

## Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

## Fakulta strojní



# KINEMATICKÉ A ZÁKLADNÍ DYNAMICKÉ ANALÝZY V CAD SYSTÉMU CREO

## Učební text a návody do cvičení předmětu "CAD II"

Václav Krys, Jakub Mžik, Tomáš Chamrad

## Ostrava 2012



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu OP VK CZ.1.07/2.3.00/09.0147 "Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumu".

Název:Kinematické a základní dynamické analýzy v CAD systému CREOAutor:Václav Krys, Jakub Mžik, Tomáš ChamradVydání:první, 2012

Počet stran: 137

Náklad:

Studijní materiály pro studijní obor Robotika Fakulty strojní

Jazyková korektura: nebyla provedena.



Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název:Vzdělávání lidských zdrojů pro rozvoj týmů ve vývoji a výzkumuČíslo:CZ.1.07/2.3.00/09.0147Realizace:Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

- © Václav Krys, Jakub Mžik, Tomáš Chamrad
- © Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava

#### ISBN 978-80-248-2733-9

#### **POKYNY KE STUDIU**

#### CAD II

Pro předmět 5. semestru oboru Robotika jste obdrželi studijní balík obsahující:

• integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu,

#### Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětu CAD I.

#### Cíl učební opory

Cílem je seznámení se základními pojmy z oblasti tvorby virtuálních modelů mechanismů pro jejich kinematické a dynamické analýzy. Po prostudování modulu by měl student být schopen připravit s využitím CAD systému CREO virtuální model mechanismu pro jeho následnou kinematickou, případně dynamickou analýzu. Sestavit zadání požadované analýzy a simulovat vnější a vnitřní silové účinky působící na analyzovaný mechanismus. Studenti se detailně seznámí s modulem MECHANISM CAD systému CREO.

#### Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do bakalářského studia oboru Robotika studijního programu B2341 Strojírenství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, 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 bohaté zkušenosti.



- Lefinovat ...
- Vyřešit ...

Ihned 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 pojmů

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



## Otázky

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



## Úlohy 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 hlavním významem předmětu schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti pro řešení reálných situací.



## Klíč k řešení

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek 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.

Úspěšné a příjemné studium s tímto učebním textem Vám přeje kolektiv autorů.

Václav Krys, Jakub Mžik, Tomáš Chamrad

## OBSAH

1	Т	<b>VORB</b> A	A SESTAV MECHANISMŮ	10
	1.1	1 Sestavy mechanismů bez kinematických vazeb		10
		1.1.1 Základní přístupy k tvorbě sestavy		11
		1.1.2	Vložení prvního komponentu do sestavy	12
		1.1.3	Vkládání dalších komponentů do sestavy	13
	1.2	Sestav	y mechanismů s kinematickými vazbami	15
		1.2.1	První komponent	15
		1.2.2	Nastavení parametrů pohybové osy kinematické vazby	17
		•	Omezení translace	17
		•	Omezení rotace	18
		•	Přejmenování vazby	19
	1.3	Kinem	atické vazby a jejich využití	20
		1.3.1	Vazba Pin	21
		•	Příklad sestavy s vazbou typu Pin	21
		1.3.2	Vazba Slider	24
		•	Příklad sestavy s vazbou typu Slider	24
		1.3.3	Vazba Rigid	26
		•	Příklad sestavy s vazbou typu Slider	27
		1.3.4	Vazba Slot	27
		•	Příklad sestavy s vazbou typu Slot	28
		1.3.5	Vazba Cylinder	29
		•	Příklad sestavy s vazbou typu Cylinder	30
		1.3.6	Vazba Planar	32
		•	Příklad sestavy s vazbou typu Planar	32
		1.3.7	Vazba Ball	33
		•	Příklad sestavy s vazbou typu Ball	33
		1.3.8	Vazba Bearing	35
		1.3.9	Vazba Gimbal	35
		1.3.10	Vazba Weld	36
		1.3.11	Vazba General	36
		1.3.12	Vazba 6DOF	36

	1.4 Sestavy z pohledu kinematických a dynamických analýz		38	
		1.4.1	Nastavení a kontrola materiálových vlastností modelů	38
		•	Nastavení materiálových vlastností dílů	38
		•	Kontrola materiálových vlastností dílů v sestavě	41
		1.4.2	Vytváření referenčních rovin a os u importovaných modelů	43
2	N	<b>10DUL</b>	MECHANISM	48
	2.1	<b>Popis</b>	prostředí modulu MECHANISM	48
	2.2	Tvorb	a simulačního modelu	53
		2.2.1	Tvorba kinematických spojení (Connections)	53
		•	Tvorba spojení pomocí ozubených převodů (Gears)	53
		•	Tvorba spojení pomocí řemene či pásu (Belts)	56
		•	Tvorba spojení pomocí kontaktu těles (3D Contacts)	59
		•	Tvorba spojení pomocí vačky (Cams)	61
		2.2.2	Vkládání pružin, tlumičů, silových účinků a pohonů	63
		•	Vkládání pružin (Springs)	63
		•	Vkládání tlumičů (Dampers)	64
		•	Vkládání sil a momentů (Force/Torque)	65
		•	Vkládání servopohonů (Servo Motors)	67
		•	Simulace momentového řízení (Force Motors)	69
		2.2.3	Vlastnosti a podmínky, nastavení gravitace (Properties and Conditions)	70
		•	Informace o hmotnostních parametrech (Mass Properties)	70
		•	Nastavení gravitace (Gravity)	71
		•	Nastavení počátečních podmínek (Initial Conditions)	71
		•	Podmínky předčasného ukončení analýzy (Termination Conditions)	73
	2.3	Defini	ce analýz a veličin	75
		2.3.1	Kinematická analýza	75
		2.3.2	Dynamická analýza	77
		2.3.3	Přehrávání výsledků analýzy	78
		2.3.4	Definice veličin	80
		•	Systémové veličiny a <b>redundance</b>	85
		2.3.5	Vykreslení křivky trajektorie	87
3	Р	ŘÍKLA	DY KINEMATICKÝCH A DYNAMICKÝCH ANALÝZ	91
	3.1	Kinem	natická a dynamická analýza mechanismu kliky	91

	3.1.1	Kinematická analýza posunu palce	92
	•	Vytvoření "Measure Feature"	92
	•	Definice pohonu rotace kliky	93
	•	Nastavení snímku mechanismu (Snapshot)	94
	•	Definice kinematické analýzy	95
	•	Grafy výsledků kinematické analýzy	96
	•	Závěr kinematické analýzy	97
	3.1.2	Dynamická analýza síly na stisknutí kliky	98
	•	Úprava sestavy mechanismu a přidání pružiny	98
	•	Postup odečtení potřebné síly	99
	•	Odstranění redundancí mechanismu	100
	•	Definice počátečních podmínek	102
	•	Definice podmínky pro předčasné ukončení analýzy	102
	•	Nastavení gravitačních účinků	103
	•	Nastavení dynamické analýzy momentu na klice	104
	•	Grafy výsledků dynamické analýzy momentu na klice	105
	•	Závěr dynamické analýzy momentu na klice	106
	3.1.3	Ověření výsledku aplikací síly na kliku	106
	•	Definice síly na konci kliky a jejího průběhu v čase	106
	•	Nastavení dynamické analýzy se silou na konci kliky	107
	•	Grafy výsledků dynamické analýzy se silou na konci kliky	108
	•	Přidání tlumiče	109
	•	Grafy výsledků dynamické analýzy se silou na konci kliky a tlumičem	110
3.2	Kinem	atická a dynamická analýza vačkového mechanismu	. 111
	•	Tvorba pohonu	111
	•	Definice počátečních podmínek	112
	•	Definice podmínek pro předčasné ukončení analýzy	113
	•	Nastavení gravitace	114
	•	Kinematická analýza	114
	•	Dynamická analýza	115
	•	Tvorba veličin	116
	•	Závěr	119
3.3	Kinem	atická a dynamická analýza hydraulického ramene	. 121

	•	Tvorba sestavy
	•	Tvorba simulačního modelu pro kinematickou analýzu 125
	•	Kinematická analýza, inverzní úloha kinematiky 127
	•	Kinematická analýza, tvorba veličin 129
	•	Tvorba simulačního modelu pro dynamickou analýzu130
	•	Dynamická analýza, přímá úloha kinematiky 131
	•	Dynamická analýza, tvorba veličin132
	•	Závěr
4	ZÁVĚR	

## 1 TVORBA SESTAV MECHANISMŮ

Základem úspěšné analýzy mechanismu v prostředí CAD systému CREO je správně vytvořená sestava jeho 3D modelu. Je proto nezbytné znovu připomenout techniky tvorby sestav.

#### 1.1 Sestavy mechanismů bez kinematických vazeb





Jedním z klíčových předpokladů pro práci se systémem CREO je správné nastavení pracovního adresáře. Hlavní sestava řešeného projektu by měla mít svůj pracovní adresář, ve kterém budou všechny součásti hlavní sestavy a dále podsestavy a všechny součásti podsestav.



Obr. 1-1 Nastavení pracovního adresáře

Vyvolat nabídku pro vytvoření nové sestavy je ve standardním prostředí CREO možné třemi způsoby. V roletovém menu FILE a v něm položka NEW. Dále kliknutím na ikonu NEW v panelu nástrojů. Poslední možností je klávesová zkratka Ctrl+N.

Dojde k vyvolání dialogového okna znázorněného na Obr. 1-2.

New X			
Type Sketch Part Assembly Manufacturing Torawing Torawing Format Report Diagram Notebook Markup	Sub-type Design Interchange Verify Process Plan NC Model Mold Layout Ext. Simp.Rep.		
Name valec-festo-sestava Common Name Use default template OK Cancel			

Obr. 1-2 Založení nového souboru (modelu)

Standardně je přednastaveno, že se bude zakládat nový "Part" (součást). Pro vytvoření sestavy je potřeba aktivovat položku "Assembly" (sestava). Do položky "Name" pak vepsat název nové sestavy. Je potřeba mít na paměti, že v CREU v názvu souboru nelze používat diakritiku a mezery. Náhradou za mezeru se používá podtržítko. Název souboru doporučuji vždy přepsat na nějaký systematický název a nenechávat tam předem nastavenou hodnotu. Přejmenovat vytvořený soubor však lze i následně. Nyní již lze kliknutím na OK dialogové menu potvrdit a přejít do vlastního prostředí modeláře. Dojde k načtení nastavené "defaultní" šablony sestavy. Pokud je vyžadováno načtení jiné šablony, je nutné zrušit zatržení položky "Use default template". Poté je možno si vybrat z připravených šablon s různými jednotkami a dalšími nastavenými parametry.

Detailním popisem s návody na vytvoření nové sestavy jsou popsány ve výukových materiálech pro předmět CAD I. Dále budou zmíněny a připomenuty informace ohledně sestav, které jsou důležité ve vztahu ke kinematickým a dynamickým analýzám mechanismů.

#### 1.1.1 Základní přístupy k tvorbě sestavy

Nejčastěji je využívána technika vkládání již vytvořených součástí (partů) do sestavy pomoci příkazu ASSEMBLE, který je dostupný prostřednictvím ikony v panelu Model – Component (Obr. 1-3).



Obr. 1-3 Ikona příkazu ASSEMBLE

Aktivací příkazu dojde k otevření prohlížeče, kde se zobrazí všechny součásti a sestavy, které je možno do tvořené sestavy vložit z aktuálně nastaveného pracovního adresáře.

Častým problémem zejména začínajících uživatelů je špatná volba prvního vkládaného komponentu do sestavy. Šroubek promodelovaný do sebemenšího detailu, nebo např. pojistný kroužek nikdy nebude vhodný jako první komponent vložený do sestavy. Mělo by se jednat o komponent, který daný technický systém spojuje se "zemí" nebo dalším prvkem systému. Na příklad u uchopovacího efektoru nelze označit za vhodný první komponent hlavní sestavy čelist. Prvním komponentem efektoru by měl být jeho nosný rám, nebo např. protikus příruby manipulátoru. Lze namítnout, že v první fázi návrhu nového efektoru je nutné na základě tvaru manipulovaného objektu navrhnout čelist a až po té zbytek efektoru. Ano, ale ve chvíli, kdy je zřejmé, jak bude vypadat nosný rám efektoru, je vhodné pracovní sestavu přeskládat. V počátečních stádiích tvorby nového technického systému je toto "přeskládávání" a přeorganizovávání sestav běžné a zcela logické.

Druhým způsobem tvorby sestav je vytváření součástí přímo v sestavě pomocí příkazu CREATE, jehož ikona je napravo od ikony příkazu ASSEMBLE (Obr. 1-4).



Obr. 1-4 Ikona příkazu CREATE

Tento způsob tvorby sestavy se využívá zejména při uplatnění modelovací techniky TOP DOWN DESIGN, která je při dobrém zvládnutí mimořádně efektivní. Nicméně dobré zvládnutí této metody plánování tvorby sestavy je značně komplikované a vyžaduje rozsáhlé zkušenosti s tvorbou sestav i řešeného technického systému.

V případě tvorby sestavy vytvářením komponent již většinou z podstaty tohoto modelovacího přístupu k problémům se vkládáním prvního komponentu nedochází.

Ať už je sestava tvořena skládáním připravených součástí nebo jejich vytvářením v sestavě, případně kombinací obou technik (nejčastější), je nutné zajistit jednoznačné definování polohy součástí vůči souřadnému systému hlavní sestavy. Nejdůležitější je správné a úplné definování polohy součásti u prvního vkládaného komponentu do sestavy.

#### 1.1.2 Vložení prvního komponentu do sestavy

Komponentem vkládaným do sestavy může být součást nebo již vytvořená sestava.



Obr. 1-5 Uživatelské rozhraní po výběru prvního komponentu sestavy

Systém je nastaven tak, že je možné okamžitě zahájit výběr referencí pro definování polohy komponentu v sestavě. Pokud nevyžaduji žádnou speciální polohu vkládaného komponentu vůči referencím sestavy, je výhodné využít způsob umístění " Default ", jak je ukázáno na Obr. 1-6. Typ umístění "Default" provede sjednocení základních souřadných systémů vkládaného komponentu se souřadným systémem sestavy. Umístění komponentu je tak plně definováno, což se projeví změnou jeho barvy a STATUSu na "Fully Constrained".

		Component Placement
User Defined	× 0.00 × ½ 🚺 s	STATUS : No Constraints 📳 🔲 💵 🖌
Angle Offset		
Parallel		
Coincident		
Normal		
🔂 Coplanar		
Centered		
→ Tangent		
Ex Fix		
Default ,		
	Assemble component at default location.	

Obr. 1-6 Umístění komponentu v sestavě způsobem DEFAULT

#### 1.1.3 Vkládání dalších komponentů do sestavy

Při vkládání dalších komponentů do sestavy je vhodné ponechat v tomto roletovém menu způsob umístění "Automatic", který na základě zvolených referencí na komponentu a sestavě vybere nejvhodnější typ umístění. Pouze u velmi specifických požadavků na umístění

komponentu v sestavě je vhodné nejprve systému zadat požadovaný typ umístění pro následující dvojici referencí.

Umístění komponentu ve složitých sestavách může ulehčit funkce zobrazení vkládaného komponentu v samostatném okně, kterou lze aktivovat tlačítkem zobrazeným na obrázku Obr. 1-7. Vazební reference pak lze vybírat z obou oken. Vytvořené vazby můžeme prohlížet, editovat, či mazat v nabídce "Placement".



Obr. 1-7 Tlačítko zobrazení komponentu v samostatném okně



Obr. 1-8 Vkládání komponentu v samostatném okně

## Shrnutí pojmů 1.1.

Pracovní adresář, sestava, pomocné samostatné okno



#### Otázky 1.1.

1. Jakou vazbou obvykle umisťujeme první komponent v sestavě?

#### 1.2 Sestavy mechanismů s kinematickými vazbami



## Výklad

Doposud jsme tvořili pouze sestavy, jejichž komponenty byly navzájem pevně spojeny. Jediná možnost pohybu vznikla nedostatečným nadefinováním polohy komponentů v sestavě, což je však nežádoucí, protože nad takovým pohybem nemáme žádnou kontrolu, natož abychom na něm dokázali provést kinematickou či dynamickou analýzu. Systém CREO však dokáže vytvářet vazby s různými stupni volnosti, které jsou plně definované. Popis jednotlivých vazeb je obsažen v kapitole 1.3

Vytváříme-li kinematickou sestavu, je vhodné ji skládat z co nejmenšího počtu komponent, mezi kterými vytvoříme kinematické vazby. To znamená, že všechny komponenty, které jsou navzájem pevné (např. příruby se šrouby) seskupujeme do vhodných podsestav.

#### 1.2.1 První komponent

První komponent sestavy můžeme vložit dvěma způsoby. Nejjednodušší a většinou nejvhodnější je vazba "Default", která sjednotí souřadné systémy vloženého komponentu a sestavy. Druhou, velmi specifickou, možností je nadefinování kinematické vazby již prvního komponentu a to vůči některé referenci sestavy (osa, rovina, bod).

V tomto případě vložíme první komponent- podsestavu tělesa válce s přírubou pro ložiskový domek vazbou "Default"

Dále běžným způsobem, ikonou Assemble, přidáme pístnici. Ta je v tělese válce posuvná podél své podélné osy, a pokud není konstrukčně speciálně upravena, má kolem této osy uvolněnou i rotaci. Pro takový typ pohybu použijeme vazbu typu Cylinder (Obr. 1-9). Popis jednotlivých vazeb je obsažen v kapitole 1.3.



Obr. 1-9 Výběr vazby Cylinder

V panelu vazeb rozbalíme kartu "Placement" (Obr. 1-10). Zde se pod vazbou "Cylinder" nejprve zobrazuje pouze položka "Axis aligment". Systém v tuto chvíli očekává volbu dvou referencí, které budou soustředné (respektive jejich osy budou sjednocené). Vybereme tedy válcovou plochu pístnice a válcový otvor tělesa válce. Pístnice se přesune do požadované polohy, STATUS se změní na "Connection Definition Complete" a vazbu můžeme potvrdit. Položek "Translation1" a "Rotation1" si v tuto chvíli nevšímáme, budeme se jim věnovat v následující kapitole. Ve stromu se komponent PISTNICE zobrazí s ikonou obdélníku s tečkou, která znamená kinematickou vazbu.

Image: Pristnice.prt



Obr. 1-10 Sjednocení os pístnice a tělesa válce

Nástrojem "Drag Components" (Obr. 1-11) nyní můžeme pístnici uchopit a vyzkoušet vytvořenou vazbu. Pístnice by se měla posouvat a rotovat kolem své podélné osy a to bez omezení.



Obr. 1-11 Nástroj Drag Components

#### 1.2.2 Nastavení parametrů pohybové osy kinematické vazby

V předchozí podkapitole bylo popsáno vytvoření kinematické vazby "Cylinder" bez jakéhokoli omezení pohybu. Aby však pístnice zůstávala v tělese válce a vysouvala se pouze v definovaných mezích, musíme kinematickou vazbu dále upravit.

#### Omezení translace

Klepneme pravým tlačítkem na komponent "PISTNICE" a v kontextové nabídce vybereme "Edit Definition". Tím se otevře nabídka definice vazeb komponentu. Rozbalíme kartu "Placement" a vybereme položku "Translation Axis".

Systém nyní čeká na výběr dvou referenčních ploch (nebo rovin), mezi kterými nadefinujeme meze pro podélné vysunutí pístnice. Vybereme plochy podle Obr. 1-12 a definici vyplníme podle Obr. 1-13.



Obr. 1-12 Plochy pro Translation Axis

Connection_11 (Cylinder)	Current Position	Regen Value
PISTNICE:Surf:F2(IMPORT FE	15.00  Set Zero Position	15.00
Rotation Axis	<ul> <li>Enable regeneration value</li> <li>Minimum Limit</li> <li>Maximum Limit</li> </ul>	15.00 <b>v</b>
New Set	Dynamic properties >>	

Obr. 1-13 Definice Translation Axis

Položka "Current Position" přesouvá komponent do zvolené vzdálenosti mezi referencemi.

Tlačítkem "Set Zero Position" lze zadanou pozici označit za nulovou (i když je například mezi zvolenými plochami 15 mm). Toho lze využít, pokud na komponentech nemáme reference, jejichž sjednocení (na 0 mm) můžeme považovat za výchozí pozici. Například u takovéhoto válce je pro nás nulová pozice "plně zasunuto", přičemž je mezi zvolenými plochami určitá vzdálenost. V tomto příkladě této funkce nebylo využito.

Položka "Regen Value" zobrazuje regenerační polohu. Do této polohy se mechanismus vrátí po každé regeneraci sestavy. U složitých mechanismů dochází velmi často k pádům sestavy z důvodu regeneračních poloh jeho jednotlivých komponentů, které se navzájem "bijí". Uživatel by si tedy měl rozmyslet, u kterých vazeb regenerační polohu zaškrtnutím "Enable regeneration value" povolí. Regenerační polohu aktualizujeme tlačítkem ">>"

Položky "Minimum Limit" a "Maximum Limit" (jsou-li zaškrtnuty) definují minimální a maximální vzdálenost zvolených ploch.

Nastavením podle obrázku výše získáme válec, jehož zasunutá poloha je definována vzdáleností zvolených ploch 15 mm a poloha vysunutá vzdáleností 200 mm. Má tedy zdvih 185 mm.

#### Omezení rotace

Pokud není pístnice konstrukčně upravena proti pootočení, její rotaci kolem osy nic nebrání. Jestliže upravená je, použili bychom spíše vazbu "Slider", která rotaci úplně znemožňuje. V tomto příkladu však bude z ilustrativních důvodů popsáno omezení rotace pístnice na interval +/- 30° od zadané nulové polohy.

V kartě "Placement" vybereme položku "Rotation Axis". Systém nyní čeká na výběr dvou referenčních ploch (nebo rovin), mezi kterými nadefinujeme meze pro úhlové natočení pístnice vůči tělesu válce. Vybereme plochy podle obrázku Obr. 1-14 a definici vyplníme podle obrázku Obr. 1-15.



Obr. 1-14 Plochy pro Rotation Axis

	Current Repition	Regen Valu
Axis alignment	Current Position	rtogon valo
Translation Axis		0.00
Rotation Axis	0.00	0.00
PISTNICE:Surf:F2(IMPORT FE	Set Zero Positio	n 👻
VALEC_TELESO:Surf:F2	C Enable regeneration value	ie
	🗹 Minimum Limit	-30.00 💌
	Maximum Limit	30.00 💌
	Dynamic properties >>	1

Obr. 1-15 Definice Rotation Axis

#### Přejmenování vazby

Označením vazby v kartě "Placement" se zobrazí nabídka, ve které můžeme vazbu přejmenovat ("Set Name"), což je vhodné provést i u jednodušších kinematických sestav, chceme-li si v mechanismech udržet pořádek. Ve větších sestavách, či přípravě na kinematické a dynamické analýzy je přejmenování vazeb nezbytné.

Connection_11 (Cylinder)	Set Enabled
🔶 Axis alignment	
Translation Axis	Set Name
Rotation Axis	Connection_11
	Set Type
	🔀 Cylinder 🛛 🔻 Flip
New Set	Status

#### Obr. 1-16 Přejmenování vazby

Nástrojem "Drag Components" nyní můžeme pístnici uchopit a vyzkoušet vytvořenou vazbu. Pístnice by se měla pohybovat v zadaných mezích translace a rotace. Po regeneraci se vrátí do zadané regenerační pozice.

## ) Shrnutí pojmů 1.2.

Kinematická vazba, vazba Default, vazba Cylinder, povinné reference vazby, omezující reference vazby, nastavení nulové polohy, limity, regenerační poloha



#### Otázky 1.2.

- 2. Co dělá vazba Default?
- 3. K čemu slouží nastavení nulové polohy?
- 4. K čemu slouží regenerační poloha?



#### **CD-ROM**

• Tento postup je obsažen na videu 1-4\_Cylinder\_na\_valci

#### 1.3 Kinematické vazby a jejich využití

	Čas ke studiu: 4 hodiny
0	<ul> <li>Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět</li> <li>Vysvětlit pojmy Třída vazby, DOF.</li> <li>Popsat jednotlivé typy kinematických vazeb.</li> </ul>
	<ul> <li>Sestavit jednotlivé kinematické vazby.</li> </ul>

Vybrat vhodnou kinematickou vazbu pro daný účel.



V následujících podkapitolách budou popsány jednotlivé přednastavené kinematické vazby a jejich použití demonstrováno na příkladech. Většina příkladů je doplněna videosekvencemi.

Na začátek je ještě vhodné připomenout, že těleso má v 3D prostoru obecně 6 stupňů volnosti (DOF – Degrees Of Freedom). Jsou jimi 3 rotace a 3 translace (kolem os x,y,z). Vazbami tyto stupně volnosti odebíráme. Podle toho, kolik DOF vazba odebírá, rozlišujeme tzv. třídu vazby. Číslo třídy je shodné s počtem odebraných DOF.

# 1.3.1 Vazba Pin 🗡

Třída vazby:	5
Ponechané DOF:	1 rotace kolem zvolené osy
Definice:	<ol> <li>Osa otáčení (Axis Alignment)</li> <li>Plocha na plochu (Translation)</li> </ol>
Možná omezení:	Úhel natočení (Rotation Axis)

Vazba typu Pin je v konstruktérské praxi zřejmě nejčastěji používanou kinematickou vazbou. Spojuje komponenty pomocí osy rotace a reference polohy na této ose. Ponechává tak jediný stupeň volnosti – rotaci.

Jako osu rotace lze zvolit osu, hranu, či křivku. Jako referenci posunutí lze zvolit referenční bod, vrchol, rovinu, či plochu.

#### Příklad sestavy s vazbou typu Pin

Cílem je umístit kliku vazbou typu Pin tak, aby rotovala kolem příslušné osy, jak je zobrazeno na Obr. 1-17. Dále tuto rotaci omezíme na rozsah 45°.



Obr. 1-17 Vazba Pin na klice

Do sestavy nejprve vložíme ("Assemble") komponent "ZAKLADOVA\_DESKA", který umístíme pomocí vazby "Default".

Následně vložíme ("Assmemble") komponent "KLIKA". Z roletové nabídky kinematických vazeb vybereme typ "Pin" a rozbalíme kartu "Placement", abychom měli plnou kontrolu nad vytvářenými referencemi. V položce "Axis Alignment" vybereme válcové plochy podle Obr. 1-18, čímž sjednotíme jejich osy.



Obr. 1-18 Pin - Axis Alignment

V položce "Translation" vybereme plochy podle Obr. 1-19, čímž je sjednotíme a klice určíme bod na rotační ose, kolem kterého se bude otáčet. Pokud se plochy sjednotí opačně, než je potřeba, klepneme na tlačítko "Flip". V nabídce "Constraint Type" ponecháme "Coincident".



Obr. 1-19 Pin – Translation

Nyní je možno vazbu potvrdit. Klika by v tuto chvíli měla uvolněnou rotaci kolem osy. Zde však ještě doplníme omezení této rotace tak, aby klika šla pootočit jen do úhlu 45°. V reálu by toto bylo zajištěno například zarážkou, nebo nějakým jiným konstrukčním řešením.

Jakmile jsme vyplnili dvě "povinné" reference – "Axis Alignment" a "Translation", zpřístupní se dodatečné, omezující podmínky, v případě vazby Pin je to "Rotation Axis". Zde vybereme dvě roviny, či plochy, mezi kterými budeme chtít nastavit omezující úhel, v tomto příkladu podle Obr. 1-20. Je možné nastavit nulovou a regenerační polohu, minimální a maximální limit. Tyto parametry nastavíme podle Obr. 1-20. Více o nastavení kinematických vazeb v kapitole 1.2.2.



Obr. 1-20 Pin - Rotation Axis

Následně je možno vazbu potvrdit a nástrojem "Drag Components" vyzkoušet.



Vazba typu Slider (posuvník) se používá v případech, kdy chceme komponentu ponechat pouze 1 stupeň volnosti, a to posuv. Spojuje komponenty pomocí osy posuvu a reference natočení kolem této osy.

Jako osu translace lze zvolit osu, hranu, či křivku. Jako referenci natočení lze zvolit rovinu, či plochu.

#### ♣ Příklad sestavy s vazbou typu Slider

Cílem je umístit palec tak, aby se posouval ve směru znázorněném na Obr. 1-21. Dále tento posuv omezíme jen na určitý úsek.



Obr. 1-21 Vazba Slider na palci

Budeme pokračovat na příkladu z předchozí kapitoly, ale je zde i možnost vstupovat pouze s komponentem "ZAKLADOVA\_DESKA" uloženým na "Default".

Vložíme ("Assemble") komponent "PALEC". Z roletové nabídky kinematických vazeb vybereme typ "Slider" a rozbalíme kartu "Placement", abychom měli plnou kontrolu nad vytvářenými referencemi. V položce "Axis Alignment" vybereme osy podle Obr. 1-22, čímž je sjednotíme.



Obr. 1-22 Slider - Axis Alignment

V položce "Rotation" vybereme plochy podle Obr. 1-23, čímž je sjednotíme a klice zamezíme rotaci kolem definované posuvné osy. Pokud se plochy sjednotí opačně, než je potřeba, klepneme na tlačítko "Flip".



Obr. 1-23 Slider – Rotation

Nyní je možno vazbu potvrdit. Palec by v tuto chvíli měl uvolněnou translaci po své podélné ose. Zde však ještě doplníme omezení této translace tak, aby se v kulise pohyboval jen do určité vzdálenosti. V reálu by toto bylo zajištěno například zarážkou, nebo nějakým jiným konstrukčním řešením.

Jakmile jsme vyplnili dvě "povinné" reference – "Axis Alignment" a "Rotation", zpřístupní se dodatečné, omezující podmínky, v případě vazby Slider je to "Translation Axis". Zde vybereme dvě roviny, či plochy, mezi kterými budeme chtít nastavit omezující vzdálenosti, v tomto příkladu podle Obr. 1-24. Je možné nastavit nulovou a regenerační polohu, minimální a maximální limit. Tyto parametry nastavíme podle Obr. 1-24. Více o nastavení kinematických vazeb v kapitole 1.2.2.



Obr. 1-24 Slider - Translation Axis

Následně je možno vazbu potvrdit a nástrojem "Drag Components" vyzkoušet.

# CD-ROM Tento postup je obsažen na videu 1-6\_slider\_palec

## 1.3.3 Vazba Rigid

Definice:	Plná definice jako u User Defined
Ponechané DOF:	0
Třída vazby:	6

Vazba typu Rigid spojuje dva komponenty tak, že jsou vůči sobě pevné. Lze je umístit pomocí jakýchkoli platných vazeb, jako u běžné definice vazby typu "User Defined". Komponenty jsou sjednoceny do jednoho těla.

#### ♣ Příklad sestavy s vazbou typu Slider

Cílem je umístit kulisu na kliku tak, jak je zobrazeno na Obr. 1-25. Budeme pokračovat na příkladu z předchozích kapitol, kde již máme nadefinovány vzájemné polohy komponent "KLIKA" a "PALEC".

Vložíme ("Assemble") komponent "KULISA". Z roletové nabídky kinematických vazeb vybereme typ "Rigid" a rozbalíme kartu "Placement", abychom měli plnou kontrolu nad vytvářenými referencemi. Následně nadefinujeme umístění kulisy ke klice podle Obr. 1-25 stejně, jako bychom vytvářeli běžnou pevnou vazbu.



Obr. 1-25 Vazba Rigid na kulise

Po potvrzení vazby se komponent "KULISA" ve stromě zobrazí se symbolem překrývajících se obdélníčků (Obr. 1-26), který znamená, že je uchycen pevně na jiný komponent, který je pohyblivý (zde kulisa pevně na pohyblivou kliku).

#### 🔲 🖥 KULISA.PRT

#### Obr. 1-26 Symbol umístění na pohyblivý komponent

Následně je možno vazbu potvrdit a nástrojem "Drag Components" vyzkoušet.



## CD-ROM

• Tento postup je obsažen na videu 1-7\_rigid\_kulisa



Třída vazby:	2
Ponechané DOF:	1 translace ve směru zvolené křivky 3 rotace kolem referenčního bodu
Definice:	Bod na křivku
Možná omezení:	Vzdálenost posuvu na křivce vzhledem k referenčnímu bodu

Vazba typu "Slot" (štěrbina) se používá, pokud chceme umístit bod na křivku, typicky pro různé posuvné kulisy. Lze omezit posuv po křivce – limit délky dráhy od referenčního bodu křivky (většinou jeden z koncových bodů křivky).

Na Obr. 1-27 můžeme vidět tužku, jejíž hrot (bod) je uložen vazbou typu "Slot" na křivku. Tužka se tak může pohybovat pouze po této křivce.



Obr. 1-27 Vazba Slot - tužka

#### Příklad sestavy s vazbou typu Slot

Cílem je umístit kulisu s palcem tak, aby se čep palce pohyboval pouze v drážce kulisy (Obr. 1-28). Budeme pokračovat na příkladu z předchozích kapitol. Tímto dokončíme sestavu tohoto příkladu.



Obr. 1-28 Sestava s vazbou Slot

Pravým tlačítkem myši na již vložený komponent "KULISA" otevřeme jeho kontextovou nabídku, z níž vybereme "Edit Definition". Otevře se definice vazeb

komponentu. Zde rozbalíme kartu "Placement", ve které vidíme vazbu "Rigid" spojující kulisu s klikou.

Dole v této kartě klepneme na příkaz "New Set", který nám umožní aplikovat na komponent další plnohodnotnou vazbu. Z roletové nabídky kinematických vazeb vybereme "Slot" a vložíme reference bodu palce na křivku kulisy, podle Obr. 1-29. Vazbu můžeme potvrdit a nástrojem "Drag Components" vyzkoušet funkci jak této vazby, tak celé sestavy.



Obr. 1-29 Slot - Point on Line

Stejně bychom mohli postupovat při umístění komponentu palce, tedy "opačným směrem". Systém však umožňuje umístit pouze komponenty, které jsou ve stromu níže ke komponentům nad nimi. To proto, že v CREO jde o strom ryze historický, to znamená, že pokud bychom chtěli editovat definici komponentu "PALEC", komponenty pod ním ze stromu zmizí, tedy nelze na ně vytvořit vazbu, protože v okamžiku přidání palce v sestavě ještě neexistovaly. Komponenty je možné ve stromu sestavy přesouvat tažením myší, ale jen tak, aby neporušily principy popsané výše, čili nelze je přesunout pod komponent na nich referencemi závislý (nebo jakkoli jinak závislý).

# $\bullet$

#### **CD-ROM**

• Tento postup je obsažen na videu **1-8\_slot\_kulisa** 

## 1.3.5 Vazba Cylinder 🏹

Třída vazby:	4
Ponechané DOF:	1 translace kolem zvolené osy 1 rotace kolem zvolené osy
Definice:	Osa (Axis Alignment)
Možná omezení:	Vzdálenosti posuvu (Translation axis) Úhel natočení (Rotation Axis)

Vazba typu Cylinder (válec) se, už podle svého názvu, používá nejčasněji pro umístění pístnice ve válci. Komponentu tak ponechává 2 stupně volnosti – translaci a rotaci kolem zvolené osy. Jako osu translace lze zvolit osu, hranu, či křivku. Jako reference natočení lze zvolit rovinu, či plochu.

#### Příklad sestavy s vazbou typu Cylinder

Cílem je umístit kulisu na hřídel s našroubovanou zarážkou tak, aby se mohla pohybovat translačně v ose hřídele, a to pouze omezeně ve vybrání na hřídeli (35mm). Zároveň tak, aby byla kulisa otočná kolem osy hřídele, opět jen v mezích vybrání (+/- 60°).



Obr. 1-30 Sestava hřídele s kulisou

Do sestavy nejprve vložíme ("Assemble") komponent "ZAKLADOVA\_DESKA", který umístíme pomocí vazby "Default". Všimneme si, že tato sestava již obsahuje zarážku a šroub. Držíme se totiž zásady zjednodušování kinematických sestav, tedy že komponenty, které se neúčastní kinematických vazeb, seskupujeme do vhodných podsestav, byť to nemusí být reálné z hlediska montáže.

Vložíme ("Assemble") komponent "KULISA\_CYLINDER". Z roletové nabídky kinematických vazeb vybereme typ "Cylinder" a rozbalíme kartu "Placement", abychom měli plnou kontrolu nad vytvářenými referencemi. V položce "Axis Alignment" vybereme válcové plochy podle Obr. 1-31, čímž sjednotíme jejich osy.

acement Move Options Fi	exibility Properties	1
Connection_4 (Cylinder)	Constraint Enabled	
Axis alignment	Constraint Type	
HRIDEL:Surf:F5(EXTRUD	Coincident -	
O Translation Axis	Offset	
Rotation Axis	0.00 <b>Flip</b>	
New Set	Status	
		Criented
		P

Obr. 1-31 Cylinder - Axis Alignment

Nyní je možno vazbu potvrdit. Kulisa by v tuto chvíli měla uvolněnou rotaci a translaci kolem osy hřídele. Zde však ještě doplníme omezení rotace a translace tak, aby se kulisa mohla pohybovat pouze v jí vymezené drážce v hřídeli.

Jakmile jsme vyplnili "povinnou" referenci "Axis Alignment", zpřístupní se dodatečné, omezující podmínky, v případě vazby Cylinder jsou to "Translation Axis" a "Rotation Axis".

Jako reference pro "Translation Axis" vybereme horní plochu kulisy a spodní plochu zarážky, podle Obr. 1-32. Parametry této vazby nastavíme podle téhož obrázku.



Obr. 1-32 Cylinder - Translation Axis

Jako reference pro "Rotation Axis" vybereme rovinu kulisy a rovinu hřídele. Vybereme roviny, které jsou ve střední poloze kulisy v drážce rovnoběžné, viz Obr. 1-33 Parametry této vazby nastavíme podle téhož obrázku.

Placement	Move	Options	Flexibility	Properties			
Connec Axis al	tion_4 (C	ylinder)	Curren	t Position		Rege	n Value
Transla Rotatio	ation Axis	YLINDER:RIC &RAZKOU:A	-24.00	Set Zero P Set Zero P nable regeneration nimum Limit aximum Limit	>> cosition on value	0.00 • -60.00 60.00	•
New Set							

Obr. 1-33 Cylinder - Rotation Axis

Další příklad této vazby, včetně definic a omezujících podmínek je ukázán na příkladu pneumatického válce v kapitole 1.2.



# 1.3.6 Vazba Planar

Třída vazby:	3
Ponechané DOF:	2 translace ve zvolené rovině 1 rotace kolmo na zvolenou rovinu
Definice:	Rovina na rovinu
Možná omezení:	Vzdálenosti posuvu (Translation axis) Úhel natočení (Rotation Axis)

Vazba typu Planar spojuje dva komponenty tak, že se mohou vzájemně posouvat ve zvolené rovině a rotovat kolem osy k této rovině kolmé. Zvolené referenční roviny lze od sebe odsadit o zvolenou vzdálenost. Posuvy i rotace je možno omezit.

#### Příklad sestavy s vazbou typu Planar

Cílem je umístit tužku na podložce tak, aby směřovala vždy kolmo k podložce.

Vytvoříme sestavu komponent "PODLOZKA" a "TUZKA", kde podložku uložíme vazbou "Default" a tužce vybereme z roletové nabídky kinematických vazeb typ "Planar". Následně sjednotíme plochu kolmo protínající hrot tužky a horní rovinu podložky, podle Obr. 1-34. Vazbu potvrdíme a vyzkoušíme nástrojem "Drag Components".



Obr. 1-34 Vazba Planar

1.3.7 Vazba Ball **1** 

Třída vazby:	3
Ponechané DOF:	3 rotace kolem referenčního bodu
Definice:	Bod na bod
Možná omezení:	Maximální úhel mezi zvolenými osami

Vazba typu Ball se používá pro sjednocení dvou bodů, přičemž zůstávají uvolněny všechny rotace kolem nich. Typicky se používá pro různé kulové čepy.

#### Příklad sestavy s vazbou typu Ball

Cílem je vytvořit sestavu kulového čepu. Nejprve do sestavy vložíme komponent "RAMENO" a uložíme jej na vazbu "Default". Následně vložíme "CEP", z roletové nabídky kinematických vazeb vybereme typ "BALL" a rozbalíme kartu "Placement", abychom měli plnou kontrolu nad vytvářenými referencemi. Do vazby vybereme dva body podle Obr. 1-35.



Obr. 1-35 Vazba Ball

Následně se zpřístupní dodatečná omezující podmínka "Cone Axis", kde jako reference vybereme dvě osy protínající referenční bod. Obecně lze vybrat jakékoli dvě rovnoběžné osy. Omezující úhel nastavíme na 20° podle Obr. 1-36. Vazbu můžeme potvrdit a nástrojem "Drag Components" vyzkoušet její funkci.

Connection_6 (Ball) Point alignment Cone Axis Cone Axis	Current Position		
RAMENO: A_1(AXIS): F7(REV	Cone Opening Angle	20.00	
New Set	Dynamic properties >>	Flip	20.000000
			Coincid
		/	

Obr. 1-36 Ball - Cone Axis

## **CD-ROM**

• Tento postup je obsažen na videu 1-9\_ball\_kulovy\_cep

1.3.8	Vazba Bearing 褡	
	Třída vazby:	2
	Ponechané DOF:	1 translace ve směru zvolené přímky
		3 rotace kolem referenčního bodu
	Definice:	Bod na přímku
	Možná omezení:	Vzdálenost posuvu na přímce vzhledem k referenčnímu
		bodu

Vazba typu Bearing je v podstatě kombinací vazeb Ball, ze které přebírá definici "Cone Axis", tedy maximálního úhlu dvou os (více v kapitole 1.3.7) a vazby Slider, tedy posuvu po zvolené ose.



Obr. 1-37 Vazba Bearing



• Příklad definice vazby Bearing je obsažen na videu **1-10\_bearing\_tuzka** 

1.3.9	Vazba Gimbal 🏹	
	Třída vazby:	3
	Ponechané DOF:	3 rotace kolem počátku souřadného systému
	Definice:	Souřadný systém na souřadný systém

Vazba typu Gimbal je velmi podobná vazbě Ball (kapitola 1.3.7), avšak namísto bodů sjednocuje počátky souřadných systémů. Navíc jsou jednotlivé rotační osy přístupné pro serva, síly, měření apod.

#### 1.3.10 Vazba Weld 🟳

Třída vazby:	6
Ponechané DOF:	0
Definice:	Souřadný systém na souřadný systém

Vazba typu Weld je velmi podobná vazbě Rigid (kapitola 1.3.3), avšak sjednocuje počátky souřadných systémů. Navíc ponechává takto uloženou podsestavu pohyblivou.

#### 1.3.11 Vazba General 👬

Vazba typu General je univerzální vazbou, kde si uživatel může vytvořit vazbu "čehokoli na cokoli" s požadovaným stupněm volnosti. Symbol vazby mění podobu podle toho, které stupně volnosti jsou odebrány.

Je potřeba dát pozor, aby nebylo vytvořeno nadměrné množství vazeb (byť by mezi sebou nekolidovaly), což by vedlo ke vzniku redundancí.

## 1.3.12 Vazba 6DOF 🏃

Definice:

Souřadný systém na souřadný systém

Vazba 6DOF je velmi specifická, protože neodebírá žádné stupně volnosti. Váže k sobě referenčně dva souřadné systémy, ale nikterak neomezuje jejich pohyb. Na její rotační a translační osy však lze nadefinovat pohony, síly, měření apod. Pokud je potřeba, stupně volnosti lze odebrat až v prostředí Mechanism, a to pohony nastavenými na nulovou rychlost.



Třída vazby, stupeň volnosti, DOF.

Vazba Pin, Slider, Cylinder, Rigid, Slot, Planar, Ball, Bearing, Gimbal, Weld, General, 6DOF.



#### Otázky 1.3.

- 5. Co znamená zkratka DOF?
- 6. Které dvě vazby neponechávají žádný stupeň volnosti?
- 7. Čím se liší vazby Ball a Bearing?
- 8. Čím se liší vazby Ball a Gimbal?
- 9. Která vazba se dá nastavit tak, že může nahradit kteroukoli jinou?
- 10. Čím je specifická vazba typu 6DOF?

# 1.4 Sestavy z pohledu kinematických a dynamických analýz

## 1.4.1 Nastavení a kontrola materiálových vlastností modelů



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

↓ Nastavit a zkontrolovat materiálové vlastnosti modelů a sestav



# Výklad

Základem dynamické analýzy je správné nastavení materiálových vlastností všech dílů sestavy. Pokud by tyto byly definovány špatně, dynamická analýza je bezcenná a nemůže poskytnout správné výsledky. Aplikují se při ní totiž setrvačné síly jednotlivých komponentů, i gravitační síla, která působí na komponenty úměrně jejich hmotnosti.

## 🖊 Nastavení materiálových vlastností dílů

Do nastavení materiálových vlastností dílu se dostaneme přes kartu "File", nabídku "Prepare", položkou "Model Properties", viz Obr. 1-40.

Dále máme dvě možnosti. Můžeme dílu přiřadit předdefinovaný materiál, popř. vlastní vytvořený a uložený materiál, a to tlačítkem "change" u položky "Material" (Obr. 1-39, položka 1). Zde si z databáze připravených materiálů vybereme ten, který potřebujeme, tlačítkem šipek jej přidáme do seznamu "Materials in Model" a zkontrolujeme, že je u něj zobrazen symbol červené šipky (Obr. 1-40). Pokud máme v tomto seznamu více definovaných materiálů, přiřadíme ten správný dvojklikem na něj – opět je nutné věnovat pozornost symbolu šipky. Po potvrzení tlačítkem OK zkontrolujeme, že u položky "Material" je opravdu náš požadovaný materiál.



Obr. 1-38 Nástroj Model Properties

Model Properties						
aterials 🖓			1			
Material	Not assigned		change			
Units	millimeter Newton Second (mmNs)		change			
Accuracy	Relative 0.0012		change 2			
Mass Properties		0	change			

Obr. 1-39 Možnosti nastavení materiálových vlastností





Druhou možností je ruční definice materiálových vlastností, do které se dostaneme tlačítkem "change" u položky "Mass Properties" – položka 2 v Obr. 1-39. Otevře se okno "Mass Properties" (Obr. 1-41), kde můžeme ručně zadat hustotu (Density), případně si ji nechat vypočítat ze známé hmotnosti (Mass) a objemu (Volume) dílu. Režim zadání volíme v roletové nabídce "Define Properties by". Pokud ponecháme režim definice podle geometrie dílu a jeho hustoty (Geometry and Density) a zadáme požadovanou hustotu (Density), tlačítkem "Calculace" nám systém vypočte a zobrazí všechny ostatní veličiny, jako polohu těžiště (Center of Gravity), momenty setrvačnosti vzhledem ke zvoleným osám (Inertia). Tlačítkem OK definici potvrdíme.

Mass Properties X									
- Define Properti	ies by								
Geometry and De	nsity	•							
Coordinate Sys	Coordinate System								
Default CSVS		Use Previous 🔻							
Basic Propertie		— Center of Gravity [mm] —							
Density 7.827082	tonne/mm^3	X							
Volume	mm^3								
Mass	tonne	Y							
Area	mm^2	Z							
Inertia [mm+2	tonne]								
At Coordinate	: System Origin								
🔘 At Center of 🤇	Gravity								
bxx	lxy								
lyy	lxz								
Izz 🔰	lyz								
Reset Calcul	ate) Generate Re	port Save • OK Cancel							

Obr. 1-41 Ruční nastavení materiálových vlastností

Nastavení hustoty a výslednou hmotnost dílu můžeme zkontrolovat nástrojem "Mass properties" v kartě "Analysis" (Obr. 1-42)



Obr. 1-42 Nástroj Mass Properties

V okně, které se nám otevře, klepneme na tlačítko se symbolem brýlí (Obr. 1-43), čímž se vypíší materiálové a hmotnostní parametry dílu. Modrým tlačítkem "i" si tyto

výsledky můžeme otevřít v samostatném okně. Pozornost věnujeme především položkám "DENSITY" (hustota) a "MASS" (hmotnost).

	Mas	s Propertie:	8		>
Analysis	Feature				
Solid Quilt	Geometry				
CSYS	Se	lect items			
	٧	lse Default			
Density	0.000	00001			×
Accuracy	0.000	001000			-
VOLUME SUBEACI DENSITY MASS = CENTER X Y Z	= 7.644646 AREA = 3.8 = 7.8270820 5.9835272e- DF GRAVITY 2.2905048	1e+04 MM^3 212171e+04 0e-09 TONNE 04 TONNE with respect e+00 1.4494	MM4/2 / MM/3 to _ZAKL 599e+00		0
Quick	▼ Mass_P	rop_1			
60	) 🤄		~	>	K

Obr. 1-43 Kontrola hustoty dílu

#### Kontrola materiálových vlastností dílů v sestavě

Pokud jsme nadefinovali materiálové vlastnosti jednotlivých dílů v sestavě, zkontrolujeme si ještě přímo v modelu sestavy. To provedeme opět nástrojem "Mass Properties" v kartě "Analysis" (Obr. 1-42). Pokud jsme na některý díl zapomněli, zobrazí se tabulka, jako na Obr. 1-44, kde můžeme hustotu dílu dodatečně provizorně zvolit pro výpočet hmotnosti sestavy. To je ale stav nežádoucí, proto otevřeme onen díl a materiálové vlastnosti mu změníme.

	Density	
Parameters		
Model	Density	Ilnits
KULISA	1.000000	tonne / mm^3
KLIKA	0.000000	tonne / mm^3
PALEC	0.000000	tonne / mm^3
ZAKLADOVA_DESKA	0.000000	tonne / mm^3
	ш	
×		X

#### Obr. 1-44 Definice hustoty nedefinovaného dílu v sestavě

Pokud jsou všechny díly definovány, můžeme si nechat zobrazit výpis hmotnostních a setrvačných vlastností sestavy tlačítkem se symbolem brýlí a modrým tlačítkem "i". Ve

spodní části okna výpisu jsou shrnuty materiálové vlastnosti jednotlivých dílů sestavy, které zkontrolujeme. Jestliže je vše tak, jak má být, můžeme sestavu podrobit dynamické analýze.

INFORMATION WINDOW (modmass.dat)		х			
File Edit View					
-0.23467 0.97062 -0.05317					
0.96689 0.23871 0.09018					
ROTATION ANGLES from _KLIKA_SESTAVA orientation to PRINCIPAL AXES (degrees):					
angles about x y z 30.524 -83.991 16.794				Mass Properties	х
			Analysis (	Feature	
RHDII UF GYRHIIUN WITH PESPECT TO PRINGIPHE HAES: R1 R2 R3 2 67531320+81 // 61581800+81 5 85536870+81 MM			Solid Ge	eometry	
			🔿 Quilt		
			CSYS	Select items	
MASS PROPERTIES OF COMPONENTS OF THE ASSEMBLY				Vise Default	
(in assembly units and the _KLIKA_SESTAVA coordinate frame)					
			Density	1.0000000	*
DENSITY MASS C.G.: X Y Z			Accuracy	0.00001000	*
ZAKLADOVA DESKA MATERIAL:	STEEL				
7.82708e-09 5.98353e-04 2.29050e+00 1.44946e+00 -3.06123e+01			VOLUME =	1.0978486e+05 MM^3	E.
KLIKA MATERIAL:	BRASS	月	SURFACE A	AREA = 5.0888389e+04 MM*2 DENSITY = 7.6757587e-09 TONNE	
8.40738e-09 1.03430e-04 3.67069e+01 -2.00000e+01 3.03282e+01			MASS = 8	4268207e-04 TONNE	
KULISA MATERIAL:	AL6061		CENTER OF	CRAWN with respect to KLIKA	
2.71020e-09 1.25804e-05 1.00000e+01 -6.04522e+00 -1.39548e+01			XYZ	7.7296410e+00 6.2235102e 01 .2	0
PALEC MATERIAL:	STEEL		•	ац. — — — — — — — — — — — — — — — — — — —	
7.82708e-09 1.28319e-04 9.51308e+00 1.40416e+01 -6.96031e+01		*	Quick	Mana Drop 1	$\sim$
			Starch	I Imdoo_Linh_1	
Close			60	Co V	X

Obr. 1-45 Kontrola materiálových vlastností dílů v sestavě



Před započetím dynamické analýzy je nezbytné definovat materiálové vlastnosti všech dílů. Dílu lze přiřadit jeden z předdefinovaných materiálů, či přímo zadat hustotu. Vhodné je před přechodem do modulu MECHANISM znovu zkontrolovat definici materiálů nástrojem "Mass Properties" v sestavě.



# Otázky 1.4.

11. Jaké existují způsoby definice materiálových vlastností v systému CREO?

## 1.4.2 Vytváření referenčních rovin a os u importovaných modelů





Pokud si uživatel vytváří modely sám, případně používá pouze modely vytvořené v systému CREO (nebo starším PRO/Engineeru), tyto modely obsahují referenční roviny RIGHT (pravá), TOP (horní), FRONT (přední), jak lze vidět na obrázku Obr. 1-46. Ty se generují automaticky při vytvoření každého dílu a sestavy.



Obr. 1-46 Referenční roviny nového dílu

Často je však nutné pro konstrukci použít komponenty jiných dodavatelů- od spojovacího materiálu, přes nejrůznější pohony, stroje, až po celé výrobní haly a budovy. Málokdy se setkáme s tím, že dodavatel poskytne svá kompletní 3D data, protože obsahují jeho know-how. A i když se jedná o jednoduché, běžně dostupné díly, používá jiný CAD software. Takové komponenty se pak k uživateli dostávají ve formě neutrálních formátů, jako jsou STEP, IGES apod.

Tyto formáty obsahují veškerou geometrii, avšak nemají referenční roviny, které jsou většinou nutné pro použití komponentu v sestavě. Referenční prvky si po importu musí uživatel vytvořit sám.

Na Obr. 1-47 je zobrazen importovaný pneumatický válec. Lze vidět, že neobsahuje žádné referenční roviny ani osy, jen počátek souřadného systému "1".



Obr. 1-47 Válec bez referencí

U dílů, které obsahují rotační část, jíž chceme proložit referenční roviny, je vhodné začít osou – tlačítko "Axis" na panelu Datum karty Model (Obr. 1-48).

Axis Plane	Sketch
Datum 🔻	
<b>/ Axis</b> Create a datum axis.	

Obr. 1-48 Vytvoření referenční osy

Importované modely obsahují velké množství ploch a hran, proto lze v pravém dolním rohu okna z roletové nabídky aktivovat výběrový filtr "Surface" (plochy), což usnadní výběr potřebné válcové plochy, s jejíž osou chceme novou referenční osu sjednotit (Obr. 1-49).

All	
Datum Point	
Intent Datum Point	
Vertex	
Intent Chain End	
Edge	
Curve	
Surface	
Intent Datum Plane	5
Facet Vertex	
Facet Edge	
Intent Chain	
Coordinate System Axis	
Axis	
Intent Datum Axis	
All	

Obr. 1-49 Filtr ploch

Následně vybereme požadovanou válcovou plochu importovaného modelu, zobrazenou na Obr. 1-50. Ta se zobrazí v seznamu References v kartě Placement okna pro definici referenční osy s parametrem "Through" (skrz, čili sjednotit). V kartě "Properties" téhož okna zadáme název nové osy "OSA\_VALCE" a tlačítkem OK osu vytvoříme. Nová osa se zobrazí ve stromě modelu.



Obr. 1-50 Výběr válcové plochy

Máme-li vytvořenou osu, můžeme jí proložit referenční roviny. Klikneme na tlačítko "Plane" panelu "Datum" karty "Model" (Obr. 1-51), čímž vyvoláme okno vytvoření referenční roviny.



Obr. 1-51 Vytvoření referenční roviny

**Se stisknutou klávesou CTRL** vybereme osu válce, kterou jsme vytvořili (zobrazí se s parametrem "Through" – skrz) a jednu z bočních ploch válce, v tomto případě horní podle Obr. 1-52. Ta se zobrazí v seznamu "References" s parametrem "Offset" (odsazení). Lze nastavit úhel (Rotation), který bude svírat referenční rovina s vybranou plochou válce, zde chceme roviny rovnoběžné, tudíž zadáme 0°. V kartě "Properties" téhož okna zadáme název nové roviny "ROVINA\_HORNI" a tlačítkem OK rovinu vytvoříme. Nová rovina se zobrazí ve stromě modelu.



Obr. 1-52 Výběr horní plochy válce

Stejným postupem vytvoříme rovinu rovnoběžnou s přilehlou plochou válce (Obr. 1-53), kterou nazveme "ROVINA\_PRAVA".



Obr. 1-53 Výběr boční plochy válce

Třetí referenční rovinu sjednotíme s čelní plochou válce podle obrázku Obr. 1-54. Tato se rovněž zobrazí s parametrem Offset (odsazení), který ale v tomto případě zna mená odsazení translační, čili lze zadat vzdálenost (Translation) nové roviny od vybrané plochy. Nyní je chceme sjednotit, proto ponecháme Translation 0 mm. V kartě Properties vepíšeme název "ROVINA\_PREDNI".



Obr. 1-54 Výběr čelní plochy válce

Ve stromě modelu jsou nyní vytvořeny 3 referenční roviny a jedna osa, které posléze v sestavě umožní umístit další součásti pneumatického válce. Strom by měl vypadat jako na obrázku Obr. 1-55.



Obr. 1-55 Strom s novými referencemi

Nakonec nezapomeneme model uložit.

# Shrnutí pojmů 1.5.

3D modely většiny výrobců musí být importovány z neutrálních formátů, jako je například nejvíce rozšířený STEP. Ty však neobsahují, kromě základního souřadného systému, žádné referenční roviny ani osy, proto si je uživatel musí vytvořit, než s takovými díly začne pracovat.



# **CD-ROM**

- Tento postup je obsažen na videu 1-1\_vytvareni\_referenci
- Další postupy vytváření referencí jsou obsaženy na videích 1-2\_vytvareni\_referenci\_pistnice 1-3\_vytvareni\_referenci\_loziskoveho\_domku

# 2 MODUL MECHANISM

Softwarové prostředí Creo (dříve Pro Engineer) je schopno kromě pokročilého parametrického 3D modelování mnoha dalších funkcí potřebných pro běžnou konstrukční praxi. Takovou funkcí je bezesporu možnost provádění kinematických a dynamických analýz 3D modelů. V prostředí Creo i Pro Engineer je tvorba těchto analýz obsažena v modulu "Mechanism". Před samotným vstupem do modulu je zapotřebí se opět ujistit, zdali je model správně připraven (kinematické vazby v modelu, definovaná hustota…).

Rovněž je důležité si uvědomit, že žádný výrobce softwaru pro 3D modelování nezaručuje správnost výsledků a tudíž se v případě nehody nelze na takto získané údaje odvolávat. Získané údaje je zapotřebí vždy vlastnoručně v kritických bodech ověřovat. Pro složitější výpočty je výhodné pracovat souběžně v prostředí Creo a ve výpočtovém programu (např. MathCAD). Uživatel si tak okamžitě ověřuje správnost výsledků a riziko chyby je minimalizováno.

# 2.1 Popis prostředí modulu MECHANISM



# Výklad

Pro přechod do modulu Mechanism je důležité být v sestavě či podsestavě strojní součásti, kterou chceme analyzovat.

Předem je důležité říci, že je při tvorbě velkých sestav výhodnější analyzovat jednotlivé konstrukční uzly zvlášť (pokud to jde). Je to výhodnější jednak z hlediska přehlednosti a zejména výpočetního času. Při tvorbě rozsáhlých sestav a náročných dynamických analýz je dobré analyzovat pouze kritická místa (např. rozjezd robotu).

Jako příklad byla vybrána sestava jednoduchého ramene bagru, která byla pro tento účel vytvořena s kinematickými vazbami a definovanou hustotou jednotlivých součástí. Přechod z klasického menu sestavy do modulu Mechanism je znázorněn na Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Přechod do modulu Mechanism

Kliknutím na ikonu modulu "Mechanism" model sestavy přejde do stejnojmenného modulu, jak je ukázáno na Obr. 2-2.



Obr. 2-2 Prostředí modulu Mechanism

Oproti standardnímu modeláři se provede několik změn. Na pásu karet přibude karta "Mechanism", kde se nachází prostředky pro úpravu modelu a tvorbu kinematických a dynamických analýz. Detail karty je zobrazen na Obr. 2-3.

Summary	<b>₫</b> ×.	Mechar Analys	ism Playback	Measures	Drag Components	Gears 6 Belts	O P Servo Motors X B	orce Motors orce/Torque ushing Load	😫 Springs 💉 Dampers
Informat	tion		Analysis 🔻		Motion	Connections		Insert	
	Ma Prop	ass erties	נקראינע Gravity ווונים Cond ווונים Cond	itions I Conditions	Highlight Bodies	□□ / Axis Plane × Point ▼ ★ Coordinate S	Sketch	Close	
		Prope	rties and Condit	ions	Bodies	Datum 🔻		Close	

Obr. 2-3 Karta modulu Mechanism

Karta je pro přehlednost dělena do několika sekcí:

- Information (Informace o modelu, hmotnostních parametrech, zobrazení)
- Analysis (tvorba nových analýz, přehrávání simulací a vyčíslení výsledků)
- Motion (pohybování se součástmi připojenými vazbou umožňující pohyb)
- Connections (spojení 2 součástí pomocí převodů, pásu, vačky a kontaktu)
- Insert (vložení pohonů, sil a momentů, pružin a tlumičů)
- **Properties and Conditions** (nastavení gravitace, počátečních podmínek...)
- Bodies (vysvícení obrysů součástí, zablokování součástí ...)
- **Datum** (tvorba rovin, bodů, os, křivek, souřadných systémů a skic)
- **Close** (ukončení modulu viz konec kapitoly)

Důležitým prvkům bude věnována náležitá pozornost v kapitole 2.2 – "Tvorba simulačního modelu".

V modelu sestavy se uvnitř modulu Mechanism zobrazují symboly jednotlivých kinematických vazeb a vytvořených prvků mechanizmu tam, kde jsou použity. V případě, že z jakéhokoliv důvodu potřebujeme tyto značky schovat, klikneme na tlačítko "Mechanism Display" v sekci "Information" na pásu karet. Zobrazí se nabídka "Display Entities", kde je možno si vybrat, jaké značky mají být zobrazovány a jaké ne. Vypnutí zobrazení značek kinematických vazeb (joints) je ukázáno na Obr. 2-4. Změna se projeví okamžitě. Obdobně lze schovat i ostatní prvky. Pokud ovšem ničemu nevadí, doporučuje se je ponechat zapnuté. Značky mohou, jak bude později ukázáno, pomoci při tvorbě simulačního modelu a zrychlit práci.



Obr. 2-4 Zobrazování značek prvků

Novinkou oproti standardnímu modeláři je také strom modulu Mechanism, kde se zobrazují jednotlivé prvky vytvářené v modulu podobně jako v modelovém stromě sestavy její součásti. Zde také lze tvořit nové prvky, což je výhodné především proto, že se nemusí hledat na pásu karet.

Ve stromě modulu Mechanism lze také provádět změny rotačních a translačních os jednotlivých kinematických vazeb (změna regenerační polohy, limitů a fyzikálních parametrů. Rozbalením položky CONNECTIONS a JOINTS šipkou u názvu se dostaneme do přehledu použitých kinematických vazeb. Kliknutím na jednotlivé vazby se vysvítí příslušné značky na 3D modelu. Toho lze využít v případě, že jsme zapomněli vazby pojmenovat. V závorkách za názvem vazby je uveden název sestavy nebo podsestavy, kde byla vazba vytvořena. Po vybrání kýžené vazby ji rozbalíme a zobrazí se 2 součásti, mezi nimiž je vazba definovaná a rotační nebo translační osa, popř. více os dle charakteru jednotlivých vazeb (bližší popis vazeb v kapitole 1.3). Nastavení příslušné osy provedeme kliknutím pravým tlačítkem myši na její název – "Edit Definition". Postup je zobrazen také na Obr. 2-5. Tento postup je výhodný zejména v případech, kdy se jedná o nastavení parametrů os definovaných v podsestavách, které bychom v modelovém stromě obtížně hledali.



Obr. 2-5 Editace translační osy

V prostředí Mechanism lze vytvářet souřadné systémy, body, osy, roviny, křivky a skici. Přes modelový strom sestavy lze také měnit definici vazeb mezi součástmi sestavy (pravé tlačítko myši – "Edit Definition"). V případě, že musíme provést rozsáhlejší změny, přidat zapomenuté součásti apod., je nutno opustit prostředí Mechanism a změny provést ve standardním modeláři. Pro opuštění modulu Mechanism slouží tlačítko "Close" na panelu Mechanism. Prvky vytvořené v modulu (pohony, převody …) zůstanou zachovány, ale pokud byla provedena nějaká analýza, dojde ke ztrátě jejich výsledků. Po opětovném spuštění modulu je nutno provést analýzu znova nebo výsledky analýzy uložit (pokud byla provedena analýza, systém na tuto skutečnost upozorní a nabídne uložení výsledků při ukončení modulu).

# Shrnutí pojmů 2.1.

**Mechanism** je modul v softwarovém prostředí Creo určený k provádění kinematických a dynamických analýz v modelu.



## Otázky 2.1.

12. Na co si dát pozor při opouštění modulu Mechanism?



# Úlohy k řešení 2.1.

1. Přejděte se sestavou do modulu Mechanism a vyzkoušejte skrývání značek kinematických vazeb.

## 2.2 Tvorba simulačního modelu



# Výklad

Po přechodu do modulu Mechanism následuje další úprava modelu a definice kinematických či dynamických analýz tak, abychom vyšetřili požadované fyzikální děje. V této části učebního textu bude následovat popis používaných funkcí modulu Mechanism.

## 2.2.1 Tvorba kinematických spojení (Connections)

### **4** Tvorba spojení pomocí ozubených převodů (Gears)

Ozubení je častým prostředkem pro přenesení rotačního pohybu a převodu otáček. V modulu Mechanism slouží k vytváření ozubených převodů funkce "Gears", která je schopna simulovat přenos pohybu různých druhů ozubených kol.

Na příkladu je ukázáno vytvoření ozubeného převodu mezi dvěma čelními ozubenými koly s šikmým ozubením. Byla vymodelována dvě ozubená kola, která chceme vložit do sestavy a roztočit je. Softwarové prostředí Creo umožňuje provést tuto akci bez vytvoření rámu. Založíme tedy novou sestavu s vhodnými jednotkami a vytvoříme 2 osy nad sebou ve vzdálenosti 141 mm tak, jak je ukázáno na Obr. 2-6. K vytvoření druhé osy byla použita pomocná rovina.



Obr. 2-6 Příprava sestavy

Nyní pomocí funkce "Assemble" přidáme KOLO1. Ve výběru typu vazby zvolíme "Pin". Hlavní osa (Axis alignment) bude spodní osa v sestavě a podélnou rovinu kola sjednotíme s příslušnou základní rovinou tak, aby kolo bylo umístěno symetricky (Translation). V tomto případě je výhodné nastavit také možnosti osy rotace (Rotation Axis) tak, že sjednotíme příčné roviny a povolíme regenerační hodnotu rovnu nule. Obdobným způsobem vložíme také KOLO2. V tomto případě je zapotřebí zajistit počáteční pootočení kola 2 vůči kolu 1. V možnostech osy rotace (Rotation Axis) zadáme do aktuální pozice údaj -5 tak, jak je ukázáno na Obr. 2-7. Účelem natočení je zajistit, aby do sebe zuby pěkně zapadly. Může se stát, že hodnota 5 dostane ozubené kolo do nežádané pozice. Pak jsou zřejmě jinak nastaveny směry os a je zapotřebí nastavit natočení experimentálně. Pokud je vše v pořádku, povolíme regenerační polohu a ukončíme tvorbu vazby.



Obr. 2-7 Natočení kola 2

Správnost dosavadního postupu lze ověřit tím, že použijeme funkci "Drag components" v kartě "Mechanism". Po kliknutí na tlačítko funkce klikneme na jednotlivá kola a posouváním myši zjistíme, zda-li se otáčí. Model zregenerujeme pomocí funkce "Regenerate" v kartě "Model" nebo pomocí semaforu na spodní liště programu. Pokud se kola vrátila do původní polohy, můžeme pokračovat dále, pokud ne, musíme hledat chybu. Nyní přejdeme do modulu Mechanism. Funkci "Gears" aktivujeme kliknutím na příslušné tlačítko v kartě Mechanism nebo také ve stromu modulu Mechanism rozbalením položek Connections, kliknutím pravým tlačítkem myši na položku Gears a vybráním možnosti "New". Oba způsoby jsou zobrazeny na Obr. 2-8.



Obr. 2-8 Funkce Gears

Objeví se okno "Gear Pair Definition", kde se definují parametry ozubeného převodu. Napřed je vhodné převod pojmenovat (Name). **Typy ozubeného převodu** (Type) mohou být:

- Generic (uživatelsky definovaný)
- **Spur** (zjednodušené modely čelních ozubených kol)
- Bevel (kuželová ozubená kola)
- Worm (šneková soukolí)
- Rack & Pinion (pastorek a ozubený hřeben)

V tomto případě ponecháme možnost "Generic", volba "Spur" by šla použít při zjednodušeném modelu (2 válce navzájem se dotýkající, průměry odpovídají roztečným průměrům jednotlivých kol). V záložce "Gear1" klikneme na černou šipku v části "Motion Axis" a klikneme na symbol vazby pin na kole 1. Textová pole se vyplní údaji a obrys kola zezelená. To samé provedeme v záložce "Gear2" a vybereme vazbu pin kola 2. V poslední záložce "Properties" rozbalíme nabídku "Gear Ratio" a vybereme možnost "User Defined". Nyní lze manuálně vepsat převodový poměr ozubeného soukolí. Do části D1 napíšeme 1 a do části D2 1.6. Převodový poměr je tedy 1:1.6. Celý postup je ukázán na Obr. 2-9.



Obr. 2-9 Definice parametrů ozubeného převodu

Po potvrzení se na modelu, kromě symbolů kinematických vazeb, objeví také symbol ozubeného převodu. Pro kontrolu nyní znovu použijeme funkce "Drag Components" nyní by se ozubená kola měla pohybovat tak, jako ve skutečnosti. Pokud tomu tak není, je třeba najít chybu.

### Tvorba spojení pomocí řemene či pásu (Belts)

Další častou strojní součástí jsou řemeny či pásy. Pro tvorbu těchto mechanismů slouží funkce "Belts". Pro vytvoření vazby je zapotřebí mít sestavu minimálně dvou řemenic vložených pomocí kinematických vazeb (pro tento účel se hodí opět vazba typu "Pin"). Systém si ale umí poradit i se složitějšími soustavami sestávající se z více řemenic. Pro dosažení lepšího vizuálního efektu, ale také zpřesnění dynamického modelu součásti, lze pomocí této funkce vytvořit řemen jako samostatnou součást (Part), které lze přiřadit materiálové parametry. Další předností je možnost simulace napínání řemene pomocí napínacích kladek. Jako příklad byla vybrána soustava dvou řemenic s jednou napínací kladkou. Řemenice byly umístěny do sestavy stejným způsobem, jako ozubená kola. Pro napínací kladku je výhodné vytvořit si novou podsestavu, do které je vložena také pomocí Do hlavní sestavy byla podsestava přidána pomocí vazby typu "Slider", vazby "Pin". umožňující vertikální posuv (přidány limity tak, aby kladka neustále řemen napínala). Funkcí "Drag Components" byla ověřena správná funkce vazeb. Nyní je možno přejít do modulu Mechanism a aktivovat funkci "Belts" na kartě modulu nebo v jeho stromě (Connections – Belts -pravé tlačítko myši- New). Připravená sestava uvnitř modulu je, včetně zvýrazněných tlačítek funkce "Belts", znázorněna na Obr. 2-10. Po aktivaci funkce se vytvoří nová karta "Belt", kde budeme definovat parametry.



Obr. 2-10 Připravená sestava pro tvorbu řemenového převodu

Další postup je znázorněn na Obr. 2-11. Otevřeme záložku "References", klikneme do pole "Pulleys" a nyní postupně vybereme všechny tři součásti (při výběru držíme klávesu Ctrl). U řemenic vybíráme plochu styku řemenice s nejužším místem klínového řemene, naopak u napínací kladky zvolíme místo s největším průměrem kladky – jednu z bočních hran (řemen je zde otočen). Systém automaticky propojí všechny kladky pomocí symbolu řemene. V případě, že by byl řemen zamotaný, posouváme bílé body na řemenu (na obrázku vyznačeny šipkami), dokud nedosáhneme situace na Obr. 2-11. Dále klikneme do pole "Belt plane" a vybereme podélnou rovinu sestavy. Nyní můžeme tvorbu potvrdit.



Obr. 2-11 Tvorba řemenového převodu

Mezi prvky zůstal symbol řemenového převodu symbolizující vytvořenou vazbu. V modelovém stromě se nově objevil prvek "Belt1". Správnost nastavení vazby lze opět ověřit pomocí funkce "Drag Components". Pokud se otáčí vše správným směrem, lze přistoupit k dalšímu kroku, kterým je tvorba řemene v sestavě. Pravým tlačítkem myši klikneme na prvek "Belt1" v modelovém stromě nebo na symbol vazby na modelu a zvolíme možnost "Make Part". V otevřeném okně "Component Create" se ujistíme, že jsou zvoleny možnosti "Part" a "Solid", případně součást přejmenujeme. Potvrzením přejdeme do okna "Creation Options", kde zvolíme "Empty". Postup je zobrazen na Obr. 2-12.

REMEI	NICE1.PRT AK.ASM	Type Part	Sub-type Solid	Creation Method Copy From Existing Locate Default Datums		
<ul> <li>Inser</li> </ul>	Delete Group Suppress	Skeleton Model Bulk item Envelope	O Sheetmetal Intersect Mirror	Create features		
	Rename Edit Edit Definition Edit References	Name Common name	Remen			
	Make Part		Cancer			
	Setup Note 🕨			OK Cancel		
	Info   Edit Parameters		l			

Obr. 2-12 Vytvoření součásti řemene

Touto cestou se vytvořila součást obsahující pouze jednu křivku. Opustíme modul Mechanism a součást v sestavě aktivujeme (klikneme pravým tlačítkem myši na název součásti v modelovém stromě – "Activate"). Ostatní prvky jsou barevně potlačeny. Nyní rozbalíme součást v modelovém stromě (šedá šipka vedle jejího názvu) a klikneme na prvek "Belt Curve id …". Ujistíme se, že je označen, teprve potom klikneme na kartě "Model" na funkci "Sweep" – tažení po křivce. Vybraná křivka se při spuštění funkce **celá** zvýrazní, čímž systém dává vědět, že ji bere v úvahu. Následně klikneme na symbol skici na kartě "Sweep". Otevře se prostředí skici, kde vybereme potřebné reference a do výřezu v drážce řemenice dokreslíme řemen tak, jako v levém horním rohu Obr. 2-13. Skicu potvrdíme. Pokud je vše v pořádku, systém vytvoří náhled řemene. Pokud odpovídá situaci na Obr. 2-13, můžeme potvrdit vytvoření prvku "Sweep". Součást je možno klasickým způsobem otevřít, přiřadit jí hmotnostní parametry, popřípadě měnit její vzhled.



Obr. 2-13 Tvorba řemene funkcí "Sweep"

Vytvořený řemen je samozřejmě statický prvek a pohybem řemenic se fyzicky neotáčí. Řemen vytvořený tímto způsobem však dokáže měnit svůj tvar, pokud budeme hýbat s vazbou "Slider" napínací kladky. Pomocí funkce "Drag Components" ji posuneme a následně sestavu zregenerujeme. Řemen by se měl upravit podobně, jako na Obr. 2-14.



Obr. 2-14 Napínání řemene

## Tvorba spojení pomocí kontaktu těles (3D Contacts)

3D kontakt je vysoce specifická vazba a hned úvodem je zapotřebí zmínit, že její použití je **velmi** omezené. Systém si totiž dokáže poradit pouze se specifickými případy a to ještě za podmínky, že se jedná o jednoduché tvary. Plocha, v jejímž řezu se vyskytuje křivka jiná než kružnice, nemůže být ani vybrána. V případě, že je model naprosto triviální, je však použití poměrně jednoduché. Jako příklad poslouží kulička pohybující se po dráze složené z několika nakloněných rovin. Celá dráha byla vymodelována jako jeden "Part". Na pomyslný start je umístěn souřadný systém. V sestavě je dráha vložena pomocí vazby "Default". Model koule je do sestavy vložen pomocí vazby "6DOF", která ponechává kouli absolutní volnost. Koule byla pomocí funkce "3D Dragger" (barevná koule okolo souřadného

systému součásti) umístěna nad místo startu. Na Obr. 2-15 je k vidění připravený model s vyznačenými možnostmi spuštění funkce "3D Contacts".



Obr. 2-15 Vytvoření nové vazby pomocí funkce "3D Contacts"

Po aktivaci funkce rozklikneme záložku "References", abychom viděli, kam se vybrané položky zapisují a klikneme na plochu koule (stačí na polovinu). Plocha se objeví v oddíle "Contact Reference 1". Nyní klikneme do oddílu "Contact Reference 2" a pomocí klávesy Ctrl vybereme všechny plochy, kterých se kulička může potenciálně dotknout. V kartě panelu změníme v rolovací nabídce volbu z "No friction" na "With friction", do statického součinitele tření  $\mu_s$  napíšeme například hodnou 0.2 a do kinetického součinitele  $\mu_k$  hodnotu 0.1. Nastavení je předvedeno na Obr. 2-16. Následně nastavení potvrdíme a vazba je připravena pro analýzu.





## Tvorba spojení pomocí vačky (Cams)

Často používaným strojním prvkem jsou vačky, které slouží k transformaci rotačního pohybu vačkové hřídele na translační pohyb zdvihátka. Zdvihátko se zvedá v přesně stanovenou dobu do definované výšky. Oba parametry závisí na konstrukci vačky. Z hlediska 3D modelování se vačka a zdvihátko vloží do sestavy pomocí vhodných vazeb ("Pin", "Slider", …) a vzájemně se propojí až v modulu Mechanism pomocí funkce "Cams". Použití je ukázáno na vačce čtyřdobého zážehového motoru s rozvodem OHC. Jednotlivé součásti byly vloženy na připravené osy v sestavě. Pro ventil byla použita vazba "Slider" (není vhodné protáčení z hlediska budoucích vazeb), vše ostatní přidáno pomocí vazeb "Pin". Regenerační poloha nastavena na vačkové hřídeli tak, aby excentrická část vačky v základní poloze směřovala dolů. Následně otevřeme modul Mechanism a dle Obr. 2-17 aktivujeme funkci "Cams".



Obr. 2-17 Vytvoření nové vazby pomocí funkce "Cams"

Nyní označíme pomocí klávesy Ctrl všechny činné plochy vačky a potvrdíme stisknutím tlačítka "OK" **v okně "Select"**. Na vačce se objeví symbol vazby. Otevřeme záložku "Cam2" a nyní stejným způsobem označíme **obě** části válečku zdvihátka (na rozdíl od funkce "3D Contact", kde systém válcové a kulové části vybírá jako celky). Potvrdíme okno "Select" a symbol vazby se objeví i na druhé součásti. V kartě "Properties" lze nastavit tření a nadskakování vačky (funguje, pokud je definovaná nějaká počáteční podmínka – viz kap. 2.2.3). Parametr "e" nadskakování vačky nabývá hodnot od 0 do 1. Čím je větší, tím více vačka nadskakuje. Všechny kroky jsou zobrazeny na Obr. 2-18. Při výběru se může objevit chyba (uživatelská vlastnost systému). Pokud se tak stane, je zapotřebí výběr opakovat, zaměnit pořadí nebo restartovat program. Okno potvrdíme, a pokud jsme nenastavili nadskakování, tak se obě součásti budou navzájem dotýkat.

	Cam-Follower Connection Definition X	Cam-Follower Connection Definition X	Cam-Follower Connection Definition
	Name	Name	Name
	Vacka_Zdvihatko	Vacka_Zdvihatko	Vacka_Zdvihatko
	Cam1 Cam2 Properties	Cam1 Cam2 Properties	Cam1 Cam2 Properties
	VACKOVA HRIDEL:surface	ZDVIHATKO KROUZEK:surface	Enable Liftoff
	Autoselect Flip	Autoselect Flip	<b>e</b> = 0.2
			Friction     Enable Friction
	Depth Display Settings	Depth Display Settings	μ <sub>s</sub> = 0.2
	Automatic	Automatic	M <sub>k</sub> = 0.1
	Front Reference	Front Reference	
1	k	k	
	Back Reference	Back Reference	OK Cancel
	k	k	
	Center Reference	Center Reference	
	k	k	
	Denth	Depth	
and the second se	1 mm	1 mm	
	1 P		
	0/ 0/	Off Connet	

Obr. 2-18 Nastavení parametrů funkce vazby Vacka\_Zdvihatko

zdvihátkem rovněž Táhlo ventilu je se propojeno spojením "Cams", které je spolehlivější a rychlejší na výpočet než logičtější volba "3D Contact". Tvarový styk je oproti minulému případu pouze bodový (táhlo zakončeno kulovou plochou). Pokud bychom postupovali jako v minulém případě, systém by hlásil chybu. Proto je nutno mít na kulové ploše křivku a vačku definovat pomocí plochy a křivky, která je umístěna do podélné roviny sestavy (zabezpečen neustálý styk křivky s plochou zdvihátka - proto také použita vazba "Slider"). Při výběru plochy nás systém nepustí dál, dokud nedefinujeme počáteční a koncový bod. Ty vybereme náhodným kliknutím na libovolný bod na začátku konci stykové plochy na zdvihátku. Postup je zobrazen na Obr. a 2-19.



Obr. 2-19 Nastavení parametrů funkce vazby Zdvihatko\_Ventil

# 2.2.2 Vkládání pružin, tlumičů, silových účinků a pohonů

# 🞍 Vkládání pružin (Springs)

Práce s pružinami je v modulu Mechanism velmi jednoduchá. Předem je zapotřebí říci, že pro účely simulací, kde není zapotřebí počítat s hmotnostními parametry pružin, se tento prvek vůbec nemusí modelovat. Stačí mít v sestavě definovány body, z nichž alespoň jeden je umístěn v pohyblivé součásti. Na příkladu je ukázáno vložení pružiny do sestavy s vačkou. Pohyblivý bod je umístěn v oblasti držáku pružiny na ventilu (v jeho ose) a pevný bod je definován v sestavě přibližně 35 mm pod prvním bodem (rovněž v ose). Pružina se vytvoří dle Obr. 2-20 pomocí funkce "Springs".



Obr. 2-20 Vložení pružiny pomocí funkce "Springs"

Po aktivaci funkce klikneme v její kartě na záložku "References" a na text "Select items". Pomocí klávesy Ctrl vybereme oba body. V náhledu se vytvoří značka pružiny. Můžeme dále nastavovat její tuhost u parametru "K" (např. 8 N/mm) a délku nezatížené pružiny u parametru "U" (např. 38 mm). Parametr "Current" ukazuje aktuální délku pružiny a informuje nás o jejím předpětí. V kartě "Options" můžeme měnit průměr pružiny (např. 14.6 mm). V záložce "Properties" lze měnit název pružiny. Vytvoří se model pružiny, který je pouze ilustrační (nelze mu přiřadit hustotu) silové parametry pružiny budou uvažovány při analýze. Otáčením vačky pomocí funkce "Drag Components" se model deformuje jako skutečná pružina. Postup nastavení všech zmíněných parametrů pružiny, včetně znázornění výsledného stavu, je zobrazen na Obr. 2-21.



Obr. 2-21 Nastavení parametrů pružiny

## ↓ Vkládání tlumičů (Dampers)

Důležitým prvkem pro správnost výpočtů v prováděných analýzách je také simulace tlumičů (jsou-li použity v navrhované sestavě). K tvorbě tlumičů slouží funkce "Dampers". Pro ukázku byla vybrána jednoduchá sestava tlumiče skládající se z těla a pístnice, vložené pomocí vazby "Cylinder". V modulu "Mechanism" aktivujeme funkci "Dampers" jedním z možných způsobů zobrazených na Obr. 2-22.



Obr. 2-22 Vložení tlumiče pomocí funkce "Dampers"

Otevřeme kartu "References". Funkce "Dampers" vyžaduje jako referenci pohybovou vazbu, respektive její osu. Kliknutím vybereme **translační** pohybovou osu (vazba "Cylinder"). V záložce "Properties" lze tlumič přejmenovat. Jediným nastavovaným parametrem je koeficient tlumení "C". Zadáme např. 300 Ns/mm a tvorbu ukončíme potvrzovacím tlačítkem. V prostoru vazby se objeví malý zelený znak. Celý postup je znázorněn na Obr. 2-23.



Obr. 2-23 Nastavení parametrů tlumiče

### Vkládání sil a momentů (Force/Torque)

Silové účinky se do analyzovaných sestav vkládají nejčastěji pro simulaci vnějších podmínek (zatížení od nemodelovaných periferií). Pro vkládání sil je zapotřebí mít ve vybraných součástech definované body, momenty se vkládají na celé součásti. Jako příklad definice bodové síly poslouží sestava tlumiče, kde bude simulováno zatížení vnějším prvkem. Pro definici síly byl na konci pístnice vytvořen bod. V modulu Mechanism je ke vkládání sil určena funkce "Force/Torque", která se aktivuje dle Obr. 2-24.

Následně se otevře okno "Force/Torque Definition", kde se nastavují parametry zatěžující síly. Nejprve je zapotřebí zvolit typ zatížení.



Obr. 2-24 Vložení síly pomocí funkce "Force/Torque"

Modul Mechanism nabízí tři typy zatížení:

- **Point Force** (síla působící v jednom bodu)
- Body Torque (moment působící na vybranou součást)
- **Point to Point Force** (síla působící mezi dvěma body)

V tomto případě ponecháme volbu "Point Force". V oddíle "Point or Vertex" vybereme připravený bod. Vzápětí se objeví šipka náhledu směru působení síly. Nejprve nastavíme velikost síly v záložce "Magnitude". Systém nabízí opět několik možností:

- Constant (síla má konstantní hodnotu)
- **Table** (velikost síly dána tabulkou obsahující čas a velikost)
- User Defined (velikost síly závisí na vztazích definovaných uživatelem)
- **Custom Load** (externě definovaná síla)

Z uvedených možností vybereme "Table". Podrobný postup definice zatěžující síly je uveden na Obr. 2-25.

	Force/Torque Definition	X Force/Torque Definition X
Name		Name
Zatezujici_Sila		Zatezujici_Sila
Туре		Туре
Point Force		Point Force
Point or Vert	ex	Point or Vertex
TLUMIC	_PISTNICE:SILA	TLUMIC_PISTNICE:SILA
Manufactor Di		Discution 1
Magnitude Di	rection	Define Direction by
Table	- N	Typed Vector
1000	•	isped vector
- Table		Vector
Interpolatio	on	Coordinate System
Linear	Spline fit O Monotonic fit	Wcs
Use Externa	al File	× 10
Time	Magnitude	X U
0	0	Y: -1
		7.0
File		OK Apply Cancel přidání řádků do tabulky odebrání aktuálního řádku z tabulky
t	▼ sec	
Graph		
	Magath	nahled funkce definovane fabulkou
	4 magni	(graf)
In separate	graphs Derivat	ive .
O Show user	points 🔘 Show interpolated 🛛 💿 Show both	
Number of interp	oolated points Total - 50	
	OK Apply Cap	el
	on Apply Can	

Obr. 2-25 Definice zatěžující síly pomocí tabulky

V oddíle "Interpolation" si můžeme vybrat, zda body v tabulce proložíme lineární funkcí, křivkou nebo monotónní funkcí. Vzhledem k tomu, že nárůst síly bude lineární, ponecháme možnost "Linear".

Do tabulky dle Obr. 2-25 vložíme dva řádky. Počáteční síla bude nulová, její hodnota bude stoupat, až v čase 7s dosáhne výše 5000 N. V případě, že používáme výpočetní software a chceme vložit externí data, klikneme v oddíle "File" na obrázek složky. Následně vybereme soubor ve formátu \*.tab nebo \*.grt. Podpora ostatních formátů není zaručena. Při exportu si také musíme dát pozor na to, aby **desetinný oddělovač** byl **tečka** a ne čárka. Pokud zaškrtneme pole "Use External File", tabulka zmizí a systém bude čerpat data přímo ze zdrojového souboru. To je výhodné v případě, že se budou hodnoty přepisovat. Systém si pamatuje cestu k souboru. Změní-li se (přenášení práce mezi počítači – názvy disků, flash pamětí …), systém se k hodnotám nedostane a daná síla (popř. ostatní funkce definovány tabulkou) svítí šedě. Analýza pak probíhá, jako by síla neexistovala.

V posledních částech záložky "Magnitude" je uživateli nabídnut grafický náhled jím definované tabulky. Náhled lze aktivovat stisknutím tlačítka s obrázkem grafu. Je vykreslena funkce velikosti síly v čase. Pokud by uživatel chtěl vyjádřit průběh velikosti síly vůči jiné proměnné, musí ji mít definovanou v sekci "Measures" viz kapitola 2.5. Poté by ji vybral v oddíle "Variable" místo času "t". Pro vytvoření grafu systém používá hodnoty z tabulky doplněné o hodnoty vypočtené interpolací. Počet interpolovaných hodnot ovlivňuje vyhlazení křivky funkce a uživatel jej může měnit v boxu "Number of interpolated points". Graf se zobrazuje v samostatném okně blíže popsaném v kapitole 2.5.

Nyní se přesuneme do záložky "Direction", kde ovlivňujeme směr působení síly. Systém automaticky navrhuje určit směr působení vůči globálnímu souřadnému systému soustavy. Tuto volbu ponecháme. Nyní musíme pomocí jednotkových vektorů určit směr působení síly. Je dobré posunout pohled na globální souřadný systém a podívat se, na jaké globální ose leží pohybová osa pístnice. V příkladu leží v ose y. Jelikož chceme, aby se pístnice pod vlivem zatěžující síly zasouvala dovnitř, zadáme do pole "Y" hodnotu -1. Šipka by nyní měla ukazovat kýžený směr.

Pokud je vše v pořádku, nastavení potvrdíme tlačítkem OK. Indikační šipka směru síly je nahrazena tenkou modrou čarou symbolizující definovanou zátěž.

Pro budoucí účely byla stejně vytvořena druhá síla s max. hodnotou 15 kN.

#### Vkládání servopohonů (Servo Motors)

Vkládání servopohonů je jednou z nejdůležitějších činností v modulu Mechanism. Téměř v každé analyzované sestavě se vyskytne nějaký typ pohonu. Funkce "Servo Motors" umožňuje vložení těchto typů pohonů:

- **Position** (motor řídíme pomocí polohy)
- Velocity (motor řídíme pomocí rychlosti)
- Acceleration (motor řídíme pomocí zrychlení)

67

Pro výběr správného pohonu je zapotřebí hned úvodem zmínit, že pokud budeme chtít vyšetřovat rychlosti nebo zrychlení jednotlivých kloubů, je velmi dobré definovat pohon pomocí průběhu zrychlení. Důvod je, že z průběhu zrychlení systém získá průběh polohy pomocí integrace, jejíž softwarový výpočet je rychlejší.

Pohon lze vložit na pohybovou osu (většina případů) nebo na konkrétní geometrii. Na příkladu je ukázáno vložení servopohonu s konstantním zrychlením do ozubeného soukolí, kde bude pohánět pastorek. Na Obr. 2-26 jsou znázorněny způsoby aktivace funkce "Servo Motors" v prostředí modulu Mechanism.



Obr. 2-26 Vložení servopohonu pomocí funkce "Servo Motors"

V oddíle "Driven Entity" ponecháme volbu "Motion Axis" a klikneme na vazbu "Pin" pastorku. Dojde k označení obrysu pastorku a zvýraznění souřadného systému. Pokud bychom zjistili, že se motor otáčí na opačnou stranu, lze směr obrátit pomocí tlačítka "Flip".

Přepneme se na záložku "Profile" a v oddíle "Specification" zvolíme možnost Právě jsme zvolili pohon řízený zrychlením. Ve fyzikálním vztahu "Acceleration". pro zrychlený pohyb disponují také veličiny počáteční polohy a zrychlení. Jejich velikost můžeme měnit v oddílech "Initial Angle" a "Initial Angular Velocity". V oddíle "Magnitude" ponecháme možnost "Constant". Nabízí se také časově proměnné zrychlení definované pomocí polynomů, parabolické funkce, rampy. Nejčastěji používanou možností proměnného zrychlení je však definice pomocí tabulky podrobně popsaná v kapitole 2.2 sekci "Vkládání sil a momentů (Force/Torque)". Hodnotu konstantního zrychlení nastavíme na 5 m/s<sup>2</sup>. Oddíl průběhu "Graph" nabízí náhled graficky znázorněného polohy, rychlosti a zrychlení.

Pokud je vše nastaveno, okno potvrdíme klávesou OK a na pohybové ose se objeví modrá spirála symbolizující servopohon. Postup nastavení je vidět na Obr. 2-27.

	Servo Motor Definition X	Servo Motor Definition X
	Name	Name
	Pohon_Pastorek	Pohon_Pastorek
	Type Profile	Profile
	Driven Entity	Specification
	Motion Axis	Acceleration v deg/sec^2
	Geometry Connection_1.axis_1	Initial Angle
R	Flip	රිත් 0.0209891 deg
		Initial Angular Velocity
	OK Apply Cancel	0 deg/sec
		Magnitude
	Změna směru otáčení	Constant 🗸
	Počáteční potočení	Graph
		Position     Velocity
		In separate graphs
	Počáteční rychlost /	OK Apply Cancel
4		

Obr. 2-27 Nastavení funkce "Servo Motors"

#### Simulace momentového řízení (Force Motors)

Nejmodernější řídicí systémy průmyslových robotů v sobě mají matematicko-fyzikální model celého zařízení, prostřednictvím něhož počítají zatížení na jednotlivé motory, které jsou řízeny tak, aby na jejich výstupní hřídeli byl požadovaný krouticí moment. V příkladu bude předvedeno použití momentového řízení pro rozjezd závaží umístěného na rameni. Závaží je umístěno na osu v sestavě pomocí vazby "Pin". Vložení pohonu je jednoduché a děje se prostřednictvím funkce "Force Motors" tak, jak je ukázáno na Obr. 2-28.



Obr. 2-28 Vložení pohonu prostřednictvím funkce "Force Motors"

Objeví se okno "Force Motor Definition". Postup nastavování parametrů je ukázán na Obr. 2-29. Pokud jsme pohon nepřidávali přes značku kinematické vazby, bude třeba zadat pohybovou osu ("Pin"). Následně se zvýrazní obrys součásti. V oblasti "Magnitude" nyní vybereme možnost "Ramp". Velikost momentu se bude měnit lineárně s počáteční hodnotou definovanou konstantou "A" (zvolíme 1000 N/mm) a strmost definovanou konstantou "B" (zvolíme 10 000). Při experimentální volbě rampy je dobré používat grafický náhled jejího průběhu (Obr. s grafem). Nastavené hodnoty potvrdíme tlačítkem OK.



Obr. 2-29 Nastavení parametrů pohonu

### 2.2.3 Vlastnosti a podmínky, nastavení gravitace (Properties and Conditions)

### Informace o hmotnostních parametrech (Mass Properties)

Návrh jakéhokoli strojního uzlu nejen za pomocí analýz modulu Mechanism je v praxi iterační proces. To znamená, že velmi často dochází k dílčím změnám jednotlivých součástí a dílčích sestav. Užitečným nástrojem pak může být funkce "Mass Properties", která rychle ukáže vybrané hmotnostní parametry (hustotu, hmotnost, poloha těžiště a matice setrvačnosti k těžišti a k základnímu souřadnému systému součásti). V oddílu "Reference Type" si lze vybrat, zda se budou zobrazovat parametry pro jednotlivé prvky ("Part" a "Body") nebo pro celé sestavy "Assembly". Nová analýza začne opětovným kliknutím do oblasti "Part", "Body" nebo "Assembly" v závislosti na předchozím nastavení. Údaje zobrazené touto analýzou nejdou uložit ani zkopírovat, proto se pro tyto účely musí použít klasická analýza (karta "Analysis" – skupina "Model Report" – tlačítko hmotnostní "Mass Properties"). Tato analýza vyprodukuje zprávu, kterou je možno uložit, vytisknout a údaje z ní libovolně kopírovat do dalšího software.

#### Nastavení gravitace (Gravity)

Funkce "Gravity" slouží k nastavení směru působení tíhové síly na analyzovaný model. Nastavení je velice jednoduché a probíhá stejným způsobem jako nastavování výslednice sil při definici silových účinků (pomocí jednotkových vektorů – blíže popsáno v bloku "Vkládání sil a momentů (Force/Torque)"). V případě, že se rozhodneme z jakéhokoliv důvodu měnit velikost tíhového zrychlení, musíme si dát pozor na správný převod jednotek. Nastavení gravitace je předvedeno na Obr. 2-30.



Obr. 2-30 Nastavení gravitace

### Nastavení počátečních podmínek (Initial Conditions)

Nastavení počátečních podmínek je důležité zejména proto, že některé funkce (např. odskakování vačky) by bez nastavených podmínek nefungovaly. Proto lze jejich definici doporučit i v případech, kdy mechanismus začíná z klidové polohy a pozici nastavujeme do původní polohy pomocí funkce "Regenerate".

Počáteční podmínky jsou v modulu Mechanism definovány polohou jednotlivých pohybových os sestavy (vždy) a počátečními rychlostmi bodů a pohybových os (volitelně). Při definici polohy lze použít aktuální polohu (předvolená možnost "Current Screen") nebo použít polohu definovanou pomocí funkce "Snapshot".

Funkce "Snapshot" je velmi důležitá v rozsáhlých sestavách s mnoha mechanismy. Například rameno průmyslového robotu je do sestavy vloženo pomocí vazby "Pin" a dále je pomocí funkce "Gears" napojeno na motor s převodovkou, které mají vlastní mechanismy. Nastavíme-li regenerační polohu na vazbě "Pin" mezi jednotlivými rameny robotu, popř. základnou, ramena se sice do kýžené pozice přesunou, ale mechanismy motoru a převodovky ne. Proto musíme takto složité sestavy modelovat bez regeneračních poloh a do kýžených pozic se přesouvat pomocí kinematických analýz, jejichž výslednou polohu lze uložit pomocí funkce "Snapshot". Na příkladu je ukázáno zachycení základní polohy robotu ihned po vložení všech součástí. Po každém pohybu se tak budeme moci vrátit do výchozího stavu.

Funkce "Snapshot" je součástí funkce "Drag Components" blíže popsané v kapitole 1. Po aktivaci funkce "Drag Components" se objeví okno "Drag", ve kterém je oddíl "Snapshots". Kliknutím na název oddíl rozbalíme.

V oddíle "Current Snapshot" nejdříve zaznamenáme aktuální pozici pomocí tlačítka s fotoaparátem. Vznikne nový záznam, který se objeví v textovém poli v záložce "Snapshots". Nalevo od tohoto pole je sada tlačítek, pomocí nichž lze s uloženými pozicemi pracovat. Nejdůležitější je tlačítko s brýlemi, pomocí něhož kdykoli zobrazíme danou pozici. Záznamy lze přejmenovat kliknutím na text "Snapshot1" a následně v textovém poli v oddíle "Current Snapshot" zadáme název (např. "Zakladni\_Poloha") a potvrdíme stisknutím tlačítka Enter. Postup zaznamenání pozice je na Obr. 2-31.



Obr. 2-31 Zaznamenání polohy pomocí funkce "Snapshot"

Máme-li zaznamenanou pozici, můžeme přistoupit k definici samotných počátečních podmínek. Na kartě Mechanism klikneme na tlačítko "Initial Conditions". Na Obr. 2-32 je zobrazen celý proces tvorby počátečních podmínek. Podmínku vhodným způsobem pojmenujeme. V oddíle "Snapshot" zvolíme možnost "Zakladni\_Poloha". Protože robot začíná z klidové polohy, oddíl "Velocity Conditions" ponecháme prázdný a nastavení potvrdíme tlačítkem "OK".

Nyní bychom nechali proběhnout polohovou nebo kinematickou analýzu s pohony s polohovým řízením. Mechanismus by se přesunul do požadované polohy, kterou bychom opět zaznamenali pomocí funkce "Snapshots". Protože počet počátečních podmínek není
omezen, lze definovat novou počáteční podmínku s touto polohou, která může sloužit pro další analýzu (každé analýze lze přiřadit právě jednu počáteční podmínku).



Obr. 2-32 Tvorba počátečních podmínek

#### Podmínky předčasného ukončení analýzy (Termination Conditions)

Za normálních okolností je analýza ukončena po vypršení doby jejího trvání. Mnohdy požadovaný jev nastane dříve, než se naplní časový interval a systém zbytek analýzy počítá zbytečně. V případě, že provádíme analýzy dějů, které nastanou v neznámý čas, je lepší než volit zbytečně dlouhou dobu trvání analýzy, definovat podmínku předčasného ukončení analýzy. Na příkladu je znázorněna tvorba podmínky pro sestavu tlumiče. Postup je znázorněn na obrázku 2-33.



Obr. 2-33 Tvorba podmínek předčasného ukončení analýzy

Po spuštění funkce se otevře okno "Termination Condition Definition". Hlavním objektem v okně je textové pole, kam prostřednictvím příkazů vkládáme podmínky pro ukončení analýzy. V tomto případě je logické konec analýzy definovat pomocí polohy pístnice. Zatížíme-li pístnici příliš velkou silou, v určitém momentu dosáhne krajní polohy a zbytek simulace v ní setrvá. Dle obrázku vkládáme pomocí tlačítek nad textovým polem jednotlivé prvky výroku tak, abychom dosáhli výsledku "Poloha\_Pistnice == 141". Poloha pístnice je veličina definovaná prostřednictvím funkce "Measures" podrobně popsané v kapitole 2.5. Nyní skončí simulace po vypršení doby jejího trvání **nebo** v momentě, kdy se pístnice dotkne dna.

## Shrnutí pojmů 2.2.

**Tvorba simulačního modelu** v sobě zahrnuje spojování jednotlivých součástí sestavy pomocí převodových funkcí (ozubení, vačky, řemeny a pásy …), popřípadě 3D kontaktu (s nejistým výsledkem). Následuje přidání pohonů, pružin, tlumičů a zatěžujících účinků včetně jejich definice. Pro správnou funkci některých prvků modulu Mechanism je zapotřebí pro dynamické analýzy nastavit její počáteční podmínky. V případech, kdy vyšetřujeme jevy, které nastanou v neznámý čas, je výhodné nastavit také podmínky předčasného ukončení analýzy.



### Otázky 2.2.

- 2. Lze si při tvorbě ozubení zvolit libovolný převod, byť tomu průměry kol nemusí odpovídat?
- 3. Lze vytvořit součást řemene nebo pásu, které se dá přiřadit hustota prostřednictvím modulu Mechanism? Lze totéž provést při tvorbě pružin?
- 4. Vysvětlete rozdíl mezi funkcemi "Servo Motor" a "Force Motor".
- 5. Jaké znáte způsoby návratu mechanismu do výchozí polohy?
- 6. Proč je dobré vytvářet počáteční podmínky?



## Úlohy k řešení 2.2.

7. Všechny popisované prvky zkuste vložit do vlastních sestav.



## **CD-ROM**

Většina z prováděných úkonů je zpracována na výukových videosekvencích pojmenovaných podle názvu sestavy.



### Odměna a odpočinek

Po splnění všech úkolů a zodpovězení všech otázek si dopřejte řádný odpočinek, aby i Vaše další studium probíhalo efektivně. Pokud jste něčemu neporozuměli, neváhejte a zeptejte se vyučujícího dříve, než se pustíte do dalšího textu.

### 2.3 Definice analýz a veličin



Nyní, po zvládnutí tvorby sestav s kinematickými vazbami a tvorby simulačního modelu, lze přistoupit k samotným analýzám modelů. Při analýze bere systém v úvahu všechny předem nastavené vazby, včetně limitů, převody a počáteční podmínky. Se zatěžujícími účinky je počítáno pouze byl-li zvolen druh analýzy, který to umožňuje.

Modul Mechanism nabízí několik druhů analýz:

- **Position** (výpočty polohy)
- **Kinematic** (výpočty kinematických veličin)
- **Dynamic** (výpočty dynamických účinků)
- Static (statické výpočty)
- Force Balance (vyvažování mechanismů, výsledek je síla)

Z nabízených možností jsou nejčastěji používané kinematické a dynamické analýzy, jejichž možnosti pokrývají naprostou většinu potřeb uživatele.

#### 2.3.1 Kinematická analýza

Kinematickou analýzu je možno použít v případě, že vyšetřujeme pouze průběhy poloh, rychlostí, zrychlení, vzájemné kolize součástí a některé ostatní veličiny (počet stupňů volnosti, redundance ...) nevyžadující výpočty dynamických účinků. Doba výpočtu je úměrně kratší.

Jako příklad poslouží sestava ozubeného soukolí z předchozího oddílu. Ozubená kola, jimž byly přiřazeny materiálové vlastnosti, jsou vložena pomocí kinematických vazeb. V modulu Mechanism byl přidán ozubený převod a pohon. Vše je připraveno pro definici kinematické analýzy, jež je zobrazena na Obr. 2-34 a provádí se pomocí funkce "Analyses" nebo "Mechanism Analysis".

Po aktivaci funkce se zobrazí okno "Analysis Definition", kde v oddíle "Name" zvolíme vhodný název a v oddíle "Type" vybereme možnost "Kinematic". Dále v záložce "Preferences" lze nastavovat čas počátku a konce analýzy, počet snímků za sekundu (oddíl "Graphical Display"), případně uzamykat jednotlivé vazby a měnit jejich parametry (oddíl "Locked Entities"). V oddíle "Initial Configuration" lze zvolit počáteční podmínku (pokud je nějaká definovaná), jinak analýza začíná z aktuální pozice. Pokud se vracíme do původní polohy pomocí funkce "Regenerate" a nenastavili jsme počáteční podmínku, nesmíme zapomenout model zregenerovat před každým opakováním analýzy. Všechny volby v záložce "Preferences" ponecháme nepozměněné.

V záložce "Motors" si můžeme vybrat, které z nastavených pohonů chceme pro analýzu použít. Automaticky se vybírají všechny pohony, které z tabulky odebíráme nebo zase přidáváme zpět (pomocí tlačítek vedle tabulky, z nichž poslední vrátí všechny pohony do tabulky). Jelikož je v sestavě definován pouze jeden pohon, zkontrolujeme, že je přítomen v tabulce a celé nastavení potvrdíme tlačítkem OK.



Obr. 2-34 Definice kinematické analýzy

Po definici analýzy můžeme přikročit k jejímu spuštění. Existují dva způsoby spouštění analýz:

- Ihned po nastavení (okno "Analysis Definition" "Run"– viz Obr. 2-34)
- Prostřednictvím stromu modulu Mechanism (viz Obr. 2-35)

Doporučuje se spouštět analýzu druhým způsobem, protože se velmi často stává, že ihned po potvrzení si uvědomíme, že jsme nenastavili typ analýzy nebo jsme něco nastavili špatně.

🔻 🔀 ANALYSES	
🔀 Kinematicka_A	nalyza (KINEMATICS)
PLAYBACKS	Edit Definition Delete Copy
	Run
	Info 🕨

Obr. 2-35 Spuštění analýzy prostřednictvím stromu modulu Mechanism

Po spuštění následuje výpočet, jehož doba je závislá na druhu prováděné analýzy a výkonu pracovní stanice. Mechanismus se během analýzy pohybuje. Na spodní liště se objeví informace o stavu výpočtu (v procentech) a vedle je červené stop tlačítko. Toto slouží pro urychlené ukončení výpočtu. Pokud ho skutečně chceme ukončit, klikáme na tlačítko s co nejvyšší frekvencí tak dlouho, dokud proces neustane. Informace o stavu výpočtu jsou zobrazeny na Obr. 2-36.

Time :	6.6	94%	

Obr. 2-36 Informace o stavu výpočtu

#### 2.3.2 Dynamická analýza

Dynamická analýza je, co se týče možností využití, mnohem obsáhlejší a univerzálnější. Pomocí dynamických analýz můžeme spočítat zatěžující účinky v jednotlivých kloubech, volit správnou velikost pohonů strojních uzlů atd. **Před analýzou je potřeba ověřit, že model nemá žádné redundance a definovat počáteční podmínku!!!** 

Aplikace dynamické analýzy bude předvedena v sestavě tlumiče. Sestava je vymodelovaná dle zásad uvedených v kapitole 1. V modulu Mechanism byl do sestavy vložena funkce simulující tlumič, zatěžující síla, počáteční a koncové podmínky.

Nyní aktivujeme funkci "Mechanism Analysis". Analýzu vhodně pojmenujeme. V oddíle "Type" zvolíme možnost "Dynamic". Na kartě "Preferences" nastavíme dobu trvání analýzy ("Duration") na 7s. Počet snímků za sekundu ("Frame Rate") nastavíme na 15. Následně v oddíle "Initial Configuration" zaškrtneme možnost "I.C.State" a v oddíle "Termination Condition" možnost "Condition". Záložku "Motors" ponecháme bez povšimnutí, neboť v sestavě není použit žádný pohon.

Dynamická analýza umožňuje otevřít záložku "Ext Loads", která obsahuje tabulku s přehledem definovaných sil v modelu. Protože chceme vyšetřit průběh polohy pístnice pod zatížením menší síly, označíme sílu "Zatezujici\_Sila\_Velka" a pomocí tlačítka s šipkou ven ji

odstraníme ze seznamu tak, aby situace odpovídala té na Obr. 2-37. Ve spodní části pak povolíme výpočet s gravitačními účinky (zaškrtnutím "Enable Gravity"). Také můžeme povolit tření ve vazbách (není-li nastaveno je jedno, zda-li je položka zaškrtnutá). Analýzu potvrdíme tlačítkem "OK" následně ji spustíme pomocí stromu modulu Mechanism ("Run").



Obr. 2-37 Definice dynamické analýzy

Identickým způsobem byla nastavena analýza "Dynamicka\_Analyza\_velkaSila", která vyšetřuje mechanismus zatížený větší silou.

#### 2.3.3 Přehrávání výsledků analýzy

Po dokončení kinematické či dynamické analýzy se ve stromu modulu Mechanism objeví šedá šipka u položky "Playbacks". Tato funkce slouží pro přehrávání analýzy. Alternativním způsobem je spustit přehrávání prostřednictvím tlačítka "Playback" v kartě "Mechanism". Tato volba otevře okno "Playbacks", kde si lze vybrat, jaká analýza se bude přehrávat a lze také spustit kontrolu kolizí, kde si můžeme vybrat zda-li chceme kompletní

kontrolu (časově nejnáročnější) nebo kontrolu mezi dvěma součástmi. Pokud chceme provést jakýkoli typ kontroly, systém nám nabízí ještě volbu zvukového signálu při kolizi nebo přerušení animace. Spouštění přes strom modulu Mechanism otevře rovnou okno přehrávače dané analýzy – je proto rychlejší, ale nenabízí možnost nastavování analýz a kolizí. Různé možnosti spouštění přehrávače jsou znázorněny na Obr. 2-38.



Obr. 2-38 Možnosti přehrávání analýz

Výslednou animaci je také možno uložit na pevný disk. Video je možno uložit ve formátu .mpeg nebo .avi. Systém umožňuje také jednotlivé kroky ("Frames") ukládat do obrázků .jpeg, .tiff a .bmp pro opravdu detailní analýzu. Dále uživatel volí rozlišení, renderování a počet snímků za sekundu (u videa). Nastavení nahrávání je zobrazeno na Obr. 2-39.



Obr. 2-39 Nahrávání analýz

#### 2.3.4 Definice veličin

Posledním krokem k dokončení práce v modulu Mechanism je získání a analýza počítaných veličin. Pro práci s veličinami slouží funkce "Measures", která je dostupná v kartě "Mechanism" v části "Analysis".

Po aktivaci funkce se objeví okno "Measure Results" zobrazené na Obr. 2-40. V sestavě jsou analýzy "Dynamicka\_Analyza\_malaSila" a "Dynamicka\_Analyza\_malaSila", které, aby se ukázaly v okně "Measure Results", musí být nejprve provedeny ("Run"). Provedené analýzy se zobrazují v oddíle "Result Set".

Nejdůležitější oddíl v tomto okně je však oddíl "Measures", kde se přidávají, editují a odebírají jednotlivé veličiny. V textovém poli, které je na začátku prázdné, se zobrazují všechny definované veličiny, s nimiž se manipuluje prostřednictvím tlačítek nalevo od textového pole.



Obr. 2-40 Okno "Measure Results"

Jako příklad byla vybrána sestava tlumiče, kde budeme vyšetřovat průběh polohy pístnice pod vlivem dvou zatěžujících sil (provedeny dvě analýzy pro každou zvlášť). Otevřeme okno "Measure Results" a v oddíle "Measures" vytvoříme pomocí tlačítka s bílým listem novou veličinu.

Zobrazí se nová okna "Measure Definition" a "Select". Novou veličinu pojmenujeme "Poloha\_Pistnice". Nyní můžeme kliknout pravým tlačítkem myši na symbol kinematické vazby v okně modelu, dokud se nezobrazí nabídka, ze které vybereme "Pick From List". Tento krok je důležitý, protože je použita vazba "Cylinder", která ponechává dva stupně volnosti a výběr osy bez této volby by náhodně vybral jednu ze dvou pohybových os. Ve výběru zvolíme osu "Connection1.first\_trans\_axis" a volbu potvrdíme.

V oddíle "Type" si lze vybrat typ veličiny. Modul Mechanism nabízí tyto druhy veličin:

- **Position** (měření polohy bodů a pohybových os)
- Velocity (měření rychlosti bodů a pohybových os)
- Acceleration (měření zrychlení bodů a pohybových os)
- Connection Reaction (měření reakcí ve vazbách)
- Net Load (měření silových účinků na pružinách, tlumičích pohonech a pohybových osách)
- Loadcell Reaction (měření vyvažující síly při analýze "Force Balance")
- Impact (měření nárazu do krajní polohy)
- Impulse (měří impuls síly v průběhu nárazu viz. "Impact")
- System (systémové parametry)
- Body (měření charakteristik součásti)
- Separation (měření kinematických parametrů mezi dvěma body)
- **Cam** (měření zakřivení vačky, rychlost posuvu a další parametry vačkových mechanismů)
- User Defined (dá se definovat pomocí ostatních veličin a matematických výrazů)
- **Belt** (měření napjatosti a prokluzu řemenů a pásů)
- **3D Contact** (měření plochy a dalších parametrů u spojení "3D Contact")

Protože chceme měřit posunutí pístnice, ponecháme volbu "Position". Správnost nastavení si ověříme dle Obr. 2-41.



Obr. 2-41 Nastavení veličiny "Position"

Nyní se v textovém poli v oddíle "Measures" objevila veličina Poloha\_Pistnice. Pokud označíme některou analýzu, zobrazí se vedle názvu číselná hodnota veličiny v posledním bodě analýzy. Prostřednictvím tlačítka s grafem si nyní můžeme prohlédnout průběh polohy pístnice v čase. Po stisknutí tlačítka se zobrazí okno "Graphtool" s grafickým průběhem veličiny, znázorněné na Obr. 2-42.



Obr. 2-42 Průběh polohy pístnice v čase

Skutečně zobrazený graf je však od obrázku odlišný. Některé prvky a barevné popisky se nehodí do technické zprávy. Proto je dobré nastavit formát grafu tak, aby šel snadno tisknout a kopírovat do zpráv. Otevření formátu grafu se provádí tlačítkem v horní části, nebo pokud chceme nastavit parametry jednotlivých os, dvojklikem na danou osu. Na Obr. 2-43 je ukázáno nastavení osy y. Podobně bylo provedeno nastavení osy x.

	Graph Window Options	×	Graph Font Editor
Y Axis X Axis Data Series G	raph Display	12	11
Graph			11
Poloha pistnice		×	//
Axis Label			
Poloha pistnice [mm]		//	Total fact adv
Display Axis Label		Text Style	Pont Ionchiax
Range	Tick Marks	Tick Labels	
Maximum 70	Major 8	Horizontal     Taxt Style	Height 0.074
Minimum 0	Minor 1	O Vertical	
Cold lines	A	Castlan	Dynamically Undate Graph Window
Style	Thickness	Log Scale	ОК
Dashed 💌 🌊		Scale 1	
	<u>O</u> K	Apply Cancel	

Obr. 2-43 Nastavení osy y

Dále je zapotřebí nastavit formát oblasti grafu, což je znázorněno na Obr. 2-44.

			Graph w	ndow Op	nions					
Axis	X Axis	Data Series	Graph Display	1						
∋raph										
Poloha	i pistnice	[mm]								٠
Data	Series	Label	P.,	Li	Point Dis	play	Inter		Thickn	
Series	0	Poloha Pistnice	2	2	None	v	Linear	¥	. <u> </u>	*
Lege	end Jisplay Le t Style	gend								

Obr. 2-44 Nastavení oblasti grafu

Na závěr je zapotřebí upravit pozadí do čistě bílé a zvolit vhodný nadpis, který je dobré, kromě přebarvení, ještě o trochu zvětšit. Pokud vše odpovídá situaci na Obr. 2-45, je možno nastavení potvrdit stiskem tlačítka "OK" a výsledný graf použít.

Graph Window Options X	Graph Font Editor
Axis X Axis Data Series Graph Display bel oloha pistnice v case	Font font.ndx
Display Label Text Style	Height 0.154
Blended Background Edit	OK

Obr. 2-45 Nastavení dalších parametrů grafu

Kromě grafické podoby lze data ještě uložit do tabulky ve formátu programu Microsoft Office Excel (.xls) nebo do textové tabulky (.grt) – data z analýz je možno použít pro další simulace – například definice pohonů externí tabulkou (.grt) podle předchozí kinematické analýzy.

Dále ještě vytvoříme veličinu "Tlumici\_sila", která představuje reakční sílu, jíž tlumič vyvíjí proti působící síle. V okně "Measure Results" vytvoříme novou veličinu, kterou pojmenujeme a typ veličiny zvolíme "Net Load". Jako referenci vybereme značku tlumiče (malý zelený hranol blízko značky pohybové osy) a výběr potvrdíme. Systém nyní vedle typu veličiny dodá jednotky, podle kterých si můžeme vždy zkontrolovat, zda-li jsme zvolili to, co jsme chtěli. Nastavení zkontrolujeme s Obr. 2-46 a potvrdíme.



Obr. 2-46 Definice veličiny "Net Load"

Identickým způsobem byla vytvořena veličina "Zatezova\_Sila", kde byla jako reference zvolena "Zatezujici\_Sila" definovaná v kapitole 2.2.2.

V okně "Measure Results" jsou nyní definovány tři veličiny. Modul Mechanism umožňuje nejen grafické vyjádření veličiny v čase, ale také grafické vyjádření veličiny vůči jiné veličině, popřípadě více veličin současně. Více veličin lze promítnout do jednoho grafu

(označíme jednotlivé veličiny pomocí klávesy Ctrl, popř. Shift a klikneme na zobrazení průběhu) nebo každou veličinu v samostatném grafu (postup stejný, pouze je zapotřebí zaškrtnout možnost "Graph measures separately". Po předtiskové úpravě získáme průběhy podobné těm na Obr. 2-47. V grafu se nastavuje formát každé osy zvlášť.



Obr. 2-47 Vyjádření průběhu více veličin v čase v samostatných grafech

#### Systémové veličiny a redundance

Systémové veličiny informují uživatele o obecných vlastnostech jím definovaného modelu. Pomocí těchto veličin tedy lze zobrazit:

- Degrees of Freedom (počet stupňů volnosti soustavy)
- Redundancies (redundance viz níže)
- Time (systémový čas)
- Kinetic Energy (celková kinetická energie soustavy)
- Linear Momentum (celková hybnost)
- Angular Momentum (celkový moment hybnosti)
- Total Mass (celková hmotnost)
- Center of Mass (těžiště mechanismu)
- Total Centroidal Inertia (celkový centrální moment setrvačnosti)

Zatímco většina z nabízených systémových veličin slouží jako doplňková informace uživateli, veličina "**Redundancies"**, resp. její hodnota, je pro správný výpočet dynamické analýzy zcela zásadní.

Veličina "Redundancies" určuje počet nadbytečných stupňů volnosti v systému. Přitom se vůbec nemusí jednat o to, že by starší uživatelé zapomínali na fakt, že danou vazbu už jednou udělali a přidají ji podruhé. Tato problematika bude demonstrována na jednoduchém příkladu sestavy dveří. Samotná podsestava je zpočátku připojena k hlavní sestavě pomocí dvou vazeb "Pin", jak by se všem zdálo logické a správné. Z důvodu dimenzování pantů (ideální případ, kdy se chce počítat s rovnoměrným rozložením síly mezi dva panty) byla sestava podrobena dynamické analýze v modulu Mechanism, před kterou byly definovány počáteční podmínky v podobě snímku sestavy. Při dynamické analýze byly uvažovány gravitační účinky, ale tření ve vazbách bylo zanedbáno. Pro jistotu byly dle Obr. 2-48 dveře zatíženy silou 5000 N.

Jak je z obrázku patrné systém zaznamenal 5 redundantních prvků, což má za následek nesprávný výpočet reakcí ve vazbách. Zatímco vlastní hmotnost soustavy rozložil systém do obou vazeb, zátěžová síla evidentně působí pouze na horní pant. Obdobná situace nastala i při výpočtu klopných momentů. Pokud bychom použili tření ve vazbách, systém by z neznámých příčin hlásil redundancí 6.



Obr. 2-48 Příklad chybně provedené dynamické analýzy

Jako opatření byly vazby "Pin" nahrazeny vazbami typu "Bearing". Ostatní podmínky zůstaly stejné. Pokud byla podsestava znovu přidána, je zapotřebí předefinovat působiště síly, počáteční podmínky a reakční veličiny. Vazba"Bearing" odebírá celkem dva stupně volnosti (translace – kromě svislé osy). Celkově jsme tedy odebrali pouze 4 stupně volnosti. Pokud bychom spustili analýzu, dveře by se propadly do neznáma. Proto je zapotřebí na svislou translační osu některé vazby vložit pohon (polohové řízení, konstantní velikost – 0). Nyní je zaručeno, že dveře při analýze zůstanou na svém místě a výpočet lze znovu spustit.

Dle výsledků na Obr. 2-49 je patrné, že nyní drží veškeré axiální silové účinky vazba s pohonem. Výpočet klopných momentů je však již rovnoměrný. Počet redundancí je v tomto případě 0.



Obr. 2-49 Příklad nápravy vyžadující přepočet axiální síly na oba panty

V takových případech je otázkou, jaké vazby použít tak, aby výpočty proběhly dle představ konstruktéra. Mnohdy je to práce náročná a zabere mnoho času, zvláště při tvorbě větších mechanismů.

#### 2.3.5 Vykreslení křivky trajektorie

Při tvorbě analýz může vzniknout potřeba zaznamenat trajektorii koncového bodu a tu pak použít např. k modelování objektu manipulace, pro tvorbu vazby "Slot" atd.

Vlastní tvorba křivky je poměrně jednoduchá. Jak je ukázáno na Obr. 2-50, křivka se vykresluje pomocí funkce "Trace Curve", která je skryta v oddíle "Analysis" na kartě modulu Mechanism. Je zapotřebí upozornit, že před vlastní tvorbou křivky je zapotřebí mít provedenou analýzu. Rovněž je důležité vybrat si bod na pohybujícím se objektu, jehož trajektorie se bude vykreslovat (například těžiště objektu manipulace apod.).

Po aktivaci funkce se zobrazí okno "Trace Curve", kde v oddíle "Paper Part" můžeme dvojklikem na šipku zvolit hlavní sestavu ("Tlumic"). Nyní v oddíle "Trace" ponecháme volbu "Trace Curve" a zvolíme bod, jehož trajektorie bude vykreslena. Jelikož se bude jednat o přímku, ponecháme možnost 2D. V oddíle "Result Set" vybereme příslušnou analýzu a nastavení potvrdíme tlačítkem "OK".



Obr. 2-50 Nastavení funkce "Trace Curve"

Nyní vznikla v modelovém stromě skupina "Trace2D". Pokud se skupina nezobrazila, je zapotřebí nastavit zobrazování "Features" při nastavení "Tree Filters" (Obr. 2-51).



Obr. 2-51 Zobrazení prvků "Features" v modelovém stromě

Závěrem je ukázáno, jak lze křivku použít pro tvorbu součásti v sestavě pomocí funkce "Sweep" (tažení po křivce). Opustíme modul Mechanism. Pomocí Obr. 2-52 vytvoříme novou součást v sestavě, která se po úvodním nastavení automaticky aktivuje.

V okně "Component Create" vybereme v oddíle "Type" možnost "Part" a v oddíle "Sub-type" možnost "Solid". Zároveň součást vhodným způsobem pojmenujeme. Po potvrzení se ještě zobrazí okno "Creation Options", kde zvolíme možnost "Create features", jinak by se součást nemusela automaticky aktivovat. Nastavení potvrdíme tlačítkem OK.

Assemble Component  Component	Axis Point  Point  Sketch Datum	Hole Definition Hole Definition Hole Definition Hole Definition Hole Hole Definition Hole Definition Hole Definition Definition Hole Definition Def	Pattern V Modifiers V	Manage Views V	Appearance Gallery ▼ Model Display	Display	y Co r Ir
11 · E · × ₩ 7 +	Component C Type Su © Part © S Skeleton Model 1 Bulk Item 1 Envelope	b-type Solid Sheetmetal Intersect Mirror	×	Creation Copy Locat Empty Create	eation Option Method From Existing e Default Datur e features	s ms	×
RT	Name Pohyl Common name OK	o_pistnice_mSila		ок		Cancel	

Obr. 2-52 Tvorba součásti v sestavě

Vybereme funkci "Sweep", kde vybereme křivku a jako referenci některou z bočních rovin. Definujeme nějakou jednoduchou skicu (např. kružnice o průměru pístnice) a tvorbu potvrdíme. Nastavení funkce je zobrazeno na Obr. 2-53.



Obr. 2-53 Nastavení funkce "Sweep

Vytvoří se klasická součást, která se hodí například pro vizualizaci rozsahu pohybu při tvorbě technických zpráv a prezentací, pěkně vypadá i v řezu. Takto vytvořená součást však má své hmotnostní parametry a při dalších analýzách by působila jako rušivý prvek. Proto je dobré podobné objekty tvořit až nakonec, nebo pro analýzy pořídit kopii sestavy bez těchto součástí. Alternativou je použít plošný model, který ovšem v řezu nemusí vypadat hezky. Příklad výstupu může být například Obr. 2-54.



Obr. 2-54 Znázornění pohybu pístnice při zatížení silou

# Shrnutí pojmů 2.3.

**Analýza** je provedení modelované situace pomocí modulu Mechanism, při které se počítá s různými účinky dle typu analýzy. Nejčastějšími typy analýz jsou kinematické a dynamické analýzy.

**Kinematická analýza** slouží pro výpočet kinematických veličin (poloha, rychlost, zrychlení a kolize) částí mechanismu. Při definici lze používat pohony typu "Servo Motor". Analýza nebere v úvahu žádné silové účinky. Proto, pokud kinematické veličiny závisí na dynamických účincích (síla, moment ...), musí se použít dynamická analýza.

**Dynamická analýza** slouží pro výpočet kinematických a dynamických veličin. Před prováděním dynamické analýzy je **nutno definovat počáteční podmínky a zkontrolovat, že sestava nemá žádné redundance.** Dynamická analýza může do výpočtu zahrnout všechny typy pohonů, zatěžující účinky, gravitační účinky a tření ve vazbách.

Veličiny se definují před nebo po provedení analýzy pomocí funkce "Measures". Průběhy veličin v čase nebo vůči jiné veličině lze zobrazit graficky nebo uložit do tabulky pro další použití. Vždy je potřeba výpočet nějakým způsobem ověřit. V matematickém modelu je také, pro odstranění redundantních stupňů volnosti, někdy nutné použít jiný typ vazeb než ve skutečnosti. Výsledky je třeba správně interpretovat.

Výslednou trajektorii je možno uložit do 2D nebo 3D křivky pro další použití.



- 8. Lze počítat rychlost pádu ocelové koule pomocí kinematické analýzy?
- 9. Na co se musí dát pozor při definici dynamické analýzy?
- 10. Jak převedete výsledky jedné analýzy do definičních parametrů druhé analýzy?
- 11. Vysvětlete pojem "Redundance".
- 12. Jak zobrazíte trajektorii bodu?

## Úlohy k řešení 2.3.

13. Proveďte kinematickou a dynamickou analýzu středně velké sestavy a pokuste se interpretovat výsledky.

# $\bullet$

## **CD-ROM**

Většina z prováděných úkonů je zpracována na výukových videosekvencích.

90

## **3** PŘÍKLADY KINEMATICKÝCH A DYNAMICKÝCH ANALÝZ

## 3.1 Kinematická a dynamická analýza mechanismu kliky

## 🔶 Řešený příklad

Proveďte kinematickou a dynamickou analýzu sestavy mechanismu kliky. Zjistěte úhel natočení kliky potřebný pro zasunutí palce na hranu základové desky. Dále do stávajícího mechanismu doplňte držák pružiny a pružinu dle Obr. 3-1. Zjistěte sílu F na konci kliky potřebnou pro zasunutí palce na hranu základové desky. Výsledek zkontrolujte aplikací této síly F na konec kliky.

Tuhost pružiny je 0.7 N/mm, její počáteční délka je 15 mm.

Jedná se o sestavu vytvořenou v kapitole 1.3 tohoto studijního materiálu. Opírá se rovněž o znalosti z kapitoly 2, konkrétně tvorbu pružin, tlumičů, pohonů, přípravu a definice kinematických a dynamických analýz.



Obr. 3-1 Analýza mechanismu kliky

Nedílnou součástí analýzy je promyšlení postupu. K vyřešení příkladu jistě existuje řada cest, v tomto studijním materiálu bude popsána následující:

- Zjištění úhlu natočení kliky pro zasunutí palce (kinematická analýza)
- Přidání pružiny
- Příprava mechanismu na dynamickou analýzu (odstranění redundancí)
- Zjištění momentu v rotační ose kliky potřebného pro zasunutí palce a přepočet na sílu na konci kliky (dynamická analýza)
- Ověření výsledku aplikací zjištěné síly na konec kliky (dynamická analýza)

#### 3.1.1 Kinematická analýza posunu palce

Nejprve zjistíme potřebný úhel natočení kliky k zasunutí palce za hranici základové desky, tedy tak, aby se "schoval" do vodítka na základové desce.

#### Vytvoření "Measure Feature"

Protože budeme měřit vzdálenost hrany palce k ploše základní desky (Obr. 3-2), nejdříve nadefinujeme "Measure" (veličinu). Budeme hledat její nulovou hodnotu, tedy v okamžiku, kdy tato vzdálenost bude 0 mm, je palec právě zasunut.

V kartě nástrojů "Analysis" klepneme na tlačítko "Distance", čímž se otevře okno měření vzdálenosti. Jako položku "From" zvolíme hranu palce, do položky "To" zvolíme boční plochu základové desky. Protože jsou plochy rovnoběžné, není nutno definovat "Projection Direction". Z roletové nabídky ve spodní části okna vybereme "Feature" a potvrdíme zeleným zatržítkem. Ve stromě modelu se zobrazí "ANALYSIS\_DISTANCE\_1", případně jiný název, který jsme zvolili. Tuto veličinu pak uvidíme v seznamu "Measures" v modulu Mechanism.



Obr. 3-2 Vytvoření "Measure Feature"

#### Definice pohonu rotace kliky

Během analýzy budeme chtít otáčet klikou tak dlouho, než se palec "schová", respektive než vzdálenost definovaná v předchozím kroku nabude hodnoty 0 mm.

Nadefinujeme tedy "Servo Motor" k otáčení kliky. Nastavení parametrů je ukázáno na Obr. 3-3. Jako osu pohybu (Motion Axis) na kartě "Type" zvolíme vazbu "Pin" na klice – klepnutím na její symbol v modelu. Na kartě "Profile" nastavíme typ pohonu na rychlostní (Velocity). U nastavení výchozího úhlu (Initial Angle ) odškrtneme zatržítko "Current" a jako výchozí nastavíme hodnotu 0 deg. Tam bude začínat pohyb kliky v každé analýze zahrnující tento "Servo Motor". Velikost rychlosti (Magnitude – A) zvolíme 20 deg/sec.

Jelikož má klika omezený úhel pohybu 0-45°, bude se moci pohybovat maximálně 2,25 sekund. Na tento fakt musíme pamatovat při definici kinematické analýzy.



Obr. 3-3 Servo Motor na klice

#### Nastavení snímku mechanismu (Snapshot)

Ještě než nastavíme kinematickou analýzu, definujeme si jeho výchozí polohu pomocí nástroje "Snapshot". Snímek vytvoříme ikonou fotoaparátu v okně nástroje "Drag Components" (

Obr. 3-4). Snímek vytvoříme v poloze s klikou nahoře a palcem plně vysunutým, podle. Přejmenujeme jej například na "Snap\_vychozi". Použijeme jej v kinematické analýze a dále ve vytvoření počátečních podmínek v analýze dynamické.

g Gra	al Conditions	Highlight	2 P
ties and	d Conditions	Bodies	
li	nitial Condition Bel	finition	×
Narr	ie		
InitCo	nd_1		
Sna	pshot		
80	Snap_vychozi		-
<u>ک 🗞 🗄 ا</u>			
×			

Obr. 3-4 Snapshot výchozí polohy



Obr. 3-5 Výchozí poloha mechanismu

#### Definice kinematické analýzy

V tuto chvíli máme vše připravené pro kinematickou analýzu. Protože se jedná pouze o analýzu pohybu, bez zahrnutí jakýchkoli silových účinků, není nutné zabývat se redundancemi, ani nastavením materiálů.

Analýzu nastavíme podle Obr. 3-6. Typ (Type) analýzy zvolíme "Kinematic". Koncový čas (End Time) zvolíme 2,2s. Klika má totiž omezený úhel pohybu 0-45°, a při definici úhlové rychlosti 20°/s se tak bude moci pohybovat maximálně 2,25 sekund. Systém má však problém i s hodnotou na hranici 45°, proto se na ni nesmíme dostat a zvolíme 2,2s. Snímkovací frekvenci (Frame Rate) nastavíme na 20. Ve spodní části okna zvolíme jako výchozí konfiguraci (Initial Configuration) snímek (Snapshot) "Snap\_vychozi", který jsme si vytvořili předchozím kroku. To není nezbytně nutné, protože jsme nastavili výchozí polohu na "Servo Motoru". V kartě "Motors" zkontrolujeme, že je vybrán pouze "Servo\_klika". Kinematickou analýzu pojmenujeme například "Analysis\_kin\_1" a tlačítkem OK potvrdíme.

Ve stromě modulu "Mechanism" klepneme pravým tlačítkem na vytvořenou analýzu a volbou "Run" ji spustíme.

Analysis Definition X	🖌 Analysis Definition 🔰
Name	Name
Analysis_kin_1	Analysis_kin_1
Туре	Туре
Kinematic	Kinematic
Preferences Motors Ext Loads	Preferences Motors Ext Loads
Graphical Display	Motor From To
Start Time 0	Servo_klika Start End
Length and Rate 🗸	
End Time 2.2	
Frame Count 45	8
Frame Rate 20	
	OK Run Cancel
°≥ ×	
Enable v	
Ourrect	
Snapshot Snap_vychozi • 80	
OK Run Cancel	

Obr. 3-6 Kinematická analýza

### 🐇 Grafy výsledků kinematické analýzy

Pokud kinematická analýza proběhla bez chyb, můžeme z ní nyní "vytáhnout" výsledky. Tlačítkem "Measures" modulu Mechanism otevřeme okno výsledků "Measure Results". Všimneme si, že zde již je předdefinovaná veličina "ANALYSIS\_DISTANCE\_1\_DISTANCE" (případně jiného jména), kterou jsme si vytvořili jako "Measure Feature" v předchozím postupu. Připomeňme si, že jde o vzdálenost hrany palce od boku základové desky. Úkolem analýzy je najít úhel kliky, při kterém je tato vzdálenost rovna 0 mm.

Vytvoříme tedy podle Obr. 3-7 novou "Measure" (veličinu) typu "Position" (pozice), do jejíž reference vybereme vazbu "Pin" kliky (stejnou jako v definici "Servo Motoru").



Obr. 3-7 Definice "Measure" rotace kliky

Nejprve si necháme vykreslit graf závislosti posunutí palce a rotace kliky na čase. Oba grafy lze zobrazit najednou vybráním obou veličin se stisknutou klávesou CTRL. Nezapomeneme vybrat analýzu "Analysis\_1\_kin" z nabídky "Result Set" (Obr. 3-8). Graf zobrazíme tlačítkem se symbolem grafu pod hlavičkou okna. Z grafu můžeme vyčíst, že v okamžiku, kdy je vzdálenost palce rovna 0 mm (dotkne se osy X), klika je "stisknutá" do úhlu zhruba 29°.

Stejný výsledek můžeme zjistit z grafu závislosti posuvu palce vůči natočení kliky. Nebudeme však muset úhel odměřovat přibližně "od oka", ale využijeme postupu, kdy na osu X nevynášíme čas, ale jinou veličinu, v tomto případě natočení kliky ve stupních. Graf nastavíme podle Obr. 3-9, přičemž opět nezapomeneme vybrat analýzu "Analysis\_1\_kin" z nabídky "Result Set". Vykreslený graf vzdálenosti palce se dotkne osy X v úhlu natočení kliky 29°.



Obr. 3-8 Graf závislosti rotace a posunutí v čase



Obr. 3-9 Graf posunutí palce vůči natočení kliky

#### 🖊 Závěr kinematické analýzy

Pomocí kinematické analýzy mechanismu kliky jsme zjistili, že palec se "schová" do základové desky při úhlu stisknutí kliky rovném 29°. Tento výsledek použijeme dále v dynamické analýze k předčasnému ukončení analýzy.



Tento postup je ukázán na výukových videosekvencích.

#### 3.1.2 Dynamická analýza síly na stisknutí kliky

#### 🞍 Úprava sestavy mechanismu a přidání pružiny

Než začneme s dynamickou analýzou, musíme přidat do mechanismu pružinu mezi základovou desku a kulisu dle zadání na Obr. 3-1. Na straně základové desky můžeme pružinu umístit virtuálně na bod "ve vzduchu", avšak v tomto studijním materiálu této možnosti nevyužijeme a přidáme další komponent "DRZAK". Ten uložíme buďto klasicky vazbami "Automatic", nebo vazbou typu "Rigid" podle Obr. 3-10.



Obr. 3-10 Vložení držáku pružiny

Mezi body "BOD\_PRUZINA\_DRZAK" v komponentu "DRZAK" a "BOD\_PRUZINA\_KULISA" v komponentu "KULISA" vložíme se stisknutou klávesou CTRL pružinu nástrojem "Spring" (Obr. 3-11). Koeficient tuhosti K nastavíme dle zadání na 0,7 N/mm, volnou délku pružiny U na 15 mm.



Obr. 3-11 Vložení pružiny

Před začátkem dynamické analýzy si zkontrolujeme správné nastavení materiálů a hustot jednotlivých komponentů sestavy. Více v kapitole 1.4.1.

	tinato (wamo)	THE ASSEMBLY	MPONENTS OF T	MASS PROPERTIES OF CO
ine)	iinate frame)	SESTHON COURT	iu che _klikh_	(IN assembly units an
z	Ŷ	C.G.: X	MASS	DENSITY
	FERIAL:	MAT	ADOVA_DESKA	ZAKL
e+00 -3.05899e+01	1.43645e+00	2.27343e+00	5.97779e-04	7.82708e-09
	FERIAL:	MAT	KLIKA	
e+01 2.18163e+01	-4.10677e+01	3.67069e+01	1.03430e-04	8.40738e-09
	FERIAL:	MAT	KULISA	
e+00 -3.27637e-01	-1.22987e+00	1.00000e+01	1.21165e-05	2.71020e-09
	FERIAL:	MAT	PALEC	
e+01 -4.54194e+01	1.40141e+01	9.50561e+00	1.26227e-04	7.82708e-09
	FERIAL:	MA	ZAK_PRUZINA	DR
e+01 -5.66033e+01	1.44836e+01	2.04688e+01	8.98819e-07	1.39998e-09
	Z ) -3.05899e+01 2.18163e+01 ) -3.27637e-01 -4.54194e+01 -5.66033e+01	<pre>dinate frame)</pre>	HE ASSEMBLY SESTAVA coordinate frame) C.G.: X Y Z MATERIAL: 2.27343e+00 1.43645e+00 -3.05899e+01 MATERIAL: 3.67069e+01 -4.10677e+01 2.18163e+01 MATERIAL: 1.00000e+01 -1.22987e+00 -3.27637e-01 MATERIAL: 9.50561e+00 1.40141e+01 -4.54194e+01 MATERIAL: 2.04688e+01 1.44836e+01 -5.66033e+01	MPONENTS OF THE ASSEMBLY         id the _KLIKA_SESTAVA coordinate frame)         MASS       C.G.: X       Y       Z         ADOUA_DESKA       MATERIAL:       5.97779e-04       2.27343e+00       1.43645e+00       -3.05899e+01         KLIKA       MATERIAL:       1.03430e-04       3.67069e+01       -4.10677e+01       2.18163e+01         KULISA       MATERIAL:       1.21165e-05       1.00000e+01       -1.22987e+00       -3.27637e-01         PALEC       MATERIAL:       1.26227e-04       9.50561e+00       1.40141e+01       -4.54194e+01         ZAK_PRUZINA       MATERIAL:       8.98819e-07       2.04688e+01       1.44836e+01       -5.66033e+01

Obr. 3-12 Kontrola nastavení materiálových vlastností

#### Postup odečtení potřebné síly

V předchozí kapitole jsme zjistili, v jakém úhlu stisknutí kliky se palec "schová" do základové desky. Nyní budeme analyzovat, jakou sílu je potřeba vynaložit ke stisknutí kliky do této polohy. K tomu opět vede řada cest. Zde zjistíme nejdříve krouticí moment v Nmm, jež je třeba aplikovat na kliku. Se znalostí vzdálenosti L působiště hledané síly F od osy otáčení kliky (Obr. 3-13), kde aplikujeme moment M, pak jednoduše tuto sílu vypočítáme pomocí vzorce  $F = \frac{M}{r}$ .

Na Obr. 3-13 vidíme, že vzdálenost L=76,7 mm. Dále tedy budeme hledat moment M.



Obr. 3-13 Vzdálenost působiště síly od osy otáčení

#### Odstranění redundancí mechanismu

Dalším krokem přípravy na dynamickou analýzu je odstranění redundancí. Ty můžeme vypočíst a následně zkontrolovat v systému.

$$i = 6 * n - \sum_{1}^{k} r_k$$

kde i = počet stupňů volnosti

n = počet komponentů (bez rámu)

r = počet stupňů volnosti (DOF) odebíraných jednotlivými vazbami

Výpočet provedeme pro 2 komponenty – kliku a palec. Tedy n=2. Kulisa je napevno připojena ke klice, tyto dva komponenty budeme tedy považovat za jeden.

Vazba "Pin" odebírá 5 DOF, vazba "Slot" 2 DOF, vazba "Slider" 5 DOF. Pak

$$i = 6 * 2 - (5 + 2 + 5) = 0$$

Na první pohled se může zdát, že je vše v pořádku. Není tomu ale tak, protože potřebujeme 1 stupeň volnosti pro pohyb kliky (a na něj navázaný pohyb palce). Máme tedy 1 redundanci.

Té se zbavíme nahrazením jedné vazby jinou tak, že nová vazba bude odebírat o 1 DOF méně. K modifikaci zvolíme vazbu "Slider", která odebírá 5 DOF. K takovým modifikacím se hodí vazba typu "General", ve které můžeme odebírat požadovaný počet stupňů volnosti vazbami "čehokoli na cokoli" (více o vazbě General v kapitole 1.3.11).

K určení toho, jak vazbu sestavíme je potřeba mít jisté zkušenosti s touto problematikou a umět řešení "vidět". Jinak můžeme postupovat metodou pokus-omyl. Počet redundancí však už lze jen velmi těžko zjistit početně, což je dáno nejasným počtem stupňů volnosti odebraných vazbou "General". Proto budeme počet redundancí hledat jednodušeji - analýzou v modulu Mechanism. Nadefinujeme si dvě nové veličiny – "DOF", která nám ukáže zbývající počet stupňů volnosti a "redundance", která vypočítá počet redundancí mechanismu. Tyto nadefinujeme podle Obr. 3-14.

Measure Definition	х	Measure Definition	
Name		Name	
DOF		redundance	
Туре		Туре	
System 👻		System 🔻	
Property		Property	
Degrees of Freedom	-	Redundancies	•
Evaluation Method		Evaluation Method	
Each Time Step	<b>v</b>	Each Time Step	Ŧ
			Canad

Obr. 3-14 Nastavení veličin

Výsledky se zobrazí po proběhnutí jakékoli analýzy, včetně již provedené kinematické "Analysis\_1\_kin". Požadovaným výsledkem je stav na Obr. 3-15.

Jednou z možných úprav je uložení palce podle Obr. 3-16. Vazba "General" je v tuto chvíli nadefinovaná tak, že odebírá právě 4 stupně volnosti.

Všimneme si, že ač je vše správně, počet DOF systém vypočte jako 0. I přes to, že klikou lze hýbat pomocí nástroje "Drag Components" a to by tedy měl být 1 stupeň volnosti. Je to tím, že na rotační osu kliky je nadefinován pohon (Servo Motor), který je při této analýze aktivní (otáčí s klikou). Tím odebírá jeden stupeň volnosti mechanismu, protože tato rotace již není "volná".

- Mea	sures		
Ľ	Name	Va	St
	ANALYSIS DISTANC	. <u>6.6</u> 3469	
	DOF	0	
B.	natoceni klika	44	
	redundance	0	
X			
	Graph measures s	eparately	
D			
Res	un set		
	nalysis kin 1		
	· ·		

Obr. 3-15 Počet redundancí a DOF



Obr. 3-16 Uložení palce bez redundancí

#### Definice počátečních podmínek

Pro správný průběh dynamické analýzy je nutné definovat výchozí podmínky. Jejich nastavení otevřeme tlačítkem "Initial Conditions" v modulu Mechanism. Název zvolíme například "InitCond\_1" a vybereme výchozí snímek "Snap\_vychozi", který jsme vytvořili při kinematické analýze. Tlačítkem se symbolem brýlí si můžeme zobrazit náhled na tuto pozici. Měl by vypadat podle Obr. 3-17. "Velocity Conditions" ponecháme prázdné, protože počáteční rychlost je dána "Servo Motorem" v ose kliky.



Obr. 3-17 Nastavení Initial Conditions

#### Definice podmínky pro předčasné ukončení analýzy

Protože jsme v kinematické analýze zjistili, že palec se zasune při stisknutí kliky do úhlu 29°, můžeme dynamickou analýzu ukončit právě v tento okamžik. Ponecháme si malou rezervu pohybu a hodnotu zaokrouhlíme na 30°.

Do nastavení podmínek pro předčasné ukončení se dostaneme tlačítkem "Termination Conditions". Podmínku pojmenujeme například "TermCond\_natoceni\_kliky". Tlačítkem označeným na Obr. 3-18 otevřeme nabídku již nadefinovaných proměnných a dvojklikem vybereme "natoceni\_klika", čímže tuto hodnotu přidáme do okna podmínek. Podmínku upravíme do tvaru zobrazeného na Obr. 3-18. Analýza s takto nastavenou podmínkou bude končit, jakmile úhel natočení kliky přesáhne hodnotu 30°.

<u>A</u>	⊈ Gravity ∰Initial Conditions		
Properties	( Termination Conditions		1221223
Prop	erties and Conditions	VC	jklik
	Termination Condition Definition Name TermCond_natoceni_kliky Termination Condition $\{\forall_x\} \ \pi_e \ fx$	×	Variable X DOF natoceni_klika redundance
	Natoceni_klika>30	:el	Close

Obr. 3-18 Nastavení Termination Conditions

#### Nastavení gravitačních účinků

Jelikož dynamická analýza zahrnuje silové účinky, včetně sil gravitačních, je nutné gravitaci definovat nástrojem "Gravity". Velikost gravitačního zrychlení (Magnitude) nastavíme na 9806 mm/s<sup>2</sup>. Nastavíme požadovaný směr vektoru gravitačního zrychlení (zde směrem dolů, tedy proti ose Y). Nastavení by mělo vypadat jako na Obr. 3-19

Ma Propi	ss erties	Condition nation C	ins Conditions	
	Properties nd (	Condition	าร	
	Gravity		Х	2
Di	rection	mm / s	sec^2	
X:	0			
Y:	-1			
Z:	0			

Obr. 3-19 Nastavení gravitačních účinků

#### 🐇 Nastavení dynamické analýzy momentu na klice

Máme-li splněny všechny předpoklady pro dynamickou analýzu:

- Nastaveny materiálové vlastnosti všech součástí
- Žádné redundance
- Nastaveny počáteční podmínky a podmínky pro předčasné ukončení
- Nastavenou gravitaci

můžeme nadefinovat dynamickou analýzu podle Obr. 3-20. Tu nazveme například "Analysis\_dyn\_klika". Jako typ (Type) vybereme "Dynamic", délku (Duration) zvolíme dostatečně dlouhý čas, například 10 sekund. Analýza se totiž ukončí, jakmile bude splněna podmínka pro předčasné ukončení a klika je "stisknuta" do úhlu 30°. Zvolíme počáteční podmínku pro předčasné ukončení. V kartě "Motors" ověříme, že je zahrnut pouze pohon "Servo\_klika". V kartě "Ext Loads" nezapomeneme zaškrtnout položku "Enable Gravity" (povolení gravitace). Tlačítkem OK potvrdíme.

Ve stromě modulu "Mechanism" klepneme pravým tlačítkem na vytvořenou analýzu a volbou "Run" ji spustíme.



Obr. 3-20 Nastavení dynamické analýzy s pohonem na klice

104

#### 🐇 Grafy výsledků dynamické analýzy momentu na klice

Pokud dynamická analýza proběhla bez chyb, můžeme z ní nyní "vytáhnout" výsledky. Tlačítkem "Measures" modulu Mechanism otevřeme okno výsledků "Measure Results". Chceme zjistit moment, který musel pohon na klice vyvinout k tomu, aby kliku stisknul do požadované polohy (proti síle pružiny).

Vytvoříme si tedy novou veličinu (Measure) typu "Net Load" (zobecněná síla) podle Obr. 3-21. Jako referenci vybereme opět vazbu "Pin" kliky (stejnou jako v definici "Servo Motoru" a úhlu natočení kliky).

Následně si necháme vykreslit její graf v závislosti na čase (Obr. 3-22). Z grafu lze odečíst, že pohon rotace kliky potřeboval na konci analýzy, tedy v okamžiku "schování" palce, natočení kliky na 30° krouticí moment 862 Nmm.

Measure Definition X				
Name				
net_klika				
— Туре				
Net Load 🛛 🔻 mm N				
Reference				
Servo_klika				
Evaluation Method				
Each Time Step 🔹				
OK Apply Can	el:			

Obr. 3-21 Net load na pohonu kliky



Obr. 3-22 Graf závislosti momentu na klice na čase

🐇 Závěr dynamické analýzy momentu na klice

Zjistili jsme krouticí moment na rotační ose kliky potřebný pro stisknutí kliky do úhlu  $30^\circ$ , kdy se palec zasune za hranu základové desky 862 Nmm. Podle výše zmíněného vzorce vypočítáme hledanou sílu *F*:

$$F = \frac{M}{L} = \frac{862}{76,7} = \mathbf{11}, \mathbf{24} \ \mathbf{N}$$

kde: *F* je hledaná síla na konci kliky,

*M* je krouticí moment na rotační ose kliky, *L* je vzdálenost rotační osy kliky od působiště hledané síly *F*.

Síla F má velikost 11,24 N. Získaný výsledek ověříme aplikací této síly na konec kliky.

#### 3.1.3 Ověření výsledku aplikací síly na kliku

#### 🕌 Definice síly na konci kliky a jejího průběhu v čase

V předchozí kapitole jsme zjistili sílu na konci kliky potřebnou k jejímu stisknutí (proti síle pružiny). Nyní, pro ověření, tuto sílu aplikujeme na konec kliky a pomocí dynamické analýzy zjistíme, zda opravdu kliku požadovaným způsobem stiskne. Tuto sílu nadefinujeme tak, že se bude v čase navyšovat na maximální (vypočtenou) hodnotu a opět snižovat až na nulovou velikost. Klika se tak stiskne a opět vrátí do výchozí polohy.

Sílu nadefinujeme nástrojem "Force/Torque". Nazveme ji například "Sila\_konec\_kliky" a nastavíme ji podle Obr. 3-23. Jako typ (Type) zvolíme "Point Force", tedy sílu v bodě. Referenční bod pro sílu zvolíme na konci kliky podle Obr. 3-23.

V kartě "Magnitude" nadefinujeme sílu jako funkci času, definovanou tabulkou (Function- Table). Zobrazí se definiční tabulka. Do ní tlačítkem na pravé straně vložíme tři řádky. Na počátku simulace, v čase (Time) rovném 0s, bude mít síla velikost (Magnitude) 0N. Druhý řádek nastavíme tak, že v čase analýzy 1,5s bude mít síla maximální (vypočtenou) velikost 11,24N. Poslední řádek nastavíme na čas 3s a nulovou sílu. Zkontrolujeme, že jako proměnná (Variable) je nastaven čas "t". Takto jsme nastavili trojúhelníkový průběh síly, jehož průběh si můžeme vykreslit ikonou grafu. Měl by vypadat podle Obr. 3-23.

Zbývá nastavit směr vektoru síly. To provedeme v kartě "Direction", kde vybereme definici "Point To Point" (z bodu do bodu) a jako referenční body vybereme horní a dolní koncový bod kliky podle Obr. 3-23. Směr zvolíme vztažený na tělo kliky (Direction Relative To – Body) a tlačítkem OK potvrdíme.

106



Obr. 3-23 Nastavení síly na konec kliky

#### Nastavení dynamické analýzy se silou na konci kliky

Vytvoříme novou dynamickou analýzu, nazveme ji například "Analysis\_dyn\_sila". Nastavíme ji podle Obr. 3-24. Zvolíme typ "Dynamic", délku (Duration) 3 s (protože tak máme nastavený průběh síly), dostatečnou snímkovací frekvenci (Framerate), například 40. Zvolíme opět počáteční podmínku "InitCond\_1", podmínku pro předčasné ukončení nepoužijeme. V kartě "Motors" odstraníme všechny položky (pohyb zajistí definovaná síla), v kartě "Ext Loads" upravíme seznam tak, aby byla aktivní pouze "Sila\_konec\_kliky". Tlačítkem OK potvrdíme.

Ve stromě modulu "Mechanism" klepneme pravým tlačítkem na vytvořenou analýzu a volbou "Run" ji spustíme.

Analysis Definition X	Analysis Definition X	Analysis Definition X	
Name	Name	Name	
Analysis_dyn_sila	Analysis_dyn_sila	Analysis_dyn_sila	
Туре	Type	Time	
Dynamic	Dynamic	Dupomia	
Preferences Motors Ext Loads	C Traine	Dynamic	
Graphical Display	Preferences Motors Ext Loads	Preferences Motors Ext Loads	
	Motor From To	Load From To	
Length and Rate	#m	Sila_konec_kliky Start End	
Frame Count 121		₩•	
Frame Rate 40			
Minimum Interval 0.025			
Locked Entities			
Initial Configuration	OK Run Cancel	Enable Gravity     Enable All Friction     OK Run Cancel	
● I.C.State: InitCond_1 ▼ 85° Termination Condition			
None     Condition: TermCond_nstoceni_kiil +			
OK Run Cancel			

Obr. 3-24 Nastavení dynamické analýzy se silou na konci kliky

#### 🐇 Grafy výsledků dynamické analýzy se silou na konci kliky

Pokud dynamická analýza proběhla bez chyb, můžeme zobrazit její výsledky. Během analýzy jsme si všimli, že pohyb probíhal "skokovitě". Je to způsobeno absencí tření ve vazbách a jakéhokoli tlumení. Tento průběh se promítne i do grafů. Z těch chceme vyčíst, zda síla skutečně stisknula kliku do požadované polohy, respektive že síla je dostatečná k zasunutí palce.

To zjistíme z průběhů natočení kliky (measure "natoceni\_klika") a vzdálenosti hrany palce od boku základové desky (measure "ANALYSIS\_DISTANCE\_1\_DISTANCE") v čase. Tyto grafy můžeme vidět na Obr. 3-25.

Z grafů lze vyčíst, že síla je definovaná správně. Nelíbí se nám ale pilovitý průběh veličin, proto sestavu mírně poupravíme.


Obr. 3-25 Grafy natočení kliky a posunutí palce

### 🞍 Přidání tlumiče

Sestavu upravíme tak, že k pružině přidáme velmi slabý tlumič, který průběh pohybů vyhladí. Tlumič přidáme nástrojem "Damper" a nastavíme jej podle Obr. 3-26. Zvolíme koeficient tlumení C=0,05 Nsec/mm. Takto nízká hodnota vyhladí průběh pohybu, avšak jej minimálně ovlivní ze silového hlediska.

Po nadefinování tlumiče opět spustíme dynamickou analýzu "Analysis\_dyn\_sila".



Obr. 3-26 Nastavení tlumiče

### 🗍 Grafy výsledků dynamické analýzy se silou na konci kliky a tlumičem

Po opětovném zobrazení grafů průběhu natočení kliky a posunutí palce uvidíme, že průběh se vyhladil. Můžeme se přesvědčit, že vypočtená síla na konci kliky opravdu stiskne kliku požadovaným způsobem. Klika je stisknuta do úhlu 29° a vzdálenost hrany palce od boku základové desky se "dotkne" nuly, viz Obr. 3-27.



Obr. 3-27 Grafy natočení kliky a posunutí palce s tlumičem

111

## 3.2 Kinematická a dynamická analýza vačkového mechanismu

# Řešený příklad

Proveďte kinematickou a dynamickou analýzu sestavy vačkového mechanismu. Zjistěte závislost zdvihu ventilu na natáčení vačkové hřídele a maximální moment na motoru, který je řízen pomocí zrychlení (počáteční úhlová rychlost 10 000 deg/s, konstantní zrychlení 5000 deg/s). Výpočet ukončete v momentě, kdy úhlová rychlost dosáhne hodnoty 11 300 deg/s. Tuhost pružiny je 25 N/mm. Tření ve vazbách neuvažujte.

Protože se jedná o sestavu modelovanou průběžně v tomto výukovém materiálu, vychází se z toho, že student ovládá tvorbu vaček a pružin v modulu Mechanism. Tento příklad tedy navazuje na kapitolu 2.3.2. Jednotlivé součásti jsou umístěny v sestavě pomocí pohybových vazeb a mezi sebou prostřednictvím vazeb modulu Mechanism. Byla nastavena tuhost pružiny 25 N/mm. Zbývá definovat pohon, počáteční podmínky, koncové podmínky, gravitaci, analýzy a proměnné.

#### Tvorba pohonu

Protože zadání obsahuje požadavek na řízení pohonu pomocí zrychlení, pro tvorbu použijeme funkci "Servo Motor". Nastavení parametrů pohonu je ukázáno na Obr. 3-28. Pohon pojmenujeme např. "Motor\_Vackova\_hridel". Jako poháněnou entitu na kartě "Type" vybereme vazbu "Pin" vačkové hřídele. Na kartě "Profile" zvolíme v oddíle "Specification" možnost "Acceleration". Počáteční rychlost 10 000 deg/s zapíšeme do textového pole v oddíle "Initial Angular Velocity" a hodnotu zrychlení 5 000 deg/s<sup>2</sup> do oddílu "Magnitude", kde byla ponechána možnost "Constant".



Obr. 3-28 Definice pohonu vačkové hřídele

#### Definice počátečních podmínek

Abychom nemuseli regenerovat model a protože budeme používat dynamickou analýzu, je nutné definovat počáteční podmínky. Ze všeho nejdříve je však nutno zaznamenat aktuální polohu prostřednictvím snímku (Snapshot) dle Obr. 3-29.



Obr. 3-29 Tvorba snímku sestavy

Nyní, když je pořízen snímek sestavy, je možno přikročit k nastavení počáteční podmínky, kterou pojmenujeme např. "Pocatecni\_Poloha". V oddíle "Snapshot" vybereme možnost "Vychozi\_Poloha\_snap". Jelikož je počáteční rychlost definovaná na příslušném pohonu, můžeme nastavení potvrdit, odpovídají-li údaje těm na Obr. 3-30.

h	nitial Condition Definition X							
Name								
Pocat	ecni_Poloha							
— Sna	pshot							
රිෆ්	Vychozi_Poloha_snap 🔻							
Velo	ocity Conditions							
<b>₿</b> ₽								
٩₽								
₽,								
≈								
$\boldsymbol{\gamma}$								
X								
	OK Cancel							

Obr. 3-30 Nastavení počátečních podmínek

### 🞍 Definice podmínek pro předčasné ukončení analýzy

Protože výpočet dle zadání není omezen časem, ale úhlovou rychlostí vačkové hřídele, musíme tuto rychlost nastavit jako ukončovací podmínku. Aby to šlo provést, je nejprve zapotřebí definovat novou proměnnou v okně "Measures". Pojmenujeme ji "Uhlova\_Rychlost\_Hridele" a v oddíle "Type" zvolíme možnost "Velocity". Jako pohybovou osu zvolíme rotační osu vazby "Pin" vačkové hřídele (klikneme na symbol vazby). Nastavení veličiny je zobrazeno na Obr. 3-31.



Obr. 3-31 Definice proměnné "Uhlova\_Rychlost\_Hridele"

Po potvrzení se v oddíle "Measures" zobrazí námi vytvořená proměnná. Nyní, když je v seznamu, můžeme spustit funkci "Termination Conditions". Analýza se má ukončit, když úhlová rychlost dosáhne hodnoty 11 300 deg/s. Tato podmínka se zadá do okna "Termination Condition Definition" ve tvaru zobrazeném na Obr. 3-32. Podmínku můžeme nazvat "Uhlova\_Rychlost\_11300". Veličiny a znaménka přitom vybíráme pomocí tlačítek nad textovým polem. Objeví se vždy nové okno se seznamem možností, odkud vybíráme dvojklikem.

Termination Condition Definition	х
Name	
Uhlova_Rychlost_11300	
Termination Condition	
$[\forall_x] \pi_e f x$	
Uhlova_Rychlost_Hridele >= 11300	
$\frown$	
OK Cance	el

Obr. 3-32 Nastavení ukončovací podmínky

### Nastavení gravitace

Před vlastní analýzou je ještě dobré zkontrolovat směr působení tíhové síly. K tomu použijeme funkci "Gravity". Nastavení provedeme podle Obr. 3-33.



Obr. 3-33 Nastavení gravitace

### 🖶 Kinematická analýza

Zjištění závislosti pohybu vačky zjistíme pomocí kinematické analýzy. Protože již máme vše potřebné připraveno, můžeme vytvořit novou analýzu pomocí funkce "Mechanism Analysis". Analýzu můžeme pojmenovat "Kinematicka\_Analyza". V oddíle "Type" zvolíme možnost "Kinematic".

Nyní na kartě "Preferences" můžeme nastavit konec na 0,3 s. Jedná se o přibližný výpočet, protože kinematická analýza neumí počítat s ukončovacími podmínkami. Vzorkování (Frame Rate) nastavíme na 15 000 snímků za sekundu, protože analýzy s vačkovým mechanismem vyžadují minimální krok a úhlová rychlost je velká. V oddíle "Initial Configuration" zvolíme možnost "Snapshot".

Na kartě "Motors" ověříme, že je uveden pohon "Motor\_Vackova\_hridel" a nastavení analýzy potvrdíme.

Pokud vše odpovídá situaci na Obr. 3-34, je možno spustit analýzu klasickým způsobem. Nyní by šlo pokračovat tvorbou veličin, ale vzhledem k tomu, že budeme nastavovat druhou analýzu, je časově výhodnější veličiny nastavit pro obě analýzy současně.

Pokud kinematická analýza neproběhla úspěšně, zkontrolujte, zda jste předchozí kroky provedli správně a teprve potom pokračujte v tvorbě dynamické analýzy.

	Analy Name Kinematicka_Ana Type Kinematic Preferences M Graphical Dis Start Time Lengthand Rate End Ime Frame Count Frame Rate Minimum Interval	sis Definition X yza yza vors Ext Loads olay 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Analysis Definition X Name Kinematicka_Analyza Type Kinematic Preferences Motors Ext Loads Motor Errom To Motor_Vackova Start End	Initial Configu	ration
OK Run Cancel		DK Run Cancel

Obr. 3-34 Nastavení kinematické analýzy

### 🖶 Dynamická analýza

Účelem dynamické analýzy je zjistit maximální krouticí moment na vačkové hřídeli. Před výpočtem je dobré si ověřit, že tuhost pružiny byla nastavena na 25 N/mm.

Nastavení analýzy probíhá obdobně. Pomocí funkce "Mechanism Analysis" vytvoříme novou analýzu, kterou pojmenujeme "Dynamicka\_Analyza" a typ zvolíme "Dynamic".

V záložce "Preferences" nyní zvolíme dobu trvání 0,5 s (analýza se přeruší naplněním ukončovací podmínky) a vzorkování nastavíme na 15 000 snímků za vteřinu. V oddíle "Initial Configuration" zaškrtneme možnost "I.C.State" a v oddíle "Termination Condition" možnost "Condition".

V záložce "Motors" ověříme, že je zobrazen pohon "Motor\_Vackova\_hridel".

V záložce "Ext Loads" zaškrtneme možnost "Enable Gravity". Protože tření zanedbáváme, pole "Enable All Friction" zůstane nezaškrtnuté.

Celé nastavení dynamické analýzy je na Obr. 3-35. Pokud se vše shoduje, je možno analýzu spustit. Funkčnost ukončovací podmínky si ověříme hlášením "Dynamicka\_Analyza terminated.".

Analysis Definition X	Analysis Definition X	Analysis Definition X
Name	Name	Name
Dynamicka_Analyza	Dynamicka_Analyza	Dynamicka_Analyza
Туре	Туре	Туре
Dynamic	Dynamic	Dynamic
Preferences Motors Ext Loads	Freieren Motors Ext Loads	Preterences Motes Ext Loads
Graphical Display	Motor From To	Load From To
<b>(</b>	Motor_Vackova Start End	
Length and Rate		
Duration 0.5	<b>⊞</b> +	<b>□</b>
Frame Count 7501		
Frame Rate 15000		
Minimum Interval 6.666666666667e-005		
Locked Entities		
		Enable Gravity
►	OK Run Cancel	Enable All Friction
) Š		OK Run Cancel
×		
Liftoff		
Litable		
- Initial Configuration	T	Y
o LC.State: Pocatecni_Poloha ▼ හිත්		
Termination Condition		
O None		
Condition: Uhlova_Rychlost_11300 V		
OK Run Cancel		

Obr. 3-35 Nastavení dynamické analýzy

### 🖶 Tvorba veličin

Posledním úkolem je nadefinovat správné veličiny a vykreslit ty správné průběhy. Z toho důvodu aktivujeme funkci "Measures".

Napřed je potřeba zjistit, zda se v sestavě nevyskytuje náhodou nějaká redundance. Vytvoříme novou veličinu, kterou pojmenujeme "Redundance". Typ veličiny zvolíme "System" a vlastnost (oddíl "Property") zvolíme "Redundancies". Nastavení potvrdíme. Pokud je vše v pořádku, redundance má hodnotu 0. Pokud ne, je potřebné podívat se, jestli byly vazby správně definovány.

Dále pro informaci vytvoříme veličinu s názvem "DOF" určující počet stupňů volnosti. Typ bude opět "System" a vlastnost "Degrees of Freedom". Nastavení potvrdíme. Systém bude ukazovat jeden stupeň volnosti. Pravděpodobně proto, že systém odebírá stupeň volnosti vazbám, na které byl nadefinován pohon.

Na Obr. 3-36 je zobrazeno nastavení obou systémových vazeb pro případ, že by se při jejich nastavování vyskytla chyba.

Measure Definition	х	Measure Definition	×
Name		Name	
Redundance		DOF	
Туре		Туре	
System 💌		System 🔻	
Property		Property	
Redundancies	•	Degrees of Freedom	Ŧ
Evaluation Method		Evaluation Method	
Each Time Step	Ŧ	Each Time Step	Ŧ
OK Apply	Cancel	OK Apply Cane	cel

Obr. 3-36 Nastavení systémových veličin

Nyní vytvoříme veličinu popisující natočení pístnice v čase. Postupovat lze podle Obr. 3-37. Pojmenujeme ji "Natoceni", typ ponecháme "Position" a vybereme osu rotace hřídele (vazba "Pin"). Nastavení potvrdíme pomocí tlačítka "OK".

Measure Definition X
- Name
Natoceni
Туре
Position 🔻 deg
- Point or Motion Axis
Connection_2.axis_1
Evaluation Method
Each Time Step 💌
OK Apply Cancel

Obr. 3-37 Definice veličiny měřicí natočení pístnice

Podobně postupujeme i při vytváření veličiny pojmenované "Poloha\_Ventilu", jejíž nastavení je na Obr. 3-38. Typ je rovněž "Position" a jako pohybovou osu vybereme translační osu vazby "Slider" mezi hlavní sestavou a ventilem. Nastavení potvrdíme.

Measure Definition	х
Name	
Poloha_Ventilu	
Туре	
Position v mm	
Point or Motion Axis	
Connection_3.axis_1	
Evaluation Method	
Each Time Step	Ŧ
OK Apply Can	cel

Obr. 3-38 Definice veličiny měřicí polohu ventilu

Poslední veličinou, kterou bude potřeba vytvořit, je maximální moment, který musí pohon hřídele vyvinout, aby vačková hřídel konala definovaný pohyb. Nová veličina se tedy bude jmenovat Max\_Moment. Jako typ zvolíme možnost "Net Load", ke které zvolíme referenci pohon vačkové hřídele ("Pohon\_Vackova\_hridel"). V oddíle "Evaluation Method" zvolíme "Maximum". Nastavení zkontrolujeme s Obr. 3-39 a potvrdíme tlačítkem "OK".



Obr. 3-39 Nastavení veličiny "Max\_Moment"

Vykreslení závislosti zdvihu ventilu na natočení se provede v okně "Measure Results". V oddíle "Graph Type" zvolíme "Measure vs. Measure", v oddíle "Measure for X axis" vybereme natočení hřídele ("Natoceni"). Označíme veličinu "Poloha\_Ventilu" v seznamu a vybereme kinematickou analýzu. Nyní je možno vykreslit graf. Postup je zobrazen také na Obr. 3-40.

Measure Results X								
Gran	oh Type							
Meas	ure vs. Measure		-					
Mon	auro for V avia							
Nator			-					
Indioc			•					
Mea	sures							
	Name	Va	St					
1	DOF	1						
	Max_Moment	Not Comp	outed					
	Natoceni	3045	_					
	Poloha_Ventilu	5.85592						
X	Redundance	0						
	Uhlova_Rychlost_Hri.	11500						
	Graph measures	separately						
Resi	ult Set							
	ynamicka_Analyza							
	inematicka Analyza							
Turonaucha_Anaiy2a								
	Close							

Obr. 3-40 Příprava na vykreslení závislosti zdvihu ventilu na natočení vačkové hřídele

Maximální moment lze rovněž vyjádřit graficky (nárůst maximálního momentu v čase). Vybereme dynamickou analýzu a veličinu "Max\_Moment". Volbu v oddíle "Graph Type" vrátíme na "Measure vs. Time". V tento moment je opět možno vykreslit graf. Postup je pro kontrolu znázorněn na Obr. 3-41.

Measure Results X									
Grag	Graph Type								
Meas	ure vs. Time		•						
Mag									
Mea	sures								
	Name	Va	St						
	DOF	1	_						
	Max_Moment	1849.34							
B	Natoceni	2589							
	Poloha_Ventilu	5.85592							
<b>X</b>	Redundance	0							
	Uhlova_Rychlost_Hr	i 11300							
	Graph measures	separately							
	L								
Res	ult Set								
	ynamicka_Analyza								
	inematicka Analyza		_						
	anematicka_Analyza								
	Close								
	ciose								

Obr. 3-41 Příprava na vykreslení nárůstu zátěžového momentu v čase

### 🖌 Závěr

Dle specifikací v zadání byl v softwarovém prostředí Creo Parametric vytvořen model sestavy, který byl za pomocí modulu Mechanism podroben kinematické a dynamické analýze s cílem zjistit závislost zdvihu ventilu na natočení vačkové hřídele a zjistit maximální zátěžový moment motoru, který při pohybu nastane.

Dle vypočtené závislosti zdvihu na natočení, znázorněné na Obr. 3-42, bylo zjištěno, že se ventil zvedá v rozmezí od cca  $-60^{\circ}$  až do  $0^{\circ}$ , kde se nachází maximum. Ventil klesá od  $0^{\circ}$  do  $60^{\circ}$ . Jinak je ventil přibližně v konstantní poloze (dáno eventuelním nadskakováním vačky, které v simulaci nebylo povoleno).

Výška zdvihu ventilu je přibližně 6,7 mm.



Obr. 3-42 Závislost zdvihu ventilu na natočení pístnice

Nárůst maximálního zátěžového momentu vačkové hřídele v čase je zobrazen na Obr. 3-43. Je patrné, že s rostoucí úhlovou rychlostí se zvyšuje také hodnota zátěžového momentu. Při maximální úhlové rychlosti 11 300 deg/s nabývá zátěžový moment hodnoty přibližně 1850 Nmm.



Obr. 3-43 Nárůst maximálního momentu v čase

# 3.3 Kinematická a dynamická analýza hydraulického ramene

# Řešený příklad

Proveďte kinematickou a dynamickou analýzu sestavy hydraulického ramene. Rameno nese dubový kmen o průměru 180 mm a délce 1500 mm. Vyšetřete, jakou rychlostí se mají jednotlivé pohony pohybovat, aby výsledný pohyb kmene byl přímočarý o konstantní rychlosti 1 m/s v libovolném místě. Osa kmene musí být 500 mm nad osou prvního kloubu a dráha pohybu 500 mm. Určete axiální sílu v pístech.

Před samotnou analýzou je potřeba vložit všechny součásti mechanismu do sestavy. Základnou je součást "Podstavec", na kterou je připojeno "Rameno1". Tyto dvě součásti budou rovněž propojeny z obou stran hydraulickými válci ("Hydraulicky\_Valec"). Na první rameno navazuje "Rameno2". Ramena jsou také propojena identickým hydraulickým válcem. Na kruhový průřez na konci ramene 2 symbolizující interface je připojen efektor tak, aby osa kmene byla rovnoběžná s osou kloubu 1 (mezi podstavcem a prvním ramenem). Do efektoru je vložen objekt manipulace ("OM") zadaných rozměrů. Při sestavování je možno držet se Obr. 3-44.



Obr. 3-44 Sestavené hydraulické rameno

Nyní je dobré, aby si každý samostatně zkusil mechanismus sestavit bez toho, aby pokračoval ve čtení návodu (část "Tvorba sestavy"). Sestava má mnoho kinematických vazeb a po prvním sestavení se objeví redundance (je dobré definovat analýzu v modulu Mechanism, bez jakýchkoli pohonů apod., a prostřednictvím funkce "Measures" sledovat počet redundancí).

Mechanismus sestavte tak, aby nedocházelo ke kolizím mezi jednotlivými součástmi. Bude tedy zapotřebí nastavit na vhodných vazbách limity. Pro lepší manipulaci se sestavou je výhodné nastavit regenerační polohu (v souvislosti s nastavením polohy si musíme uvědomit, že regenerační poloha je výhodným místem pro začátek analýz).

Regenerační polohu stanovme 1200 mm od osy prvního kloubu v horizontálním směru a 500 mm ve směru vertikálním.

Logickým krokem většiny uživatelů je na všechny rotační vazby použít vazbu "Pin" a pro ostatní vazby zvolit typ "User Defined". Matematický model si rovněž nedokáže poradit se situací, kdy jsou na rameno 1 připevněny dva hydraulické válce. Proto je zapotřebí pro simulaci jeden válec odebrat a výsledek nakonec rozložit na dva. Počet redundancí v sestavě bude při výše uvedeném postupu větší než 5. Na dalším postupu bude tvorba sestavy ukázána podrobně.

### 🖶 Tvorba sestavy

Prvním krokem je vložení rámu ("Podstavec") do sestavy pomocí vazby "Default". Do podstavce umístíme součást "Rameno1" pomocí vazby "Pin" tak, aby v sestavě byla symetricky. Dle Obr. 3-45 nastavíme roviny, mezi nimiž se bude odměřovat poloha ramene a nastavíme limity (minimální limit 150° a maximální 250°).

n 🏷 🔏 Pin 🔻 🌿	Coincident 🔻	0.00 💌 🏂	STATUS : Connection Definition Complete.	
Placement Move Options Fle	exibility Properties			
Connection_1 (Pin) Axis alignment Translation Rotation Axis	Current Position	Regen Value		
ASM_RIGHT:F1(DATUM F	Enable regeneration value     Minimum Limit     Maximum Limit     Dynamic properties >>	150.00 ¥ 250.00 ¥	Concident	30ent 1 1 168.086
				!

Obr. 3-45 Vložení prvního ramene

Obdobným způsobem vložíme také druhé rameno. Jako referenční roviny pro odměřování polohy ramene byly vybrány plochy obou ramen zobrazené na Obr. 3-46. Limity v tomto případě byly zvoleny 65° (minimální poloha) a 117° (maximální poloha). Regenerační polohu u ramen nedáváme (důležité pro další postup).

Placement Move Options Fle	Coincident v 0.00 v 5/2 ST	ATUS : Connection Definition Complete. 🔄 🔲
Connection_2 (Pin) Axis alignment Translation Rotation Axis	Current Position Regen Value       104.83     >     90.00     104.882000       Set Zero Position	Coincident
RAMENO1:Surf.F5(EXTF	Enable regeneration value  Minimum Limit  Maximum Limit  117.00	
New Set	Dynamic properties >>	

Obr. 3-46 Vložení druhého ramene

Na rameno 2 se vloží efektor ("Efektor") pomocí uživatelsky definované vazby. Rameno 2 je zakončeno kruhovým interface, jehož osu sjednotíme s osou efektoru. Dále sjednotíme roviny ramene a efektoru tak, aby situace odpovídala té na Obr. 3-44.

Následuje vložení objektu manipulace do čelistí efektoru. Logicky nás napadá obdobný postup jako při spojení efektoru s ramenem. V souvislosti se zadáním je zde však požadavek na rovnoměrný pohyb po přímce, který má konat právě těžiště objektu manipulace. Proto použijeme na umístění kmene vazby dvě. Ještě před tím je zapotřebí vložit do hlavní sestavy nový bod ve středu hlavního souřadného systému (v ose prvního kloubu). Postupujeme podle Obr. 3-47.



Obr. 3-47 Vložení bodu do počátku souřadného systému

První vazba bude typu "Rigid". V tomto případě postupujeme stejně, jako u typu "User Defined" – tzn., osu kmene sjednotíme s osou připravenou na efektoru a pomocí rovin reference doplníme tak, aby byl objekt jednoznačně definovaný. Druhá vazba bude typu "6DOF", která bude sloužit pro nastavení referenční polohy a pohonu provádějícího počáteční pohyb, sama však neodebírá žádné stupně volnosti. V prvním kroku nastavení referencí

vazby označíme souřadný systém objektu manipulace a hlavní souřadný systém sestavy. Dále v části "Translation Axis 1" označíme body v počátcích těchto souřadných systémů, jako aktuální pozici zadáme hodnotu -1200 a pomocí dvojité šipky zaručíme, aby v tomto místě byla regenerační poloha, kterou povolíme. Situace by měla odpovídat Obr. 3-48. Obdobný postup provedeme také u druhé translační osy, kde nastavíme hodnotu regenerační polohy 500. Nastavení potvrdíme.

Placement	Move	Options	Flexibility	Properties						
Connec Connec Csys Transla	tion_42 (i tion_44 (i alignmen tion Axis M:PNT0:F PNT0:F9(i tion Axis lation Axis	Rigid) SDOF) t 1 6(DATUM Pol DATUM Pol 2 2 s 3	Curreni -1200. T S T Mi Dyna	Position 00 V Set Zero Pc able regeneratio nimum Limit uximum Limit mic properties	>>> sition n value	Regen Va -1200.00 -1000000.0 - -1000000.0 -	lue	Coincide	nt	
EKTOR.PR1 10 9rt Here M.PRT								 	0.000000	 Trilla X

Obr. 3-48 Nastavení translační osy

Posledními články mechanismu jsou hydraulické válce. Do sestavy se vloží, podobně jako objekt manipulace, za pomocí dvou vazeb. První vazba (typu "Cylinder") bude mezi podstavcem a tělem hydraulického válce. Při nastavení translační osy je lepší pro jistotu zadat vzdálenost 61.5 mm od boční desky podstavce (viz Obr. 3-49).

lacement I	Move	Options	Flexibility	Properties		
Connection Axis align Translatio Connection Connection	n_28 (C ment n Axis EC_TEI STAVE Axis n_36 (E	Cylinder) LO:DTM3:F2 C:Surf:F5(E Ball)	Current 61.50	Position  Set Zero Pos able regeneration nimum Limit ximum Limit mic properties	Regen Value >> 0.00 sition v value -1000000.0 v 1000000.0 v	Ori
New Set						

Obr. 3-49 Definice vazby "Cylinder" mezi hydraulickým válcem a podstavcem

Druhá vazba (typu "Ball") bude spojovat pístnici a první rameno. Při definici postačí pouze sjednotit připravené body na pístnici a rameni (znázorněno na Obr. 3-50). Proces vkládání hydraulického válce můžeme nyní ukončit a zopakovat pro druhý hydraulický válec (mezi oběma rameny).

Placement	Move	Options	Flexibility	Properties				
E Connect Connect Point a Pint a	tion_28 (C tion_36 (E alignment STNICE:A AMENO1:	Cylinder) Ball) PNT0:F7(DA PNT0:F26(D	Const	Constraint Enable raint Type Coincident 🔻	:d			Coincident
• Cone /	Axis		0.00	T.				(**)
New Set			Conne	Statu: ction Definition	s Complete.		1	

Obr. 3-50 Definice vazby "Ball" mezi pístnicí a prvním ramenem

#### 🕌 Tvorba simulačního modelu pro kinematickou analýzu

Proces tvorby sestavy je nyní úspěšně ukončen a je možno přejít do modulu Mechanism pro vlastní analýzy. Pro kontrolu je možno ještě porovnat sestavu s Obr. 3-51.



Obr. 3-51 Přehled použitých kinematických vazeb

Nejprve je potřeba zjistit, jakými rychlostmi se pohybují jednotlivé hydraulické válce, když objekt manipulace koná definovaný pohyb. Známe tedy polohu a rychlost koncového bodu a neznáme polohy a rychlosti jednotlivých ramen a základny vůči sobě. Jedná se tedy o **inverzní úlohu kinematiky**.

Pro zjištění neznámých v modulu Mechanism je potřeba nejprve zajistit, aby se kmen pohyboval po zadané trajektorii. Proto se musí definovat pohon na translační ose x vazby "6DOF".

Nový pohon pojmenujeme "Pohyb\_OM" a řečenou osu zvolíme jako poháněný prvek (viz Obr. 3-52). Na kartě "Profile" v oddíle "Specification" vybereme možnost "Velocity" a v oddíle "Magnitude" ponecháme možnost "Constant" a do textového pole vepíšeme hodnotu -1000 mm/s. Definici potvrdíme.



Obr. 3-52 Definice pohonu "Pohyb\_OM"

Při experimentálním provedení kinematické analýzy se ukázalo, že trajektorií není ve skutečnosti přímka, ale křivka, která se v koncovém bodě zvedla o 10 mm vůči počátku. Jelikož v zadání stojí, že výška těžiště objektu manipulace se musí pohybovat 500 mm nad osou prvního kloubu, musíme vytvořit ještě jeden pohon, který bude udržovat konstantní výšku mechanismu.

Pohon pojmenujeme "Poloha\_OM" a jako poháněný prvek vybereme svislou translační osu vazby "6DOF". V záložce "Profile" a oddíle "Specification" ponecháme volbu "Position". V oddíle "Magnitude" ponecháme "Constant" a do textového pole zadáme 500 mm.

Z hlediska praktičnosti a budoucích analýz je dobré nyní definovat počáteční podmínky. Pro nastavení je však nezbytné mít pořízený snímek (Snapshot) sestavy v bodě, kde si přejeme, aby začínala analýza. V našem případě jsme pro tyto účely již nastavovali polohu regeneračního bodu. Proto před pořízením snímku model zregenerujeme. Snímek vytvoříme a pojmenujeme "Pocatecni\_Poloha" tak, jak je znázorněno na Obr. 3-53. Nyní nemusíme před každou analýzou regenerovat model a v případě dynamické analýzy je definovaná počáteční podmínka nutností ke správným výsledkům.



Obr. 3-53 Pořízení snímku sestavy

Vytvoříme novou počáteční podmínku dle Obr. 3-54. Pojmenujeme ji rovněž "Pocatecni\_Poloha". V okně "Initial Condition Definition", oddíle "Snapshot" vybereme pořízený snímek "Pocatecni\_Poloha". Nastavení potvrdíme.

Name Pocatecni_Poloha - Snapshot		
Pocatecni_Poloha		
Snapshot		
Snapsnot		
CO' Pocatecni_Poloha		Ŧ
Velocity Conditions		
<b>2</b> ,		
1		
20		
~		
×		
ОК	Cance	el

Obr. 3-54 Definice počáteční podmínky

### 🕌 Kinematická analýza, inverzní úloha kinematiky

Vše je připraveno pro kinematickou analýzu, kterou pojmenujeme "Inverzni\_Uloha". Nastavení analýzy je vidět na Obr. 3-55. V oddíle "Type" zvolíme "Kinematic". V záložce "Preferences" do textového pole "End Time" zapíšeme 0,5 s (dráha má být dle zadání 500 mm). Snímkování (Frame Rate) nastavíme na hodnotu 200 snímků za vteřinu, ať jsou křivky

průběhů dostatečně vyhlazené. V oddíle "Initial Configuration" zvolíme možnost "Snapshot", čímž systému povolíme začínat z námi určené počáteční podmínky.



Obr. 3-55 Definice kinematické analýzy

V záložce "Motors" se přesvědčíme, že v tabulce jsou přítomny oba pohony. Pokud ano, můžeme nastavení analýzy potvrdit a výpočet spustit.

Pro kontrolu vykreslíme trajektorii pomocí funkce "Trace Curve". Postup je uveden na Obr. 3-56. Jak vidíme, jedná se o přímku dlouhou 500 mm. Zadání je tedy splněno a my můžeme získané údaje převést jako vstup do další analýzy, kde budeme vyšetřovat zatížení pohonů (nyní nejsou zatíženy, protože jsou "vedeny" pohonem "Pohyb\_OM").



Obr. 3-56 Vykreslení trajektorie

### 🐇 Kinematická analýza, tvorba veličin

Po dokončení výpočtu analýzy budeme definovat veličiny. Začneme se systémovými veličinami "Redundance" ("Type" – "System", "Property" – "Redundancies") a "DOF" ("Type" – "System", "Property" – "Degrees of Freedom"). Obě veličiny by měly ukazovat nulovou hodnotu (stupně volnosti blokovány pohony).

Po kontrole správného sestavení jednotlivých součástí mechanismu dle Obr. 3-57 vytvoříme veličinu "Rychlost\_V1". V oddíle "Type" vybereme možnost "Velocity" a jako referenci zvolíme translační osu vazby "Slider" prvního hydraulického válce.



Obr. 3-57 Tvorba veličiny "Rychlost\_VI"

Nyní známe celý průběh rychlosti prvního válce. Tento průběh bude nutno zadat pohonu hydraulického válce, který se bude tvořit. Postup je zobrazen na Obr. 3-58. Průběh se musí uložit do tabulky. Úkon se provede v okně "Graphtool" – nejprve se tedy vykreslí graf dané veličiny a následně lze uložit soubor do tabulky ("File"-"Export Text").



Obr. 3-58 Uložení rychlosti pístnice prvního hydraulického válce do tabulky

Následně se otevře nové okno "Export To Text", ve kterém data uložíme do pracovního adresáře ve formátu "Graph Tubular File" (.grt) tak, jak je ukázáno na Obr. 3-59. Soubor pojmenujeme "Pohon\_V1".

	Export To Text	x				
◆ → ▼ □ → pc_uzivatel → DATA (D:) → Pro E → Opory → Rameno ▼ 4 Se						
🕒 Organize 🗸 🏢 Views 🗸 🎢 Tools 🗸						
Common Folders						
🗹 Desktop						
🖄 My Documents						
🖳 pc_uzivatel						
📸 Working Directory						
🚉 Network Neighborhood	File name: Date modified:					
🛃 Favorites	File name: Pohon_V1	Ty e Graph Tabular File (*.g)				
Folder Tree		Save Cancel				

Obr. 3-59 Uložení do souboru "Graph Tubular File"

Obdobně vytvoříme veličinu "Rychlost\_V2" popisující rychlost pístnice druhého hydraulického válce. Průběh uložíme ve formě textové tabulky do souboru "Pohon\_V2".

#### 🖶 Tvorba simulačního modelu pro dynamickou analýzu

Po úspěšné kinematické analýze a uložení jejich výsledků do tabulek lze přistoupit k jejich použití při tvorbě pohonů jednotlivých hydraulických válců.

Vytvoříme nový pohon s názvem "Pohon\_V1". Jako referenční pohybovou osu vybereme translační osu vazby "Slider" mezi pístnicí a tělem prvního hydraulického válce. Nyní přejdeme do záložky "Profile". V oddíle "Specification" vybereme volbu "Velocity" a v oddíle "Magnitude" možnost "Table". Tabulku nebudeme zadávat ručně, ale využijeme oddílu "File", kde pomocí tlačítka se složkou otevřeme okno "Select table file." Pro výběr tabulky je nutno zadat typ souboru "Graph Tabular File" – poté se objeví uložené tabulky (znázorněno na Obr. 3-60).

	Select table file.	х
🔹 💌 💌 🗋 🕨 pc_uzivate	el 🕨 DATA (D:) 🕨 Pro E 🕨 Opory 🕨 Rameno 🔍 🗲	
🕒 Organize 🗸 📕 Views	✓ 「剤 Tools ✓	<b>N</b> ?
Common Folders	Bohon_V1.grt	
🕜 Desktop	면 Pohon_V2.grt	
🖄 My Documents		
🖳 pc_uzivatel		
📸 Working Directory		
🕂 Network Neighborhood	File name: Pohon_V1.grt Date modified: 19-May-12 09:01:47 PM	
Tavorites	File name: Pohon_V1.grt Type Graph Tabular File (*	.gi 🗸
Folder Tree	Open Cancel	

Obr. 3-60 Otevření souboru "Graph Tubular File"

Po potvrzení okna zkontrolujeme, že se tabulka správně načetla. Z důvodu fixace systému na cestu k souboru se nedoporučuje zaškrtávat možnost "Use External File". Nastavení pohonu zkontrolujeme s Obr. 3-61 a potvrdíme.

			Servo Motor De	TINITION
		Name		
		Pahan V/1		
		Ponon_v1		
	Servo Motor Definition X	Type Profile	•	
	Name	Specificati	on	
		1 Velo	city	v mm/sec
	Pohon_V1			
		Initial Pos	sition	
	Type Profile	Current		
	Driven Entity	800 -10	9 433	mm
	Motion Axis		0.100	
	Geometry			
		Magnitude		
	JLICKY_VALEC):Connection_1.axis_1	Table		<b>v</b>
		- Interpola	tion	
	Flip	Linear	fit 🛛 🔿 Spline fi	it O Monotonic fit
			roal Filo	
	OK Apply Cancel	USe Exter	nai riic	
	OK Apply Caller	Time	Magnitude	
L Lan		0	-69.609634	<b>A</b>
TAD	1	0.005	-69 565545	
		0.01	-69.522564	
		0.015	-69.480679	₩,
		0.02	-69.439879	
		0.025	60.400465	
		0.025	-03.400135	
		0.03	-69.361494	•
		File		
		(È) D:\	Pro E\Opory\Rameno\Po	bhon_V1.grt 📓 🗍
		Creat		
		Graph		
		×		Position
				Velocity
		In separa	te graphs	Acceleration
		Show us	er points 🔘 Show inte	erpolated   Show both
		Number of inte	erpolated points 1	Total 🔻 50 🔺
			-	OV Apply Correct
			C	Apply Cancel

Obr. 3-61 Definice pohonu hydraulického válce

Postup opakujeme i pro pohon druhého hydraulického válce pojmenovaný "Pohon\_V2".

### 🖶 Dynamická analýza, přímá úloha kinematiky

Pro výpočet zatížení jednotlivých hydraulických válců využijeme pohonů "Pohon\_V1" a "Pohon\_V2", které jsou řízeny průběhem polohy (zjištěno kinematickou analýzou) tak, aby objekt manipulace konal rovnoměrný přímočarý pohyb o rychlosti 1 m/s. Případ, kdy známe průběhy kloubů a neznáme průběh koncového bodu (musíme zkontrolovat, že trajektorie se shodují a nevznikla někde chyba), se nazývá **přímá úloha kinematiky**.

Vytvoříme novou analýzu prostřednictvím funkce "Mechanism Analysis", kterou pojmenujeme "Prima\_Uloha". Postup tvorby analýzy je znázorněn na Obr. 3-62. V oddíle "Type" nastavovacího okna zvolíme "Dynamic".

	Analysis Definition	×	And	alvsis Defin	ition	×	Analysie Defin	ition	Y
	Name	^	Name	ilyaia bellili		^	- Name	alon .	~
	Prima Illoha	11	Prima Illoha				Prima Uloha		
	Туре		Туре				Туре		
	Dynamic		Dynamic			•	Dynamic		Ŧ
	Preferences Motors Ext Loads	-	Preferen	Motors -	xi Loads		Preferences Motor	xt Loads	
	Graphical Display		Motor	From	To		Load From	То	
			Pohon_V1	Start	End				
	Length and Rate	۱,	Pohon_V2	Start	End	₩,			₩,
	Erame Count 101	•							
	Frame Rate 200	11							
	Minimum Interval 0.005	11							
		4							
-	Locked Entities								
							Enable Gravity		
	h 1			ок	Run	Cancel	Enable All Friction		
							ОК	Run	Cancel
	×								
	Liftoff								
	Enable 💌								
	Initial Configuration								
	Current								
	O Current O LC State: Pocatecni Poloha ▼ ∂♂								
	Termination Condition	_							
	Iermination Condition								
	None								
	OK Run Cance	•							

Obr. 3-62 Postup tvorby dynamické analýzy

V oddíle "Type" nastavovacího okna zvolíme možnost "Dynamic". Celkový čas analýzy bude 0,5 s a snímkování 200 snímků za vteřinu. Pro správné výsledky je důležité definovat počáteční podmínku (v oddíle "Initial Configuration" zaškrtnout "I.C.State" a přesvědčit se, že je vybrán snímek "Pocatecni\_Poloha").

V záložce "Motors" jsou automaticky vybrány všechny pohony. Pro správnou funkci analýzy je zapotřebí odebrat pohony objektu manipulace použité v kinematické analýze (tj. "Pohyb\_OM" a "Poloha\_OM").

V záložce "Ext Loads" nejsou žádné působící síly. Pro správný výsledek analýzy je ale nezbytné zaškrtnout políčko "Enable Gravity". Poté nastavení dynamické analýzy potvrdíme tlačítkem "OK".

### Dynamická analýza, tvorba veličin

Posledními neznámými veličinami jsou pro nás zatěžující síly pohonů. Než však přikročíme k jejich definici, je dobré si samostatně ověřit tvar a délku trajektorie (za pomocí funkce "Trace Curve" schované v bloku "Analysis" na kartě modulu Mechanism). Pokud trajektorie odpovídá zadání, lze přejít do okna "Measure Results", jež se aktivuje tlačítkem "Measures" pro definici dalších veličin.

Vytvoříme veličinu "Zatez\_prvniV", která bude zobrazovat vypočtené zatížení prvního hydraulického válce. V tomto případě se nesmí pro název použít číselný znak, neboť se s veličinou bude dále pracovat a daná funkce (nová veličina typu "User Defined") číselné znaky nepodporuje. Typ veličiny zvolíme "Net Load" a referenci motor "Pohon\_V1". Postup ověříme s Obr. 3-63 a tvorbu potvrdíme.



Obr. 3-63 Definice veličiny "Zatez\_prvniV"

Postup se opakuje i pro druhý válec, kde veličinu nazveme "Zatez\_druhyV". Pro kontrolu si ještě lze samostatně vytvořit veličinu "Rychlost\_OM" popisující rychlost objektu manipulace, která musí být 1 m/s (tj. 1000 mm/s).

Jelikož byl pro analýzu model zjednodušen a odebrán jeden hydraulický válec (mezi podstavcem a prvním ramenem), je zatížení zbylého válce dvojnásobné. Vytvoříme tedy podle Obr. 3-64 uživatelsky definovanou veličinu, která výsledek zátěže prvního válce vydělí dvěma, a pojmenujeme ji "Zatez\_jedenPrvniV". Typ zvolíme "User Defined". Zobrazí se textové pole, kam zadáme vztah "Zatez\_prvniV / 2" tak, jako bychom definovali koncovou podmínku. Do oddílu "Quantity" bychom neměli zapomenout zadat "Force". Pro zobrazení výsledků bude zapotřebí znovu provést analýzu.

Measure Definition X
Name
Zatez_jedenPrvniV
Туре
User Defined V N
Quantity
Force
{*,} π <sub>e</sub> fx () <sub>≥</sub> ≥
Zatez_prvniV / 2
Evaluation Method
Each Time Step
$\frown$
OK Apply Cancel

Obr. 3-64 Definice veličiny "Zatez\_jedenPrvniV"

### 🖕 Závěr

Dle zadaných parametrů byla provedena kinematická a dynamická analýza sestavy hydraulického válce.

Při tvorbě sestavy byl mechanismus zjednodušen tak, aby se v matematickém modelu nevyskytovaly redundantní vazby a stupně volnosti a výpočet proběhl správně. Z toho důvodu také byly zadány počáteční podmínky pro obě analýzy.

Zvolená počáteční poloha se nachází 500 mm od osy prvního kloubu ve svislém směru a 1200 mm ve směru vodorovném. V průběhu analýzy se objekt manipulace posune rovnoměrným pohybem rychlostí 1 m/s do vzdálenosti 1700 mm od osy prvního kloubu. Pomocí kinematické analýzy byla vyřešena **inverzní úloha kinematiky** a vypočteny rychlosti jednotlivých válců zobrazené na Obr. 3-65.



Obr. 3-65 Průběh rychlostí hydraulických válců v čase

Hydraulický válec 1 se vysouvá téměř konstantní rychlostí 69 mm/s. Oproti tomu druhý válec koná pohyb opačný a jeho rychlost se zvyšuje ze 130 mm/s na cca 160 mm/s. Bylo ověřeno, že při těchto rychlostech koná objekt manipulace zadaný pohyb.

Za pomocí dynamické analýzy byla spočtena velikost zátěžových sil jednotlivých pohonů. Závislost na Obr. 3-66 zobrazuje zatížení na jednom hydraulickém válci mezi podstavcem a prvním ramenem (světle modrá) a zatížení válce umístěného mezi oběma rameny (tmavě modrá).



Obr. 3-66 Průběh zatížení hydraulických pohonů

Z uvedeného grafu je vidět, že zátěž pohonů prvního kloubu poměrně strmě roste s rostoucí vzdáleností objektu manipulace. Z původní hodnoty 2900 N vzrostla na 5000 N. Zátěž pohonu druhého kloubu roste pomaleji. Na počátku je její velikost 2000 N a na konci vzroste na 2500 N.

Z uvedených průběhů zátěžových sil, resp. z jejich maximálních hodnot, je zřejmé, že pohony jsou značně předimenzované a při reálné aplikaci je nutno zamyslet se nad optimalizací tohoto uzlu. To samozřejmě platí pouze, pokud mechanismus plní pouze účel stanovený v zadání výpočtu nebo mechanismus je při zadaném pohybu zatěžován nejvíce ze všech případů použití.

Výpočet kinematické i dynamické analýzy proběhl úspěšně bez vážnějších komplikací.

# 4 ZÁVĚR

Modul MECHANISM CAD systému CREO je silným nástrojem pro podporu konstruktérských výpočtů. Umožňuje uživateli tvorbu sofistikovaných analýz a simulací, a to jak kinematických, tedy pouze pohybových - bez zahrnutí sil, zatížení a materiálových vlastností, tak dynamických, které tyto parametry modelu zahrnují.

V první kapitole těchto učebních opor byly popsány základy tvorby sestav v CAD systému CREO. Dále byl čtenář uveden do problematiky kinematických vazeb, kde byly popsány jednotlivé typy předdefinovaných kinematických vazeb, u řady z nich včetně příkladů. Byly popsány postupy přípravy dílů a sestav pro přechod do modulu MECHANISM, zejména velmi důležité nastavení materiálových vlastností dílů a jejich kontrola v sestavě.

Druhá kapitola je věnována samotnému modulu MECHANISM. Čtenář je seznámen s jeho prostředím a všemi nástroji, které nabízí. Jsou popsány postupy tvorby spojení (Connections), vkládání pružin, tlumičů, definice silových účinků a pohonů. Nedílnou součástí správného nastavení analýzy jsou také počáteční podmínky, podmínky pro předčasné ukončení analýzy a definice gravitace. Abychom získali výsledky simulace, byly popsány definice veličin (Measures), vykreslování grafů i nástroj pro vykreslení křivky trajektorie.

Třetí kapitola je věnována příkladům praktického použití kinematických a dynamických analýz. Modely jsou sestaveny a analyzovány krok za krokem tak, aby čtenář navykl základním postupům v modulu MECHANISM.

Tyto studijní opory jsou koncipovány jako příručka, tedy tak, aby nemusely být čteny od začátku do konce, ale aby si čtenář mohl vybrat kapitolu, která jej právě zajímá, případně oblast, kterou potřebuje k získání znalostí o právě řešeném problému. Práce s CAD systémem CREO je však nikdy nekončícím řetězcem učení a není v silách žádného studijního materiálu, či příručky, popsat všechny možné situace a problémy, na které uživatel narazí. Uživatel si všechny postupy musí vyzkoušet a "zažít", přičemž není vyloučeno, že objeví postupy jiné, efektivnější. Nedílnou součástí práce s jakýmkoli CAD systémem je tak množství pokusů a omylů a uživatele by to rozhodně nemělo odradit, neboť jiná cesta k cíli nevede. Na konci této cesty je ovládnutí velmi silného prostředku, který umožňuje, či alespoň usnadňuje řešení mnoha výpočetních problémů, se kterými se konstruktér v praxi setká.



# Další zdroje

- [1]. MOSTÝN, V. Modelování a analýza konstrukcí robotů II, 1. díl. 1. vyd. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2001. 120 s.
- [2].CHAMRAD, T. Haptické zařízení pro ovládání manipulačního ramene robotu: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky, 2011, 70 s. Vedoucí práce: Mostýn, V.
- [3].On-line katalog Festo: http://www.festo.com/cms/cs\_cz/index.htm
- [4].On-line katalog Bosch Rexroth: http://www.boschrexroth.com/