a jak na sebe prvky navzájem působí. Funkční model v analýze produktu pomáhá uživateli rozhodnout kde jsou potíže, jaké problémy by měly být řešeny a posoudit náročnost problému.

Analýza produktu používá tři druhy prvků a dvou druhů působení k popsání částí technického systému.

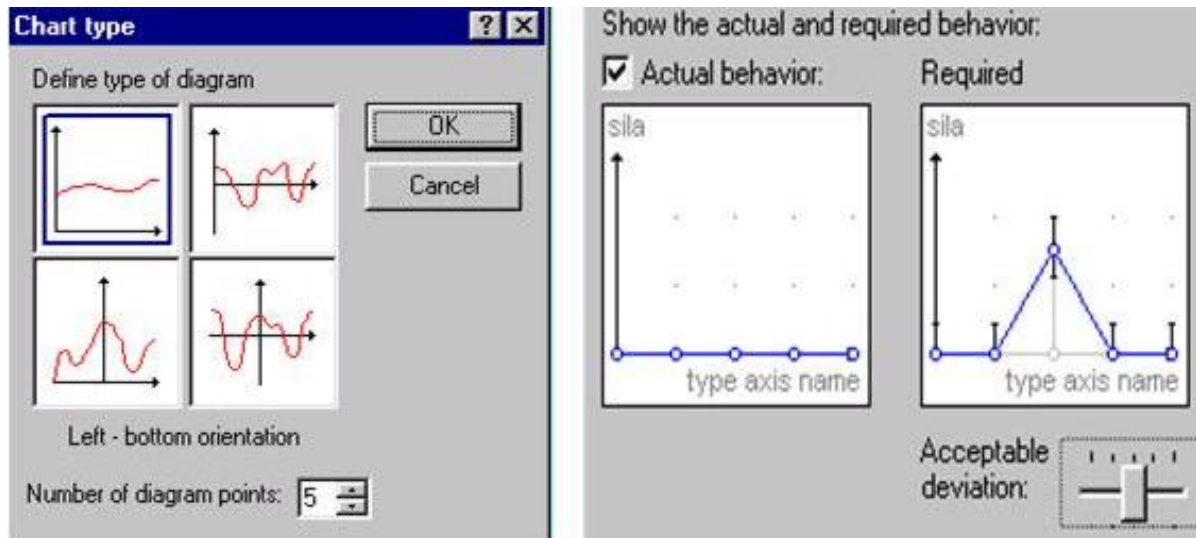
Prvky:

- komponenty - prvky objektu, který uživatel analyzuje
- nadsystémy - prvky systému, které uživatel nemůže změnit, modifikovat, nebo omezit
- produkt - konečný výsledek působení technického systému.

Působení:

- užitečná - působení, která vyhovují a/nebo zlepšují vlastnosti, či kapacitu technického systému
- škodlivá - působení, která zhoršují vlastnosti, či kapacitu technického systému.

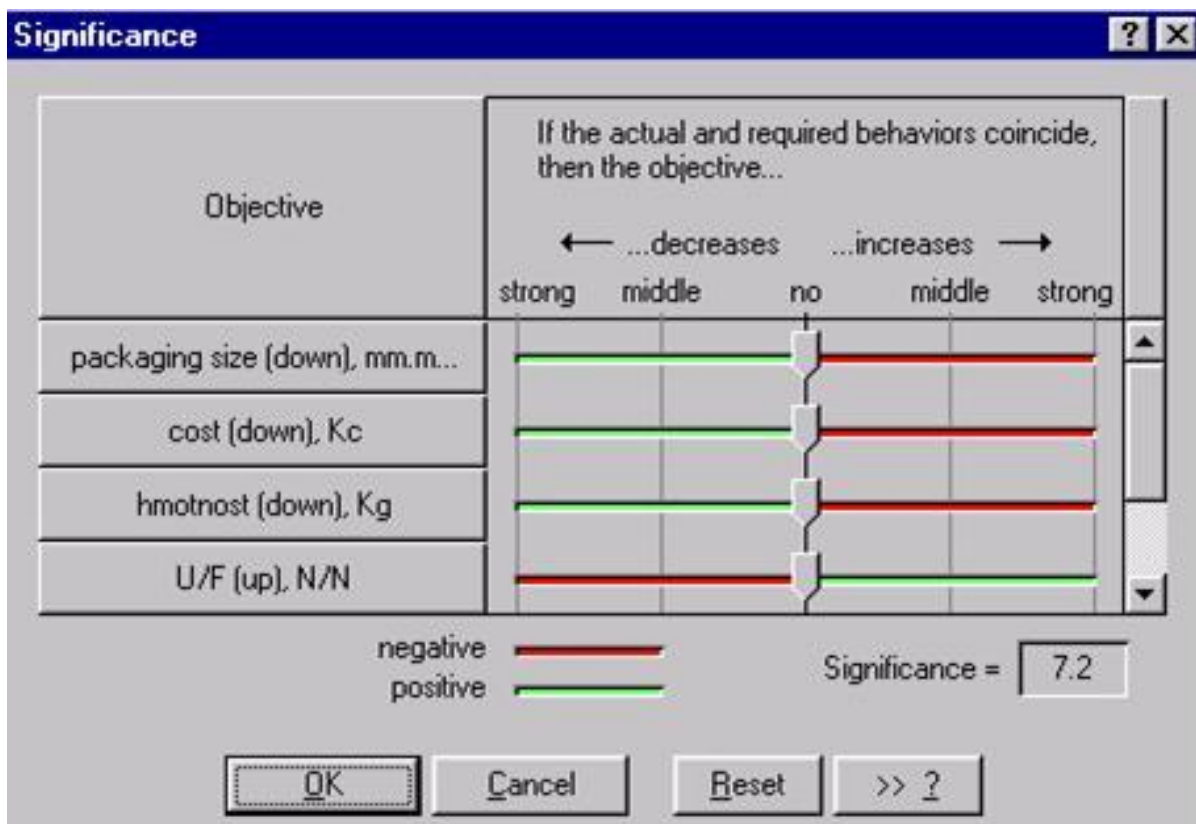
TechOptimizer analyzuje interakce mezi komponenty objektu prostřednictvím analýzy vazeb. Uživatel může volit hloubku analýzy. Základní analýza používá velmi jednoduchý popis interakcí. Detailnější analýza vyžaduje popsání interakcí pomocí parametrů jednotlivých interakcí.



Obr. 4.3.2. -5 Možnost vyjádření funkčních závislostí

TechOptimizer formuluje seznam problémů, analyzuje problémy, a uspořádává je podle jejich naléhavosti. Při uspořádání problémů respektuje vytyčené cíle analýzy.

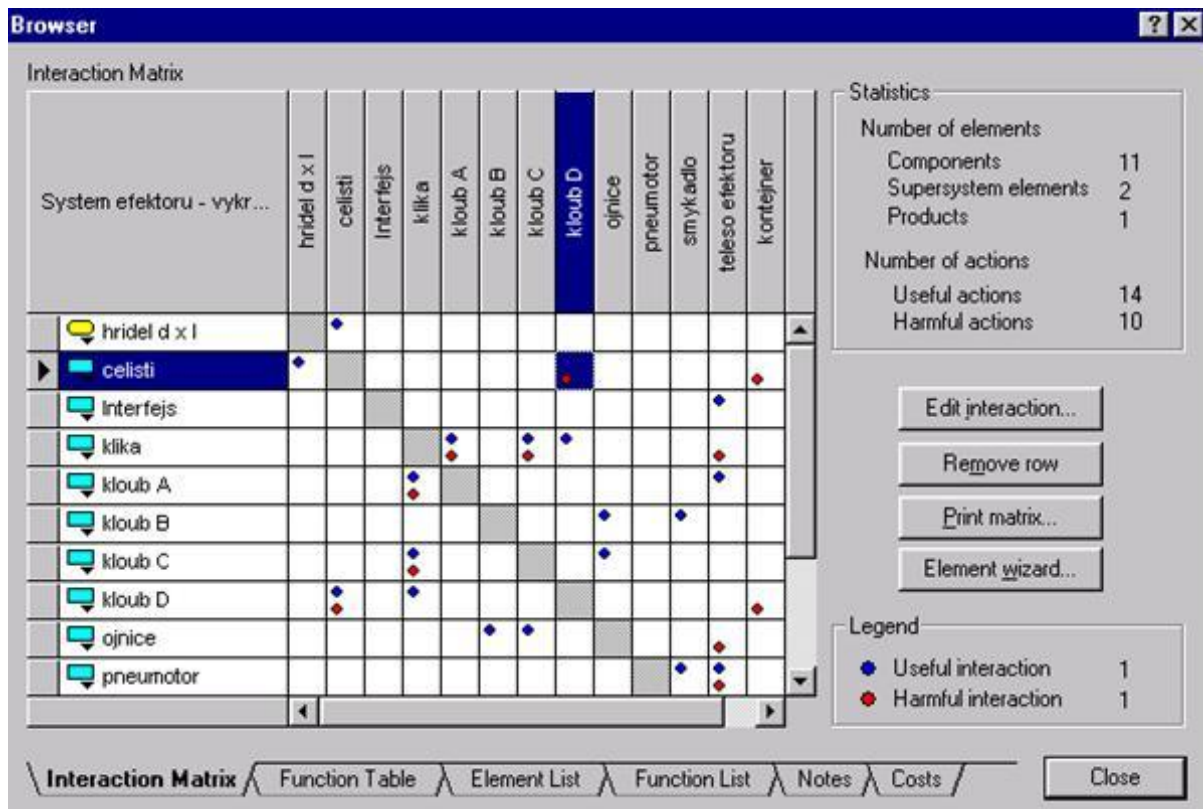
Analýza vazeb je detailní analýza jednotlivých působení mezi prvky, nadsystémy, případně ve vztahu k produktu. Zahrnuje jméno vystihující působení, zda je užitečná nebo škodlivá, stupeň plnění, a parametrické závislosti.



Obr. 4.3.2. -6 Nastavení váhy parametrů

TechOptimizer podporuje dvě úrovně analýzy vazeb:

- Analýza působení je jednodušší analýza vazby, vyžaduje velmi málo informací pro popis působení. Jednotlivá působení jsou definována jako užitečná nebo škodlivá. Užitečná působení jsou klasifikována podle stupně plnění funkce v rozmezí od nadbytečného až po nedostatečné plnění funkce.
- Analýza parametrů je rozšířená analýza vazby. Parametry důležité v daném působení jsou zde definovány a popisovány. Uživatel může definovat hodnotu, časové, prostorové a parametrické závislosti jednotlivých parametrů. V případě užitečného působení je porovnávána skutečná a požadovaná hodnota parametru nebo závislosti. Pro škodlivé působení je porovnávána skutečná a ještě přijatelná hodnota parametru nebo závislosti.



Obr. 4.3.2. -7 Interakční matice

Z obr. 4.3.2.- 4 jsou zřejmé všechny možnosti, které uživatel analýzy může zahrnout do svého hodnocení každé konkrétní vazby a působení, po přechodu z grafického vyjádření do analytické části TO. Hodnocení působení může být kvalitativní, nebo kvantitativní. Rozhoduje stupeň našich znalostí a také potřeby uživatele. Dá se předpokládat, že v počátcích návrhu budou naše znalosti o navrhovaném výrobku malé (jde-li o zcela nový výrobek), zatímco v případě inovace stávajícího výrobku jsme schopni uvádět i parametry již velmi přesně. V případě kvalitativního hodnocení operujeme pojmy - nedostatečné, nebo nadbytečné působení, případně aktuální, či požadované působení. Jsme dokonce schopni graficky zaznamenat časoprostorové závislosti jednotlivých parametrů (nebo naše představy o nich - odhady), viz příklad v obr. 4.3.2.- 5.

Nastavené parametry mají obecně různý význam (váhu) pro zadané cíle řešení projektu. Váha parametrů v relaci k cílům se nastavuje na další kartě (obr. 4.3.2.- 6). Ze zadaných hodnot systém automaticky počítá průměrnou váhu. Všechny, v rámci projektu, dosud zavedené vazby a hodnoty jsou, po automaticky v systému provedených výpočtech, souhrnně uvedeny v prohlížeči (obr. 4.3.2.- 7).

Ten poskytuje šest rozdílných přístupů k informacím o řešeném projektu, prostřednictvím:

- ❑ Interakční matice - matice, která přehledně zobrazuje všechny prvky a působení v modelu funkcí.
- ❑ Tabulky funkcí - všech funkcí v systému.
- ❑ Seznamu prvků - všech systémových prvků. Seznam graficky znázorňuje každé působení na vybraný prvek nebo působení vybraným prvkem.
- ❑ Seznamu funkcí - všech systémových funkcí. Tento seznam graficky znázorňuje prvky, které jsou spojeny s vybranou funkcí.
- ❑ Nákladů - tabulky nákladových položek na každý systémový komponent.
- ❑ Poznámek - seznamu poznámek přidružených ke každému prvku a působení v systému při provádění jednotlivých kroků analýzy.

Component	Component cost
kloub doslapu	23.00
horizontalni kloub kycle	12.00
segment stehna	56.00
kloub kolena	112.00
segment holene	5.00
vertikalni kloub kycle	74.00
rotacni motor vertikalniho kloubu ...	68.00
linearni motor horizontalniho klou...	44.00
linearni motor horizontalniho klou...	24.00

The interface also includes a 'Team members' list with 'Hradek' selected, and a bottom navigation bar with tabs for 'Interaction Matrix', 'Function Table', 'Element List', 'Function List', 'Notes', and 'Costs' (which is active). There are 'Consensus' and 'Close' buttons at the bottom right.

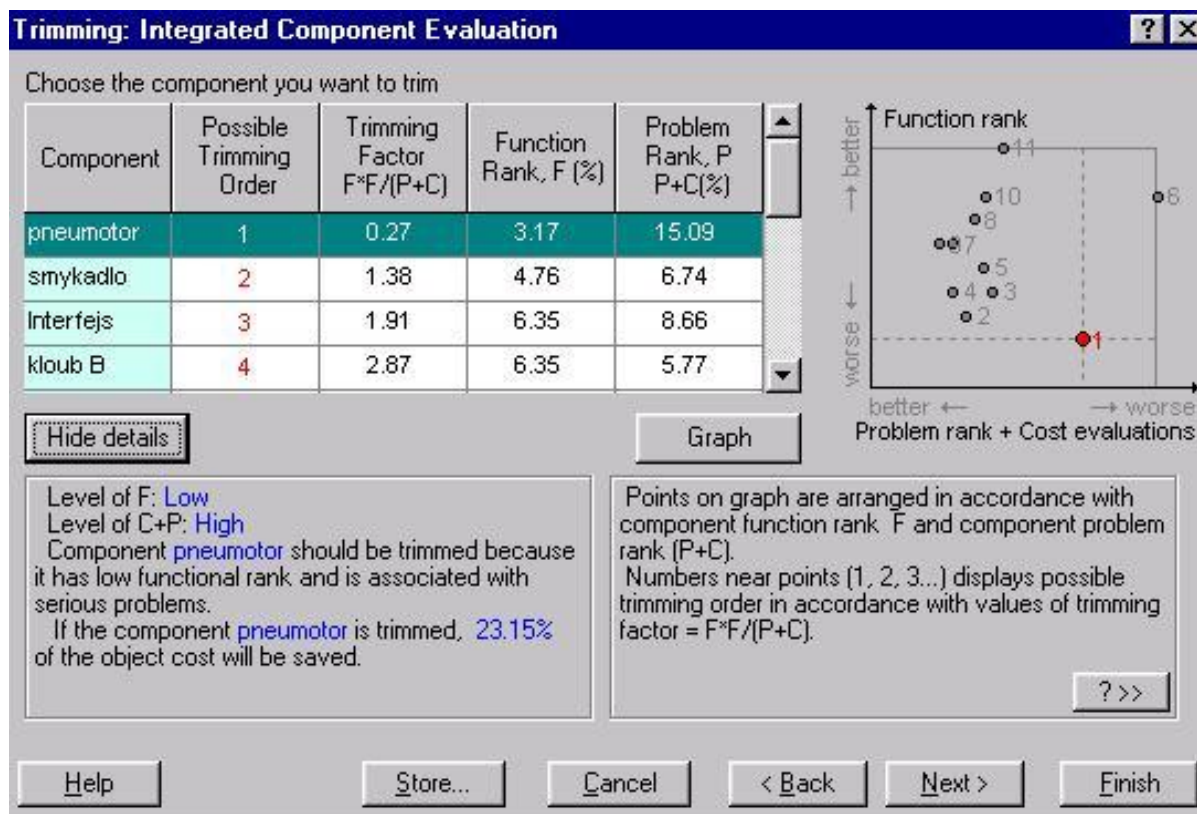
Obr. 4.3.2.-8 Prohlížeč

Jednotlivé tabulky prohlížeče lze užít k editaci dosud zadaných hodnot a vazeb, či působení a poznámek. V posloupnosti projektu se nyní provádí hodnocení očekávaných nákladů, což je možné založit na jejich absolutním nebo relativním odhadu (obr. 4.3.2.- 8).

Po takto provedené analýze úvodní fáze řešení projektu máme k dispozici hodnocení nákladů na projekt, funkcí, včetně úrovně jejich plnění a problémů, které jsme odhalili.

Těchto hodnot lze užít k posouzení dalších úkolů a pořadí jejich řešení pro dosažení optimálního výsledku celého projektu.

Hodnotová analýza vychází při hodnocení ze základní relace mezi vstupy a výstupy projektu, přičemž k maximalizaci této relace usilujeme o maximalizaci výstupů a minimalizaci vstupů. Za výstupy považujeme souhrn funkcí, kterými jsou uspokojovány potřeby uživatelů produktu a za vstupy náklady k dosažení těchto funkcí.



Obr. 4.3.2. -9 Stanovení trimovacího koeficientu

Ve skutečnosti nelze, zejména v úvodních etapách projektu, náklady dosti přesně odhadnout a navíc efektivita řešení je podmíněna i složitostí problémů, které se již v návrhových etapách života produktu vyskytují (ale samozřejmě může jít i o problémy, které konstruktér tuší, např. při likvidaci produktu po jeho dožití, z hlediska ekologie). Z toho důvodu TO využívá ke komplexnímu hodnocení optimálnosti řešení projektu vztah

$$T_f = \frac{F^2}{P+C} \quad (0.1)$$

kde

F je úroveň funkčnosti objektu, jejíž váha z hlediska inovace je zvýrazněna umocněním 2,

P je úroveň problémovosti

C je úroveň nákladů spojených s produktem.

Hodnota  $T_f$  se nazývá trimovací součinitel a z uvedeného plyne, že komponenty, které mají nízké hodnoty  $T_f$  působí v projektu obtíže, které je nutno řešit. Nejjednodušeji

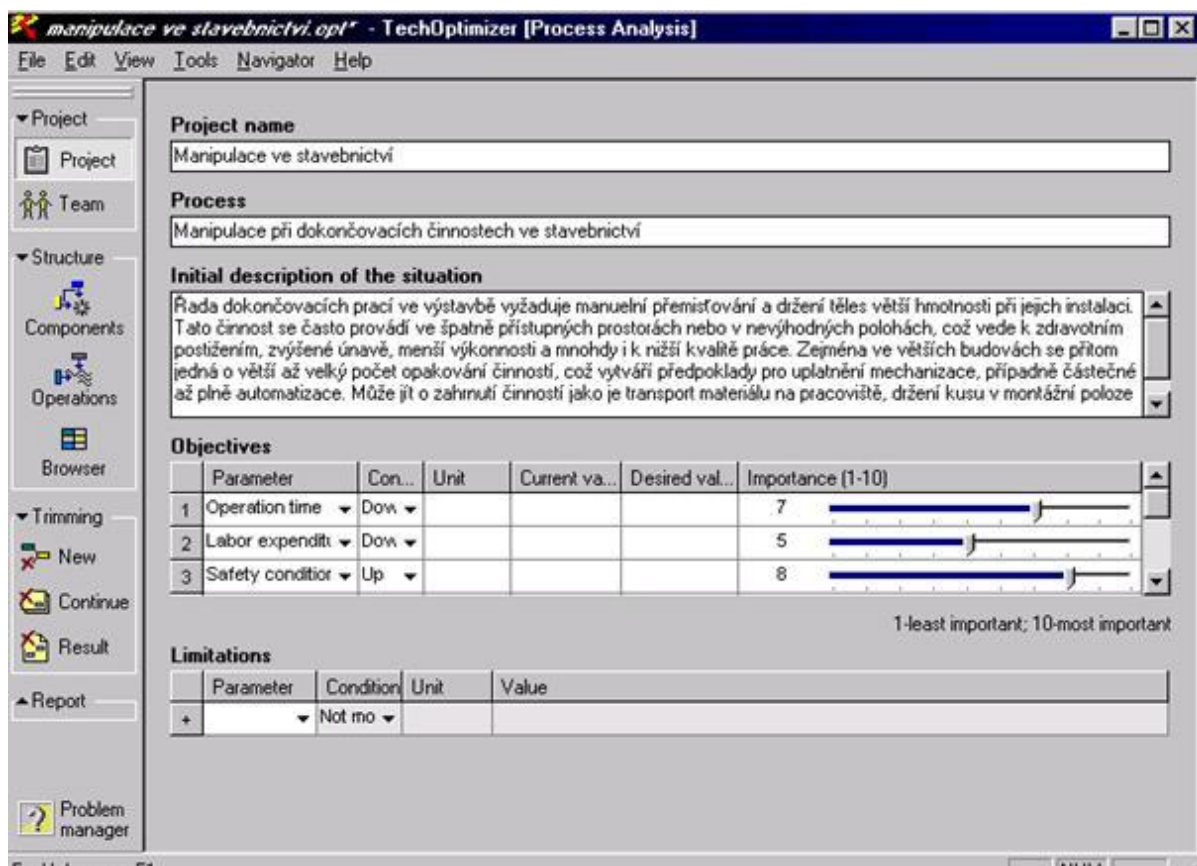
odstraněním (trimováním) takového prvku nebo dílčími úpravami – zvýšením funkčnosti (přidáním funkcí, nebo lepším plněním funkcí), snížením nákladů, snížením problémovosti.

TO automaticky provede vyčíslení jednotlivých hodnot  $T_f$  a seřadí komponenty struktury analyzovaného systému vzestupně podle jejich velikosti, takže je okamžitě zřejmé kam je nutno v rámci řešení projektu zaměřit pozornost (obr. 4.3.2.- 9).

Je nutné si uvědomit, že objektivnost této metody je založena na expertním přístupu a její individuální využití vede ke zvýšení rizika vzniku významné odchylky skutečného výsledku oproti odhadu. Značnou výhodou metody je možnost sledování řady faktorů návrhu a jejich provázanosti, což je v průběhu tvorby návrhů současnými metodami (zvláště v počátečních etapách návrhu) značně obtížné.

Získané výsledky demonstrovány v tabulce na obr. 4.3.2.- 9 jsou tedy prvním výstupem předchozí analýzy produktu. Výsledky samozřejmě nelze, vzhledem k charakteru metody, aplikovat bez dalších úvah. Přeevším je nutno posoudit shodu, či rozptyl výsledků, všech expertů a extrémní hodnoty dále analyzovat. Je také možný příklon ke zdůvodněnému hodnocení vybraného experta, nebo zprůměrování individuálních výsledků (obr. 4.3.2.- 8).

Dalším krokem, než přistoupíme k trimování konkrétního prvku, je posouzení jednotlivých hodnot vstupujících do trimovacího faktoru a možnost úprav prvku, které by tyto hodnoty výrazně ovlivnily ke zvýšení  $T_f$ .



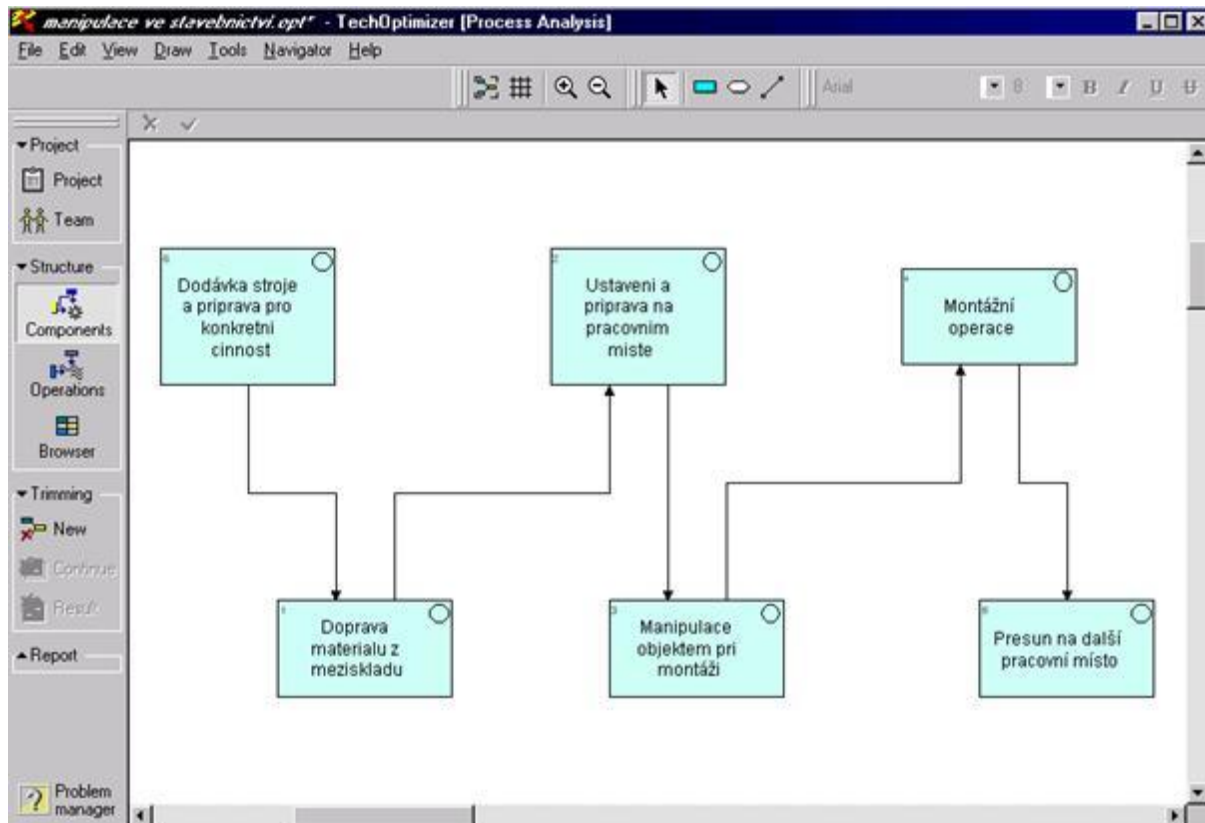
Obr. 4.3.2. -10 Vstupní údaje pro analýzu procesu

Závěrem lze konstatovat, že princip tohoto přístupu je zkušenými konstruktéry více či méně intuitivně používán, při využití TO je však velmi dobře formalizován a systematizován, takže zjednodušuje, racionalizuje a vede tvůrčího pracovníka rychle a přesně základními kroky analýzy jakéhokoliv produktu.



## Analýza procesu

Modul analýzy procesů TO umožňuje uživateli analyzovat výrobní, inženýrské a technické procesy z různých úhlů pohledu a v několika různých úrovních abstrakce. Uživatel nejdříve zkoumá procesní komponenty, které jsou během procesu uskutečňovány, pak operace, které jsou prováděny v každé procesní komponentě a nakonec různé funkce, které každá jednotlivá operace uskutečňuje.



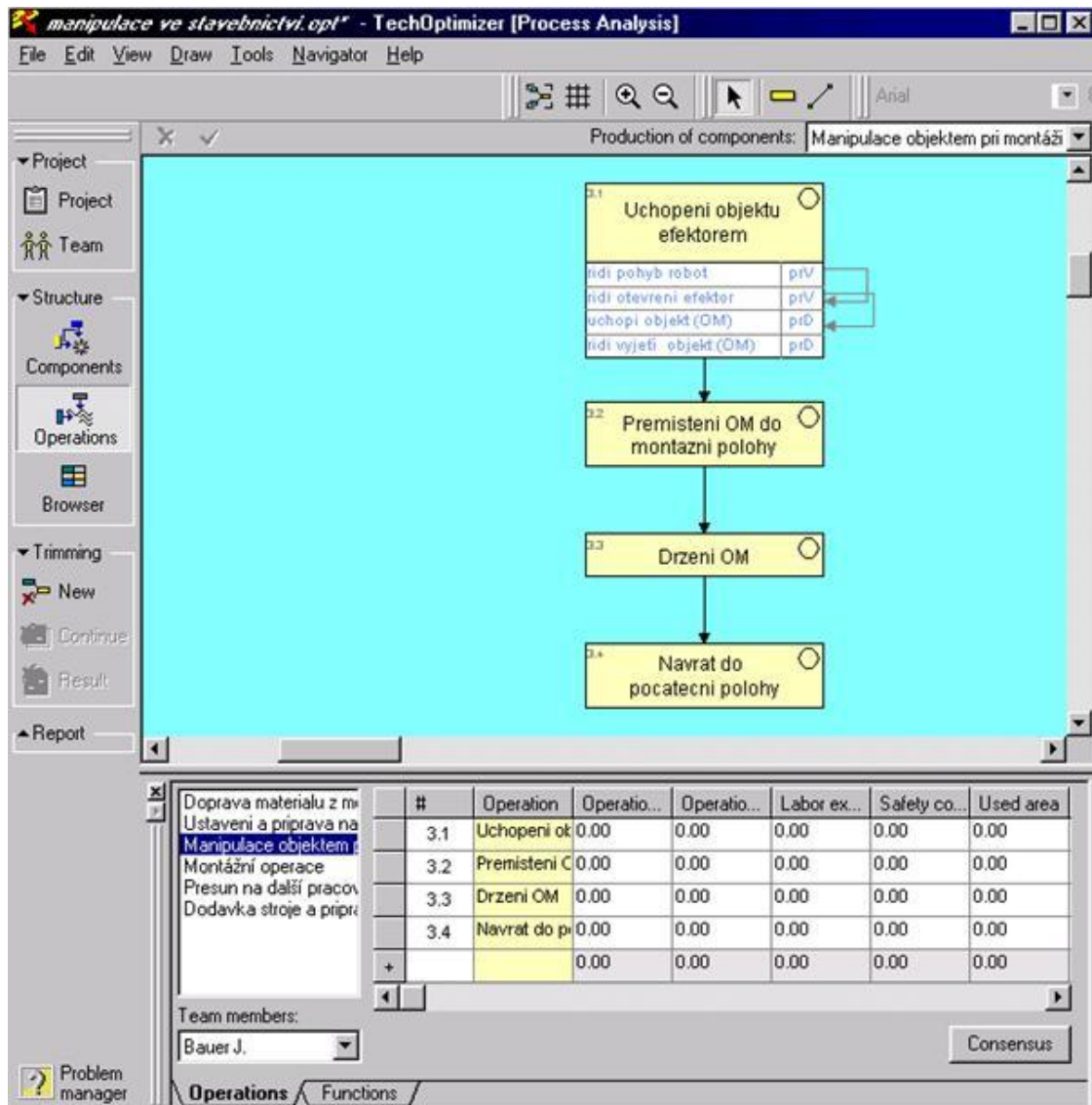
Obr. 4.3.2. -11 Schéma procesu

Uživatel sestavuje grafický model komponent, které jsou součástí daného technologického procesu a grafický model uskutečňovaných funkcí. Opět se provede analýza vazeb a po hodnocení je možné trimovat funkce. V analýze procesu může uživatel také definovat cíle projektu a jejich relativní důležitost (významnost), která mění hodnoty trimovacího faktoru a následně jednotlivá doporučení pro trimování. Systém je navíc schopen navrhovat trimovací varianty a hledat variantu optimální. Principy aplikace tohoto modulu a průběh hodnocení jsou v zásadě totožné s analýzou produktu, proto uvedeme jen na několik odlišností. Založení projektu na analýzu procesu popisuje základní situaci a cíle projektu (obr. 4.3.2. - 10).

Po založení projektu následuje zahájení analýzy procesu (analytické prvky jsou však již uplatněny při zadávání dat a posuzování významnosti jednotlivých cílů), která stejně jako u produktu má dvě formy - grafickou a tabulkovou, přičemž se pracuje se stejnými daty.

V průběhu analýzy operací, jako etapy analýzy procesu, se analyzuje pořadí a funkce každého kroku nebo operace, které vytvářejí jednotlivé komponenty procesu. To vyžaduje

porozumění z jakých částí se proces skládá, jak tyto části působí na sebe navzájem a s okolím. Pak je možné rozhodnout, které nedostatky jsou nejkritičtější, které problémy by měly být řešeny a zjistit naléhavost těchto problémů. TechOptimizer podporuje tyto analýzy v průběhu vytváření modelu procesu.



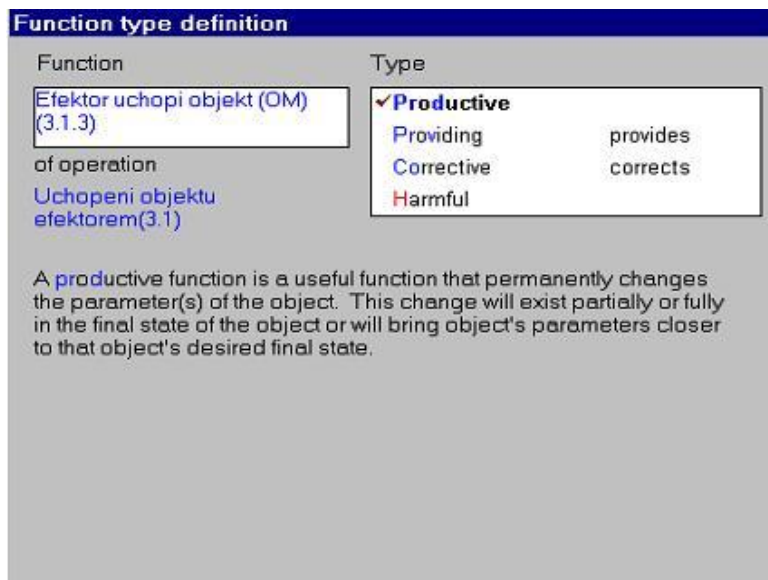
Obr. 4.3.2. -12 Operace procesu

Obecný postup pro analýzu operací v procesu začíná kreslením modelu struktury operací a jejich sledu. Každý proces má hierarchickou strukturu:

- proces může být rozložen do komponent, které jsou vytvářeny během procesu (obr. 21),
- komponenty mohou být dále rozloženy do operací (obr. 22),
- operace jsou dále tvořeny funkcemi, přičemž každá funkce obsahuje tři části:
  - působící prvek nebo nástroj,
  - působení,
  - prvek nebo výrobek, na který je působeno.

Objekt analyzujeme od vyšší úrovně hierarchické struktury a postupujeme níže, je-li to potřebné. Po vytvoření grafického modelu procesu podrobněji analyzujeme jednotlivá působení prostřednictvím analýzy vazeb. TO podporuje podobně jako u analýzy produktu dvě úrovně analýzy vazeb.

První úroveň, nazvaná analýza působení, vyžaduje jen velmi málo informací pro popis



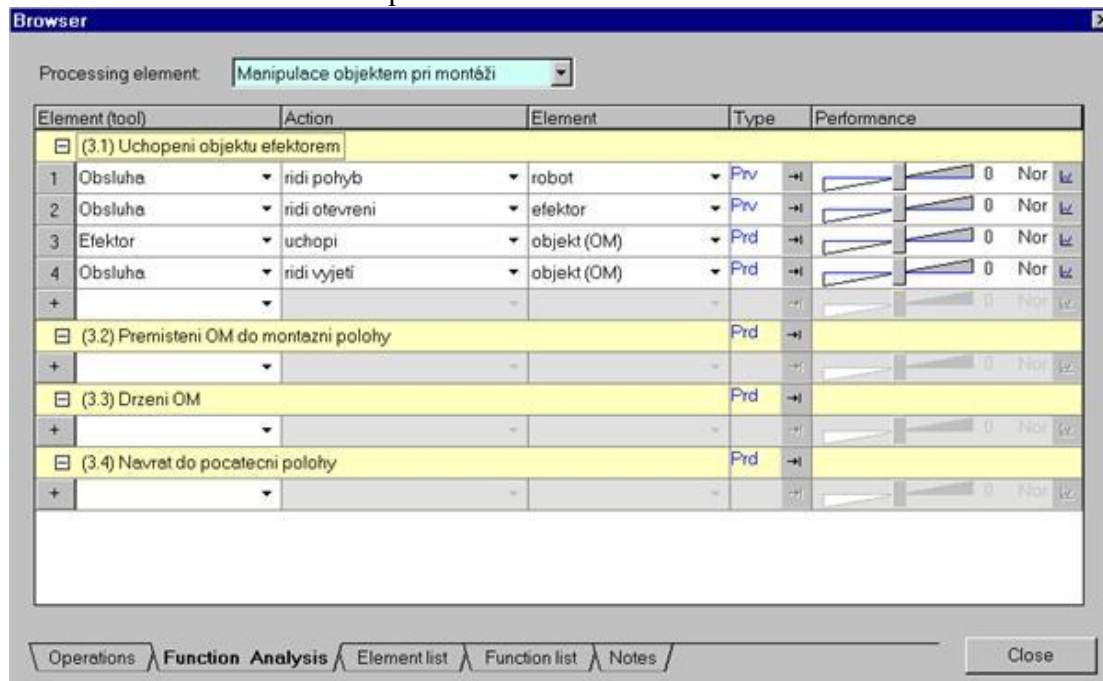
působení. Každá funkce je definovaná ve shodě s jedním ze čtyř typů a jen několika slovy. Užitečná působení jsou tříděna ve shodě s jejich úrovní funkčního plnění: obyčejná, nadbytečná, nedostatečná. Mohou se vyskytnout také škodlivá působení.

Druhá úroveň je detailní analýza vazeb, která uživateli umožňuje definovat plnění funkcí precizněji, prostřednictvím příslušných parametrů dané funkce. Analýza parametrů tedy obsahuje parametry působení.

Obr. 4.3.2. -13 Definice typu funkce

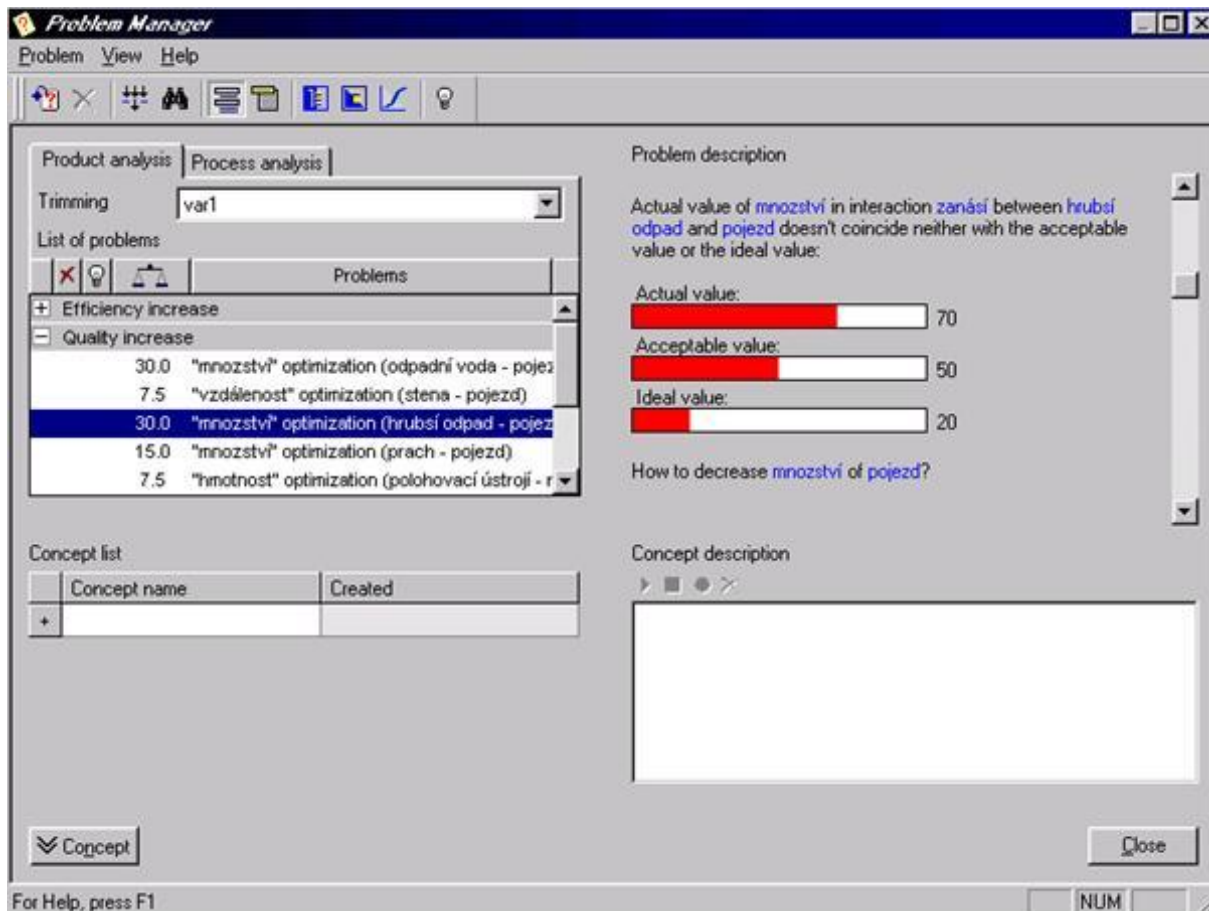
U každého parametru může

uživatel zaznamenat jeho průběh v čase, závislost na prostoru, nebo na jiném pojmenovaném parametru. V případě užitečného působení je potom porovnávána skutečná a požadovaná hodnota nebo závislost parametru. V případě škodlivého působení je porovnávána skutečná a přijatelná hodnota nebo závislost parametru.



Obr. 4.3.2. -14 Rozložení operace na prvky

TO stanovuje stupeň nesouladu mezi skutečnou a požadovanou hodnotou užitečného parametru nebo mezi skutečnou a přípustnou hodnotou škodlivého parametru. Popis, jak tyto neshody ovlivňují efektivitu procesu je definován uživatelem. TO soustřed'uje tyto informace, přiřazuje je ke komponentům procesu, vytváří seznam problémů a stanovuje jejich naléhavost. Obr. 4.3.2. - 12 ukazuje příklad komponenty „manipulace objektem při montáži“, z procesu „manipulace ve stavebnictví“ a její strukturování do 4 operací. Ve spodní části obrázku je připojena tabulka, ve které lze vyhodnotit význam každé operace pro zvolené cíle projektu.



Obr. 4.3.2. -15 Suma problémů eliminovaných při analýze procesu

Editaci všech kroků lze provádět podrobněji v prohlížeči; na obr. 4.3.2. - 13 je dále typ funkce. Každou funkci řadíme k určitému typu, ze 4 možných – funkce vytvářející, přípravné, opravné a škodlivé. Každá funkce je popsána prvkem, který působí (v obr. 4.3.2. - 13 efektor), vlastním působením (uchopí) a prvkem na který je působeno. Z obr. 4.3.2. - 14 je zřejmé, že každá operace sestává obecně z více funkcí; kromě typu funkce je zde uvedena také úroveň plnění jednotlivých funkcí kvalitativně (nedostatečné – nadbytečné), nebo i kvantitativně vyjádřením velikosti příslušných parametrů. Parametry lze vyjádřit obdobně jako u produktů i grafickou závislostí, která se otevře klepnutím na symbol grafu, na konci řádku. Vlastní karta, ve které se zobrazí možnosti vyjádření úrovně funkcí oběma způsoby je zobrazena v obr. 4.3.2. - 15. Tím je uzavřena sekvence kroků analýzy procesu a může být provedena potřebná editace, kteréhokoli kroku nebo parametru a následně i dílčí optimalizace procesu, buď pomocí trimování, nebo zlepšování či doplňování funkcí. V této chvíli je nutné provést vyhodnocení výsledků analýzy.

Oba analytické nástroje – analýza produktu i analýza procesu jsou původně určeny pro vypracování správných zadání při inovacích, tedy pro analýzy, které musí předcházet rozhodnutí o formulaci co řešit – jaký problém a ostatní moduly TO slouží k nápovědě jak k řešení dojít.

### **Manažer problémů**

Výsledkem analýzy produktu nebo procesu je vždy souhrn problémů, které zůstaly k řešení v rámci návrhu, přičemž tyto problémy jsou vyhodnoceny a seřazeny podle hodnot významnosti. Manažer problémů je nástroj, který napomáhá orientaci v seznamu problémů a napomáhá ve vyhledávání problémů k řešení.

Z příkladu karty manažera problémů (obr. 4.3.2. - 15) lze vyčíst, že je využitelná jak pro analýzu produktu, tak pro analýzu procesu. Dále, že problémy je možné třídit podle různých filtrů - podle typu problému orientovaných na:

- zvýšení kvality
- zvýšení efektivity
- zjednodušení
- uživatelem jinak definovaný problém.

Je možné navrhovat různé varianty řešení problémů, resp. koncepcí jejich řešení; jejich počet není omezen.

### **4.3.3. Syntézy**

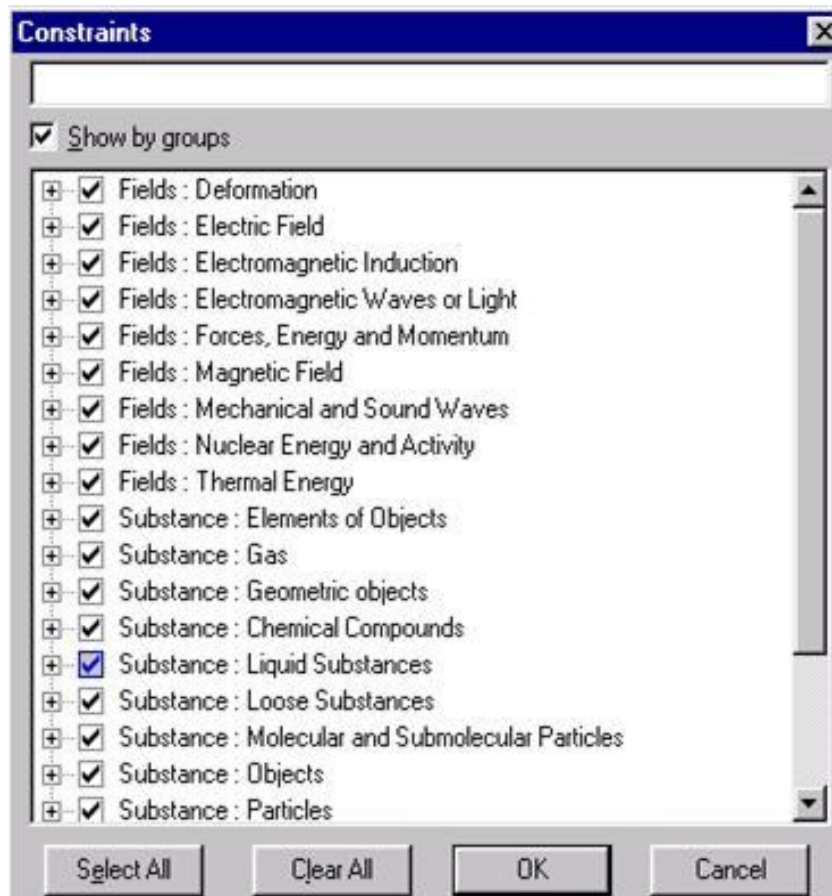
Výstupem z analýzy produktu nebo procesu je informace, kterou sumarizuje a hodnotí manažer problémů. Hledání řešení nejvýznamnějších problémů podle zvolené posloupnosti je založeno (mimo vlastní intuice a zkušeností) na metodice TRIZ a ARIZ a nástrojích Design Science. V rámci TO jde především o počítačovou podporu návrhu vycházející z TRIZ, ARIZ, která se realizuje ve 3 modulech, podporujících syntézu návrhu – Efekty, Prognózy, Principy.

#### **Efekty**

Modul efektů obsahuje přes 4000 vědecko technických efektů (jevů) a demonstračních příkladů. Tento modul umožní vybrat efekty na základě požadované technické funkce. Efekty se nacházejí v příslušné databázi efektů, teorémů, zákonů a jevů. Efekty jsou jednou z alternativních cest k hledání řešení problémů.

Efekty lze různým způsobem seskupovat respektive filtrovat a vyhledávat z různých zdrojů. V obr. 4.3.2. – 16 je příklad karty s částí efektů řazených podle skupin. Většina efektů je doložena demonstračními příklady.

Otevření konkrétního efektu poskytuje mnoho vysvětlujících údajů : popis efektu nebo příkladu, související efekty nebo příklady, výhody efektu nebo příkladu, formulaci problému a jeho řešení u příkladů, index efektu, definující parametry, které charakterizují daný efekt, omezení efektů a jejich parametrů, materiálové reference efektů, vzorce k efektům, podmínky použitelnosti efektů, reference a literatura k efektům a příkladům, on-line technický hypertextový slovník (obr. 4.3.2. – 17). Mimo existující databáze efektů je dána možnost jejího doplňování vlastními efekty.



Obr. 4.3.2. -16 Skupiny efektů

podobné objekty nebo různé objekty, segmentace látek a objektů, segmentace prostoru, segmentace povrchu, dynamizace, koordinace rytmu - slad'ování, koordinace působení - slad'ování, geometrický vývoj lineárních konstrukcí, trimming - svinování prvků.

Jako prvky problému se vkládají ty prvky, mezi nimiž je působení, které chceme změnit. Na tomto místě jsou uvedeny objekty spojené s řešeným problémem. Lze zadat jeden nebo dva objekty.

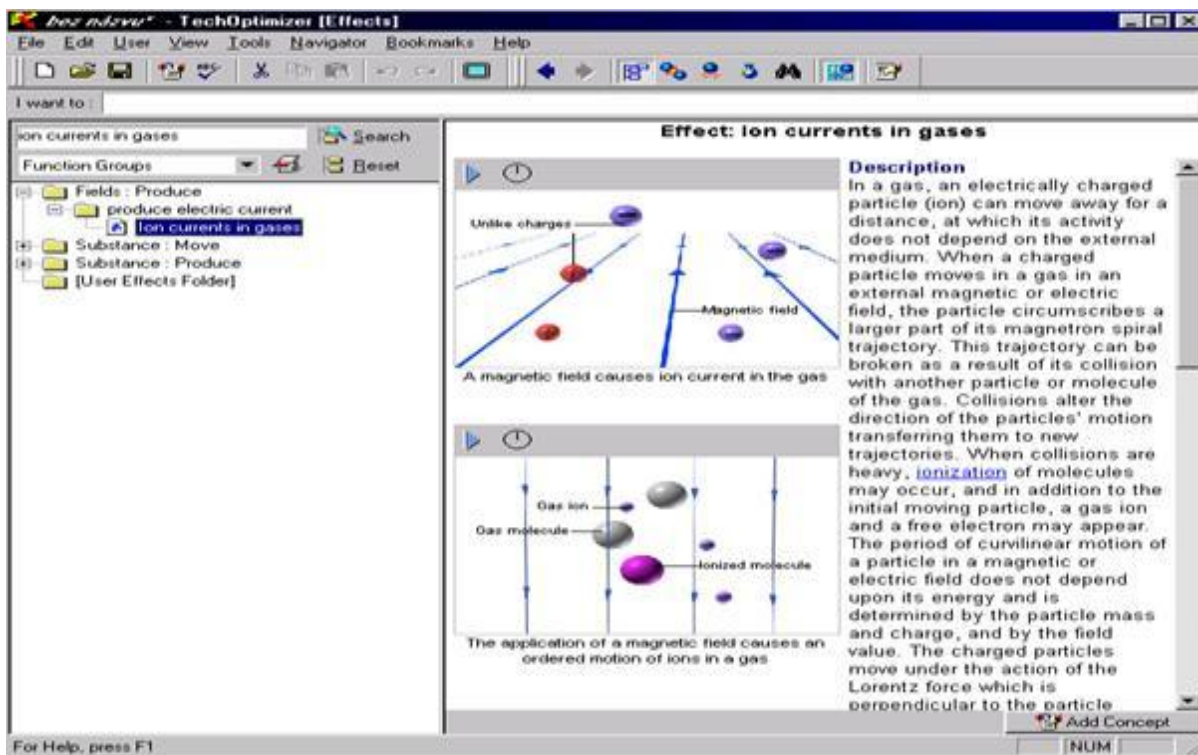
Jestliže vstoupíme na obrazovku Prognózy (obr. 4.3.2. – 18) přes Manažer problémů, jsou objekty související s daným problémem a působení mezi nimi již automaticky zapsány v příslušných polích. Jestliže pole ještě vyplněna nejsou, lze informace doplnit. Následně volíme položku **change**. Zde je nabídka čtyř možných změn působení - směru, intensity, struktury a času, které se dále podrobněji člení (obr. 4.3.2. – 19).

Opět jsou jednotlivé volby doplněny různými příklady a aplikace poskytuje řadu dalších možností, se kterými se uživatel seznámí prostřednictvím manuálu a lze využít i literatury [Devojno, Bušov 97], která problematiku dále rozvíjí.

## Prognózy

Modul prognóz uvádí možná řešení technického problému. Umožňuje také zkoumat vývojové tendence systémů. Tyto tendence se zakládají na standardních postupech, jakými se technické systémy obvykle zdokonalují, když je vyžadována změna objektů nebo jejich přemístování.

Modul pomáhá uživateli rozpoznat nové a inovační postupy transformací daného technického problému jako odezvu na pojmenování existujících nedostatků. Mezi postupy patří: zavádění nových látek, zavádění modifikovaných látek, mono-bi-poly:



Obr. 4.3.2. -17 Popis konkrétního efektu

## Principy

Protože technický systém je zpravidla složitý, existuje mnoho relací mezi jeho částmi. Velmi často, jestliže jednu vlastnost systému zdokonalíme, jiná se zhorší. Jestliže nastává taková situace, je použitelný modul principů (zahrnuje asi 40 principů). Principy mohou pomoci zmírnit nebo překonat rozpory mezi vlastnostmi a tím situaci řešit.

Tyto principy vznikly analýzou, více než 2.5 miliónu patentů. Modul Principy nabízí 39 typických technických charakteristik, parametrů. Dvojice rozporných charakteristik tvoří matici - tzv. Altšullerovu tabulku (obr. 30). První z dvojice rozporných parametrů nazýváme Improving Feature (zlepšovaný parametr) a druhou Worsening Feature (zhoršující se parametr).

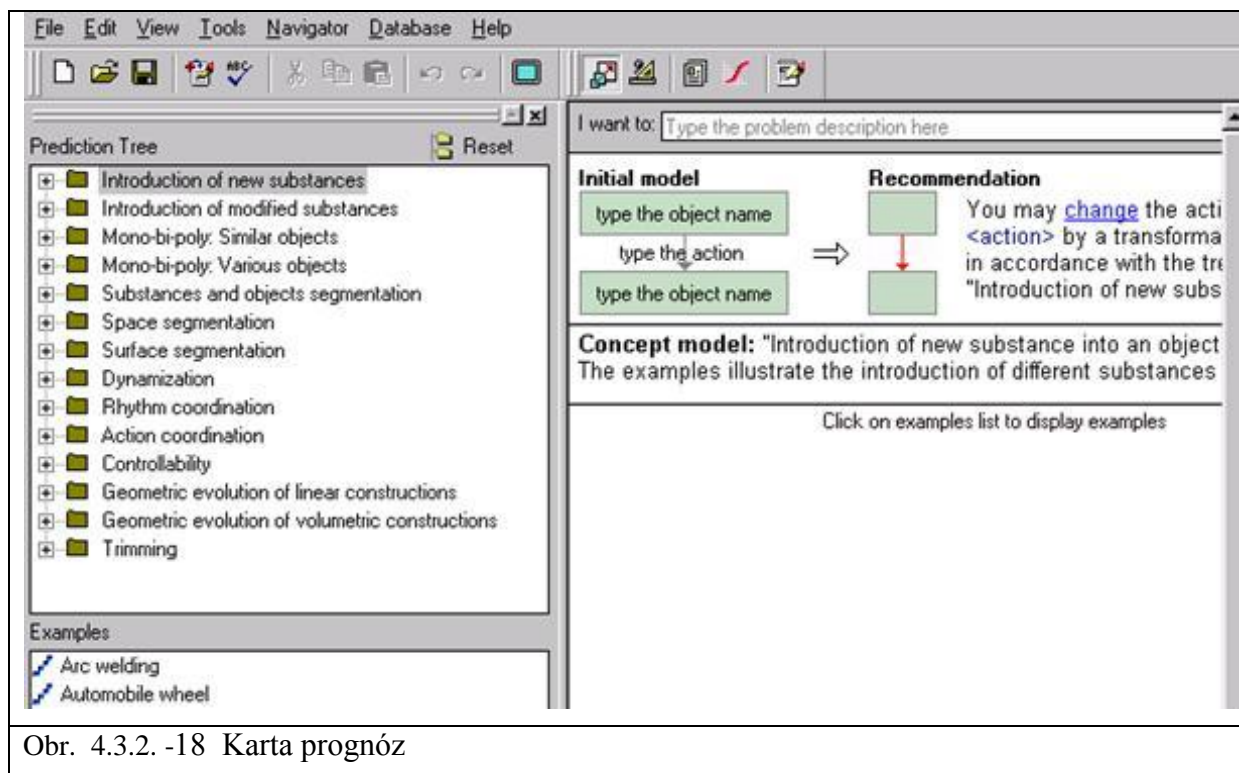
Tabulka není symetrická. Jestliže bychom dvojici parametrů přehodili v pořadí, (zhoršující jako první a zlepšovanou jako druhou) doporučené principy v tabulce nemusí být shodné s předchozím případem. Jakmile specifikujeme dvojici rozporných parametrů, které jsou obsaženy v technickém problému, modul Principy doporučí ty principy, které jsou užitečné pro eliminaci tohoto rozporu. Na příkladech připojených k jednotlivým principům se demonstruje, jak byl příslušný princip konkrétně použit pro řešení téhož nebo velmi podobného rozporu v jiném technickém systému.

Činnost v Principech začíná vyplněním polí:

**I want to** - uvedením zlepšovaného parametru

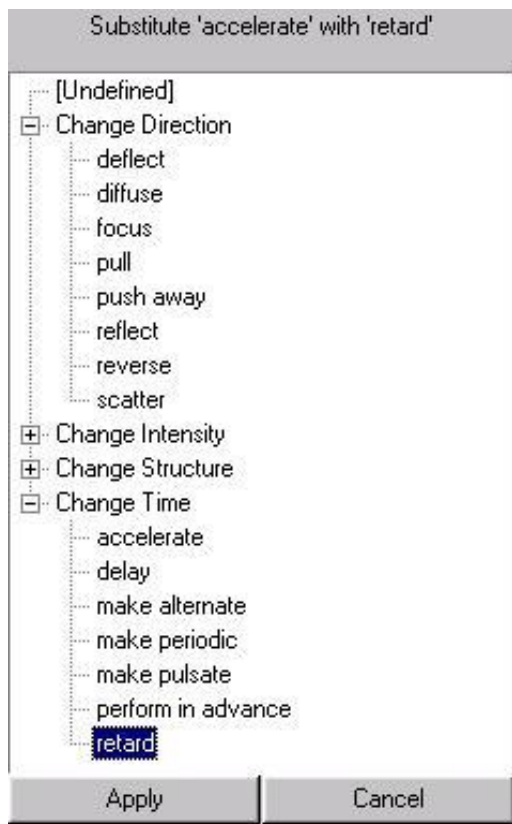
**by** - jak toho chceme dosáhnout

**but there is a problem** - uvedením zhoršovaného parametru.



Obr. 4.3.2. -18 Karta prognóz

Jestliže je modul Principy spuštěn z Manažera problémů, mohou být některé informace již zapsány.



Obr. 4.3.2. -19 Možné změny působení

feature k zhoršující se charakteristice. V takovém případě klikneme na tlačítko šikmé šipky nad seznamem charakteristik. To způsobí, že nyní bude počet položek v okně Worsening

V nabídce Improving feature volíme parametr (vlastnost, charakteristiku), která nejvíce odpovídá požadovanému cíli. Ikona se šipkou u každé položky znamená, že výčet charakteristik je neměnný, pevný - obsahuje 40 charakteristik. Jestliže není k dispozici přesně odpovídající charakteristika, hledáme charakteristiku nejbližší co do významu požadovanému cíli.

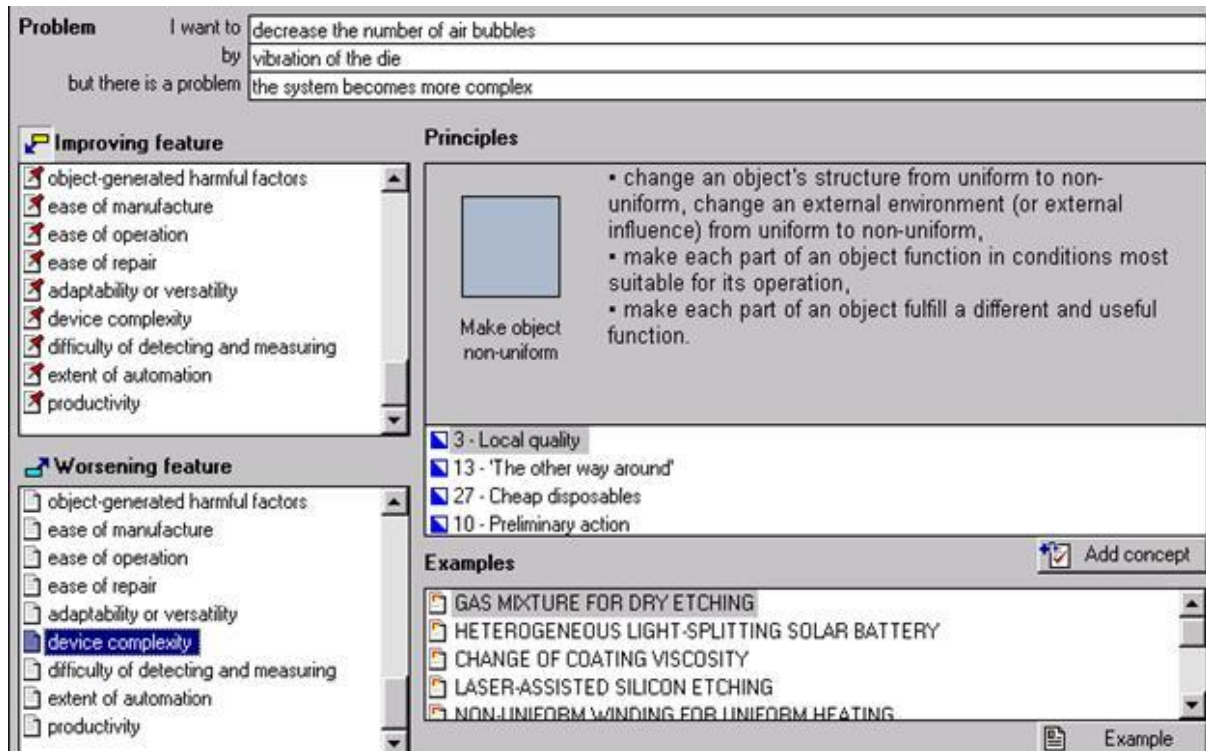
V seznamu Worsening feature volíme charakteristiku, která nejlépe popisuje problém, totiž, že se něco zhoršuje.

Při volbě několika rozdílných položek v okně Improving feature, zjistíme, že počet položek zobrazených v okně Worsening feature se mění. Je to dáno tím, že ne všechny páry Improving/Worsening charakteristik mají doporučené principy. Ukazují se jen ty páry, které mají alespoň jeden doporučený princip k řešení rozporu.

Může se stát, že charakteristika v Improving feature se velmi dobře shoduje s definicí cíle (zlepšované charakteristiky) v problému, ale nelze nalézt vhodnou charakteristiku v okně Worsening

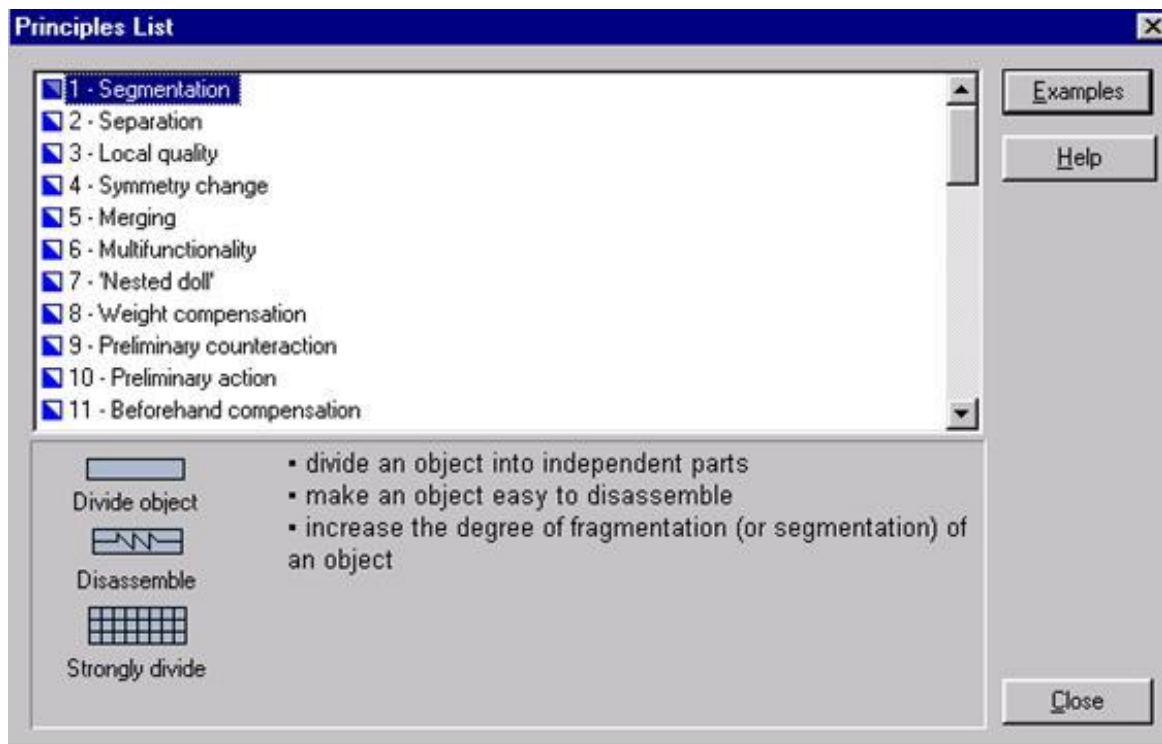


feature pevný a naopak výpis v okně Improving feature bude proměnný. Způsobí to tedy inverzi matice. Sloupce se nyní stanou řádky, ze kterých vybíráme jako v pevném seznamu.



Obr. 4.3.2. -20 Karta Principů

Jelikož je tabulka zlepšovaných/zhoršujících se charakteristik nesymetrická, v okně se objeví nové možnosti charakteristik a může se stát, že nalezneme vyhovující shodu s



Obr. 4.3.2. -21 Databáze příkladů řešení

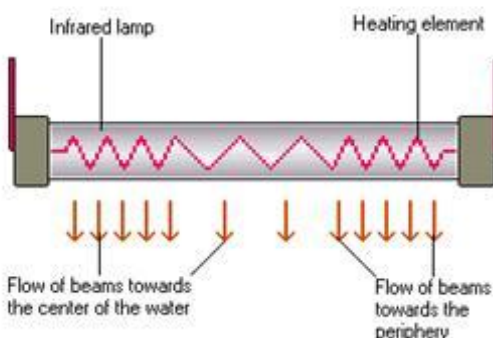
vlastními charakteristikami. V tomto případě hledáme nejlépe odpovídající charakteristiku ve Worsening Feature a pak v Improving feature.

Databáze příkladů se používá v zásadě stejně jako u principů (obr. 31 a 32).

Principles	Examples
3 - Local quality	NON-UNIFORM WINDING FOR UNIFORM HEATING

**NON-UNIFORM WINDING FOR UNIFORM HEATING**

An infrared lamp heats a semiconductor wafer. The wafer edge cools more quickly making the temperature higher in the center. Can a uniform heating be achieved?



It is proposed to use the blessing in disguise and local quality principles to improve the heating balance. Combine the non-uniform cooling with another harmful factor, non-uniform heating, to neutralize the harmful effects. The heater spiral is wound with more windings at its edges. This gives more heat at the edges than in the center. This provides a uniform temperature over the entire surface of the wafer.

Patent Application of Japan N 61-185 917

Add concept 5 of 10

Obr. 4.3.2. -22 Databáze příkladů řešení

## Základní pojmy software TechOptimizeru

**Doplňková funkce** je užitečná funkce, která působí na prvek nadsystému. Například láhev džusu je systém, jehož hlavní funkcí je "držet" džus (v prostoru).

**Alternativní systém** - termín používaný v proceduře přenosu charakteristik (vlastností, význačností). Jako alternativní systém je označován jeden ze dvou navzájem si konkurujících systémů, což jsou dva systémy s dvojicí komplementárních (navzájem se doplňujících) předností a nedostatků.

**Altshullerova tabulka** je dvoudimenzionální uspořádání řady nejefektivnějších principů, které mohou být použity k překonání typických technických rozporů.

**Pomocná funkce** je užitečná funkce působící na prvek technického systému. Nepůsobí na výrobek nebo nadsystémové prvky.

**Základní funkce** je užitečná funkce, která působí na výrobek.

**Konkurující systém** je pojem používaný v proceduře přenosu vlastností. Konkurující systémy jsou ty, které vytvářejí podobné funkce.

**Prvek**, či **komponent**, je látka, pole nebo kombinace látky a pole, které jsou částí (subsystémem) technického systému.

**Hodnocení prvků** - metoda užívaná pro stanovení pořadí, ve kterém by měla být uplatněna procedura svinování prvků. Je založena na stanovené funkční, problémové a nákladové významnosti prvků.

**Model prvků** je seznam prvků daného systému a prvků jeho nadsystému. Komponentní model zahrnuje i výrobek. Komponentní modely mohou být vytvářeny na různých hierarchických úrovních.

**Opravná funkce** je užitečná funkce, jejíž působení mění parametry nežádoucích efektů.

**Efekt** je výsledek, který může být vysvětlen vědeckými zákony fyziky, matematiky, chemie a biologie a jejich odpovídajícími technickými aplikacemi.

**Technický rozpor** je situace, která existuje, když zlepšení nebo požadovaná změna jedné charakteristiky vede ke zhoršení jiné charakteristiky.

**Technický problém** je technická, či inženýrská situace popisující problém na počátku aplikace řešitelské metody.

**Technický systém** je systém, skládající se z látek a/nebo polí, určený k uskutečňování funkcí.

**Funkce** je působení mezi subjektem a objektem, kterým subjekt mění parametry objektu.

**Analýza funkcí** je analýza technického systému zaměřená na funkce systémových komponent a nadsystémových prvků.

**Model funkcí** - model technického systému, který popisuje funkce mezi komponenty systému a s prvky nadsystému.

**Řád funkce** jednotlivé komponenty je relativní důležitost prvku při (pro) dosahování hlavní funkce technického systému.

**Typ funkce** je charakteristika funkce, charakteristika, která reflektuje specifické změny zaváděné do objektu plněním této funkce.

**Škodlivá funkce** je funkce, která zhoršuje parametry objektu funkce.

**Ideální systém** - systém, který neexistuje, ale požadovaná funkce systému je přesto dosažena.

**Model struktury** - model, který popisuje interakce (vazby) mezi komponenty uvnitř i vně technického systému, s prvky nadsystému.

**Stupeň plnění funkce** - poměr mezi aktuální (skutečnou) a požadovanou hodnotou nějakého kritéria (např. Parametru) funkce. Jestliže skutečná hodnota > požadovaná hodnota, pak stupeň plnění funkce je nadbytečný. V opačném případě je nedostatečný. Když skutečná hodnota = požadované hodnotě, pak je stupeň plnění dané funkce adekvátní potřebě.

**Životní etapa** - některá část životního cyklu technického systému. Životními fázemi jsou obvykle fáze výroby, dopravy, skladování, fungování (provozu), oprav, recyklace, atp.

**Analýza vazeb** - speciální analýza jednotlivých funkcí zaměřená na pojmenování funkce, zda je užitečná či škodlivá, na stanovení úrovně plnění a parametrických závislostí.

**Hlavní funkce** - funkce, pro jejíž plnění byl technický systém navržen.

**Měřicí funkce** - užitečná funkce, jejíž plnění se projevuje ve shromažďování informací o parametrech objektu, sepsaných v daném technologickém procesu.

**Objekt** - jeden z prvků zahrnutý do definice funkce. Subjekt funkce působí na objekt a modifikuje jeho parametry.

**Struktura objektu** - je složena z komponentů objektu, výrobku, nadsystémových prvků a škodlivých a užitečných funkcí působících mezi nimi.

**Principy** - jsou nejefektivnější postupy řešení typických technických rozporů definovaných Altšullerovou tabulkou.

**Problémová významnost prvku** - relativní index, který popisuje množství a důležitost problémů spojených s prvkem.

**Produkt** - je objekt působení hlavní funkce technického systému.

**Vytvářející funkce** - užitečná funkce, jejíž uskutečňování se projevuje v působení nevratných změn na parametrech objektu funkce

**Přípravná (zajišťující) funkce** - užitečná funkce, jejíž uskutečňování způsobuje vratné změny parametrů objektu (s výjimkou změn samotného objektu) uvedených v daném technologickém procesu.

**Žádaná hodnota parametru** - taková hodnota parametru, která zajišťuje požadované (optimální) plnění dané funkce.

**Nadsystém** - systém, který obsahuje technický systém jako jednu ze svých komponent.

**TRIZ (teorie inovačních zadání)** - metodika zdokonalování technických systémů: Opírá se o tendence rozvoje technických systémů.

**Tendence rozvoje technických systémů** - reprezentují určující tendence modifikování a zdokonalování existujících technických systémů a vytváření nových technických systémů, tendence lidského úsilí o dosažení ideálního technického systému. Tyto tendence byly odvozeny empiricky, historickou analýzou patentů a technologií.

**Trimming** (svinování) - metoda zdokonalování technických systémů založená na odstraňování prvků a přerozdělování jejich užitečných funkcí. Výsledkem procesu svinování je svinutý (nový) model technického systému a seznam problémů (zadání na svinutí), které musí být vyřešeny, za účelem dosažení nového modelu.

**Podmínky svinování** - jsou různé dostupné možnosti přerozdělování užitečných funkcí jednotlivých prvků, které by měly být odstraněny, za účelem dosažení cíle procesu svinování, tj. svinutí (omezení počtu prvků) technického systému.

**Faktor svinování** - výpočet svinovacího faktoru se používá ke stanovení komponentu na svinutí (odstranění). Je definován jako podíl  $FF/(P+C)$ , kde F je třída funkcí (funkčnost), P je problémovost, a C je cena (nákladovost). Každý člen je normalizován. Komponenty s velkou funkčností a malou problémovostí a cenou, mají velký svinovací faktor (nedoporučují se odstraňovat), komponenty s malou funkčností a velkou problémovostí a cenou, mají malý svinovací faktor (doporučují se k odstranění)

**Užitečná funkce** - funkce, která uspokojuje požadavky subjektu funkce.



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se seznámili s následujícími pojmy:

- TRIZ – teorie řešení inovačních zadání
- Moduly analýzy produktů a procesů
- Moduly syntézy – Efekty, Prognózy, Principy
- Trimování, trimovací koeficient

Kapitola slouží k připomenutí základních principů pro návrh nových technických a mechatronických systémů a jejich inovace. Nedříve analýzou zjistíme co a proč potřebujeme inovovat a nebo řešit. Následně použijeme moduly syntézy k řešení vyskytnuvších se problémů.



## Kontrolní otázka

- 1) Jaký je význam trimovacího koeficientu?
- 2) Jak konkrétně stanovíte trimovací koeficient??
- 3) Co je manažer problémů?
- 4) Na čem je postavena analýza produktu?
- 5) Na čem je postaven modul Efekty?
- 6) Co je Altšulerova matice?



## Úkol k řešení

Sestavte strukturu objektu zvoleného servisního robotu s prvky, nadsystémy a objektem i vyznačením funkcí a jejich úrovně!

## 5. NAVRHOVÁNÍ ROBOTŮ A MANIPULÁTORŮ

Po úspěšném a aktivním absolvování tohoto BLOKU

<p>Budete umět odlišit:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Software Techoptimizer od Goldfire Innovator</li></ul> <p>Aplikovat:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Analýzu kořenového problému</li></ul>	<p>Cíle přednáškového bloku</p>
--	---------------------------------

<p><i>TechOptimizer, Goldfire Innovator, workflow, researcher, úkoly, průzkum trhu, produktů a technologií, databáze, kořenový problém.</i></p>	<p>Klíčová slova</p>
---	----------------------



**Čas ke studiu:** 3 hodiny

## 5.1. MODERNÍ POSTUPY – GOLDFIRE INNOVATOR

### Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

Budete umět aplikovat: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Workflow Design New Systém</li> <li>• Workflow Improve Existing System</li> </ul>	Cíle kapitoly
---	---------------

<i>Workflow, design, new systém, improve, existing systém, GFI, popis projektu, hledání znalostí,</i>	Klíčová slova
---	---------------



**Čas ke studiu:** 90 minut



### VÝKLAD

Vývoj Invention Machine vedl k jeho stále sofistikovanější struktuře a rozšiřování o nové moduly, což poskytuje uživatelům nové možnosti a benefity. Práce se systémem (mají-li být využity všechny jeho možnosti) je však podstatně náročnější oproti TechOptimizeru verze 3.0. Z tohoto důvodu jsou následující kapitoly věnovány novým pojmům ve srovnání s TO 3.0 v minulé kapitole a následně i srovnání v postupech při inovaci stávajícího systému i návrhu nového systému.

Navíc, protože v GFI existuje manuál a Help pouze v anglickém jazyce, což vyvolává u většiny studujících potíže, jsou přeloženy nejčastěji používané anglické pojmy do češtiny. Dále jsou také upřesněny některé změny v postupech oproti TO.

#### 5.1.1. Principy GFI

Goldfire Innovator je sofistikovaný inovační software, který pomáhá uživatelům (inženýrům, vývojářům a vědcům) výrazně zvýšit produktivitu technické tvůrčí práce a jejich schopnost řešit problémy z různých oblastí vědy a techniky. Jedná se o silný nástroj, podporující realizaci různých druhů inovací a vývoj systémů nové generace. Goldfire Innovator stimuluje u uživatele nápady a myšlenky, které poté napomáhá transformovat do podoby konkrétního komerčního řešení. Tento program účelně kombinuje ověřenou metodiku tvorby a řešení inovačních zadání – TRIZ s vysoce propracovaným způsobem vyhledávání informací pomocí technologie IMC's Natural Language (technologie přirozeného jazyka). Zjednodušeně řečeno Goldfire Innovator systematicky vede uživatele k získání odpovědí na 3 základní otázky tvůrčí činnosti, kterými jsou CO, PROČ a JAK řešit (zlepšit) s cílem dosáhnout inovace stávajícího nebo vývoje nového technického systému.

Při činnostech spojených s tvůrčí činností jsou cílem úsilí vynálezce (konstruktéra) stavy technického systému v budoucnosti, přitom jejich znalost je nezbytná pro rozhodování v současnosti. Z tohoto plyne základní rozpor při technické tvůrčí práci. Goldfire Innovator snižuje informační neurčitost a výrazně se tím podílí na eliminaci základního technického rozporu.

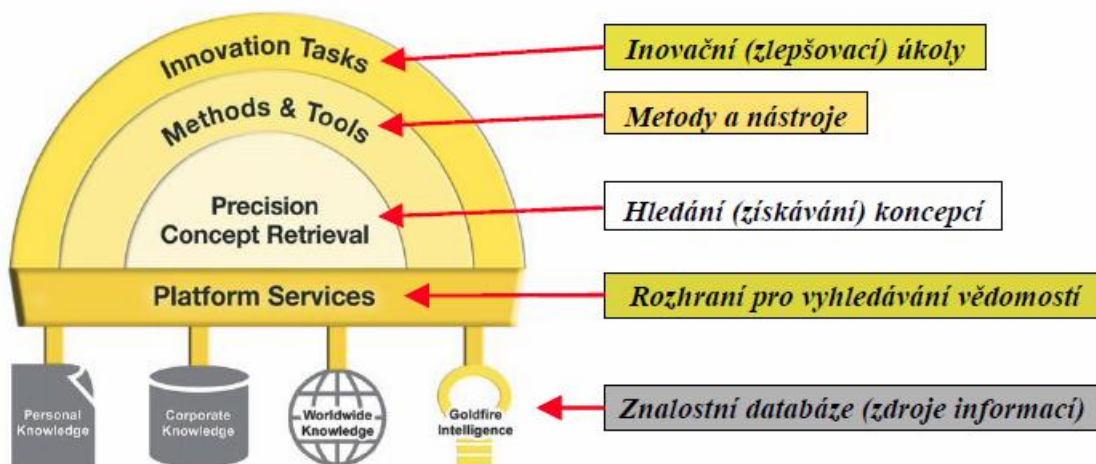
## Význam a přínosy Goldfire Innovatoru

Tento nástroj byl navržen za účelem pomoci uživatelům vyvíjet a ověřovat levnější, spolehlivější a kvalitnější řešení v následujících oblastech:

- vývoj nových výrobků,
- zlepšování stávajících produktů a výrobních procesů,
- identifikace poruch a jejich předcházení,
- strategický výzkum výrobků a výrobních technologií,
- eliminování styku s překážkami na trhu,
- pomoc při ochraně duševního vlastnictví.

Hlavní přínosy spojené s využitím Goldfire Innovatoru v inovačním procesu jsou:

- zvýšení efektivity a produktivity tvůrčí práce (díky systematickosti, propracované metodice pro proniknutí k jádrům problémů, sémantickým vyhledávacím schopnostem a přístupu k interdisciplinárním vědomostem),
- rychlý přístup k interním a externím inovačním znalostem (prostřednictvím rozhraní umožňujícího sémantické vyhledávání v osobních a firemních znalostních databázích a Invention Machine's Innovation Intelligence)
- schopnost vytvářet a ověřit více koncepcí v kratším čase
- snížení doby pro uvedení nového výrobku na trh
- stimulování originálních nápadů a myšlenek vedoucích k zařízením nové generace.



Obr. 5.1.1. – 1 Struktura řešení inovačních zadání v GFI

## 5.1.2. Možnosti využití GFI pro tvůrčí práci návrháře



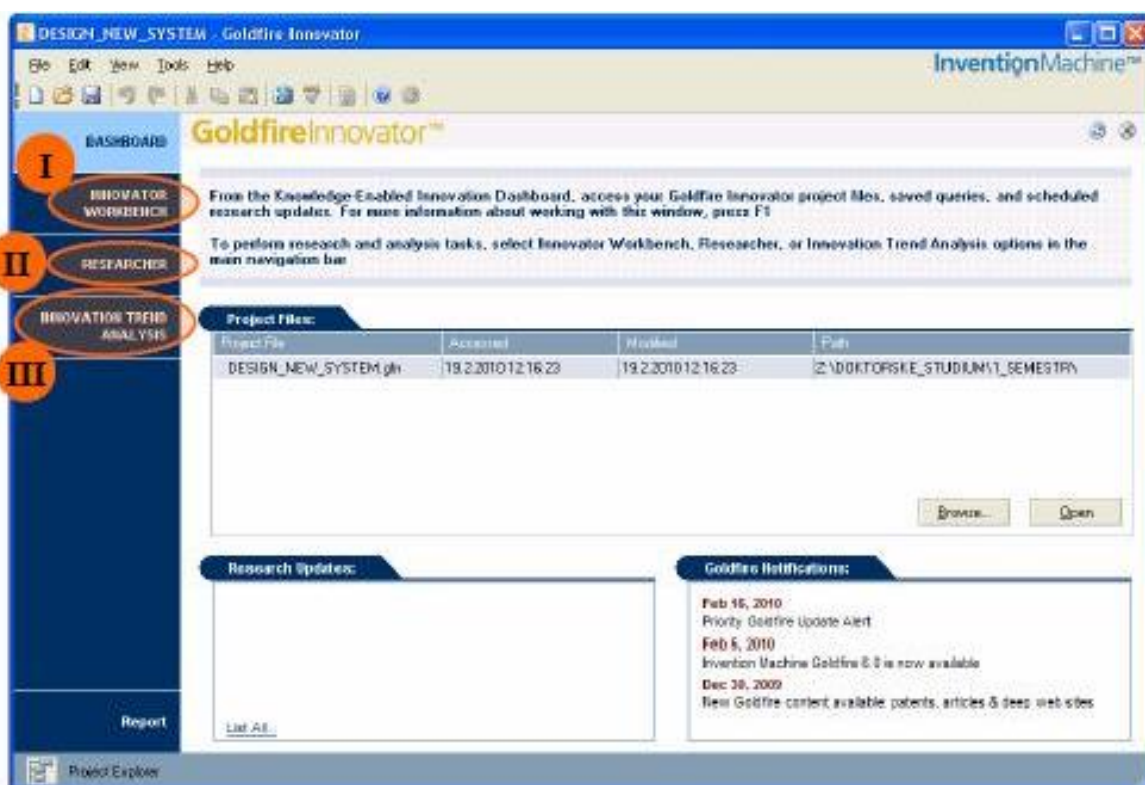
S odvoláním na poznatky získané v předmětu Metodika konstruování v oboru a skripta Kreativita a inovační myšlení, uveďme přehledně základní možnosti využití GFI.

Goldfire Innovator disponuje 3 základními nástroji (funkcionalitami), které jsou k dispozici po jeho spuštění v Navigation bar (navigačním panelu) (obr. 5.1.2-1):

I INNOVATOR WORKBENCH (Pracovní stůl Inovátoru)

II RESEARCHER (Výzkumník)

III INNOVATION TREND ANALYSIS (Analýza inovačního trendu)



Obr. 5.1.2.-1 Hlavní okno GFI

Nástroj Innovator Workbench (pracovní stůl Inovátoru) obsahuje čtyři předdefinované workflow (průběh práce) a umožňuje rovněž tvorbu workflow uživatelských. Workflow (průběh práce) představuje strukturovaný (uspořádaný) soubor úkolů, který důsledně vede uživatele analýzou problému a jeho řešením.

Řešení konkrétních problémů lze provádět také mimo workflow a to prostřednictvím Researcher (výzkumníku), který využívá dvou významných vlastností Goldfire Innovatoru. Těmito jsou pokročilá vyhledávací technologie IMC's Natural Language (technologie přirozeného jazyka) a s ní spojený přístup k obrovskému množství interdisciplinárních vědomostí a informací obsažených v rozsáhlých aktualizovaných internetových databázích.

Innovation Trend Analysis (analýza inovačního trendu) umožňuje získat informace o konkurenci analyzováním patentovaných údajů a poskytuje firmě náhled do konkurenčního prostředí s cílem najít výhodné postavení pro vstup na nové trhy, nastavit a definovat nový (potenciální) směr vývoje a zlepšení výrobků.

Project file (soubor projektu) může obsahovat několik Projects (projektů). Každý Project (projekt) může užívat pouze 1 workflow. Podle typu vykonávané úlohy lze rozlišit 3 základní typy projektů:

- projekt vytvořený při započítání Innovator Workbench workflow (průběhu práce pracovního stolu Inovátoru),
- projekt vytvořený uložením řešení prostřednictvím Researcher (výzkumníku) mimo workflow,
- projekt vytvořený uložením výsledku Innovation Trend Analysis (analýzy inovačního trendu) mimo workflow.

### **Klasifikace workflow**

Workflow lze primárně rozdělit na predefined (předdefinované) a custom (uživatelské) workflow.

Predefined (předdefinovaná) workflow jsou dodávána s Goldfire Innovatorem a představují průvodce optimalizací technických systémů nebo výrobních procesů. Existují celkem 4 předdefinované sekvence úkolů (workflow), které se dělí podle zaměření na dosažení určitého cíle:

- A Improve Existing System (Zlepšení existujícího systému),
- B Design New System (Návrh nového systému),
- C Synthesize Hybrid System (Sestavení smíšeného systému),
- D FMEA - Failure Mode and Effects Analysis (Analýza poruch a jejich následků).

Pro sestavení (nedefinování) vlastních sekvencí úkolů Goldfire Innovatoru může uživatel využít Custom (uživatelské) workflow.

Improve Existing System (Zlepšení existujícího systému) se používá pro nalezení a řešení problémů spojených se stávajícím zařízením nebo procesem. Je možné jej využít jak pro přírůstkové zlepšení, tak i pro radikální přepracování systému fungujícího na jiném principu. Zahrnuje Root Cause Analysis (analýzu hlavních (kořenových) příčin), která je volitelná, a buď Device Analysis (analýzu zařízení) nebo Process Analysis (analýzu procesu). Toto workflow umožňuje vykonávat analýzu hlavních (kořenových) příčin problémů v technickém zařízení nebo procesu a provádí podrobnou klasifikaci systému. Klíčové technické problémy pro optimalizaci systému jsou identifikovány na základě vstupu zadaného uživatelem. Řešení těchto problémů jsou následně hledány a ověřovány prostřednictvím schopností integrovaného Researcher (výzkumníku). Navíc je možno najít jednodušší a lepší konstrukci pomocí nástroje pro zjednodušení návrhu Simplify Design.

Design New System (Návrh nového systému) se užívá pro sestavení požadavků na koncepční návrhy nového zařízení. Obsahuje úlohu hledání znalostí Researcher Knowledge Search (vyhledávání znalostí), Root Cause Analysis (analýzu hlavních (kořenových) příčin) a Device Analysis (analýzu zařízení). Toto workflow provádí uživatele sérií úkolů napomáhajících vytvořit koncepční návrh nového systému a bude dále podrobněji rozebráno.

Synthesize Hybrid System (Sestavení smíšeného systému) pomáhá stanovit požadavky koncepčního návrhu hybridního systému a je založen na srovnávání hlavních vlastností dvou nebo více systémů. Uživatel je proveden sérií úkolů srovnávajících dva nebo více konkurenčních systémů. Ve výsledku se pak kombinují jejich nejlepší vlastnosti do optimalizovaného smíšeného (hybridního) systému. Tato analýza produkuje ověřené návrhové požadavky pro nové zařízení. Využívá se schopností integrovaného Researcher

(výzkumníku) pro nalezení a ověření přístupů k realizaci těchto specifikovaných požadavků (vlastností).

FMEA - Failure Mode and Effects Analysis (Analýza poruch a jejich následků) je systematická metoda identifikování poruch produktu nebo procesu a jejich následků, stejně jako předcházení jejich vzniku. FMEA se zaměřuje na zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti výrobku a spokojenosti spotřebitele. Tato metoda je široce užívána celou řadou společností. Jejím hlavním úkolem je sestavit FMEA tabulku, která se následně používá pro:

- Identifikaci potenciálních způsobů poruch zařízení nebo procesu
- Formulování potenciálních následků a příčin poruch
- Hodnocení a seřazení potenciálních poruch podle závažnosti
- Stanovení způsobů prevence závažných poruch.

### **5.1.3. Workflow Design New System (Návrh nového systému)**

#### **Popis jednotlivých úkolů postupu (workflow)**

Design New System (Návrh nového systému) je workflow, které provádí uživatele přes sekvenci 4 úkolů za účelem dosažení požadovaného cíle - vytvoření požadavků pro návrh nového systému.

#### **1. Project Description (Popis projektu)**

V tomto úvodním úkolu se zadává Project Name (jméno projektu), Autor (jméno autora) a volitelně Project Description (popis projektu – často se zde nastíní cíl projektu). Dále se zde zaškrtnutím Analyze Core Problem volí, že Root Cause Analysis (analýza kořenových příčin) bude v tomto projektu vykonána, a vybírají se předvolené znalostní databáze prohledávané během řešení problému v Solution Manager (manažeru řešení).

#### **2. Knowledge Search (Hledání znalostí)**

Je založeno na prohledávání sémanticky tříděných znalostních databází, které mohou obsahovat firemní a osobní databáze, sbírky patentů a IMC vědecké efekty, za účelem nalezení již existujících řešení souvisejících s funkcemi vykonávanými navrhovaným systémem.

#### **3. Analyze and Solve Core Problems (Analyzovat a řešit jádro problémů)**

Tento úkol je volitelný a provádí se v něm Root Cause Analysis (analýza kořenových příčin). Cílem může být podobně jako v Improve Existing System formulovat kořenový (počáteční) problém nějaké události nebo v případě tohoto workflow se může jednat o identifikaci příčin hlavní funkce a tím o stimulování nových nápadů, jak danou účelovou funkci nového systému zajistit. Root Cause Analysis je užitečná v případě, že hledání znalostí (úkol 2) nepřinese řešení, jak efektivně vykonat danou funkci systému.

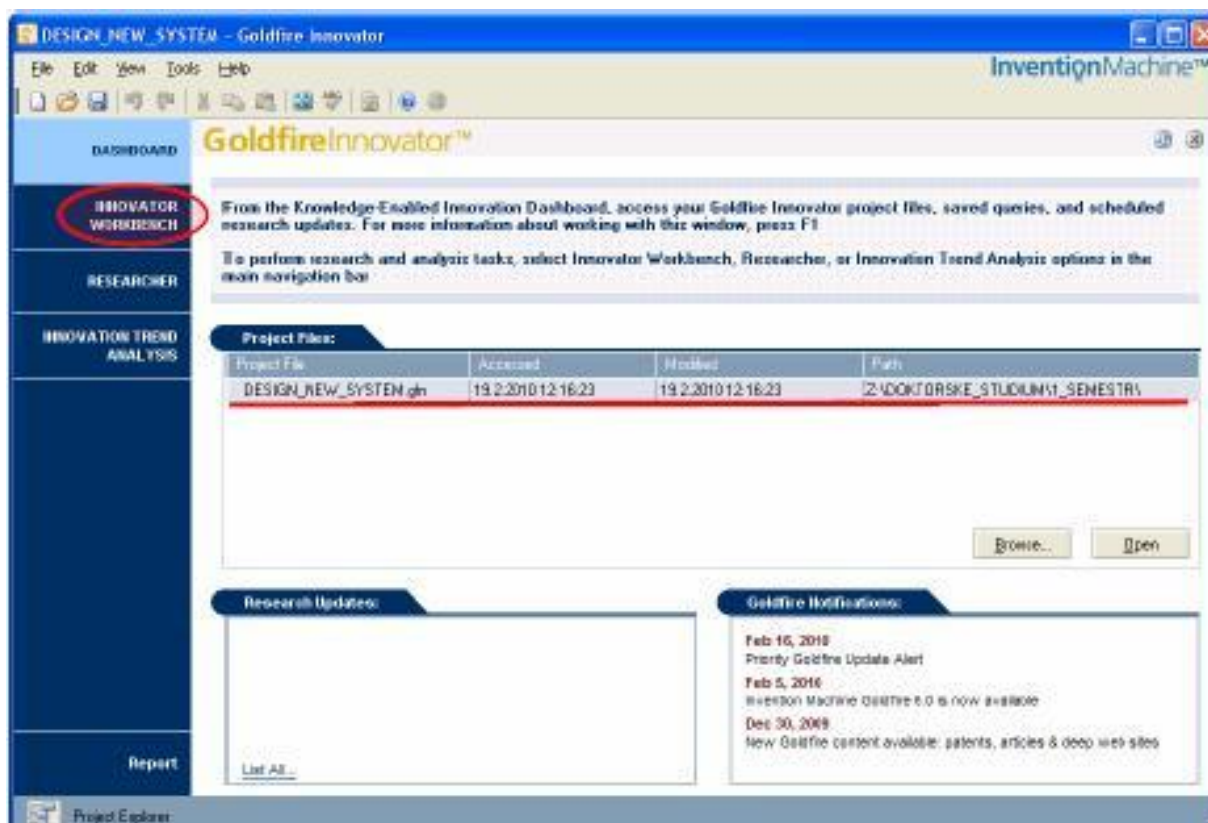
#### **4. Model and Improve System (Modelovat a vylepšit systém)**

V tomto úkolu uživatel cíleně interpretuje výsledky vyhledávání a analýzy již existujících řešení za účelem sestavení modelu funkcí nového systému. Goldfire Innovator pak na základě vyhodnocení tohoto modelu automaticky generuje problémová tvrzení a následně umožňuje jejich řešení v Solution Manager. Tento úkol nabízí rovněž možnost eliminovat (vytrimovat) „slabé“ komponenty nebo působení z modelu návrhu. Funkce vykonávané odstraněnými komponentami nebo působeními jsou přeloženy na jiné části systému. Tento postup často vede k návrhu zařízení nové generace.

#### 5.1.4. Příklad aplikace workflow

Hledá se řešení nového technického systému - subsystému mobility servisního robotu, který se bude vyznačovat vysokou mobilitou v členitém terénu.

Pro zahájení práce v Goldfire Innovatoru byl založen nový project file (soubor projektu) s názvem DESIGN\_NEW\_SYSTEM.gfn (viz obr. 5.1.4.-1).

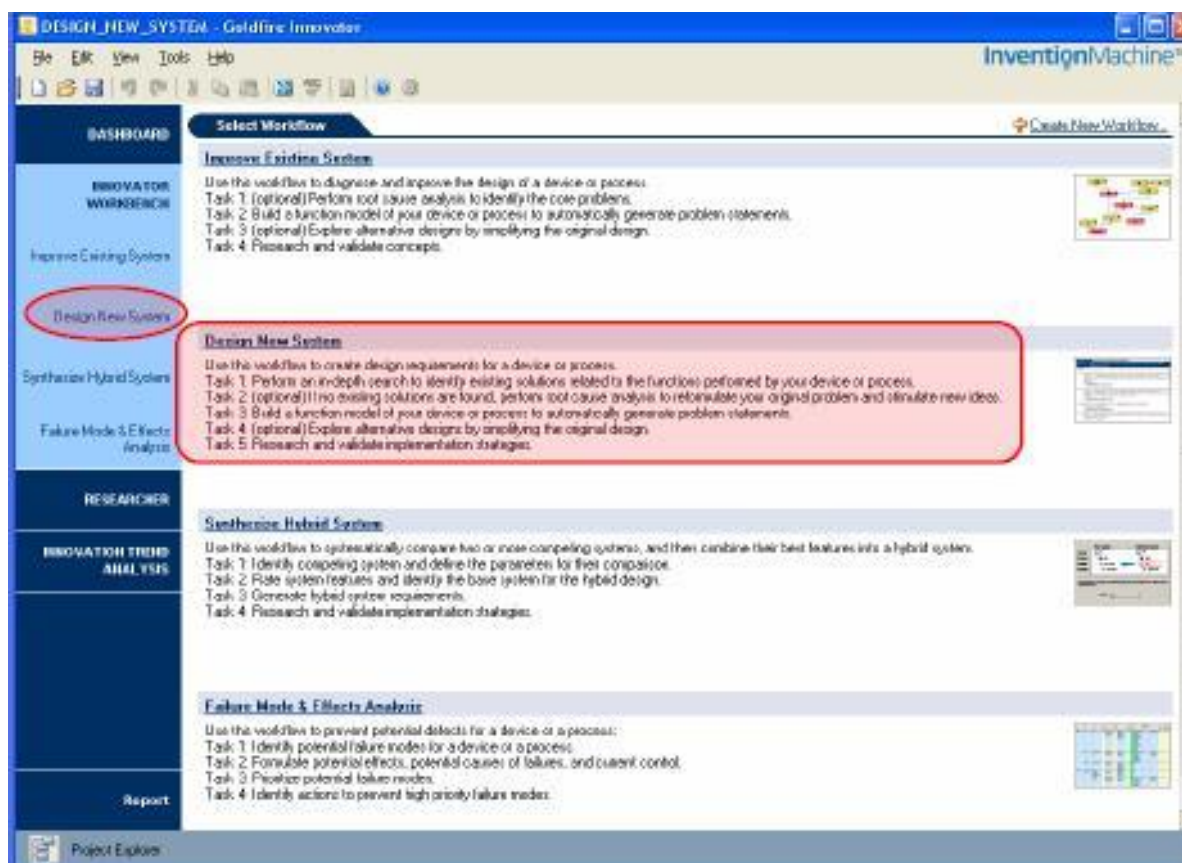


Obr. 5.1.4.-1 Založení projektu Návrh nového systému

Stiskem tlačítka Innovator Workbench (pracovní stůl Inovátoru) se zobrazí 4 předdefinovaná workflow a okno pro jejich volbu (viz obr. 5). V našem případě byl zvolen Design New System. Na základě této volby se otevřelo úvodní okno Project Description (viz obr. 5.1.4.-2) tohoto workflow.

#### Úkol 1 – PROJECT DESCRIPTION (Popis projektu)

S ohledem na cíl řešeného projektu byl tento nazván Robot\_Mobility\_Subsystem. V tomto kroku byl rovněž zatržen checkbox, který udává zahrnutí úkolu Analyze & Solve Core Problem do tohoto workflow. Pro přechod k dalšímu úkolu (kroku) a pro návrat k předcházejícímu úkolu (kroku) se používají tlačítka v pravém spodním rohu aktuálního okna Goldfire Innovatoru, které v podstatě představují volby Další a Zpět. Přepínání mezi jednotlivými kroky workflow je možné provádět také pomocí tlačítek v navigačním panelu na levé straně okna (viz obr. 5.1.4.-4).



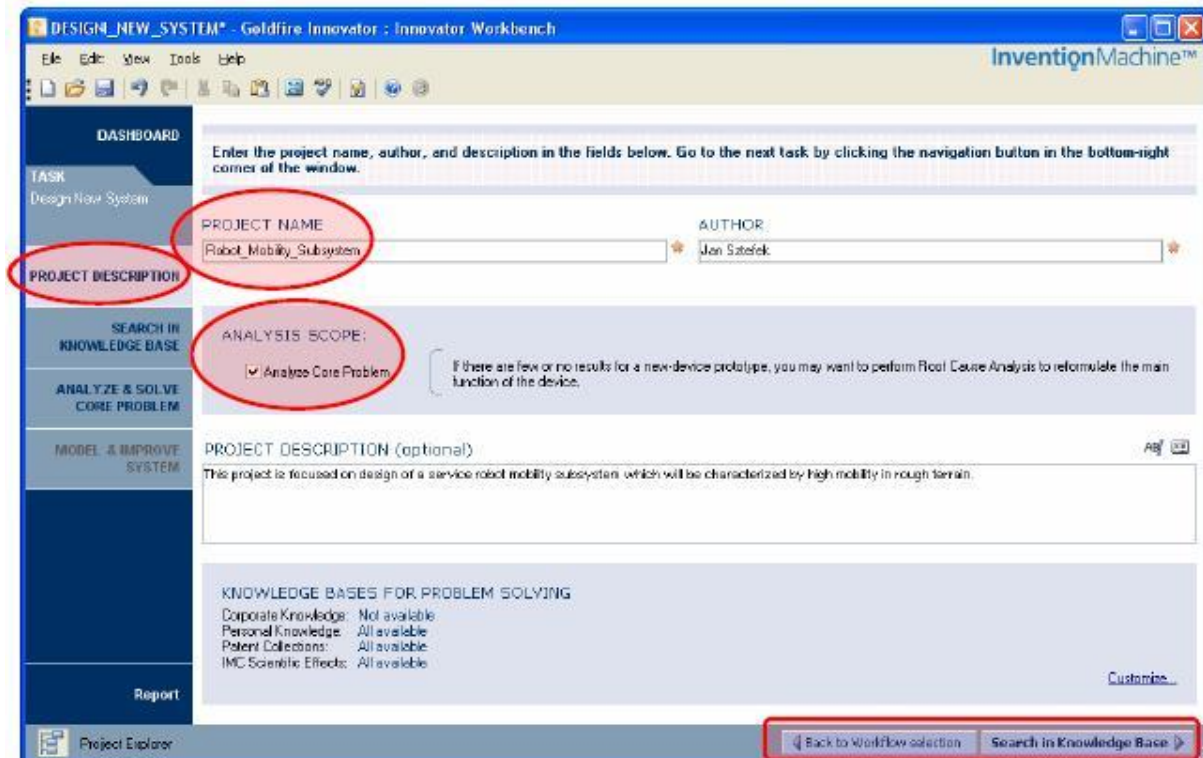
Obr. 5.1.4.-2 Karta pro volbu workflow (postupu)

<p><b>Design New System</b></p> <p>Use this workflow to create design requirements for a device or process.</p> <p>Task 1: Perform an in-depth search to identify existing solutions related to the functions performed by your device or process.</p> <p>Task 2: (optional) If no existing solutions are found, perform root cause analysis to reformulate your original problem and stimulate new ideas.</p> <p>Task 3: Build a function model of your device or process to automatically generate problem statements.</p> <p>Task 4: (optional) Explore alternative designs by simplifying the original design.</p> <p>Task 5: Research and validate implementation strategies.</p>
<p>Obr. 5.1.4.-3 Postup při návrhu nového systému (osnova)</p>

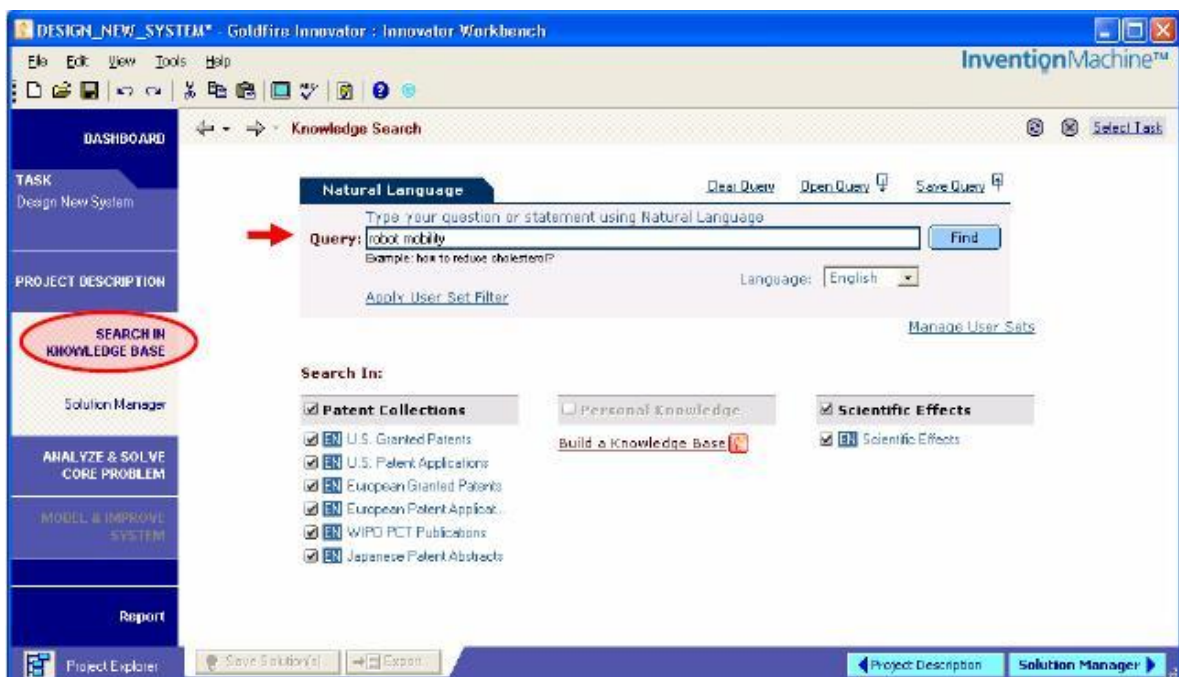
## Úkol 2 – SEARCH IN KNOWLEDGE BASE (Hledání ve znalostní databázi)

Dalším úkolem bylo vyhledat již existující řešení hlavní (účelové) funkce řešeného systému – mobilního subsystému. V případě mobilního subsystému je hlavní funkcí zajistit mobilitu robotu. Pro zjištění, zda vůbec vybrané databáze (viz pole Search In na obr. 85.1.4.-5) informace týkající se této hlavní funkce obsahují, byl nejprve zadán Query (dotaz) robot

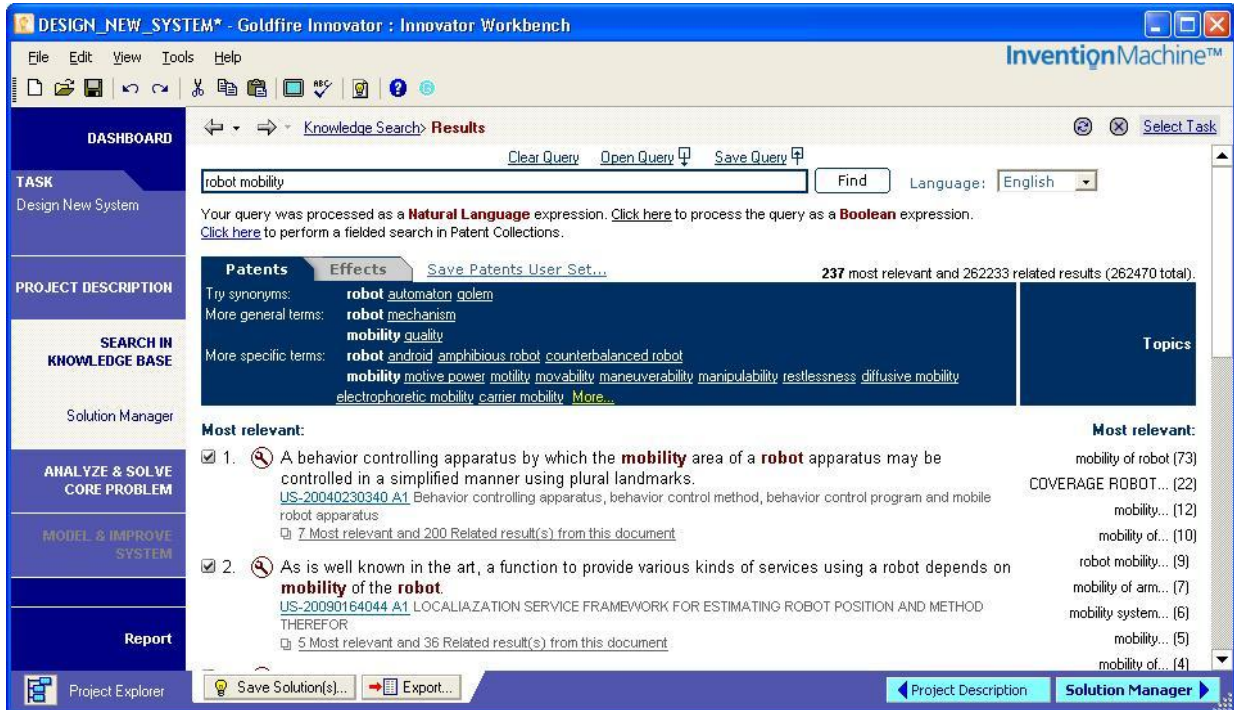
mobility (mobilita robotu). Výsledky vyhledávání jsou zachyceny na obr. 5.1.4.-6 a obr. 5.1.4.-7.



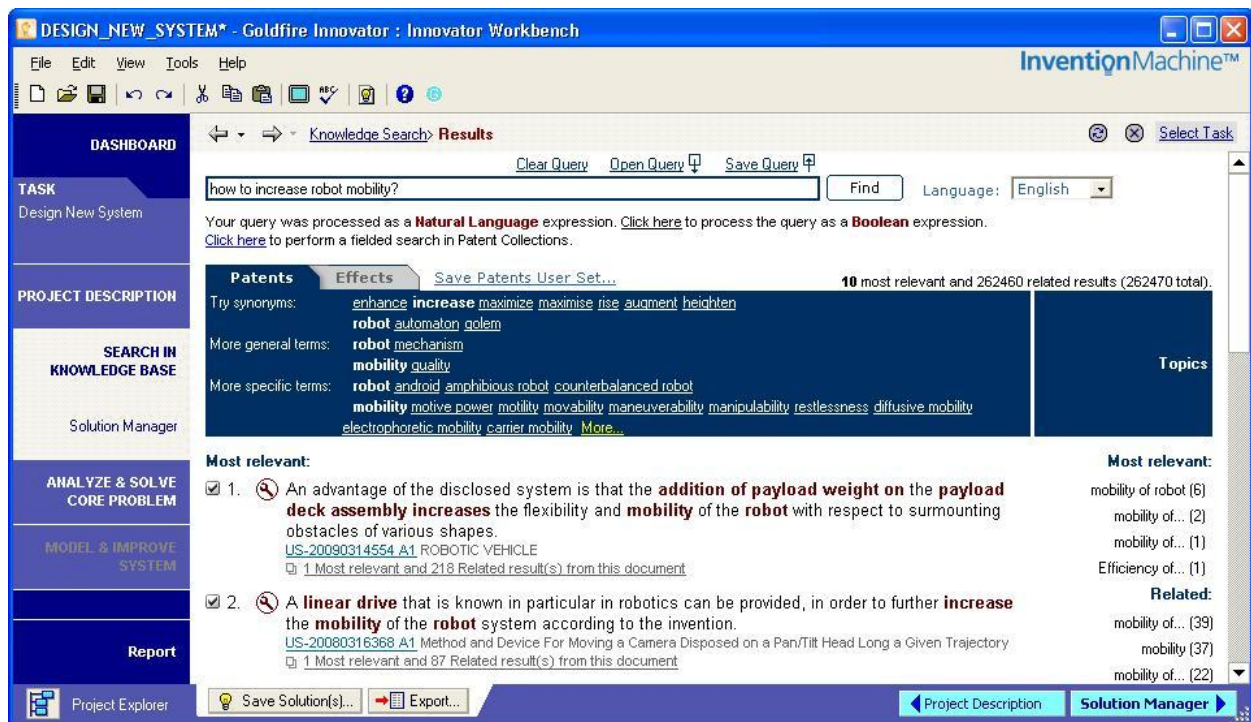
Obr. 5.1.4.-4 Zadání vstupních údajů nového projektu



Obr. 5.1.4.-5 Karta zadání dotazu k vyhledání poznatků o novém produktu



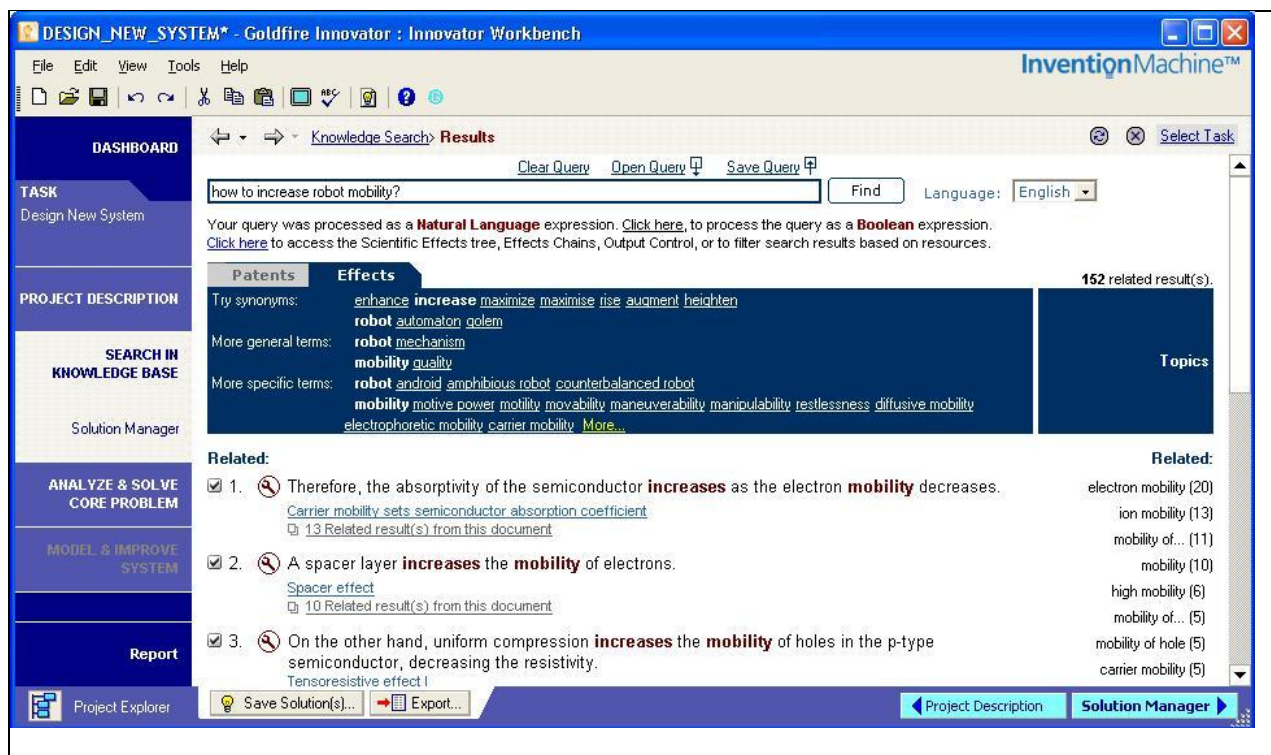
Obr. 5.1.4.-6 Výsledky vyhledávání z databáze patentů pro dotaz “robot mobility”



Obr. 5.1.4.-7 Další výsledky vyhledávání z databáze patentů pro dotaz “robot mobility”

Vzhledem k tomu, že zásadní problém mobilního subsystému pro aplikace v členitém terénu představuje nízká úroveň mobility, byl původní výraz rozšířen na otázku How to increase robot mobility? (Jak zvýšit mobilitu robotu?). Toto upřesnění dotazu vedlo k

značnému zredukování počtu výsledků především z databáze patentů (z původních 237 na 10 nejdůležitějších). Výsledky vyhledávání zobrazené na obr. 5.1.4.-7 a obr. 5.1.4.-8 přinesly několik zajímavých a podnětných řešení z patentové oblasti. Nejzajímavějším je patent s označením US-2009/0314554 A1 ROBOTIC VEHICLE, který zahrnuje konstrukci podvozku s vysokým stupněm mobility dosaženým zvýšením stability při překonávání překážek.



Obr. 5.1.4.-8 Ještě další výsledky vyhledávání z databáze patentů pro dotaz “How to increase robot mobility?”

Dotazy lze samozřejmě pohodlně a efektivně modifikovat s možností využití Goldfire Innovatorem nabízených slov a tím je možné získat spoustu dalších podnětných informací pro návrh nového systému. Příkladem je zadání otázky How to ensure robot mobility? (Jak zajistit mobilitu robotu?).- obr. 5.1.4.-9.

V dalším kroku tohoto úkolu se zobrazí Solution Manager (správce řešení), který v poli Problems & Solutions (problémy a řešení) uvádí seznam zadaných dotazů a jejich uložených řešení a umožňuje další vyhledávání v poli Solutions (řešení) – obr. 5.1.4.-10.

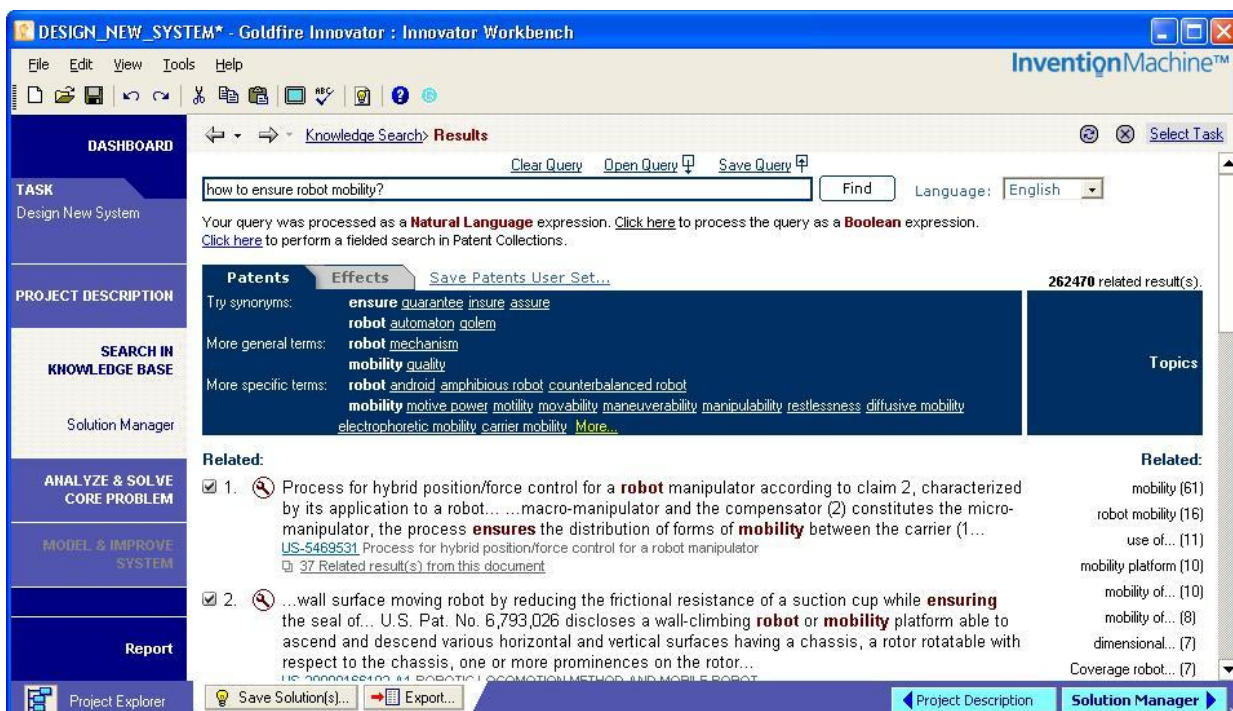
### Úkol 3 – ANALYZE & SOLVE CORE PROBLEM (Analyzovat & řešit jádro problému)

Jedná se o úkol, který uživatele systematicky provádí 3 následujícími kroky (viz obr. 5.1.4.-11) a pomáhá identifikovat příčiny určité nežádoucí události.

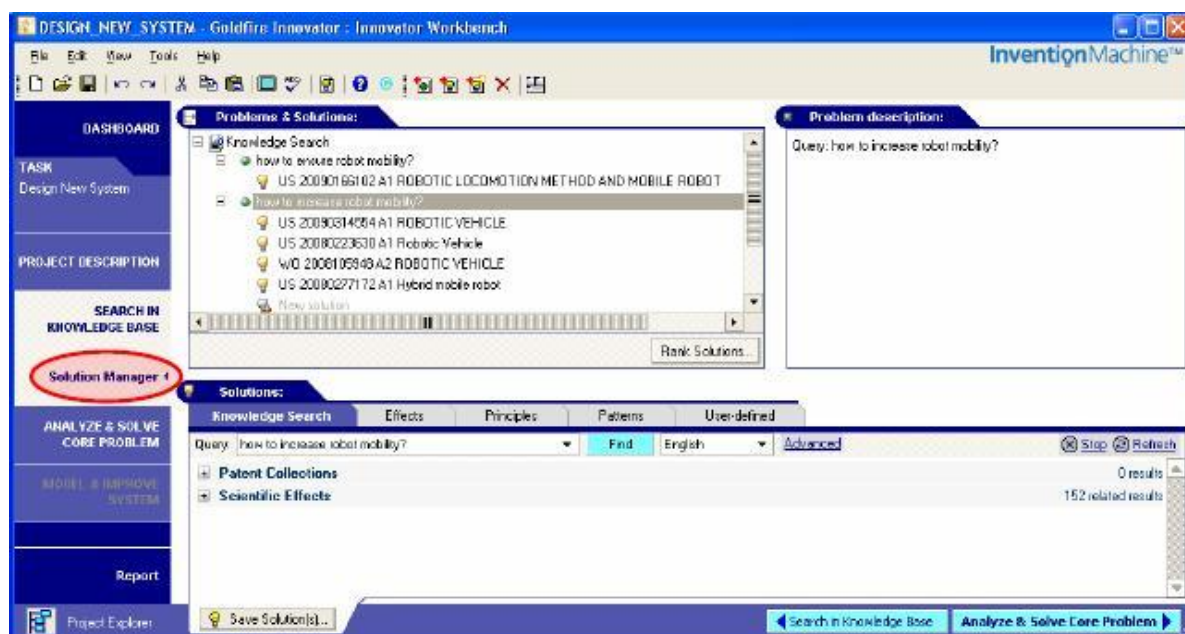
Úvodní krok Build Cause-Effect Model (sestavení modelu příčina – následek) pomáhá sestavit model zachycující příčiny daného problému (nežádoucí události) (viz obr. 5.1.4.-12). Uživatel sám z hlediska kvality schopnosti řešit příčiny určuje, do jaké úrovně příčin



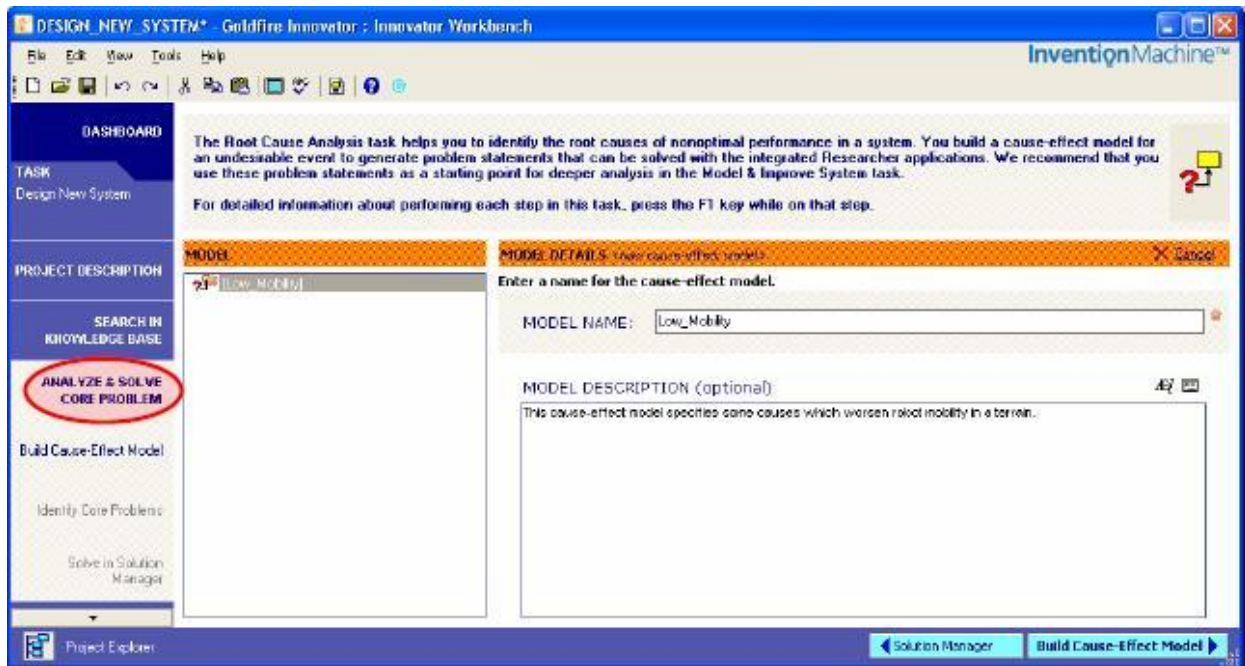
(hloubky) bude vytvořený model zasahovat. Problémem (nežádoucí události) je v našem případě myšlena low robot mobility (nízká mobilita robotu), jehož dvěma příčinami jsou low crossing ability (nízká schopnost překonávat překážky) nebo low manoeuvrability (nízká manévrovatelnost). Každý z obou těchto problémů má své vlastní příčiny (příčinu) a tak dále (viz obr. 5.1.4.-12).



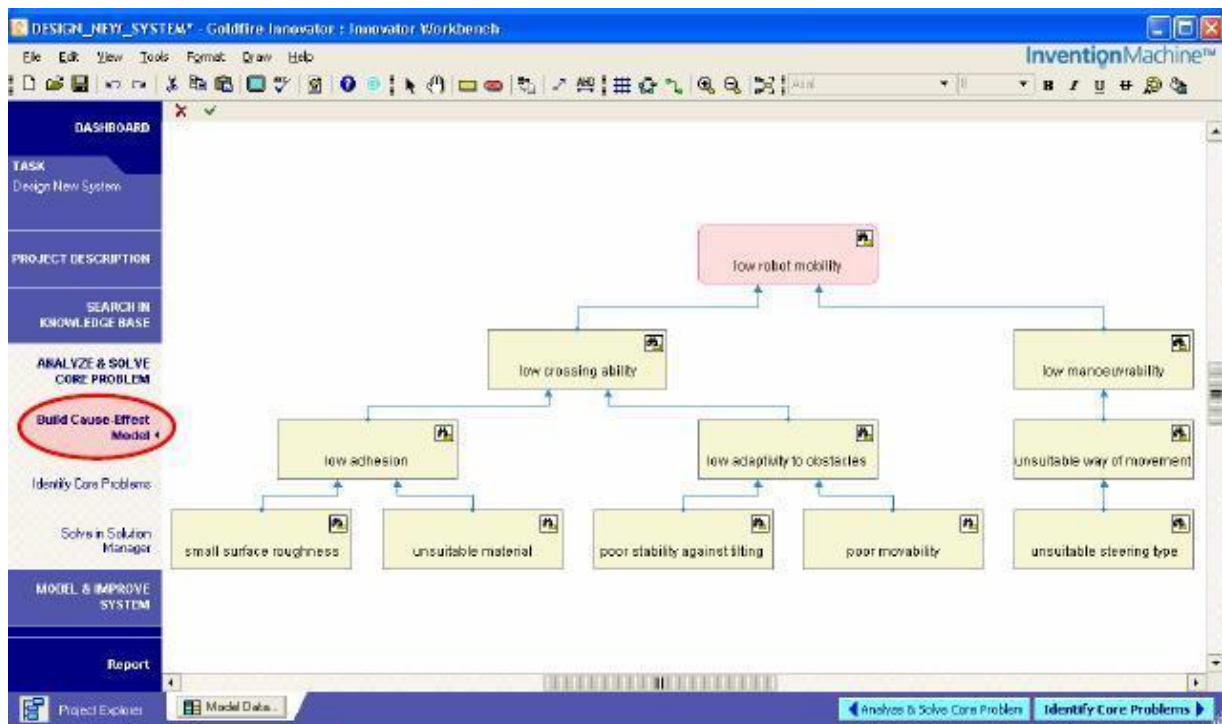
Obr. 5.1.4.-9 Výsledky vyhledávání z databáze patentů pro dotaz “How to ensure robot mobility?”



Obr. 5.1.4.-10 Karta správce řešení



Obr. 5.1.4.-11 Karta pro založení modelu příčina - následek

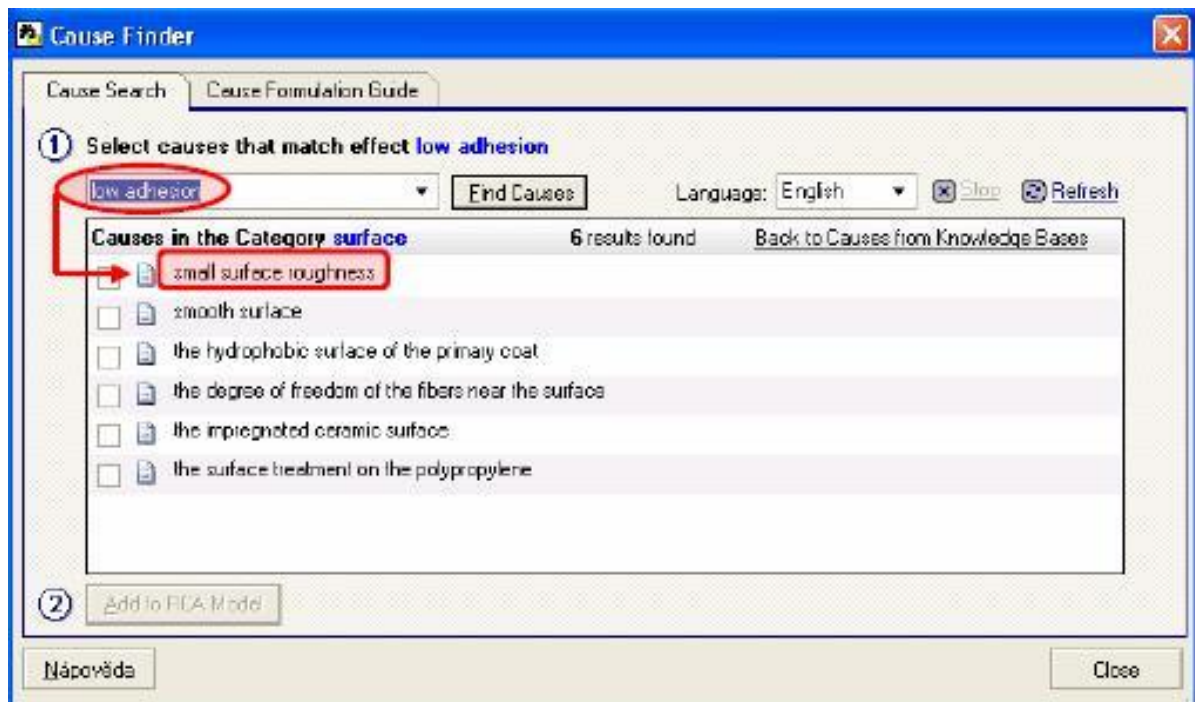


Obr. 5.1.4.-12 Karta pro tvorbu modelu příčina - následek

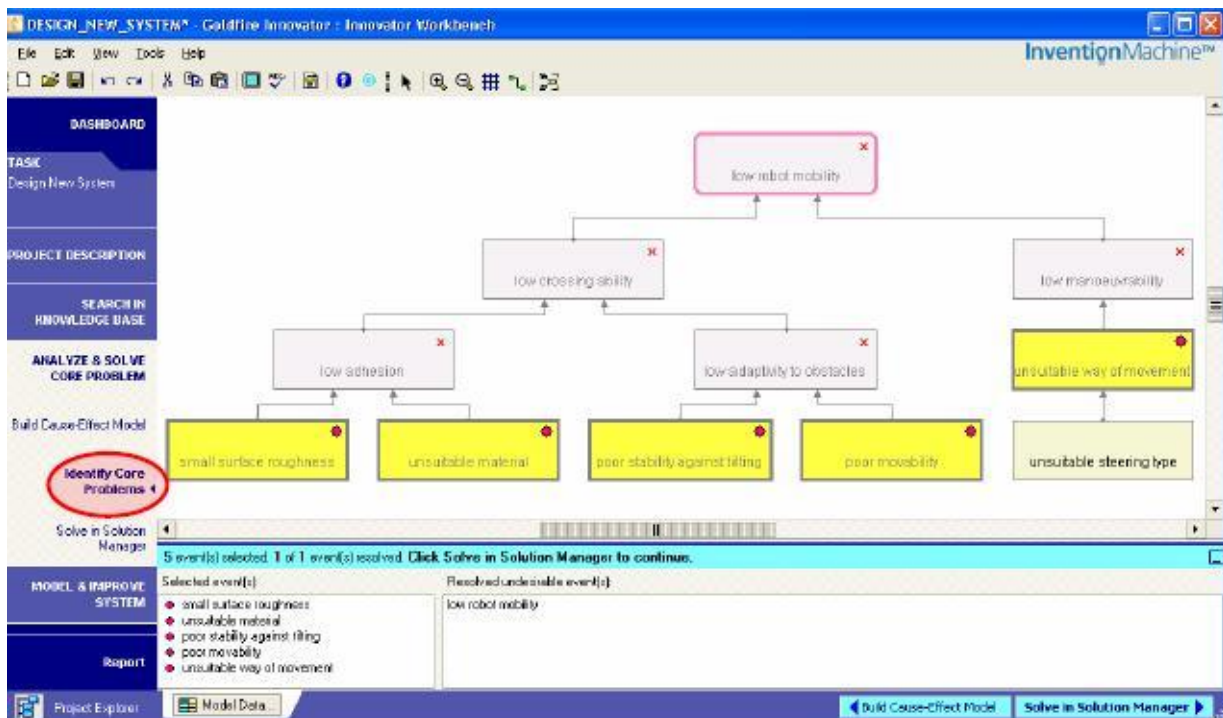
Pro pomoc s definováním příčin může uživatel využít nástroj Cause Finder (vyhledávač příčin), který buď nabízí příčinu ze znalostních databází přímo (viz obr. 5.1.4.-13) nebo provádí jejím formulování.

Už samotný název kroku Identify Core Problems (identifikace kořenových problémů) naznačuje, že se zabývá určováním hlavních (kořenových) problémů. Za kořenové problémy

jsou považovány ty problémy (příčinné události), které v případě jejich vyřešení eliminují vznik původního problému (nežádoucí události) (viz obr. 5.1.4.-14).



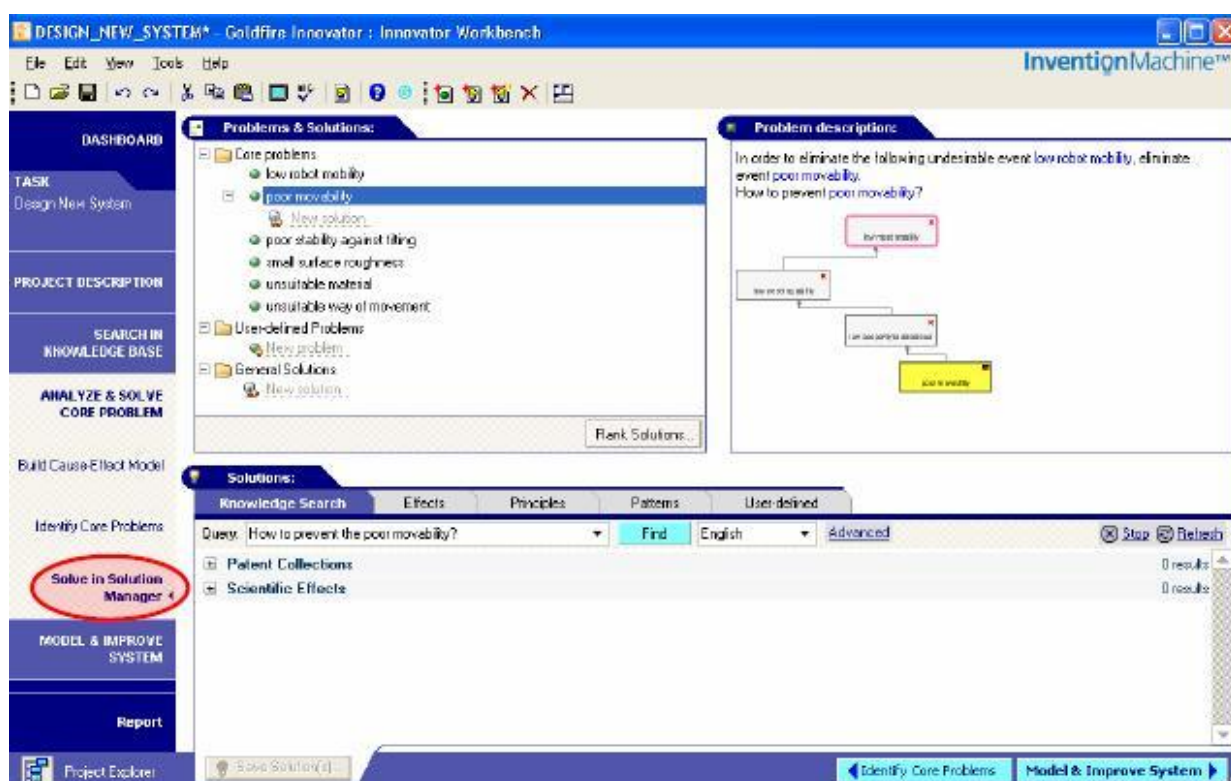
Obr. 5.1.4.-13 Karta databáze hledání příčin



Obr. 5.1.4.-14 Karta pro identifikaci kořenových příčin problémů

Pro uvedený příklad to znamená, že pokud budou vyřešeny žlutě označené příčinné události (problémy) – small surface roughness (malá drsnost povrchu), unsuitable material (nevhodný materiál), poor stability against tilting (nízká stabilita proti překlolení), poor movability (nízká přestavitelnost) a unsuitable way of movement (nevhodný způsob pohybu) (viz obr. 5.1.4.-14) dojde k zabránění vzniku nežádoucí události – low robot mobility (nízká mobilita robotu).

V posledním kroku tohoto úkolu Solve in Solution Manager (řešit ve správci řešení) je uveden seznam vybraných kořenových problémů, pro které je rovněž možné v tomto kroku za pomoci propracovaného vyhledávání znalostí efektivně nalézt řešení (viz obr. 5.1.4.-15).

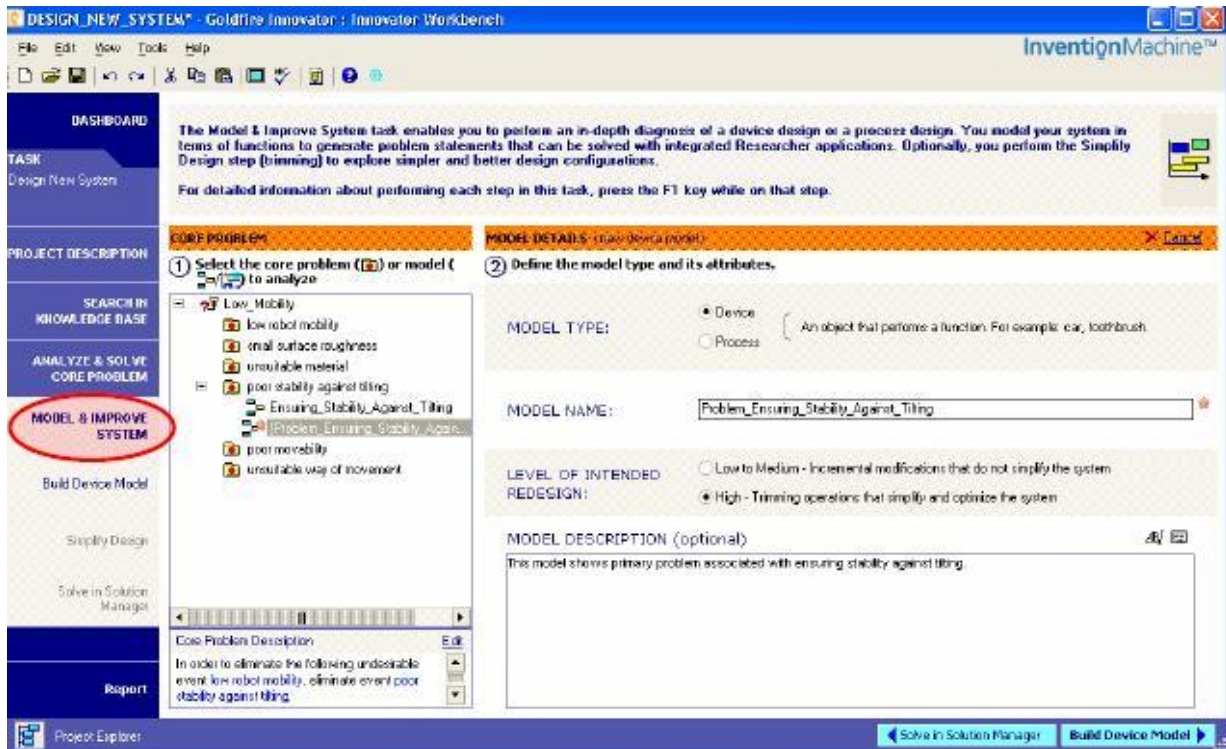


Obr. 5.1.4.-15 Karta pro řešení kořenových problémů

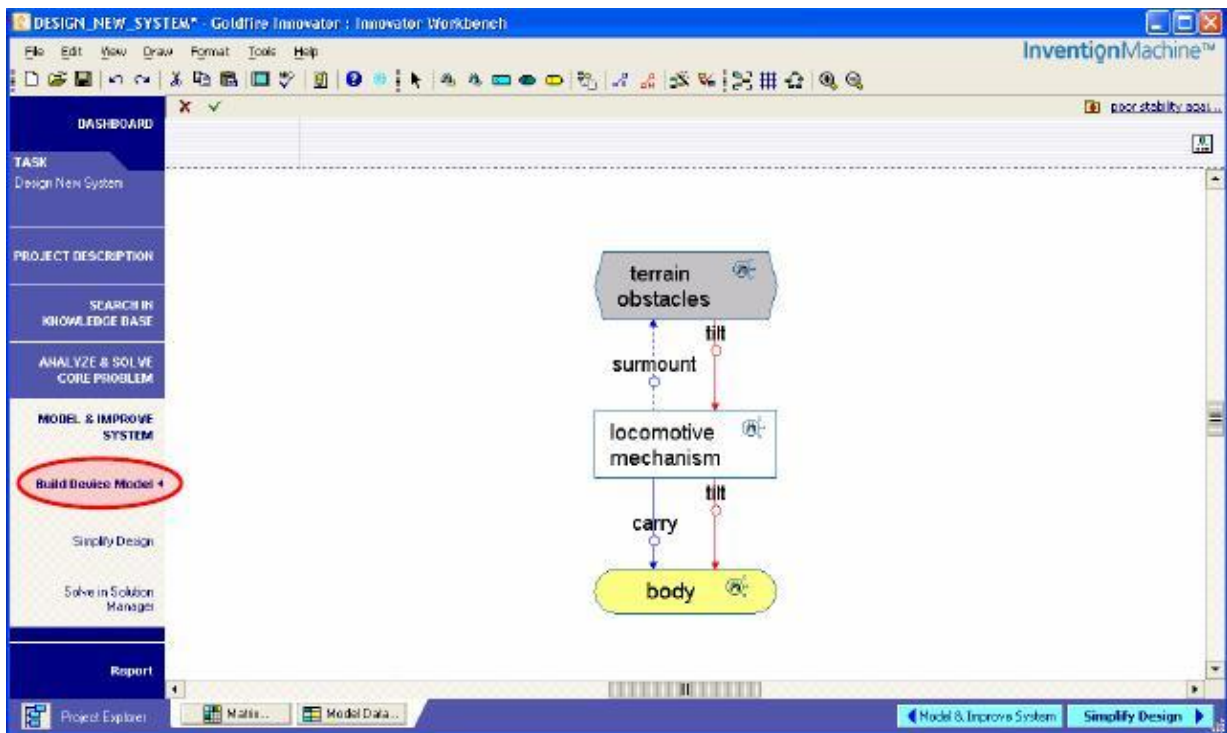
#### Úkol 4 – MODEL & IMPROVE SYSTEM (Modelovat a zlepšit systém)

V tomto posledním úkolu je sestavován model funkcí nového systému, který obsahuje jeho prvky a vzájemná působení mezi nimi. Na základě parametrů modelu jsou vyhodnoceny prvky a působení a automaticky generována tvrzení pro zvýšení hodnoty systému. Je možné sestavovat model části systému zajišťující řešení daného kořenového problému.

Pro ukázkou tvorby modelu byl zvolen kořenový problém poor stability against tilting (nízká stabilita proti překlolení). Po určení typu, pojmenování, popsání modelu a zvolení, zda bude využit nástroj pro zjednodušení návrhu Simplify Design (viz obr. 5.1.4.-16) následuje krok Build Device Model (sestavení modelu zařízení) (viz obr. 5.1.4.-17). Model obsahuje pouze prvky a působení týkající se eliminování nízké stability proti překlolení (viz obr. 5.1.4.-17).

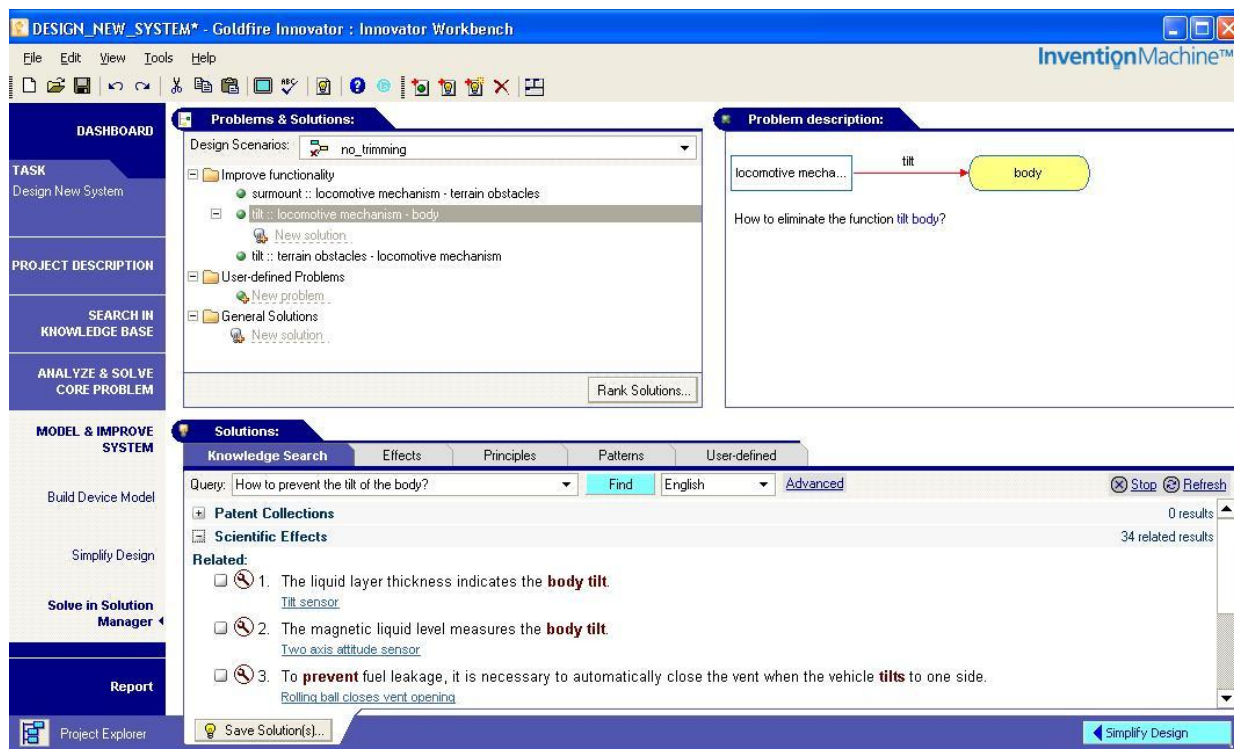


Obr. 5.1.4.-16 Karta pro výběr problému a založení modelu produktu nebo postupu jeho diagnózy



Obr. 5.1.4.-17 Karta grafického editoru k vytvoření modelu pro stabilitu robotu

Z modelu (viz obr. 5.1.4.-17) a správce řešení (viz obr. 5.1.4.-18) je patrné, že nejdůležitějším problémem je funkce locomotive mechanism tilts body (pohybové ústrojí mobilního subsystému naklápí jeho tělo), která zapříčiňuje nízkou stabilitu robotu.



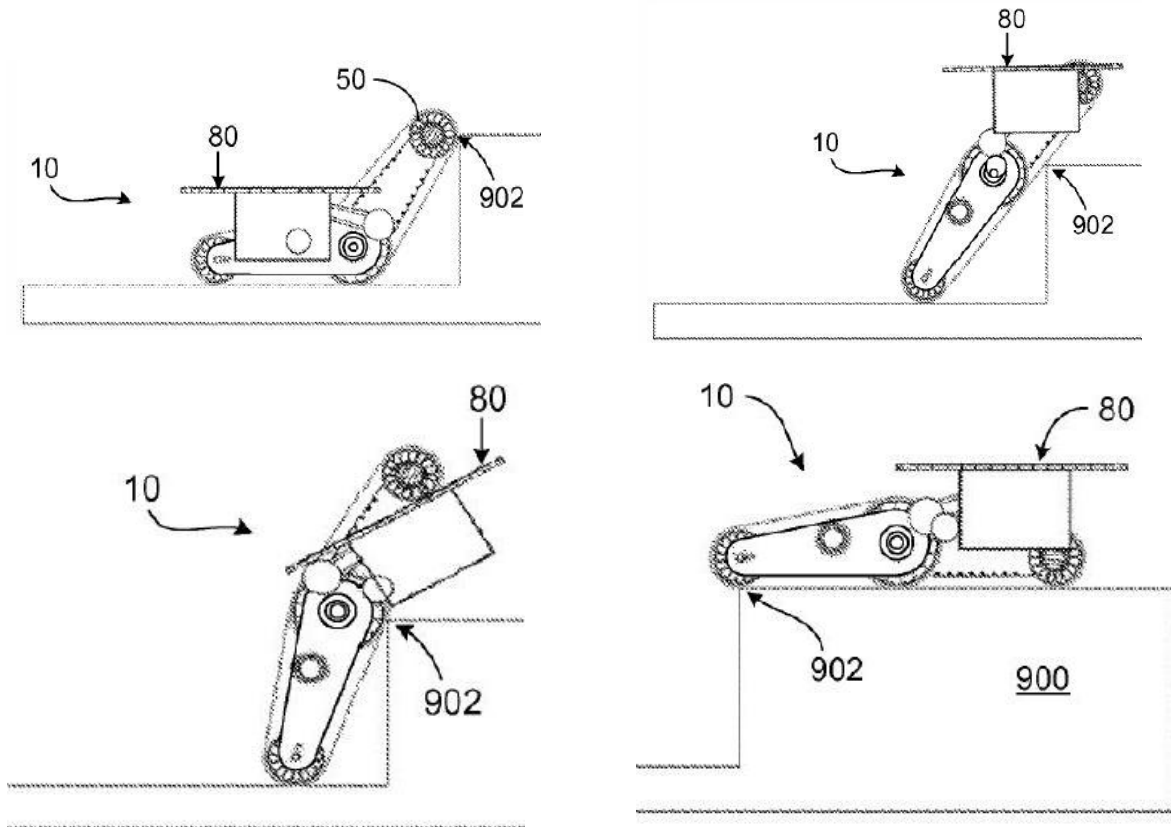
Obr. 5.1.4.-18 Karta správce řešení problémů vygenerovaných podle nadefinování modelu zařízení

Jedno z potenciálních řešení bylo nalezeno v již zmíněném patentu US-2009/0314554 A1 ROBOTIC VEHICLE, kde stabilitu robotu zajišťuje rameno se dvěma stupni volnosti (dvěma nezávisle poháněnými rotačními klouby). Tento hnací mechanismus přemísťuje a naklápí tělo (část hmoty) mobilního subsystému za účelem změny polohy jeho těžiště, pro dosažení stabilní konfigurace v průběhu překonávání překážky (viz obr. 5.1.4.-19).

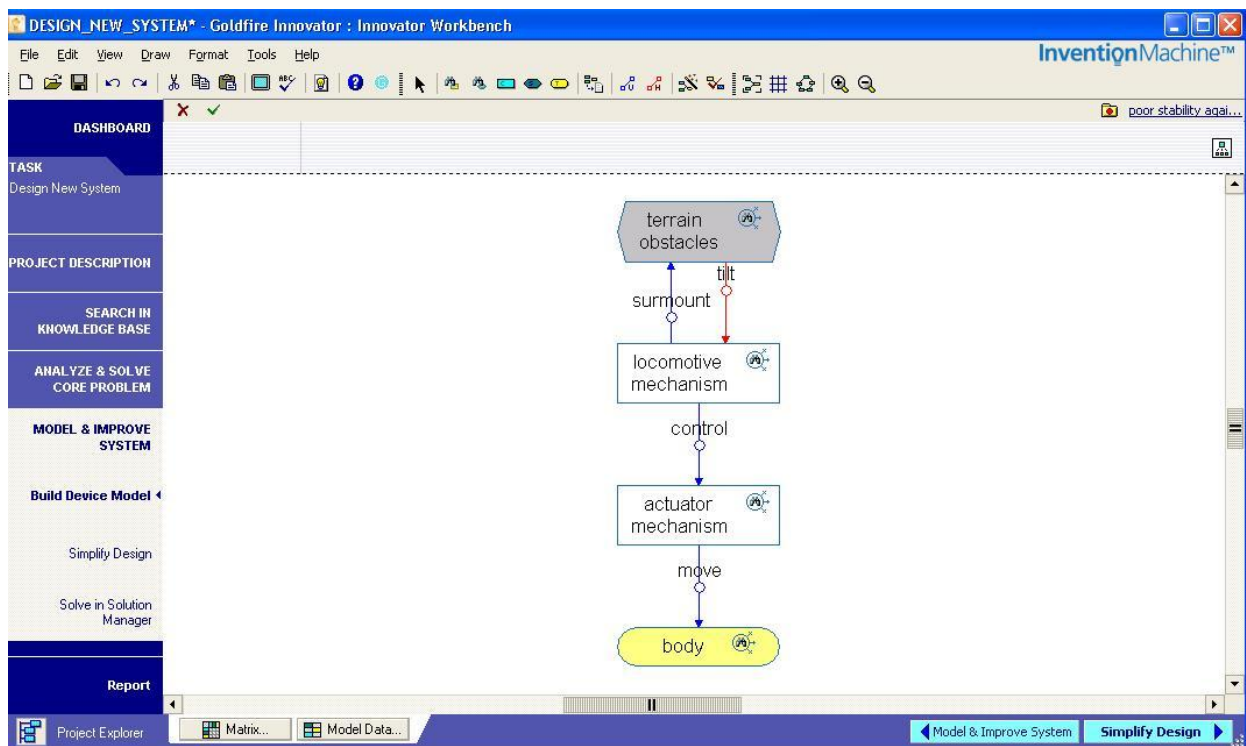
Na základě tohoto patentu byl model doplněn o actuator mechanism (hnací mechanismus) pohybuující body (tělem) pro zvýšení stability robotu při překonávání překážek (viz obr. 5.1.4.-20, 21). Tento návrh je poté možné hlouběji diagnostikovat a dále zlepšovat

## Závěr

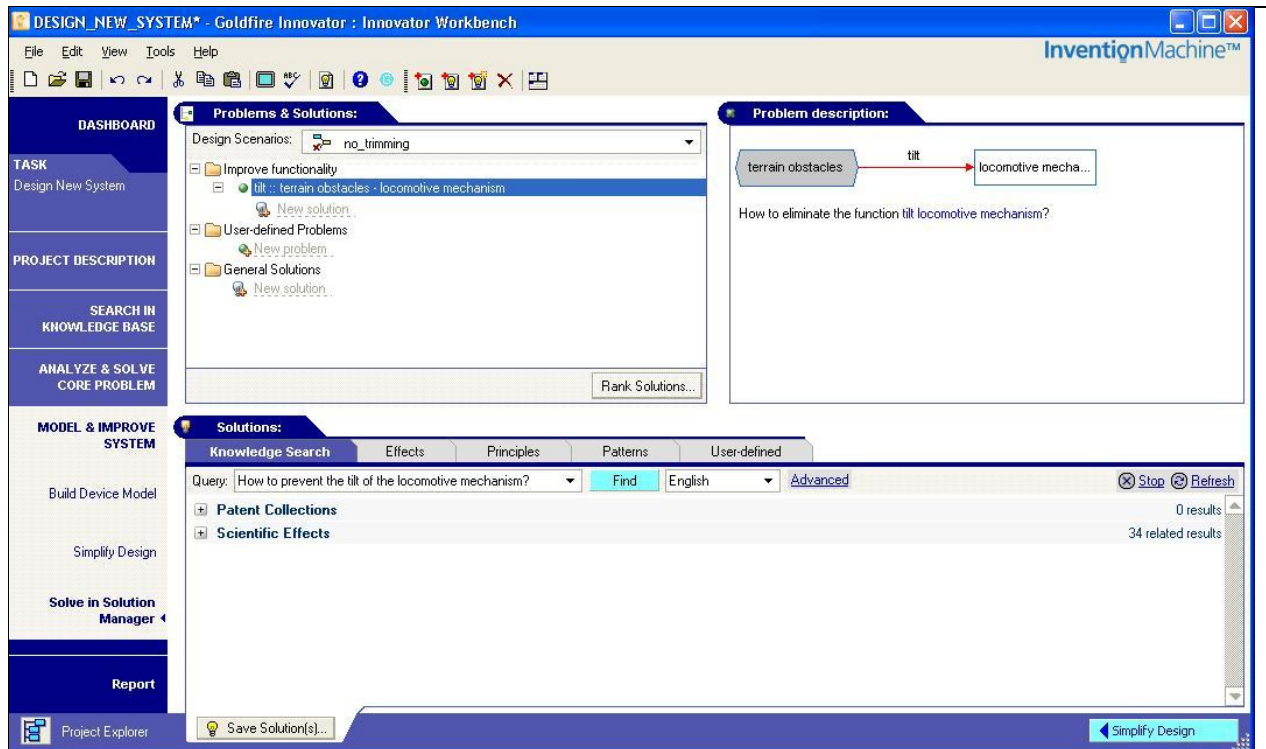
Na příkladu byly předvedeny možnosti softwarového nástroje pro tvorbu a řešení inovačních zadání Goldfire Innovator. Byly ukázány jednotlivé úkoly při návrhu nového systému (Design New System). Tato předdefinovaná sekvence úkolů byla demonstrována na příkladu návrhu mobilního subsystému servisního robotu s vysokým stupněm mobility.. Do řešení zde byl zapojen patent, jehož použití by však muselo být ověřeno a doloženo případnou smlouvou o licenčních poplatcích. Další možností by bylo tvůrčí rozvíjení principu a hledání vlastního řešení, k čemuž je možné využít dalších postupů GFI.



Obr. 5.1.4.-19 Zajištění stability robotu podle patentu *US-2009/0314554 A1 ROBOTIC VEHICLE*



Obr. 5.1.4.-20 Karta grafického editoru s mechanismem pro zvýšení stability robotu



Obr. 5.1.4.-20 Karta správce řešení problémů pro upravený model zařízení



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste se seznámili s následujícími pojmy:

- GFI – Goldfire Innovator
- Workflow – pracovními postupy GFI
- Hledáním jádra problému
- Zlepšení systému
- Hledání nového systému

Kapitola slouží k připomenutí základních principů pro návrh nových technických a mechatronických systémů a jejich inovace s pomocí GFI. Nedřívě analýzou zjistíme co a proč potřebujeme inovovat a nebo řešit. Následně použijeme moduly syntézy k řešení vyskytnuvších se problémů. Praktický postup aplikace GFI je demonstrován na příkladu.



## Kontrolní otázka

- 1) Jak získáte informace o podobných již řešených problémech?
- 2) Jak se formulují otázka pro zkoumání dosažitelných informací?
- 3) Co je to jádro problému?



- 4) Co jsou pracovní postupy GFI?



### Úkol k řešení

- 1) Podle uvedeného příkladu řešení v této kapitole využijte pro zlepšení (workflow Improve systém) zvoleného servisního robotu, pro jiné parametry nebo jinou variantu servisní činnosti!

## 5.2. APLIKACE POSTUPŮ A PROSTŘEDKŮ PRO NÁVRH AKČNÍHO SUBSYSTÉMU (AS)

### Po úspěšném a aktivním absolvování této KAPITOLY

<p>Budete umět použít a zdůvodnit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ základní postupy a prostředky pro návrh konstrukčních uzlů akčního subsystému robotu a jejich prvků</li> </ul>	Cíle kapitoly
--	---------------

<p><i>Přípravné kroky pro návrh, cíl, hlavní funkce zařízení, nosný subsystém, výpočty prvků, nosník, rameno, zatížení, geometrie nosného profilu ramene, distribuce pohonů, způsoby spojení nosného profilu se skříní kloubu, způsoby připojení orientačního ústrojí, způsob připojení ramene do systému polohovacího ústrojí, způsob vedení energetických kabelů a komunikačních vodičů (případně technologických médií), způsob uložení koaxiálních dutých hřídelí.</i></p>	Klíčová slova
--	---------------



**Čas ke studiu:** 90 minut



### VÝKLAD

Vlastní průběh návrhu akčního subsystému průmyslových a servisních robotů ať již využívající jakýchkoliv metod a prostředků v tomto studijním materiálu probíraných, vyžaduje vždy přípravu údajů a dat a práci s nimi tak, aby mohl být zpracován požadavkový list a uzavřena smlouva s odběrateli.

Abychom mohli se vstupními daty smyslu plně pracovat promyšlíme tedy konkrétní postup. Níže rozebereme aspoň základní kroky sestavení modelu systému podle GFI.

#### 5.2.1. Přípravné kroky pro návrh AS

Jako od každého technického systému očekáváme i od robotu plnění konkrétní účelové (hlavní) funkce, která však může být realizována jen přes řadu dílčích funkcí. Promýšlení těchto funkcí a jejich logické návaznosti jsou tedy jedním z prvních úkolů. Vzniklá struktura je pak realizována orgány, které naplňují fyzickou podstatu funkcí. Nejjednodušší variací orgánů umožňuje morfologická matice. Možnou cestou je i návrh funkční a orgánové struktury přes TechOptimizer nebo GoldFire Innovator.

K těmto činnostem je však nezbytné mít připravena výchozí data, což je otázka značných zkušeností, průzkumu trhu a jednání s odběrateli. Významnou roli hraje již několikrát zmíněná schopnost vývojářů vytvářet si vlastní systémy zpracování dat jako soubory know how.

Sestavujeme-li předběžný model zařízení musíme pracovat s jeho základními stavebními prvky:

- **Cíl**, který je objektem hlavní funkce zařízení. **Cíl** není komponentou zařízení. Existuje vně zařízení, a reprezentuje hlavní důvod proč bylo zařízení navrženo.
- **Component (komponenta)**, který je součástí analyzovaného zařízení. Je možno vytvořit model složitého zařízení jako hierarchii navzájem působících komponent. Například, jako nejvyšší úroveň, by se vymodelovalo zařízení v rámci *high-level* komponent. V případě auta, by takovéto *high-level* komponenty mohly být karoserie, hlavní konstrukce, motor, převodovka, kola a pneumatiky. Každá z těchto komponent může být reprezentována jako *device model*, potenciálně obsahující všechny prvky modelu zařízení, včetně **Target** a **Supersystem**.
- **Supersystem (supersystém)**, který je částí okolí zařízení, se nímž je zařízení ve styku, ale není součástí zařízení samotného.
- **Action link (akční vazba)**, specifikující akci, jež je jednou z částí modelu.

Než se zahájí stavba modelu je třeba identifikovat **Targets, Components** a **Supersystems**.

*Target* zařízení, je hlavním důvodem navržení daného zařízení. Jako *Target* je uváděna hlavní funkce zařízení. *Target* je elementem, který existuje mimo zařízení které se analyzuje. **Target je příjemcem, nebo předmětem, hlavní funkce systému.**

Identifikace *main function* zařízení pomůže identifikovat *Target*. *Main function* zařízení, je primární činností, která byla navržena za účelem dosažení cíle. Například, co je hlavní funkcí **medical ampule (lékařské ampule)**? Ampule je naplněná a uzavřená za účelem, aby mohla doručit na trh obsažený lék. Ampule není izolovaným objektem, který by musel být uzavřený jen proto, aby byl zapečetěný. Hlavní funkcí ampule je tedy **to contain medicíně (pojmout lék)**. Předmětem této funkce je **lék**. Tedy, **lék** je *Target* (cílem) systému.



Dalším příkladem by mohl být již zmiňovaný větrák. Co je hlavní funkcí větráku ?

Jelikož je větrák určen k pohybu vzduchu, jeho hlavní funkcí je tedy **to move air (pohyb vzduchu)**. To že se osoba při použití větráku může cítit chladněji je pouze “vedlejší výhodou“ hlavní funkce, nikoli hlavní funkcí. Jsou jiné způsoby, jak ochladit osobu, a není nutné k tomu použít pohyb vzduchu.

Nebo: Co je hlavní funkcí klimatizace? Jednou hlavní funkcí klimatizace je **to cool air (ochlazovat vzduch)**. Vzduch, který prochází zařízením je ochlazován na požadovanou teplotu, tedy **air (vzduch)** je *Target*.

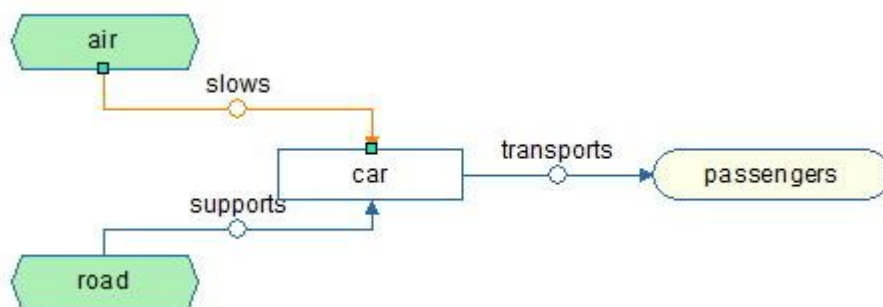
Klimatizace také obvykle slouží k čištění vzduchu a zachytávání prachových částic, což může navádět k závěru, že klimatizace také čistí vzduch. Jelikož čištění vzduchu je výsledkem zachycování prachových částic ve filtru uvnitř zařízení, druhá hlavní funkce může být tedy formulována jako **trap dust (zachycování prachu)**, což činí **dust** druhým *Target* systému.

**Tipy, pro identifikaci *Device components* (komponent zařízení)**

Komponenty systému jsou elementy analyzovaného systému.

Příkladem je rozdělení auta na komponenty: karoserie, hlavní konstrukce, motor, převodovka, kola a pneumatiky. Pro porovnání komponent auta s elementy cílů a elementy supersystémů, uvažujte následující:

- Cílem auta jsou **cestující**, jelikož hlavní funkcí auta je **přepravit pasažéry**.
- Dva elementy supersystémů auta mohou být - **cesta** a **vzduch**.



Každá z komponent auta může být postupně modelována jako minizařízení. Každé z těchto minizařízení může také obsahovat komponenty modelu. V GI jsou komponenty zařízení, které jsou reprezentovány modelem, nazývány **model komponenty**.

Zařízení může mít až 10 hierarchických úrovní modelů komponent. Každá z komponent může obsahovat elementy cílů a elementy supersystémů.

Komponenta, který není reprezentována modelem, je nazývána **jednoduchá komponenta**.

Výběr nejnižší komponenty zařízení

Podstatný úkol při modelování komponent systému spočívá v určení příslušné úrovně distribuce (členění) systému. Například auto může být rozděleno pouze na karosérii a kola. Ale každá z těchto komponent může být dále členěna, a každá z rozčleněných komponent může být opět rozdělena. Obvykle však nemá smysl pro sestavení správného modelu auto rozdělovat až na úroveň atomů. **Co je tedy nejnižší komponenta, která ještě dává smysl?**

**Obecně lze říci, že úroveň je definována nejnižší částí systému, ve které je uživatel ještě ochoten hledat řešení.**

Vezměme si extrémní případ, kdy je auto postaveno pouze z karosérie a kol. V okamžiku, kdy postoupíte ke kroku, ve kterém usilujete systém zjednodušit, naskytla by se možnost zjednodušit pouze karosérii nebo kola (v GI jsme nespécifikovali, že jsou tyto komponenty postaveny z menších částí). Jako jedno z řešení by mohlo být pokusit se o přiřazení funkce kol na jinou komponentu systému, a vyřadit je tak z návrhu zařízení. Auto bez kol by bylo zcela jistě vysoce pokrokové, ale jeho vývoj by mohl vyžadovat příliš mnoho prostředků, a tím se stát z hlediska uplatnění na trhu nerealizovatelným. Z tohoto důvodu lze říci, že zvýšením úrovně detailů při definování komponent zařízení, je možno z GI získat doporučení ke zjednodušení k řešení, které je bude k realizaci vhodnější.

### Tipy, pro identifikaci supersystémů zařízení

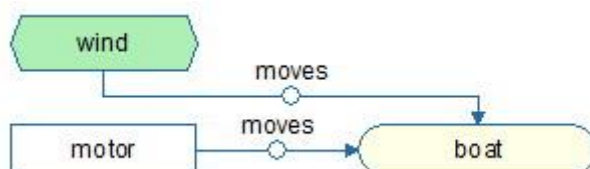
Supersystém je částí okolí zařízení, se kterým zařízení je ve styku, ale není součástí zařízení samotného. Elementy supersystému nemohou být eliminovány nebo zjednodušeny protože jsou, podle definice, nad a za rozsahem systému.

Následující otázky a doporučení pomohou k rozhodnutí, zda element je supersystémem:

- Mohu tento element změnit ? Mohu kontrolovat stav tohoto elementu ? Pokud je odpověď ne, tento element je supersystémem.
- Mohu tento element odebrat z návrhu systému ? Pokud je odpověď ne, tento element je supersystémem.

Elementy supersystému mohou soužit jako volné zdroje, kterým lze během zjednodušování systému přiřadit některé funkce zařízení. Jelikož elementy supersystému nejsou částí systému, je možné tímto způsobem snížit náklady.

**Příklad:** Uvažuj motorovou loď na jezeře. Zde je jedním ze supersystémů pro systém lodě vítr. V případě, že bude navržena vhodná plachta, je možno vítr takto zapřáhnout, a použít jako velmi levný zdroj energie pro pohyb lodě. Vítr bude tedy sloužit jako zdroj, a provádět některé funkce, které byly dříve navrženy pro systém.



## Definování funkcí

Funkce, prováděná určitým elementem, je akce, kterou element generuje na druhý (přijímající) element. Akce mění nebo ovládá jeden nebo více pozorovatelných parametrů přijímajícího elementu. Funkce je sestavena ze slovesa a podstatného jména. Sloveso je akcí, prováděnou na přijímajícím elementu (podstatné jméno).

### Příklad

Předpokládej, že spolu přímo navzájem působí v systému magnet a elektronový paprsek. Magnet provádí funkci na elektronovém paprsku: **odklání elektronový paprsek**. Parametr elektronového paprsku, který je touto funkcí ovlivňován, je jeho **pozice**.

V některých případech může vyjádření o funkci elementu vypadat přinejmenším rozdílně (netradičně) od zažitého smýšlení.

Dva důležité body pro definici funkce:

1. Funkce je vždy sestavena ze slovesa (akce) a podstatného jména (objekt který přijímá akci). Celkové vyjádření o funkci je formulováno ve smyslu předmět-akce-objekt, kde předmětem je element provádějící funkci. Například, ve funkčním vyjádření **magnet odklání elektronový paprsek**, předmětem je **magnet**, a jeho funkcí je **odklání elektronový paprsek**
2. Akční element musí přímo ovlivňovat nebo udržovat jeden nebo více parametrů přijímajícího elementu. Pokud nedokážeme ve funkci identifikovat takový parametr, neobdržíme použitelné hlášení o problému.

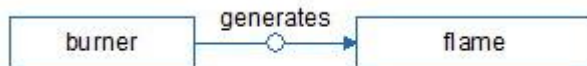
### (Rozlišování užitečných a škodlivých funkcí)

Poté, co definujeme ve svém modelu funkce, klasifikujeme každou funkci jako buď užitečnou nebo škodlivou.

**Užitečná funkce:** definice

**Užitečné funkce** jsou vyžadovány, aby mohl být splněn hlavní účel, pro který je systém navržen.

**Příklad:** Funkční vyjádření **hořák generuje plamen** reprezentuje v procesu užitečnou funkci hořáku. Hořák ovlivňuje teplotu i hustotu plasmy plamene.



Jakmile do prostředí GI vložíme užitečnou funkci, specifikujeme také její úroveň v relativním měřítku:

- **nedostatečná** – výstup funkce je pod zamýšlenou úrovní (funkce je prováděna nedostatečně)
- **optimální** – funkce je prováděna tak jak je zamýšleno
- **nadbytečná** – výstup funkce je nad zamýšlenou úrovní

**Škodlivá funkce:** definice

**Škodlivá funkce** reprezentuje okolnosti reálného světa, které nebyly v původním návrhu zamýšleny nebo předpokládány. Takováto funkce je na překážku zamýšlenému účelu zařízení a způsobuje kompromisy v jeho provedení. Eliminací nebo zmírněním škodlivých funkcí může být provedení nebo výkon zařízení optimalizován.

**Příklad:** Funkční vyjádření **větrák vibruje díly počítače** v systému počítače. Účelem větráku je zajištění pohybu vzduchu a tím ochlazení komponent v počítači, nikoli způsobit v zařízení vibrace a generovat hluk.



Jakmile do prostředí GI vložíme škodlivou funkci, můžeme specifikovat její úroveň v relativním měřítku - v měřítku od **nejméně** do **nejvíce**. Čím škodlivější funkce bude, tím bude méně ohodnocena komponenta, která tuto funkci produkuje.

**Způsoby jak model sestavit**

GI poskytuje tři prostředí pro pomoc se sestavením modelu zařízení:

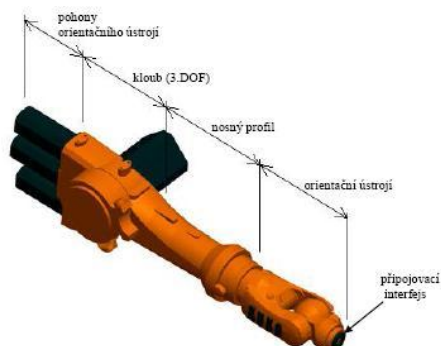
- Device Model wizard
- Graph Editor
- Interaction Matrix

## 5.2.2. Návrh a výpočty vybraných částí akčního subsystému robotu

K demonstraci postupu vyberme jednu ze složitějších úloh návrhu manipulátoru robotu – řešení horního ramena robotu.

Hlavní funkcí horního ramene je polohování (v daném případě rotace kolem osy x) orientačního ústrojí (orientační ústrojí – OÚ – je cíl). Polohování má své parametry – silový

moment, přesnost, tuhost, rychlost, zrychlení, rozsah pohybu. Komponenty ze kterých sestává můžeme demonstrovat na obvyklém (= v praxi častém) provedení horních ramen s rotačním pohybem podle obr. 5.2.2.-1.



Obr. 5.2.2.-1 Provedení horního ramena manipulátoru

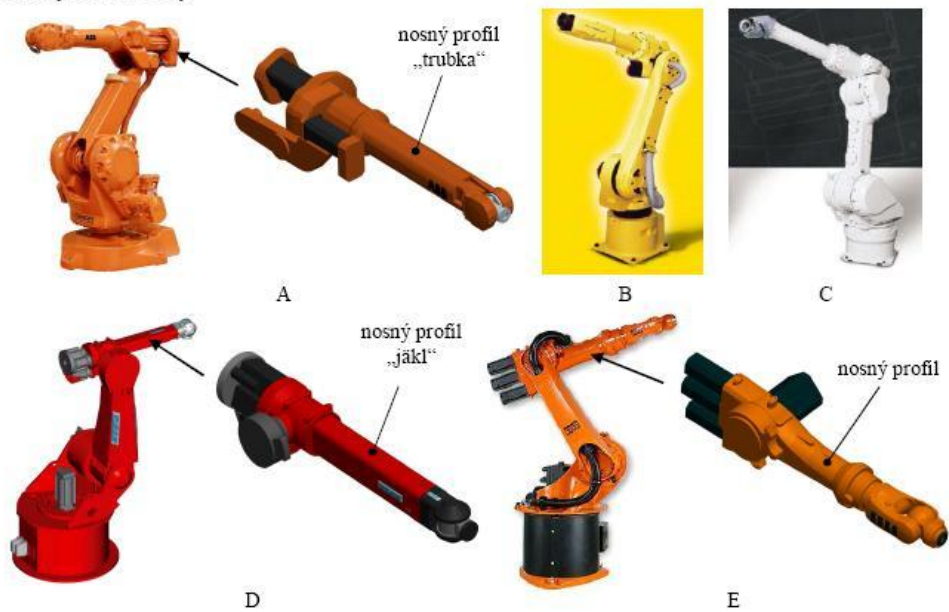
Další prvky systému horního ramena jsou – těleso ramena, pohon otoče ramena, 3 pohony OÚ, kabeláž pro přenos energie a informací. Kromě hlavní funkce je nutné zajistit dílčí funkce jako – těleso ramena nese pohony OÚ, pohon ramena otáčí tělesem ramena.

Z analýzy struktury orgánů a funkcí užitečných i škodlivých, potřebných parametrů, dostupných převodů a motorů i technologičnosti konstrukce, dostupných materiálů vyplynou problémy, které konstrukci a její parametry limitují a na které je nezbytné se soustředit.

Patří sem např.:

- geometrie nosného profilu ramene,
- distribuce pohonů,
- způsoby spojení nosného profilu se skříní kloubu (3.DOF),
- způsoby připojení orientačního ústrojí,
- způsob připojení ramene do systému polohovacího ústrojí,
- způsob vedení energetických kabelů a komunikačních vodičů (případně technologických médií),
- způsob uložení koaxiálních dutých hřídelí.

*Průmyslové roboty*



Obr. 27 Horní ramena průmyslových robotů

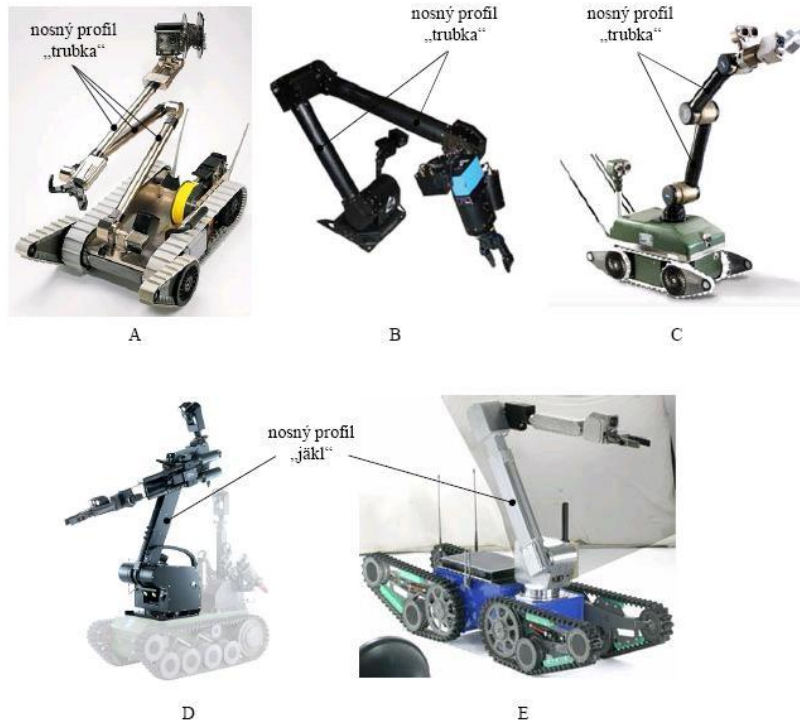
A – robot *ABB IRB 2400L*  
B – robot *Fanuc M-16iB/10L*

C – robot *Kawasaki KF264*  
D – robot *Reis RV16L*

E – robot *Kuka KR6*

Obr. 5.2.2-2 Další provedení horních ramen současně vyráběných robotů

*Servisní roboty*



Obr. 28 Ramena manipulačních nástaveb servisních robotů

A – robot *PackBot 510* společnosti *iRobot*  
B – nástavba robotu *CAMELEON* společnosti *Eca*  
C – robot *ASENDRO EOD* společnosti *Robowatch*

D – robot *TEODOR* společnosti *Telerob*  
E – robot *TELEMEX* společnosti *Telerob*



Obr. 5.2.2-3 Provedení ramen některých servisních robotů

*Geometrie nosného profilu* zahrnuje tvar a rozměry příčného průřezu a jeho změnu v podélném směru profilu. Z výše uvedených obrázků vyplývá, že se z hlediska tvaru příčného průřezu používají v podstatě dva typy uzavřených profilů – *kruhový* (typ „trubka“) a *obdélníkový* (typ „jákl“). Nosné profily, které směrem ke koncovému členu kinematické struktury (k orientačnímu ústrojí) v souvislosti s teorií o nosnících stejné pevnosti zmenšují svůj průřez se vzhledem k náročnější technologii výroby vyskytují v menší míře.

*Distribuce pohonů* je v tomto případě chápána jako rozmístění jednotlivých pohonů následujících os (stupňů volnosti) na rameni robotu. U horního ramene současných průmyslových robotů jsou z důvodu snížení momentu setrvačnosti ramene pohony (resp. motory) následujících os (os orientačního ústrojí) umístěny výhradně na jeho konci protilehlém k orientačnímu ústrojí. Mechanická energie je pak z tohoto místa rozvedena obvykle dutými koaxiálními hřídeli uloženými uvnitř ramene. V případě manipulačních nástaveb servisních robotů, které se obvykle v porovnání s průmyslovými roboty vyznačují nižšími rychlostmi a zrychleními jednotlivých pohybových os, se vyskytují hybridní konstrukce. Při preferování modulární koncepce se pohony jednotlivých os umísťují přímo v kloubech.

V konstrukci ramen z konvenčních materiálů se používají pro vzájemné *spojování jednotlivých dílů* (částí) *ramene* a při *připojování ramene do systému robotu* běžně ve strojírenství užívané rozebíratelné spoje.

*Energetické kabely, komunikační vodiče a technologická média* (stlačený vzduch, laserový paprsek, barva pro stříkání, ochranná atmosféra pro svařování apod.) mohou být vedena v zásadě dvěma způsoby – vně nebo uvnitř ramene. U průmyslových robotů se vyskytují obě varianty, přičemž záleží na konkrétní konstrukci a zvyklostech výrobce. Pro manipulační nástavby servisních robotů je typické vést energii, informace a technologická média v dutině ramen.

Využití *koaxiálních dutých hřídelí* uložených v dutině ramene je v současnosti nejpoužívanější způsob rozvodu mechanické energie z pohonů (resp. motorů) do příslušných kloubů.

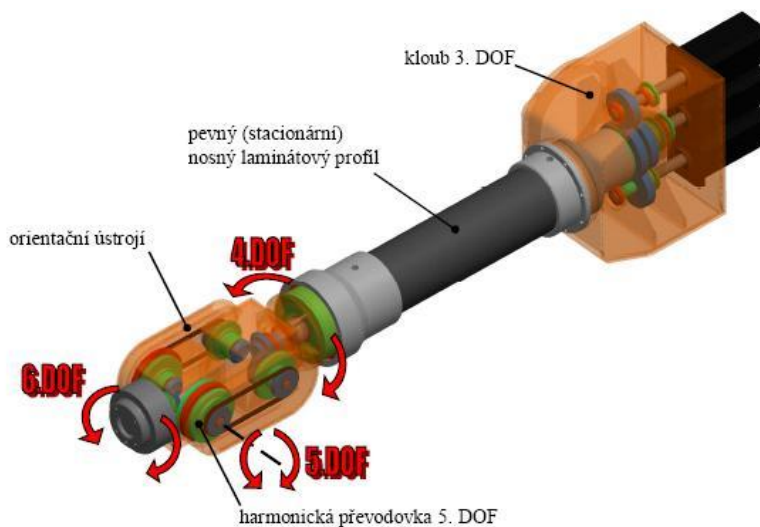
Varianty možných řešení horních ramen lze výhodně posoudit v morfologické matici orgánů (obr. 5.2.2.-4).

Číslo znaku	Charakteristický znak (vlastnost)	Způsob provedení (technická realizace)				Počet způsobů provedení
		a	b	c	d	
I	<i>distribuce (umístění) pohonů</i>	v kloubech	hybridní	mimo klouby	-----	3
II	<i>přenos energie z pohonů (motorů) do kloubů</i>	vložené rozvodné převody	bez rozvodných převodů	-----	-----	2
III	<i>tvar průřezu nosného profilu</i>	kruh	obdélník	mnohoúhelník	proměnný	4

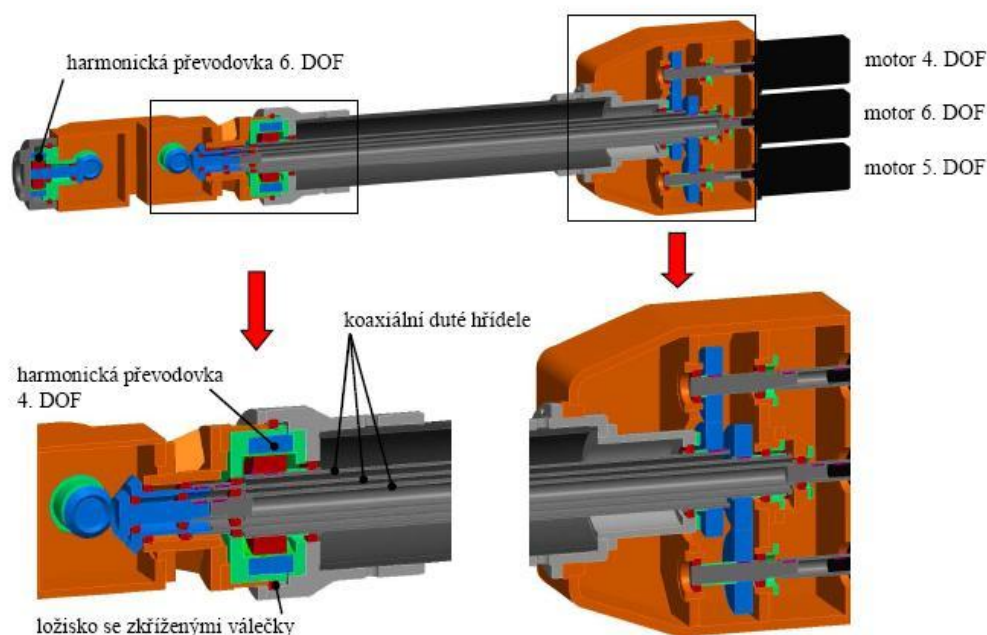
<b>IV</b>	<i>typ průřezu nosného profilu</i>	plný (viz obr. IVa)	dutý (viz obr. IVb)	----	----	2
<b>V</b>	<i>velikost (rozměry) průřezu po délce</i>	konstantní (viz obr. Va)	proměnná (viz obr. Vb)	----	----	2
<b>VI</b>	<i>způsob připojení spojovacího prvku (prvků)</i>	integrován(y) při výrobě laminátu	dodatečné připojen(y)	----	----	2
<b>VII</b>	<i>spoj nosného profilu s prvkem kloubu (3.DOF)</i>	s materiálovým stykem	se silovým stykem	s tvarovým stykem	kombinovaný	4
<b>VIII</b>	<i>spoj nosného profilu s prvkem orientačního ústrojí</i>	s materiálovým stykem	se silovým stykem	s tvarovým stykem	kombinovaný	4
<b>IX</b>	<i>povaha (funkce) nosného profilu</i>	pevný	rotující	----	----	2
<b>Celkový počet kombinací (teoretický počet variant)</b>						<b>6144</b>

Obr. 5.2.2-4 Morfologická matice volby orgánů

Pro demonstraci byla vybrána varianta se stacionárním tělesem ramena (obr. 5.2.2.-5).



Obr. 5.2.2-5 První představa o možné koncepci horního ramena



Obr. 5.2.2-6 Detaily zvolené koncepce

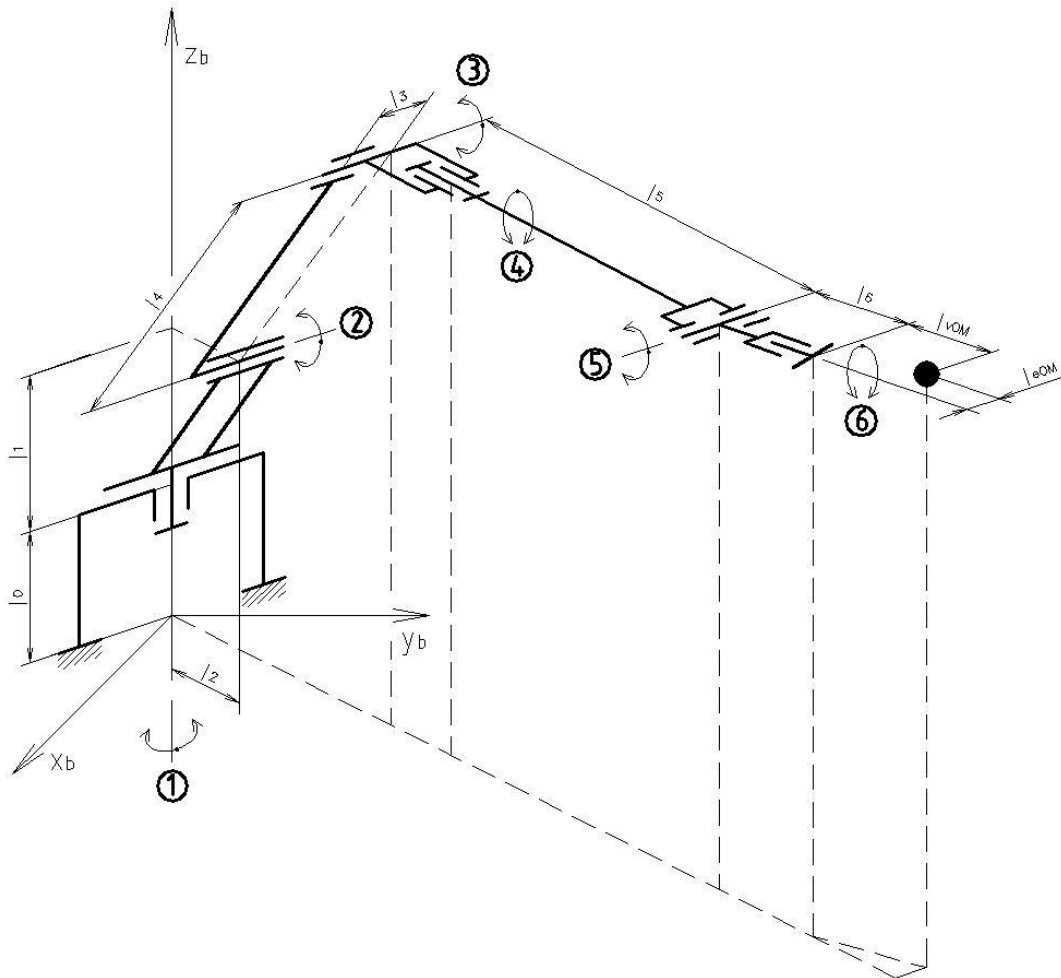
Jedná se o variantu, která se vyznačuje stacionárním nosným profilem (obr. 5.2.2.-5), spojeným se skříní kloubu 3. DOF. V tomto konstrukčním řešení je namáhán nosný profil ohybem a tahem. Jak je patrné z řezu 3D modelem na obr. 5.2.2.-6, obsahuje konstrukce tři koaxiální duté hřídele. Na dutý hřídel 4. a 5. DOF je přenášen výkon servomotorů pomocí čelních ozubených soukolí. Dutý hřídel 6. DOF je se servomotorem spojen spojku. K transformaci parametrů (otáček a momentů) servomotorů jednotlivých stupňů volnosti orientačního ústrojí dochází v harmonických převodovkách pro 4., 5. a 6. DOF, které jsou umístěny na konci ramene v orientačním ústrojí. Díky tomu přenáší duté hřídele relativně nízké kroutící momenty při vysokých otáčkách.

Jedním z aspektů při výběru vhodnější varianty je výskyt kritického místa návrhu z hlediska jeho konstrukčního řešení a montáže. U uvedené varianty je takovým místem uložení tří koaxiálních dutých hřídelů (včetně jejich montáže) a vedení dutých hřídelů 5. a 6. DOF poměrně malým otvorem v harmonické převodovce 4. DOF. Z tohoto důvodu by musela být s největší pravděpodobností použita výrobcem upravená harmonická převodovka s větším otvorem, jejíž cena by byla podstatně vyšší než cena převodovky standardní.

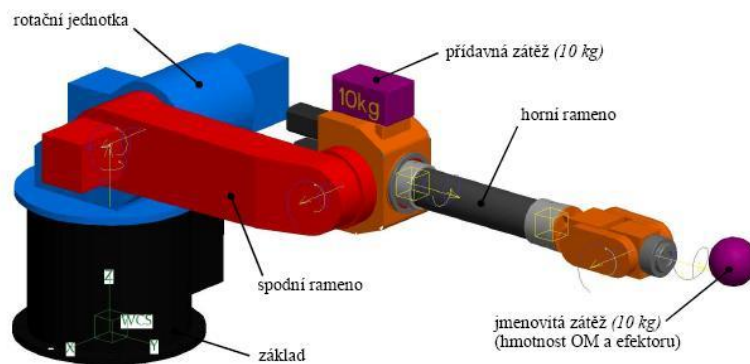
### Výpočtový model robotu a jeho parametry

Pro předběžný návrh jednotlivých dílů a strojních součástí a komponent konstrukce horního ramena je potřebné stanovit výchozí hodnoty zatížení jednotlivých dílů. Tento proces je z důvodu neznalosti hmotností a momentů setrvačnosti jednotlivých součástí a skupin v počáteční fázi návrhu velmi obtížný a vyžaduje značné zkušenosti z předešlé realizace podobných konstrukcí. K získání výchozích hodnot zatížení byl v modulu Pro/MECHANICA MOTION proto vytvořen pro koncepci robotu (obr. 5.2.2.-8) výpočtový model akčního subsystému robotu (obr. 5.2.2.-7). Jeho užité parametry (obr. 5.2.2.-10) byly zvoleny a

dopočteny na základě parametrů současných angulárních robotů (obr. 5.2.2.-9), přičemž úroveň některých parametrů byla v souladu s inovativním přístupem mírně zvýšena.



Obr. 5.2.2-7 Výpočtový model akčního subsystému robotu



Obr. 5.2.2-8 Zvolená koncepce robotu

Parametr	Typ robotu		
	ABB IRB 2400L	Reis RV 6L	Kuka KR 16 L6
Jmenovitá nosnost [kg]	7	6	6

<b>Přídavná zátěž horního ramene [kg]</b>		10	10	10
<b>Opakovatelná přesnost [mm]</b>		±0,06	±0,05	±0,1
<b>Max. dosah [mm]</b>		1810	1725	2025
<b>Rozsahy pohybu os polohovacího ústrojí [°]</b>	Osa 1	360 (±180)	330 (-180/+150)	370 (±185)
	Osa 2	200	155 (-30/+125)	190 (-35/+155)
	Osa 3	125	270 (-150/+120)	284 (-154/+130)
<b>Rozsahy pohybu os orientačního ústrojí [°]</b>	Osa 4	370 (±185)	420 (±210)	700 (±350)
	Osa 5	240 (±120)	246 (±123)	260 (±130)
	Osa 6	800 (±400)	720 (±360)	700 (±350)
<b>Max. úhlové rychlosti os polohovacího ústrojí [°/s]</b>	Osa 1	150	140	156
	Osa 2	150	140	156
	Osa 3	150	140	156
<b>Max. úhlové rychlosti os orientačního ústrojí [°/s]</b>	Osa 4	360	270	335
	Osa 5	360	300	355
	Osa 6	450	500	647
<b>Vzdálenost</b>	Osa 2 - Osa 3 [mm]	855	615	680
	Osa 3 - Příruba přípoj. interfejsu [mm]	945	830	1085

Obr. 5.2.2-9 Parametry vybraných robotů o nosnosti 6-16 kg

### Stanovení maximálních úhlových zrychlení jednotlivých stupňů volnosti

Pro určení maximálních úhlových zrychlení stupňů volnosti (os) polohovacího ústrojí byl stanoven požadavek, aby k rozběhu příslušné osy z klidu na její maximální úhlovou rychlost došlo na dráze rovné 15 % minimálního rozsahu pohybu os polohovacího ústrojí podle

$$\text{vztahu: } \varepsilon_{i\max} = \frac{\omega_{i\max}^2}{2 \cdot k \cdot \varphi}, \quad (1)$$

kde  $\varphi$  je minimální hodnota z rozsahů pohybu os polohovacího ústrojí (1., 2. a 3. DOF), tedy  $\varphi = \varphi_2$ , a poměr úhlové dráhy rozběhu (resp. brzdění) a rozsahu pohybu osy je navržen  $k = 0,15$  (15 %).

Doba rozběhu příslušné osy polohovacího ústrojí z klidu na její maximální úhlovou rychlost se vypočte ze vztahu:

$$t_{1r} = \frac{\omega_{i\max}}{\varepsilon_{i\max}}. \quad (2)$$

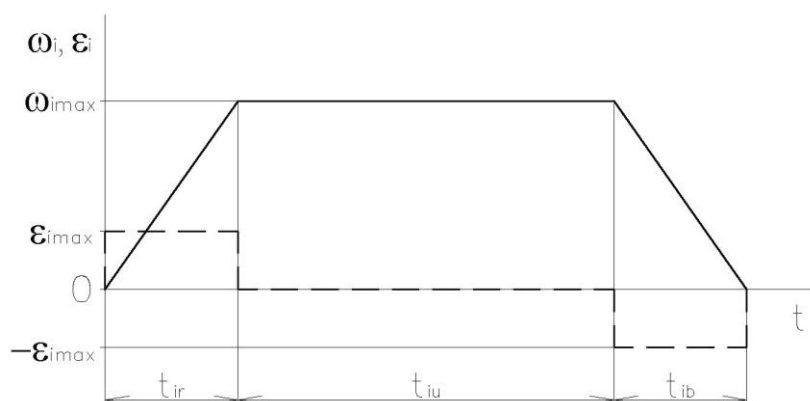
Příklad výpočtu maximálního úhlového zrychlení a doby rozběhu 1. DOF:

$$\underline{\underline{\varepsilon_{1\max}}} = \frac{\omega_{1\max}^2}{2 \cdot k \cdot \varphi} = \frac{160^2}{2 \cdot 0,15 \cdot 190} = \underline{\underline{449,1^\circ \cdot s^{-2}}} = \underline{\underline{7,839 \text{ rad} \cdot s^{-2}}}$$

$$\underline{\underline{t_{1r}}} = \frac{\omega_{1\max}}{\varepsilon_{1\max}} = \frac{160}{449,1} = \underline{\underline{0,356 \text{ s}}}$$

Obdobně se určí maximální úhlová zrychlení stupňů volnosti (os) orientačního ústrojí, kde se ve vztahu (1) místo  $\varphi$  dosazuje minimální hodnota z rozsahů pohybu os orientačního ústrojí (4., 5. a 6. DOF)  $\varphi_{ou} = \varphi_5$  a je navržen poměr úhlové dráhy rozběhu (resp. brzdění) a rozsahu pohybu osy  $k_{ou} = 0,12$  (12 %). Doba rozběhu příslušné osy orientačního ústrojí z klidu na její maximální úhlovou rychlost se vypočte z rovnice (2).

K výpočtu maximálních úhlových zrychlení a dob rozběhu jednotlivých stupňů volnosti byl využit program Mathcad 13.0.



Obr. 5.2.2-11 Uvažovaný průběh rychlosti a zrychlení

Parametr		Vstupní (navržená) hodnota
Jmenovitá nosnost [kg]		10
Přídavná zátěž horního ramene [kg]		10
Opakovatelná přesnost [mm]		$\pm 0,1$
Max. dosah [mm]		2000
Rozsahy pohybu os polohovacího ústrojí [°]	Osa 1 - $\varphi_1$	370 ( $\pm 185$ )
	Osa 2 - $\varphi_2$	190 (-35/+155)
	Osa 3 - $\varphi_3$	280 (-150/+130)
Rozsahy pohybu os orientačního ústrojí [°]	Osa 4 - $\varphi_4$	420 ( $\pm 210$ )
	Osa 5 - $\varphi_5$	250 ( $\pm 125$ )
	Osa 6 - $\varphi_6$	720 ( $\pm 360$ )
Max. úhlové rychlosti os polohovacího ústrojí [°/s]	Osa 1 - $\omega_{1max}$	160
	Osa 2 - $\omega_{2max}$	160
	Osa 3 - $\omega_{3max}$	160
Max. úhlové rychlosti os orientačního ústrojí [°/s]	Osa 4 - $\omega_{4max}$	320
	Osa 5 - $\omega_{5max}$	350
	Osa 6 - $\omega_{6max}$	600

Max. úhlová zrychlení os polohovacího ústrojí [ $^{\circ}/s^2$ ]	Osa 1 - $\varepsilon_{1\max}$	449,1
	Osa 2 - $\varepsilon_{2\max}$	449,1
	Osa 3 - $\varepsilon_{3\max}$	449,1
Max. úhlová zrychlení os orientačního ústrojí [ $^{\circ}/s^2$ ]	Osa 4 - $\varepsilon_{4\max}$	1706,7
	Osa 5 - $\varepsilon_{5\max}$	2041,7
	Osa 6 - $\varepsilon_{6\max}$	6000
Vzdálenost	Osa 2 - Osa 3 ( $l_4$ ) [mm]	700
	Osa 3 - Příruba připoj. interfejsu ( $l_5 + l_6$ ) [mm]	1050

Obr. 5.2.2-10 Zvolené parametry výpočtového modelu robotu

### Hodnoty zatížení v určených místech horního ramena

Pro získání hodnot zatížení v příslušných místech konstrukce horního ramena byly provedeny dynamické analýzy výpočtového modelu v systému Pro/MECHANICA MOTION, pro nejnepříznivější polohu průmyslového robotu. Za tuto polohu byla zvolena konfigurace manipulátoru robotu se spodním a horním ramenem, konkrétně výstupem 5. DOF, natočeným do vodorovné roviny (obr. 5.2.2-11). V této poloze dochází k největšímu vyložení polohovacího ústrojí robotu. Tabulka v obr. 5.2.2-12 uvádí složky daných zatížení pro tuto konfiguraci za současného pohybu jednotlivých stupňů volnosti (os) s maximálním zrychlením a maximální rychlostí, jichž je dosaženo právě v této poloze.

Místo působení	Složky zátěžné síly [N]		Složky zátěžného momentu [N.mm]	
Výstup 6.DOF	$F_{6x}$	-660	$M_{6x}$	-115872
	$F_{6y}$	1304	$M_{6y}$	-59290
	$F_{6z}$	-640	$M_{6z}$	1962
Výstup 5.DOF	$F_{5x}$	-707	$M_{5x}$	-163099
	$F_{5y}$	1452	$M_{5y}$	-59235
	$F_{5z}$	-729	$M_{5z}$	49520
Výstup 4.DOF	$F_{4x}$	-867	$M_{4x}$	-920858
	$F_{4y}$	1909	$M_{4y}$	-61857
	$F_{4z}$	-1052	$M_{4z}$	704481
Výstup 3.DOF	$F_{3x}$	-1026	$M_{3x}$	-1099330
	$F_{3y}$	2371	$M_{3y}$	-244008
	$F_{3z}$	-1466	$M_{3z}$	510493

Spoj nosný profil - koncovka (strana OÚ)	$F_{SOUx}$	-816	$M_{SOUx}$	-421806
	$F_{SOUy}$	1797	$M_{SOUy}$	-61617
	$F_{SOUz}$	-947	$M_{SOUz}$	277938
Spoj nosný profil - koncovka (strana skříně 3.DOF)	$F_{SSKx}$	-832	$M_{SSKx}$	-900612
	$F_{SSKy}$	1841	$M_{SSKy}$	-61679
	$F_{SSKz}$	-981	$M_{SSKz}$	686770

Obr. 5.2.2-12 Hodnoty zatížení v uvedených místech pro nejnepříznivější konfiguraci výpočtového modelu za současného pohybu jednotlivých os s maximálním zrychlením a rychlostí

### Rozbor zatížení jednotlivých částí ramena

Při stanovení zatížení jednotlivých součástí a komponent konstrukce ramene se postupovalo od výstupu příslušného stupně volnosti, kde je již zatížení známo z dynamické analýzy výpočtového modelu průmyslového robotu viz tabulka (obr. 5.2.2-12). Těmito součástmi se myslí ložiska a strojní součásti a komponenty pro přenos výkonu ze servomotorů na výstup příslušného stupně volnosti orientačního ústrojí, tzn. hřídele včetně per, koaxiální duté hřídele, nosný profil, mechanické převody, harmonické převodovky a spojky. Postupným zahrnováním dynamického zatížení od předcházejících rotujících částí úměrného jejich momentu setrvačnosti byly určeny vstupní údaje pro návrh a dimenzování těchto součástí.

Na obr. 5.2.2-13, 14, 15 je znázorněno uspořádání 6., 5. a 4. DOF. Tyto obrázky slouží k určování zatížení jednotlivých strojních součástí a komponent a k jejich následnému dimenzování. Vzhledem k tomu, že se jedná o stále stejný princip výpočtu, postupující vždy od výstupu příslušného stupně volnosti (v případě 6. DOF tedy od příruby připojovacího interfejsu) k servomotoru a bude využit pro všechny tři stupně volnosti, je zde tento výpočet uveden obecně. Jeho aplikace je demonstrována pouze na příkladu výpočtu kroutícího momentu (zatížení) hřídele hnané ozubené řemenice 6. DOF, uložené v ložiskách 3, 4 (viz obr. 5.2.2-13). Nutno podotknout, že při postupném dimenzování a úpravách 3D modelu ramene jsou známy všechny parametry předchozích součástí a komponent potřebné pro výpočet zatížení následujícího dílu.

Výpočet kroutícího momentu (zatížení) přenášeného danou součástí se provádí dle vztahu:



$$M_{kiDOF} = \frac{M_i}{\prod_{j=1}^k i_j \cdot \eta_j} + \left\{ \sum_{m=1}^{k-1} \left[ \frac{J_{miDOF}}{\prod_{j=m+1}^k i_j^2 \cdot \eta_j} + J_{kiDOF} \right] \cdot \varepsilon_i \cdot \prod_{j=1}^k i_j \right\}$$

kde  $M_{kiDOF}$  je kroučící moment přenášený k-tou součástí (hřídelí) i-tého stupně volnosti (od jeho výstupu),

$M_i$  je moment na výstupu i-tého stupně volnosti,

$i_j$  je převodový poměr j-tého převodu nebo převodovky i-tého stupně volnosti,

$\eta_j$  je účinnost j-tého převodu nebo převodovky i-tého stupně volnosti,

$J_{miDOF}$  je moment setrvačnosti m-té skupiny součástí (hřídele včetně nábojů) i-tého stupně volnosti,

$J_{kiDOF}$  je moment setrvačnosti k-té skupiny součástí (hřídele včetně nábojů) i-tého stupně volnosti,

$\varepsilon_i$  je úhlové zrychlení na výstupu i-tého stupně volnosti.

Otáčky k-té součásti (hřídele) i-tého stupně volnosti se vypočítají ze vztahu:

$$n_{kiDOF} = \frac{\omega_i}{2 \cdot \pi} \cdot \prod_{j=1}^k i_j$$

kde  $\omega_i$  je úhlová rychlost na výstupu i-tého stupně volnosti.

Výkon přenášený k-tou součástí (hřídelí) se pak určí z rovnice:

$$P_{kiDOF} = M_{kiDOF} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{kiDOF}$$

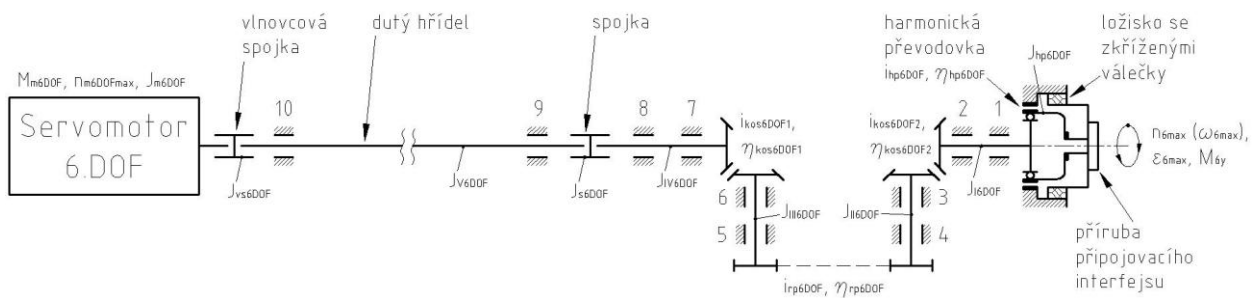
Aplikace rovnic tří posledních rovnic pro výpočet veličin přenášených hřídelí hnané ozubené řemenice 6. DOF:

$$M_{II6DOF \max} = \frac{M_{6y \max}}{i_{hp6DOF} \cdot \eta_{hp6DOF} \cdot i_{kos6DOF2} \cdot \eta_{kos6DOF2}} + \left( \frac{J_{hp6DOF} + J_{I6DOF}}{i_{kos6DOF2}^2 \cdot \eta_{kos6DOF2}} + J_{II6DOF} \right) \cdot \varepsilon_{6 \max} \cdot i_{hp6DOF} \cdot i_{kos6DOF2}$$

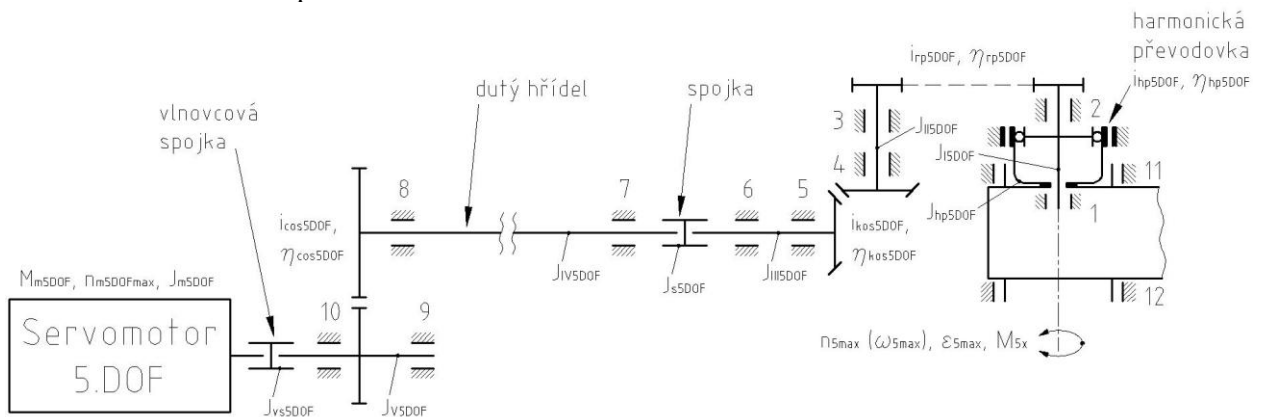
$$\underline{\underline{M_{II6DOF \max}}} = \frac{59,290}{50 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot 0,9877} + \left( \frac{1,93 \cdot 10^{-5} + 4,5 \cdot 10^{-5}}{1^2 \cdot 0,9877} + 7,8 \cdot 10^{-5} \right) \cdot 104,72 \cdot 50 \cdot 1 = \underline{\underline{2,350 Nm}}$$

$$\underline{\underline{n_{II6DOF \max}}} = \frac{\omega_{6 \max}}{2 \cdot \pi} \cdot i_{hp6DOF} \cdot i_{kos6DOF2} = \frac{10,472}{2 \cdot \pi} \cdot 50 \cdot 1 = 83,334 s^{-1} = \underline{\underline{5000 min^{-1}}}$$

$$\underline{\underline{P_{II6DOF \max}}} = M_{II6DOF \max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_{II6DOF \max} = 2,350 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 83,334 = \underline{\underline{1230 W}}$$

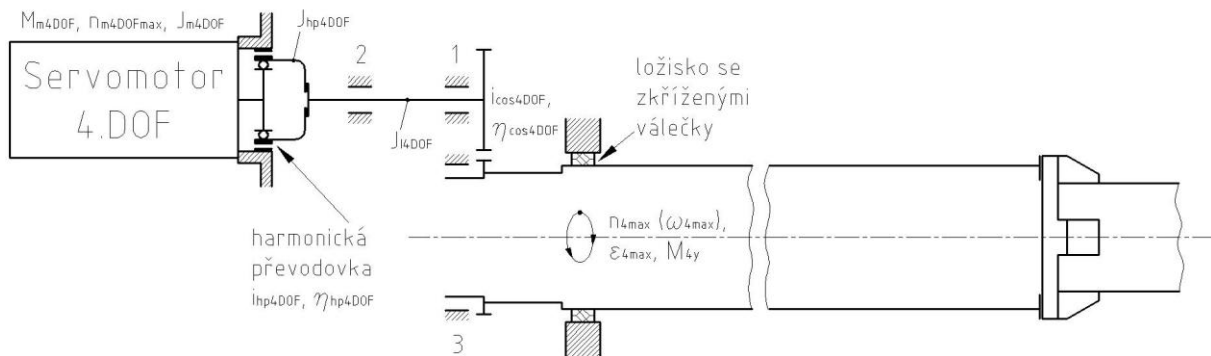


Obr. 5.2.2-13 Schéma uspořádání 6. DOF



Obr. 5.2.2-14 Schéma uspořádání 5. DOF

*Poznámka:* Hodnoty veličin uvedených v rovnicích a představují parametry známé z postupného návrhu od výstupu stupně volnosti.



Obr. 5.2.2-15 Schéma uspořádání 4. DOF

## Návrh strojních součástí a komponent ramena

Patří sem především návrh harmonických převodovek, jednotlivých mechanických převodů a jejich prvků, hřídelí a jejich spojů s náboji, ložisek, spojek mezi servomotorem a hřídelemi, aj. Tyto výpočty byly předmětem kurzu Průmyslové roboty a manipulátory.

Na tomto místě uvedeme návrh nosného profilu ramena řešeného jako trubka. Pro návrh byla stanovena kritéria a jejich mezní hodnoty (okrajové podmínky) viz tabulka (obr. 5.2.2.-16). Při jejich nedodržení přestává profil, potažmo celé rameno, plnohodnotně plnit svou funkci. Volí se tloušťka stěny trubky  $t_{NP}$ , resp. její vnitřní průměr  $d_{NP}$ .

<i>Kritérium</i>	<i>Podmínka</i>
Přemístění koncového bodu střednice nosného profilu při max. zatížení ( <i>deformace od ohybu a tahu</i> )	$\leq 0,12$ mm
Úhel zkroucení nosného profilu při max. zatížení ( <i>deformace od krutu</i> )	$\leq 0^\circ 1'$ ( $\leq 2,9 \cdot 10^{-4}$ rad)
Pevnostní kontrola pro max. zatížení	musí vyhovovat

Obr. 5.2.2-16 Kritéria pro dimenzování nosného profilu

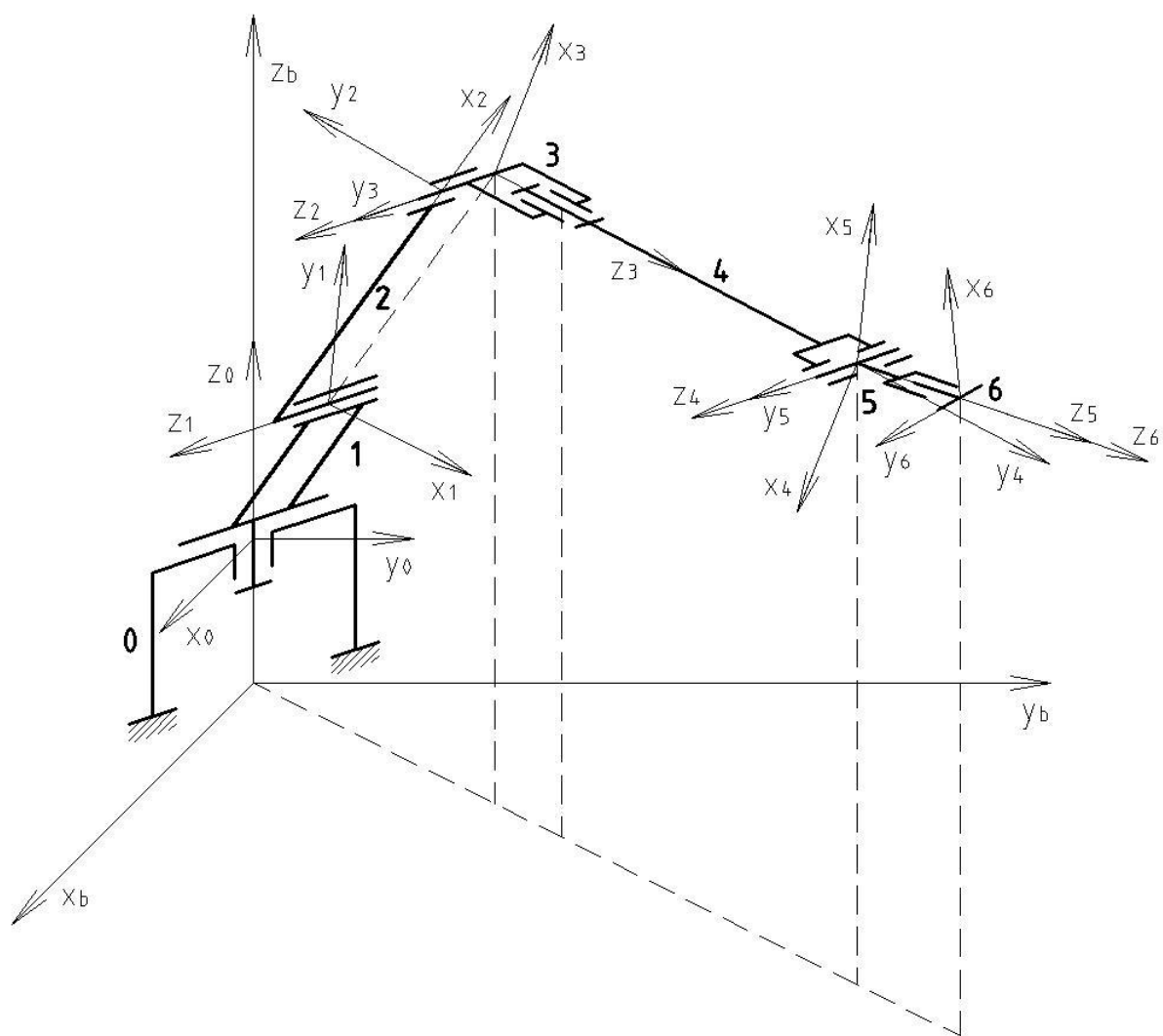
### Výpočtové schéma nosného profilu

Pro snadnější definování výpočtového modelu pro napěťovou a deformační analýzu je výhodné sestavit výpočtové schéma, které zachycuje uložení a zatížení součásti. Nosný profil lze chápat jako nosník vetnutý v místě uložení v ložisku se zkříženými válečky. Maximální zatížení nosného profilu je tvořeno (viz obr. 5.2.2-17):

- dynamickými a statickými účinky od následujících částí konstrukce horního ramene zakončených objektem manipulace (včetně) reprezentovanými silou  $\overrightarrow{F_{SOU}}$  a momentem  $\overrightarrow{M_{SOU}}$ ,
- vlastní tíhou nosného profilu,
- proměnným spojitým zatížením  $\overrightarrow{f_{NP}} = \overrightarrow{f}(y_{NP})$  od pohybu nosného profilu (v důsledku translačního zrychlení),
- dynamickým momentem  $\overrightarrow{M_{dNP}}$  od pohybu nosného profilu (v důsledku úhlového zrychlení).

Úkolem je stanovit průběh spojitého zatížení  $\overrightarrow{f_{NP}}$  v závislosti na vzdálenosti  $y_{NP}$  od začátku nosného profilu. K tomu je potřeba nejprve určit translační zrychlení jednotlivých bodů střednice nosného profilu. Pro výpočet byl s výhodou využit program Mathcad 13.0 a byly aplikovány znalosti řešení kinematiky prostorových mechanismů. Základním krokem výpočtu je vytvoření schématu mechanismu s rozmístěním souřadných systémů

dle Denavit-Hartenberga (zkráceně D-H) (viz obr. 5.2.2.-17) pro následné sestavení transformačních matic mezi těmito souřadnými systémy.



Obr. 5.2.2-17 Schéma průmyslového robotu se souřadnými systémy a parametry dle D-H

$i$	$v_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
0	0	$l_0$	0	0
1	$q_1$	$l_1$	$l_2$	$\pi/2$
2	$q_2$	$l_3$	$l_4$	0
3	$q_3$	$-l_3$	0	$\pi/2$
4	$q_4$	$l_5$	0	$\pi/2$
5	$q_5$	0	0	$\pi/2$
6	$q_6$	$l_6$	0	0

Obr. 5.2.2-17 Parametry D-H

Translační zrychlení jednotlivých bodů střednice nosného profilu se vypočítá ze vztahu:

kde  $\vec{a}_{NPb} y_{NP}$  je vektor zrychlení bodu střednice nosného profilu daného proměnnou  $y_{NP}$  v bázovém souřadném systému (0xbyzbz),

$\vec{a}_4$  je vektor zrychlení počátku souřadného systému článku

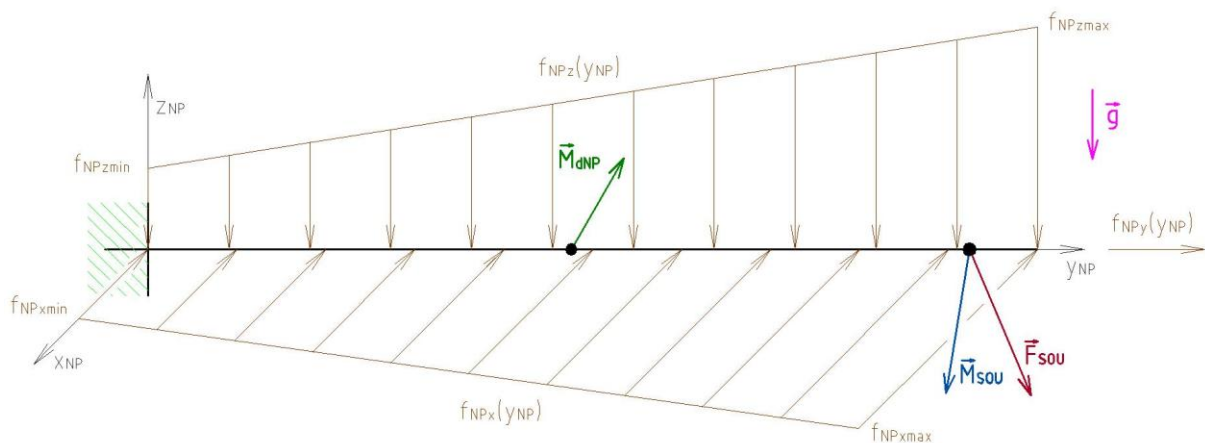
4 (0x4y4z4),

$\vec{\varepsilon}_4$  je vektor úhlového zrychlení článku 4,

$\vec{p}_{NPb} y_{NP}$  je vektor bodu střednice nosného profilu daného proměnnou  $y_{NP}$ ,

$\vec{\omega}_4$  je vektor úhlové rychlosti článku 4

$$\vec{a}_{NPb} y_{NP} = \vec{a}_4 + \vec{\varepsilon}_4 \times \vec{p}_{NPb} y_{NP} + \vec{\omega}_4 \times \vec{\omega}_4 \times \vec{p}_{NPb} y_{NP}$$



Obr. 5.2.2-18 Výpočtové schéma nosného profilu pro maximální zatížení

Postupnou úpravou vektorové rovnice se získají pro jednotlivé složky translačního zrychlení bodů střednice nosného profilu tyto vztahy:

x-ová složka:  $a_{NPbx} \cdot y_{NP} = a_{4x} - y_{NP4p} \cdot \varepsilon_{4z} + y_{NP4p} \cdot \omega_{4x} \cdot \omega_{4y} + -\varepsilon_{4z} + \omega_{4x} \cdot \omega_{4y} \cdot y_{NP}$ ,

y-ová složka:  $a_{NPby} \cdot y_{NP} = a_{4y} - y_{NP4p} \cdot \omega_{4x}^2 - y_{NP4p} \cdot \omega_{4z}^2 + -\omega_{4x}^2 - \omega_{4z}^2 \cdot y_{NP}$ ,

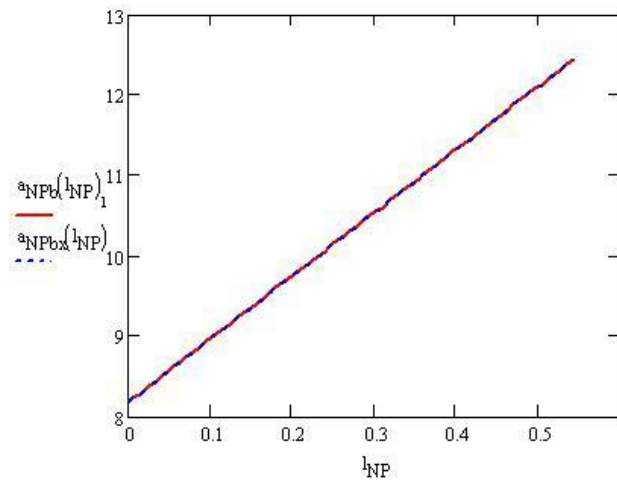
z-ová složka:  $a_{NPbz} \cdot y_{NP} = a_{4z} + y_{NP4p} \cdot \varepsilon_{4x} + y_{NP4p} \cdot \omega_{4y} \cdot \omega_{4z} + \varepsilon_{4x} + \omega_{4y} \cdot \omega_{4z} \cdot y_{NP}$ .

Z rovnic pro složky je patrné, že se jedná o rovnice lineární, které lze přepsat nahrazením absolutního členu konstantou  $q_{NP}$  a lineárního členu konstantou  $k_{NP}$  do tvarů:

x-ová složka:  $a_{NPbx} \cdot y_{NP} = q_{NPx} + k_{NPx} \cdot y_{NP}$ ,

y-ová složka:  $a_{NPby} \cdot y_{NP} = q_{NPy} + k_{NPy} \cdot y_{NP}$ ,

z-ová složka:  $a_{NPbz} \cdot y_{NP} = q_{NPz} + k_{NPz} \cdot y_{NP}$ .



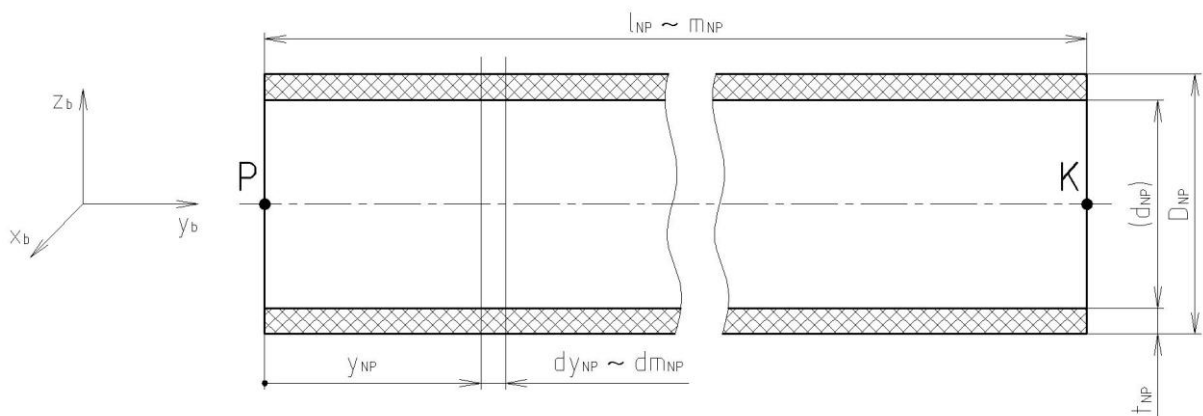
Totožnost (překrývání) průběhu x-ové složky s průběhem y-ové složky a s průběhem z-ové složky dokládá správnost provedení matematických úprav.

Vzhledem k homogenitě trubky a jejímu konstantnímu průřezu po délce platí následující závislost:

$$\frac{dy_{NP}}{l_{NP}} = \frac{dm_{NP}}{m_{NP}} \Rightarrow dm_{NP} = \frac{m_{NP}}{l_{NP}} \cdot dy_{NP},$$

kde  $m_{NP}$  je hmotnost nosného profilu.

Obr. 5.2.2-19 Průběh x-ové složky translačního zrychlení po délce střednice nosného profilu



Obr. 5.2.2-20 Schéma nosného profilu s vyznačením elementárního řezu

Na elementární část nosného profilu o délce  $dy_{NP}$  ve vzdálenosti  $y_{NP}$  od jeho počátku (viz obr. 5.2.2-20) působí v důsledku translačního zrychlení elementární síla  $d\overline{F}_{NP} \cdot y_{NP}$  určená vztahem:

$$d\overline{F}_{NP} \cdot y_{NP} = -\overline{a}_{NPb} \cdot y_{NP} \cdot dm_{NP}$$

Dosazením do této rovnice a zavedením konstanty

$$k_m = -\frac{m_{NP}}{l_{NP}} = -\frac{\rho_{NP} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{NP}^2 - d_{NP}^2 \cdot l_{NP}}{l_{NP}} = -\pi \cdot \rho_{NP} \cdot t_{NP} \cdot D_{NP} - t_{NP} \quad \text{se získá vztah:}$$

$$d\overline{F}_{NP} \cdot y_{NP} = -\overline{a}_{NPb} \cdot y_{NP} \cdot \frac{m_{NP}}{l_{NP}} \cdot dy_{NP} = k_m \cdot \overline{a}_{NPb} \cdot y_{NP} \cdot dy_{NP}$$

Průběh spojitého zatížení od translačního zrychlení proměnného po délce nosného profilu je pak určen vztahem:

$$\overline{f}_{NP} \cdot y_{NP} = \frac{d\overline{F}_{NP} \cdot y_{NP}}{dy_{NP}} = k_m \cdot \overline{a}_{NPb} \cdot y_{NP}$$

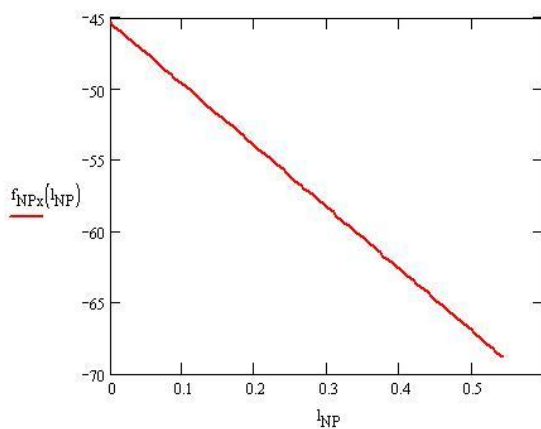
Rozepsáním tohoto vztahu do složek a dosazením konkrétních hodnot získáme následující vztahy:

$$\text{x-ová složka: } \overline{f}_{NPx} \cdot y_{NP} = k_m \cdot q_{NPx} + k_m \cdot k_{NPx} \cdot y_{NP} = -45,245 - 43,380 \cdot y_{NP}$$

$$\text{y-ová složka: } \overline{f}_{NPy} \cdot y_{NP} = k_m \cdot q_{NPy} + k_m \cdot k_{NPy} \cdot y_{NP} = 91,301 + 215,842 \cdot y_{NP}$$

$$\text{z-ová složka: } \overline{f}_{NPz} \cdot y_{NP} = k_m \cdot q_{NPz} + k_m \cdot k_{NPz} \cdot y_{NP} = -38,434 - 86,759 \cdot y_{NP}$$

*Poznámka:* Proměnná  $l_{NP}$  v grafech na obr. 5.2.2-19, 21 odpovídá  $y_{NP}$  v uvedených rovnicích..



Obr. 5.2.2-21 Průběh x-ové složky spojitého zatížení od translačního zrychlení po délce nosného profilu

Dynamický moment od úhlového zrychlení nosného profilu se vypočítá ze vztahu:

$$\overline{M}_{dNP} = -\left[ J_{NP} \cdot \overline{\varepsilon}_4 + \overline{\omega}_4 \times J_{NP} \cdot \overline{\omega}_4 \right],$$

kde ( $J_{NP}$ ) je matice setrvačnosti nosného profilu vyjádřená v básovém souřadném systému (sestavená na základě prvků odečtených z analýzy 3D modelu nosného profilu v systému Pro/ENGINEER).

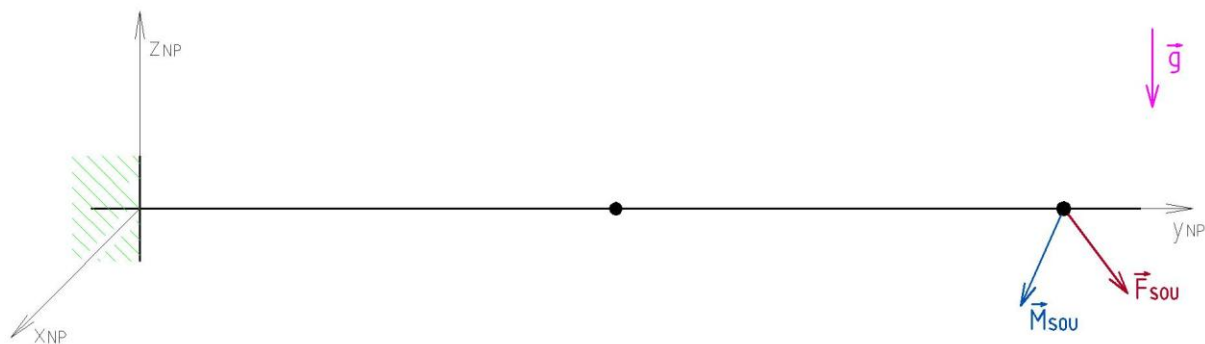
Po dosazení konkrétních hodnot získáme

velikost dynamického momentu:

$$\vec{M}_{dNP} = \begin{pmatrix} -1,460 Nm \\ -0,149 Nm \\ 0,321 Nm \end{pmatrix}.$$

Výpočet spojitého zatížení od translačního zrychlení a dynamického momentu od úhlového zrychlení nosných profilů z různých materiálů a dutých hřídelí 5. a 6. DOF je třeba doplnit výpočtem statického zatížení.

Statické zatížení nosného profilu zahrnuje pouze tíhu částí konstrukce horního ramene zakončených objektem manipulace (včetně), reprezentovanou silou  $\vec{F}_{sou}$  a momentem  $\vec{M}_{sou}$  a vlastní tíhu nosného profilu. Schéma nosného profilu zatíženého staticky je zobrazeno na obr. 5.2.2-22..



Obr. 5.2.2-22.. Výpočtové schéma nosného profilu pro statické zatížení



## Shrnutí kapitoly

V této kapitole jste poznali nové pojmy:

- Výpočtový model
- Struktura pohybové jednotky
- Prvky pohybové jednotky
- Výpočtové schéma statického a dynamického zatížení
- Souřadné systémy
- Program Mathcad

Na příkladech konstrukcí pohybových jednotek a výpočtových schématech bylo ukázáno propojení a aplikace poznatků z oblasti robotiky ostatních disciplín – Mechanika, Části a mechanismy strojů, Pružnost a pevnost aj.





### **Kontrolní otázka**

- 1) Jak přejdete od modelu konstrukčního uzlu ve 2 nebo 3D k výpočtovému modelu?
- 2) Z čeho sestává maximální zatížení profilu ramene vybrané pohybové jednotky (zde)?



### **Úkol k řešení**

Porovnejte v příkladu uvedená konstrukční řešení pohybových jednotek a odpovídající výpočtové modely a analyzujte rozdíly, případně jiné varianty řešení.

## 6. PŘÍLOHY




## Další zdroje

- [1] Skařupa, J.-Mostýn,V.: Metody a prostředky navrhování průmyslových a servisních robotů. Vydanie I., Košice: Edícia vedeckej a odbornej literatúry – Strojnícka fakulta TU v Košiciach, Vienala Košice, 2002; [ISBN 80-88922 – 55 - 0] 190 str.
- [2] Skařupa, J.-Mostýn,V.: Teorie průmyslových robotů. Vydanie I., Košice: Edícia vedeckej a odbornej literatúry – Strojnícka fakulta TU v Košiciach, Vienala Košice, 2000; [ISBN 80 – 88922 – 35 – 6] 150 str.
- [3] Skařupa, J.: Průmyslové roboty a manipulátory. Operační program Rozvoj lidských zdrojů. Název: E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů CZ.O4.01.3/3.2.15.2/0326. Ostrava 2007 [ISBN 978-80-248-1522-0] 260 str.
- [4] Skařupa, J.: Kreativita a inovační myšlení v konstruování. Operační program Rozvoj lidských zdrojů. Název: Inovace vzdělávání na Fakultě strojní zaměřené na osobnostní rozvoj studentů CZ.O4.1.03/3.2.15.3/0415. Ostrava 2007 [ISBN 978-80-248-1717-0] 230 str.
- [5] Angeles, J.: Fundamentals of Robotic, Mechanical systems, Second Edition, Springer, 2002, [ISBN 0-387 – 95368 - X] 513 p.
- [6] Lung-Wen Tsai: Robot Analysis, John Wiley & Sons, 1999, [ISBN 0-471 – 32593 - 7] 497 str.
- [7] Konečný, Z. Technologie Top Down Design v návrhu struktur robotů. AT&P journal: Bratislava 2005, HMH s.r.o. Bratislava, ročník XII, číslo 2/2005, s. 43-44. ISSN 1335-2237
- [8] Konečný, Z. Models of robots mechanism in CAD system Pro/ENGINEER. Acta Mechanica Slovaca: Strojnícká fakulta technickej university v Košiciach, Košice, 2-A/2006 ROBTEP 2006, ročník 10, str. 239 -242. ISSN 1335-2393
- [9] Konečný, Z. Krys, V. Creation of the rotational joint for the strength calculation purposes. Acta Mechanica Slovaca: Strojnícká fakulta technickej university v Košiciach, Košice, 2-A/2006 ROBTEP 2006, ročník 10, str. 243 -247. ISSN 1335-2393
- [10] CRAIG, J.J. Introduction to Robotics Mechanics & Control. USA: Addison-Wesley,1986, ISBN 0-201-10326-5
- [11] FROLOV,K.,V.,VOROBĚV,J.,I.: Mechanika promyšlených robotov. Rasčet i projektirovannije mehanizmov. Moskva, Vysšaja škola, 1988.
- [12] ISII,T.-SIMOJAMA,I.-INOUE,H.-HIROSE,M.-NAKADZIMA,N.: Mechatronika. Tokyo, Iwanami Shoten Publishers 1985

- 
- [13] MOSTÝN, V.-SKAŘUPA, J.: Improving of the Mechanical Model Accuracy for Simulation Purposes. In: Mechatronics č. 2/2001, Elsevier Science Velká Británie
- [14] RIVIN, E. I.: Mechanical design of robots. New York, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [15] SCHILLING, R.J. Fundamentals of Robotics, Analysis and Control. USA: Prentice-Hall Inc., 1990, ISBN 0-13-334376-6
- [16] SCHRAFT, R., D., VOLZ, H.: Serviceroboter. Innovative Technik in Dienstleistung und Versorgung. Springer, Berlin, 1996, str. 232. ISBN 3-540-59359-4.
- [17] SCHRAFT, R., D., SCHMIERER, G.: Serviceroboter. Produkte, Szenarien, Visionen. Springer, Berlin, 1998, str. 216. ISBN 3-540-64330-3.
- [18] Dejl, Z.: Konstrukce strojů a zařízení I., MONTANEX, Ostrava, 2000
- [19] SKAŘUPA, J.: Metody koncepčního návrhu manipulátorů průmyslových robotů. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, roč. XLIV, řada strojní, č.1/98, Ostrava, 1998, s. 47-52; [ISSN 1210 - 0471]
- [20] SKAŘUPA, J.: Development and innovation of robotics systems. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, roč. XLV, řada strojní, č.2/99, Ostrava, 1999, s. 121-126; [ISSN 1210 - 0471]
- [21] SKAŘUPA, J.-MOSTÝN,V.: Model parametrization as a method of properties transfer on new-proposed robots. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, roč. XLVI, řada strojní, č.1/2000, Ostrava 2000, s. 49-54; [ISSN 1210 - 0471]
- [22] SKAŘUPA,J.-MOSTÝN,V.: CAD systémy a postupy prediktivního inženýrství aplikované na vývoj PRaM. In: Zborník vedeckých prác Sjf TU Košice, 3. medz. konf. "ROBTEP 97 - Automatizácia/Robotika v teórii a praxi", Prešov 1997, s. 44 - 46; [ISBN 80-7099-293-X]
- [23] SKAŘUPA,J.-MOSTÝN,V.: Analysis and definition of task for development and innovation of robotic systems. In: Acta Mechanica Slovaca, roč.1, č.1/2000, Sjf TU Košice, 2000, s. 39-46; [ISSN 1335-2393]
- [24] SKAŘUPA,J: Techoptimizer – the tool for innovation and new solution in robotics. In: Sborník mezinárodní vědecké konference fakulty strojní, sekce Výrobní systémy s průmyslovými roboty, FS VŠB-TUO Ostrava, Ostrava 2000, s.52.1-52.7 [ISBN 80-7078-799-6]
- [25] SKAŘUPA,J: Service robots – formulation of a task order for development. In: Sborník mezinárodní vědecké konference fakulty strojní, sekce Výrobní systémy s průmyslovými roboty, FS VŠB-TUO Ostrava, Ostrava 2000, s.54.1-54.6 [ISBN 80-7078-799-6]
- [26] SKAŘUPA,J.-MOSTÝN,V.: Design and innovation methods of robotic systems. In: Sborník mezinárodního kongresu MATAR Praha 2000, sekce
-

- 
- Průmyslové roboty a automatizace, FS ČVUT Praha, Praha 2000, s.36-42 [ISBN 80-238-5539-5]
- [27] SKAŘUPA,J.-MOSTÝN,V.: The method of properties transfer on new-proposed robots. In: 16th International Conference on Production Research ICPR – 16, „Production and Technology for the Benefit of Mankind, Protecting the Nature and Life on the Earth“ Conference CD-ROM p. 13, CTU Prague, Prague 2001, s.xx-xx (přijato do sborníku) [ISBN 80-02-01438-3]
- [28] SKAŘUPA,J.: Servisní roboty – nové přístupy k zadání úkolů pro vývoj. In: Sborník konference AUTOS 2001, Automatizované systémy. TERIS 2001, ČVUT Praha, aj., Praha 2001, s.98-104 [ISSN 1212-5706]
- [29] SKAŘUPA,J.: Počítačová podpora předběžného návrhu akčního subsystému modulárních PR. In: 2. mez. konf. "ROBTEP 95 – Automatizácia/Robotika v teórii a praxi", SjF TU Košice, Prešov 1995, s. 61-64
- [30] SKAŘUPA,J.: Destrukční robotizované systémy. In: 2. mez. konf. "ROBTEP 95 – Automatizácia/Robotika v teórii a praxi", SjF TU Košice, Prešov 1995, s. 169-172
- [31] SKAŘUPA, J.: Some Aspects of Computer Support in a Design of Modular Structures of Industrial Robots. In: 2. mez. konf. "COMTEP 96 - Počítače v teórii a praxi", SjF TU Košice, Prešov 1996, s. 42 - 44; [ISBN 80-7099-261-1]
- [32] SKAŘUPA, J.: Research on robotized systems for support of new water jet technology applications. In: Geomechanics 96, A.,A.,Balkema/Rotterdam/Brookfield 1997, s. 309 - 314; [ISBN 90 5410 921 1]
- [33] SKAŘUPA,J.- MOSTÝN,V.: Počítačová podpora vybraných etap koncepčního návrhu mechatronických systémů. In: 3. mez. konf. "COMTEP 98 - Počítače v teórii a praxi", SjF TU Košice, Prešov 1998, s. 225 - 228; [ISBN 80-7099-388-X]
- [34] SKAŘUPA, J.: Selected questions of the design robotized destruction systems with high pressure water jet. In: 6th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'97, University of Cassino, Cassino 1997, Italy, s. 417-422; [ISBN 88-87054-00-2]
- [35] SKAŘUPA,J.-MOSTÝN,V.: Analysis and definition of task for development and innovation of robotic systems. In: 4. celošt. konf. s mez. účastí "ROBTEP 99 – Automatizácia/Robotika v teórii a praxi", SjF TU Košice, Prešov 1999, s. 265-272 [ISBN 80-7099-453-3]
- [36] SKAŘUPA,J.-MOSTÝN,V.: Service robots - formulation of task for development and tools of solutions. In: 10th Int. Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD 2001, Vienna University of Technology, Vienna 2001, Austria, (Abstrakts s. 14), CD ROM s. 6;
- [37] SKAŘUPA, J.- MOSTÝN, V. – KOLEKTIV: Rozvoj metod počítačové
-

- 
- podpory pro návrh mechatronických systémů. Grantový projekt Fondu rozvoje vysokých škol G1/0577/1999. (zr). Závěrečná zpráva 12/1999, kat. robototechniky FS VŠB – TU Ostrava, Ostrava 1999.
- [38] SKAŘUPA, J.: Uplatnění nových vzdělávacích metod technické tvůrčí práce. Grantový projekt Fondu rozvoje vysokých škol F1/0578/1999. (zr). Závěrečná zpráva 12/1999, kat. robototechniky FS VŠB – TU Ostrava, Ostrava 1999.
- [39] SKAŘUPA, J. – MOSTÝN, V.: Uplatnění nových vědeckých poznatků v předmětu Navrhování mechatronických systémů. Grantový projekt Fondu rozvoje vysokých škol F1/0643/1999. (zr). Závěrečná zpráva 12/1999, kat. robototechniky FS VŠB – TU Ostrava, Ostrava 1999.
- [40] SKAŘUPA, J.: Robotizované destrukční systémy s progresivními roboty. Grantový projekt Fondu rozvoje vysokých škol F1/3064/1994. (zr). Závěrečná zpráva 12/1994, kat. robototechniky FS VŠB – TU Ostrava, Ostrava 1994.
- [41] SZTEFEK, Jan. *Analýza možností užití kompozitů v konstrukci robotů*. Ostrava, 209. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Vedoucí práce Jiří Skařupa.
- [42] TOMKINSON, D.-HORNE, J.: *Mechatronics Engineering*. New York aj., McGraw-Hill, 1995, s. 201
- [43] VALÁŠEK, M. a kol.: *Mechatronika*. Praha, Vydavatelství ČVUT 1995, s. 153.
- [44] WANNER, M.-CH.: *Rechnergestützte Verfahren zur Auslegung der Mechanik von Industrierobotern*. Berlin, Springer-Verlag, 1989.
- [45] WARNECKE, H., SCHRAFT, R.: *Industrieroboter Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1990. 348 p.
- [46] [Http://www.euron.org](http://www.euron.org)

 Klíč k řešení	
	<b>Blok 1</b>
O 1.1-1	V čem spočívá odlišnost robotu oproti manipulátoru? <i>Manipulátor má nulovou inteligenci.</i>
O 1.1-2	Jak se liší robot sériový od paralelního? <i>Řazením pohybových jednotek.</i>
O 1.1-3	Čím se odlišují průmyslové a servisní roboty? <i>Účelem – řeší automatizaci servisních činností, musí mít k tomu vhodný technologický modul a odpovídající pohyb.</i>
O 1.1-4	Jaké jsou fáze technického života robotů? <i>Nápad, návrh, realizace, provoz, likvidace.</i>
O 1.1-5	Která témata prerekvizit jsou pro předmět Roboty a manipulátory zvláště důležitá a proč? <i>Znalosti konstrukce PRaM, Metodiky konstruování, Částí a mechanismů strojů.</i>
O 1.2-2	Jaká jsou kritéria pro volbu kinematické struktury? <i>Tvar a velikost pracovního prostoru, požadovaná dráha těžiště objektu manipulace, požadovaná přesnost polohování OM, požadovaná orientace OM, volba druhu pohonu jednotlivých os</i>
O 1.2-3	Co je obecný model postupu konstruování a v čem je jeho význam? <i>Stanovení funkční a orgánové struktury, propracování konstrukční dokumentace, vše ve variantách, vyhodnocení variant a volba konečné a její optimalizace.</i>
O 1.2-4	Na čem je založena funkční a nákladová analýza? <i>Na analýze funkcí a nákladů a postupu hledání zlepšování funkcí a snižování nákladů.</i>
O 1.2-5	Kdy je výhodné užít metodiku TRIZ? <i>Pro hledání nových řešení nebo výrazných inovací.</i>

O 1.3-1	<p>Jaké jsou základní shody a odlišnosti mezi sériovými a paralelními koncepcemi průmyslových robotů?</p> <p><i>Odlišná je struktura ramen robotu, z čehož vyplývají odlišnosti výstupních parametrů – pracovní rychlosti, přesnost, tuhost, pracovní prostor. Shody jsou v řešení jednotlivých kloubů.</i></p>
O 1.3-2	<p>Jaké jsou základní shody a odlišnosti mezi průmyslovými a servisními roboty?</p> <p><i>Účelem – řeší automatizaci servisních činností, musí mít k tomu vhodný technologický modul a odpovídající pohyb.</i></p>
O 1.3-3	<p>Jaké rozpory a problémy se vyskytují při návrhu jednotlivých druhů robotů?</p> <p><i>Rozpory mezi požadavky kladenými na automatizaci činností a možnostmi jejich realizace danými stavem techniky.</i></p>
O 1.3-4	<p>Jaké jsou rozdíly mezi roboty a jinými mechatronickými systémy?</p> <p><i>V závislosti na účelu disponují vyšší univerzalitou aplikací a funkcí.</i></p>
<b>Blok 2</b>	
O 2.1-1	<p>Které jsou výchozí parametry při návrhu vyvážení rotační pohybové jednotky?</p> <p><i>Tíhové a setrvačné účinky pohybujících se hmot, jejich rychlosti a zrychlení a účinnosti pohonu.</i></p>
O 2.1-2	<p>Který je výstupní parametr pro konstrukční návrh pružinového vyvažovacího systému?</p> <p><i>Konstanta tuhosti pružiny.</i></p>
O 2.1-3	<p>Jak je definováno <math>\lambda</math> při vyvážení rotační pohybové jednotky PVS (pružinovým vyvažovacím systémem)?</p> <p><i>V hodnotách měrného výkonu a rozsahu regulace otáček.</i></p>
O 2.1-4	<p>Kterých základních vlastností Archimedovy spirály využijete pro vyvážení manipulátoru robotu?</p> <p><i>Změny poloměru (ramena momentu) při otáčení vačky s Archimedovou spirálou.</i></p>
O 2.1-5	<p>Jak je definována kvalita vyvážení?</p> <p><i>Jako hodnota <math>\theta=1</math> - (poměr absolutní hodnoty zlomku v jehož čitateli je součet momentu z nevyvážení tíhových účinků vlastních hmot konstrukce a momentu vyvažovacího systému a ve jmenovateli parametr nevyvážení</i></p>
O 2.2-1	<p>Jak se liší pantograf od paralelogramu?</p> <p><i>Paralelogram má protilehlé strany stejně dlouhé, pantograf má některé ze stran prodlouženy za klouby původního paralelogramu.</i></p>
O 2.2-2	<p>Z čeho vychází stanovení délek na pantografu?</p> <p><i>Z podobnosti trojúhelníků vzniklých nad pracovní přímkou a jejími úseky (3 trojúhelníky).</i></p>



O 2.2-3	Které jsou základní parametry pro návrh pantografu? <i>Převodový poměr <math>i</math> a konstrukční parametr <math>\lambda</math> a předepsaný pracovní prostor.</i>
O 2.2-4	Z čeho se vychází při návrhu efektoru? <i>Z poznatků o objektu manipulace, použitém robotu a o manipulační činnosti.</i>
<b>Blok 3</b>	
O 3.1-1	Proč se u akčního systému provádí přednostně deformační výpočet prvků? <i>Pro dosažení požadované přesnosti polohování musí být minimalizovány deformace, pak následný výpočet pevnostní vykazuje předimenzování nad dovolené hodnoty napjatosti.</i>
O 3.1-2	K čemu slouží následný pevnostní výpočet? <i>Protože jde o manipulační zařízení kde jde o bezpečnost obsluhy a případné poškození okolních zařízení, musí být doloženo výpočtem, že robot je bezpečně navržen.</i>
O 3.1-3	Jaký má dnes význam analytický výpočet? <i>Získané vztahy a relace mezi parametry mají širší výpovědní hodnotu a umožňují předpovědi pro budoucí návrhy podobných konstrukcí – vytvářejí základ pro tzv know how.</i>
O 3.1-4	O co jde při funkčním výpočtu? <i>Dokladuje kvalitu funkcí zařízení odvozenou ze vstupních parametrů pro návrh.</i>
<b>Blok 4</b>	
O 4.1-1	Co je to servisní činnost? <i>Každá činnost, která má servisní (nevýrobní) charakter, ať již pro obsluhu technických systémů (údržba), nebo lidí (regenerace, obsluha imobilních osob).</i>
O 4.1-2	Jaké struktury pro návrh robotu potřebujeme zpracovat z analýzy servisních činností? <i>Funkční a orgánové struktury.</i>
O 4.1-3	Co to jsou S křivky a k čemu slouží? <i>Vyjadřují aktuální kvalitu dané konstrukce po stránce ekonomické i technické. V průběhu životnosti se hodnotí, při zlepšování konstrukce v obou kritériích posouvá ke 100 %.</i>
O 4.1-4	O co jde při funkčním výpočtu? <i>O průkaz funkčnosti zařízení dodržáním požadovaných rozhodujících parametrů.</i>
O 4.2-1	Uveďte základní požadavky a kritéria pro návrh průmyslových robotů? <i>Kompaktnost, přesnost, tuhost, rychloběžnost.</i>
O 4.2-2	Ze kterých parametrů vychází funkční výpočet servisních robotů? <i>Podle typu servisní činnosti takových parametrů, které jsou odvozeny z kvality</i>

	<i>prováděné činnosti (technologie – např.: rychlost provedení, hmotnost manipulovaného objektu, dosažitelnost potřebných poloh, aj.)</i>
O 4.2-3	<p>Jaké jsou principy maticového výpočtu sil a chyb modulárních robotů?</p> <p><i>Pro předběžný návrh se vychází ze souřadných systémů umístěných v kloubech se vzájemně rovnoběžných os ve všech kloubech robotu a z transformace složek sil a momentů mezi jednotlivými souřadnými systémy. V maticích lze snadno identifikovat které účinky jsou nejnepríznivější a je nutné se jimi zabývat.</i></p>
O 4.2-4	<p>Jak lze této metody užít k vytvoření know how?</p> <p><i>Pro jednotlivé typy robotů lze provést předběžné sestavení matic a posoudit vhodnost jejich užití i se závěry k jednotlivým vlivům na konstrukci ex ante.</i></p>
O 4.3-1	<p>Jaký je význam trimovacího koeficientu?</p> <p><i>Ukazuje směr potřebného zkvalitňování konstrukce.</i></p>
O 4.3-2	<p>Jak konkrétně stanovíte trimovací koeficient??</p> <p><i>Hodnocení kvality a úrovně funkcí dělíme hodnocením vzniklých obtíží (problémů při návrhu i realizaci) a vynaložených nákladů.</i></p>
O 4.3-3	<p>Co je Manažer problémů?</p> <p><i>Po analýze produktu pomocí trimovacího koeficientu získáme pořadí prvků, kterými je nutné se zabývat při optimalizaci konstrukce a při dalším vývoji. Ke zlepšení konstrukce Manažer problémů doporučuje využití modulů syntézy TechOptimizeru.</i></p>
O 4.3-4	<p>Na čem je postavena analýza produktu?</p> <p><i>Na hodnocení vztahů (působení mezi jednotlivými prvky konstrukce). Podle stupně poznání konstrukce lze použít pojmů fuzzy logiky (moc, málo, více, aj.) až po funkční (matematický) nebo grafický popis více či méně přesných závislostí.</i></p>
O 4.3-5	<p>Na čem je postaven modul Efekty?</p> <p><i>Na znalosti zákonů a zákonitostí jednotlivých vědních disciplin</i></p>
O 4.3-6	<p>Co je Altšulerova matice?</p> <p><i>Na základě analýzy mnoha patentů a vynálezů byly zjištěny obecnější relace mezi parametry objektů, pro řešení technických systémů, jde-li o tzv. technické rozpory (problémy), tj. takové kdy víme jak zlepšit určitý parametr konstrukce ovšem jen na úkor jiného, který se zhorší. K tomu jsme schopni najít v Altšulerově matici tzv. <b>princip</b>(y) – tj. doporučení jak to na základě zkušeností provést.</i></p>
	<b>Blok 5</b>
O 5.1-1	<p>Jak získáte informace o podobných již řešených problémech?</p> <p><i>GFI poskytuje přes svůj vyhledávač vlastní databáze, ze kterých lze tyto poznatky extrahovat buď pomocí klíčových slov nebo přesněji pomocí položeného dotazu v tzv. přirozeném jazyce.</i></p>

O 5.1-2	<p>Jak se formulují otázky pro zkoumání dosažitelných informací?</p> <p><i>Pomocí položeného dotazu v tzv. přirozeném jazyce. Např.: Jak zvýšit tuhost robotu? Otázka musí být položena v angličtině.</i></p>
O 5.1-3	<p>Co je jádro problému?</p> <p><i>Mnoho v praxi řešených problémů identifikovaných v technických systémech lze řešit v různých úrovních řetězce, vytvořeného odpověďmi na otázku proč tento problém vznikl(?), čímž se posuneme k řešení problému v jiné úrovni, ale řešíme i problém původně definovaný. Jestliže jsme u jádra věci nedokážeme již získat další odpověď na otázku proč.</i></p>
O 5.1-4	<p>Co jsou pracovní postupy GFI?</p> <p><i>Pracovními postupy rozumíme předpis kroků při řešení technického problému, které využívají jednotlivých modulů programu GFI tak jak jsou připraveny přímo v programu nebo upraveny z těchto modulů uživatelem.</i></p>
O 5.2-1	<p>Jak přejdete od modelu konstrukčního uzlu ve 2D nebo 3D k výpočtovému modelu?</p> <p><i>Výpočtový model získáme z konstrukčního modelu zjednodušením na jednočárovou skicu se zakótovanými působišti silových účinků.</i></p>
O 5.2-2	<p>Z čeho sestává maximální zatížení profilu ramene vybrané pohybové jednotky?</p> <p><i>Maximální zatížení profilu ramene konkrétní pohybové jednotky (platí pro pohybovou jednotku v obr. 5.2.2-17) zahrnuje:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>dynamické a statické účinky od následujících částí konstrukce horního ramene včetně objektu manipulace,</i></li> <li>• <i>vlastní tíhu nosného profilu,</i></li> <li>• <i>proměnné spojité zatížení od pohybu nosného profilu (v důsledku translačního zrychlení),</i></li> <li>• <i>dynamický moment od pohybu nosného profilu (v (v důsledku úhlového zrychlení).</i></li> </ul>