

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní  
Ústav mechaniky

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

## **Dynamický model poddajného mechanismu Trijointu s řízením**

Obor: Inženýrská mechanika a mechatronika

2005

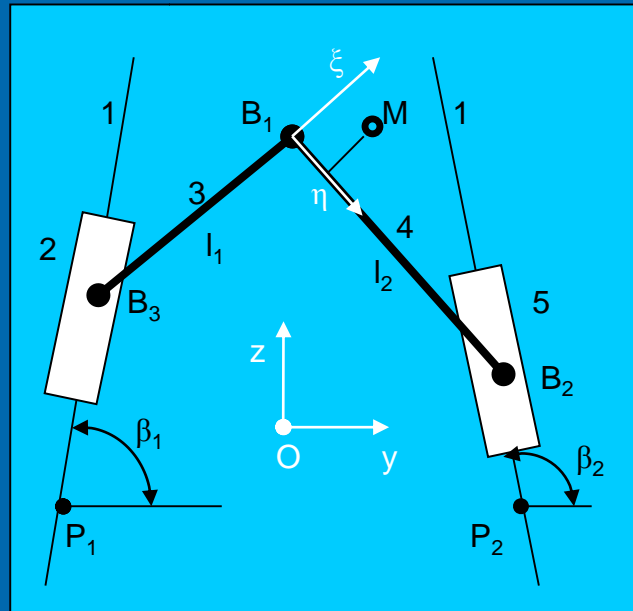
Tomáš HEŘMAN

## Cíle diplomové práce

- Vytvoření dynamického modelu tuhého mechanismu Trijointu s řízením v ko-simulaci Simpack-Simulink
- Vytvoření dynamického modelu poddajného mechanismu Trijointu s řízením v ko-simulaci Simpack-Simulink

# Mechanismus Trijoint

Mechanismus tvořený **paralelní kinematikou**

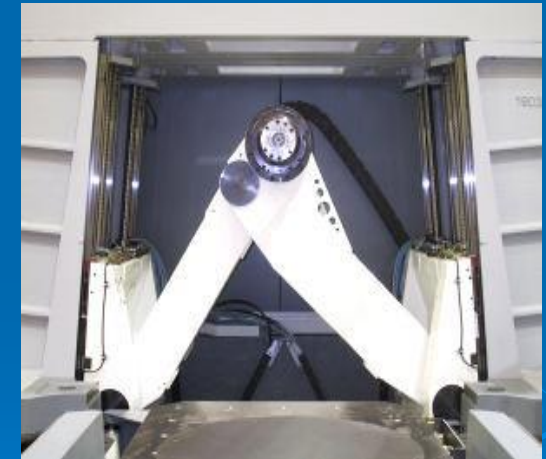


Pozn.:

Tento mechanismus tvoří základní mechanismus **horizontálního obráběcího centra Trijoint 900H** vyrobeného firmou **Kovosvit**

## Použité programy pro vytvoření modelů

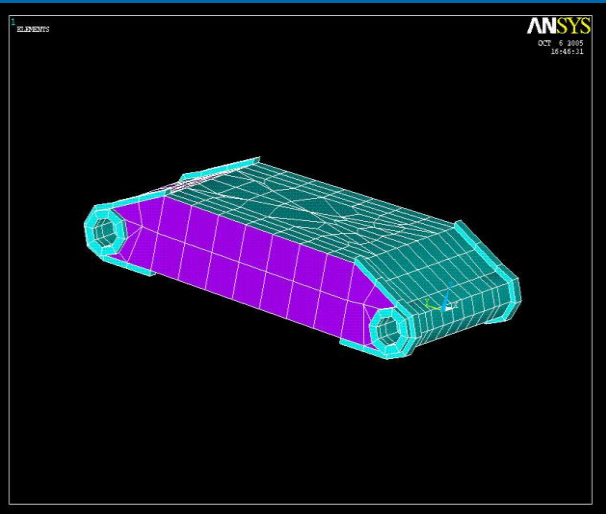
- Simpack 8.7
  - Fembs
  - Simat
- Ansys 6.1
- Matlab-Simulink R14



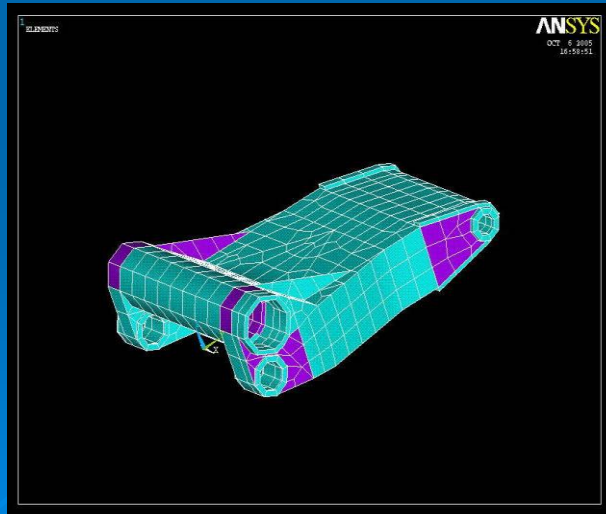
# Výchozí pozice pro vytvoření modelu

- Model kaskádního řízení v Matlabu-Simulinku \*
- MKP modely těles mechanismu v Ansysu \*
  - Modely obou ramen
  - Model vozíku

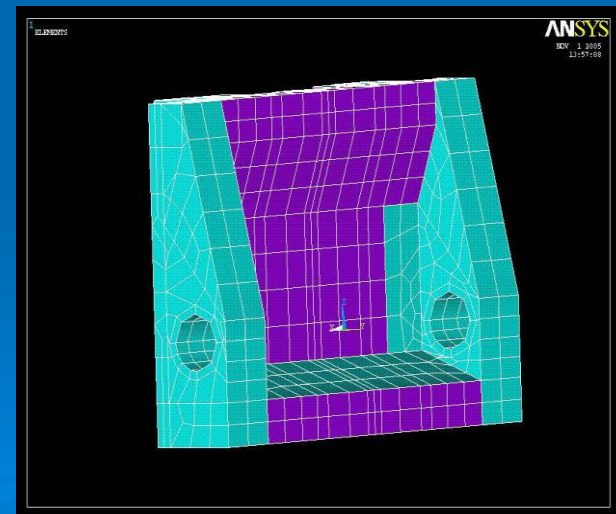
Rameno1  
(6780 DOF)



Rameno2-vřeteno  
(8640 DOF)



Vozík1  $\equiv$  Vozík2  
(9642 DOF)



\* modely vznikly při vývoji obráběcího horizontálního centra Trijoint 900H

# Teorie soustav s mnoha poddajnými tělesy

- Vychází z teorie soustav s mnoha tělesy
- Výsledný pohyb poddajného tělesa je popsán **superpozicí** tzv. **velkých pohybů** referenčního souřadného systému tělesa **a malých** elastických deformací
- Deformace tělesa lze popsat pomocí **aproximace pole deformací** tj. pomocí tvarových funkcí násobených časově závislými souřadnicemi
- **Tvarové funkce** lze získat z metody konečných prvků (MKP)
  - uzlový přístup = uzlové posuvy násobené uzlovými souřadnicemi
  - **modální přístup** = vlastní tvary násobené modálními souřadnicemi

**Simpack aproximuje pole deformací poddajných těles modálním přístupem**

# Sestavení pohybových rovnic soustav s mnoha poddajnými tělesy

**Jordanův princip:** 
$$\int_V \delta \dot{r}^T \rho \dot{r} dV + \int_V \delta \dot{\varepsilon}^T \sigma dV = \int_S \delta \dot{r}^T p dS$$

Poloha bodu P v referenčním souřadném systému tělesa:

$$d^i(c, t) = c^i + u^i(c, t)$$

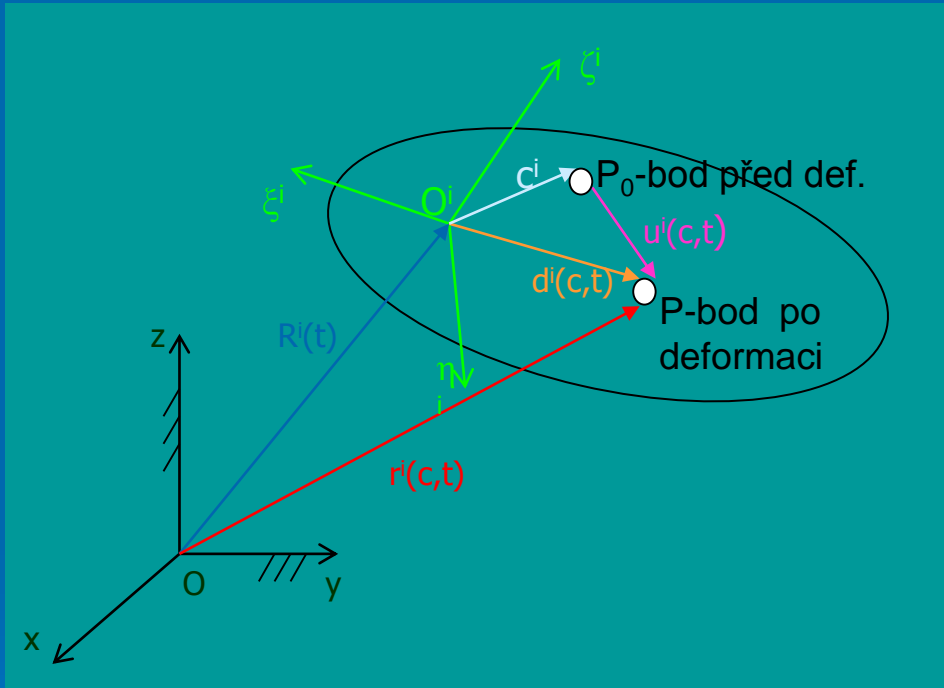
Aproximace pole deformace:

$$u^i(c, t) = \sum_{j=1}^{n_q} u_j^i(c) q_j^i(t)$$

Poloha bodu P v globálním souřadném systému:

$$r^i(c, t) = R^i(t) + S^i(t) d^i(c, t)$$

$$r^i(c, t) = R^i(t) + S^i(t) \left[ c^i + \sum_{i=1}^{n_q} u^i(c) q^i(t) \right]$$



## Napětí a deformace

Lineární model - Hookeův zákon

$$\sigma^i(c, t) = E^i \varepsilon^i(c, t)$$

$$\varepsilon^i(c, t) = D_{\text{el}}^i u^i(c, t)$$

Modální matice tuhosti a hmotnosti:

$$K_e = U_F^T K_F U_F \quad M_e = U_F^T M_F U_F$$

# Pohybové rovnice soustav s mnoha poddajnými tělesy

$$M(q) \cdot a_z + k_b(\Omega, q, \dot{q}) + k(q, \dot{q}) = h(r, S, q, \dots)$$

$$\begin{bmatrix} m & \tilde{d}_{CM}^T & C_t^T \\ \tilde{d}_{CM} & I & C_r^T \\ C_t & C_r & M_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a \\ \dot{\omega} \\ \ddot{q} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} m\tilde{\omega}\tilde{\omega}d_{CM} + 2m\tilde{\omega}\dot{d}_{CM} \\ \tilde{\omega}I\tilde{\omega} + G_r\omega \\ O_e\Omega + G_e\omega \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_e q \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_k p_k \\ \sum_k l_k + \sum_k \tilde{c}_k p_k \\ \sum_k U_F^T(c_k) p_k \end{Bmatrix}$$

$$m = \int_V \rho dV \quad md_{CM} = \int_V \rho d dV \quad C_t = \int_V \rho U_F^T dV \quad G_r = \int_V \rho \tilde{d} \tilde{d} dV \quad O_e = \int_V \rho \tilde{U}_F^T \tilde{d}^T dV$$

$$I = \int_V \rho \tilde{d}^T \tilde{d} dV \quad m\dot{d}_{CM} = \int_V \rho \dot{d} dV \quad C_r = \int_V \rho U_F^T \tilde{d}^T dV \quad G_e = \int_V \rho U_F^T \tilde{d} dV$$

$$\Omega = [\omega_x^2, \omega_y^2, \omega_z^2, \omega_x \omega_y, \omega_y \omega_z, \omega_x \omega_z]^T$$

# Ko-simulace

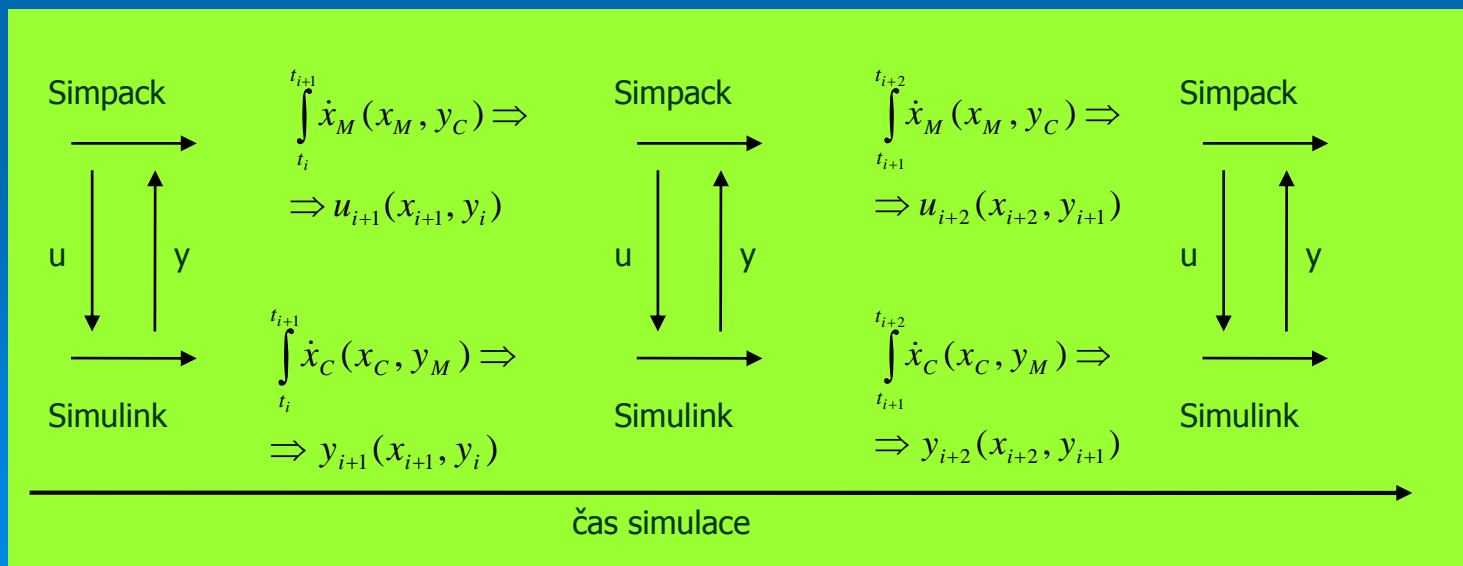
= provedení výpočtu pomocí dvou programů

Umožňuje využít jednotlivé přednosti obou programů

Simpack obsahuje speciální DAE integrátor

Simulink vhodný pro vytvoření řízení mechanismu

Komunikace programů při výpočtu probíhá v diskretním časovém kroku





# Obecný postup vytvoření poddajného tělesa pro Simpack

## 1) Vytvoření vstupních souborů pro Fembs v Ansysu

- soubor *\*.sub* redukce MKP modelu
- soubor *\*.rst* modální analýza redukovaného MKP modelu
- soubor *\*.cdb* grafická reprezentace MKP modelu pro Simpack

## 2) Postup převedení MKP modelu modulem Fembs

Probíhá v sedmi krocích:

2. krok - výběr uzlů, ze kterých se stanou v Simpacku markery
3. krok - výběr vlastních tvarů pro aproximaci pole deformací pomocí výběru vlastních frekvencí
4. krok - možnost výpočtu deformačních tvarů
7. krok - vytvoření výsledného souboru *\*.SID\_FEM* obsahujícího poddajné těleso pro Simpack

# Modelování poddajných mechanismů v Simpacku

## Základní rozdíl:

**Tuhá tělesa:**     *Joint*           – kinematická dvojice  
                      *Constrain* – pro uzavření smyčky mechanismu

**Poddajná tělesa:** načtení ze souboru \*.SID\_FEM

*Joint*           – pro složení mechanismu (6 DOF)

*Constrain* – pro vytvoření kinematických dvojic

## Zásady:

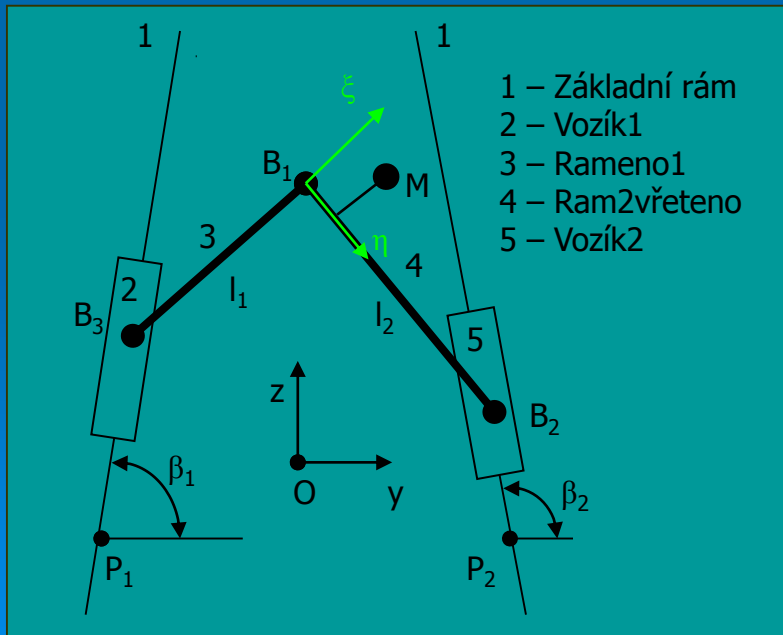
- Souřadný systém poddajného tělesa v Simpacku je totožný se souřadným systémem MKP modelu a nelze v Simpacku transformovat
- V bodě souřadného systému poddajného tělesa Simpack vytvoří *marker*, který je nutné použít pro spojení kinematické dvojice (*joint*)

# Vytvoření tuhého mechanismu Trijoint s řízením

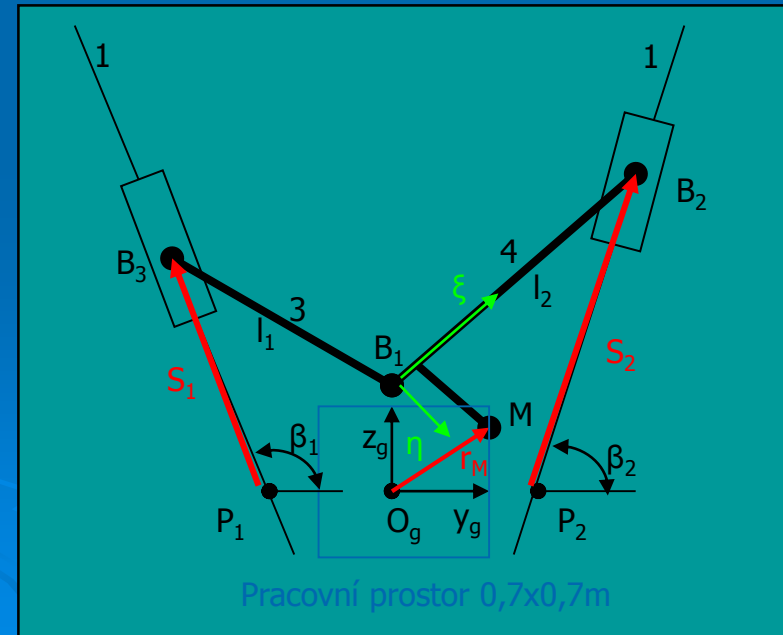
## Rovinný model

- Požadavek pro ko-simulaci**
- kompatibilita obou modelů
  - shodná počáteční poloha
  - zvolení vstupních a výstupních senzorů (signálů) v obou programech pro ko-simulační výpočet

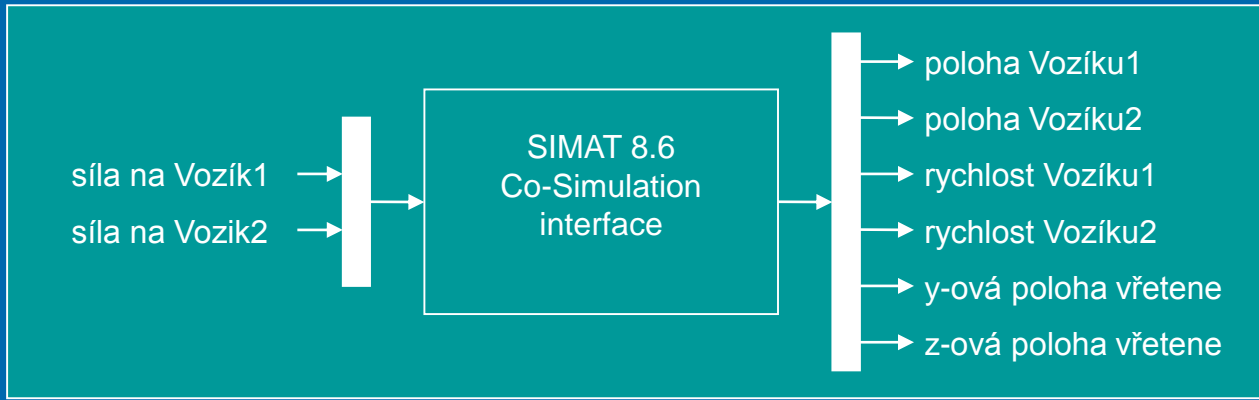
## Rovinné schéma mechanismu:



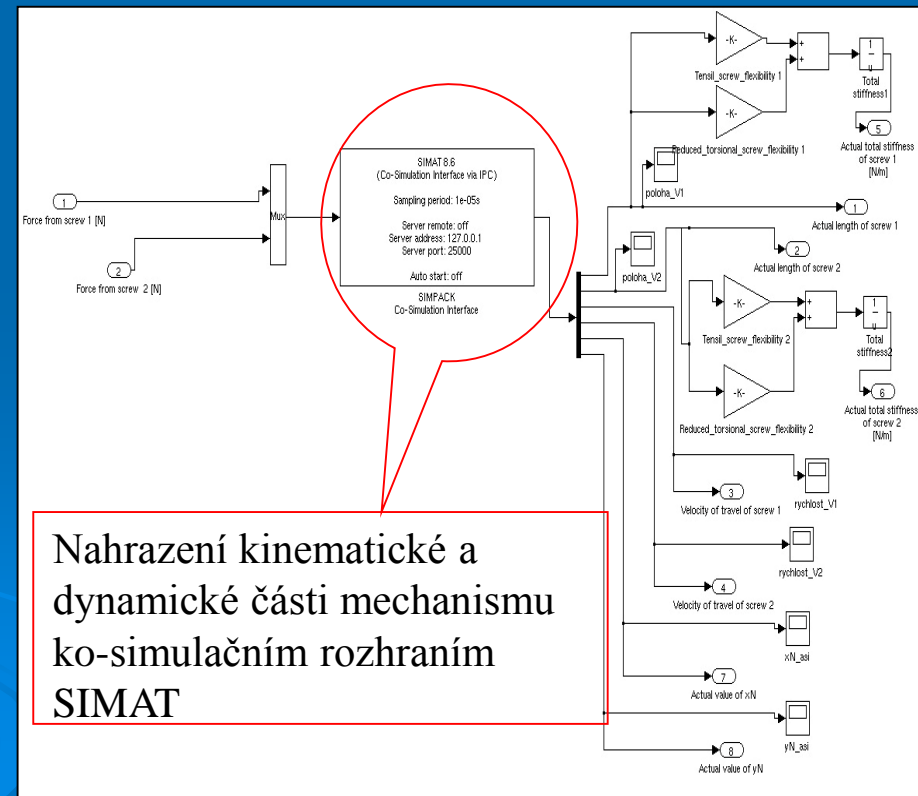
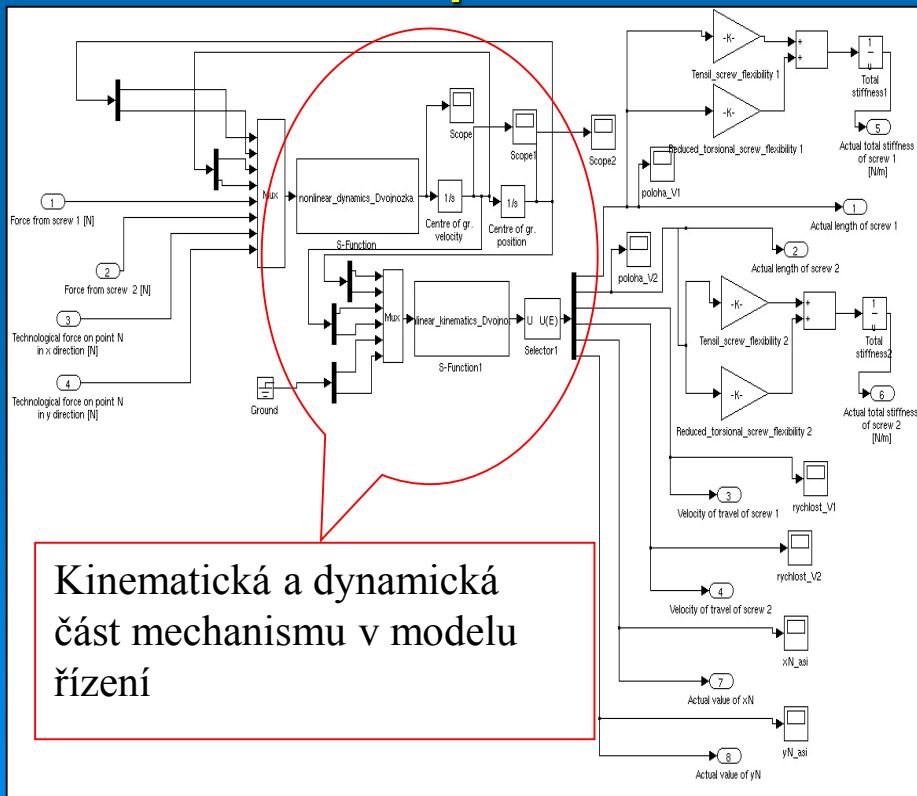
## Schéma modelu řízení:



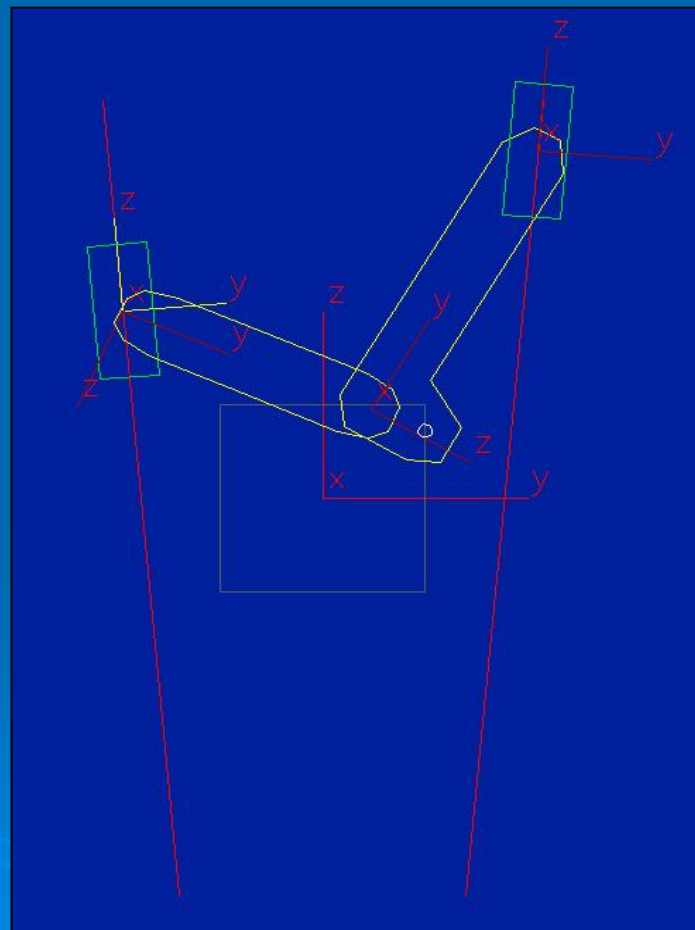
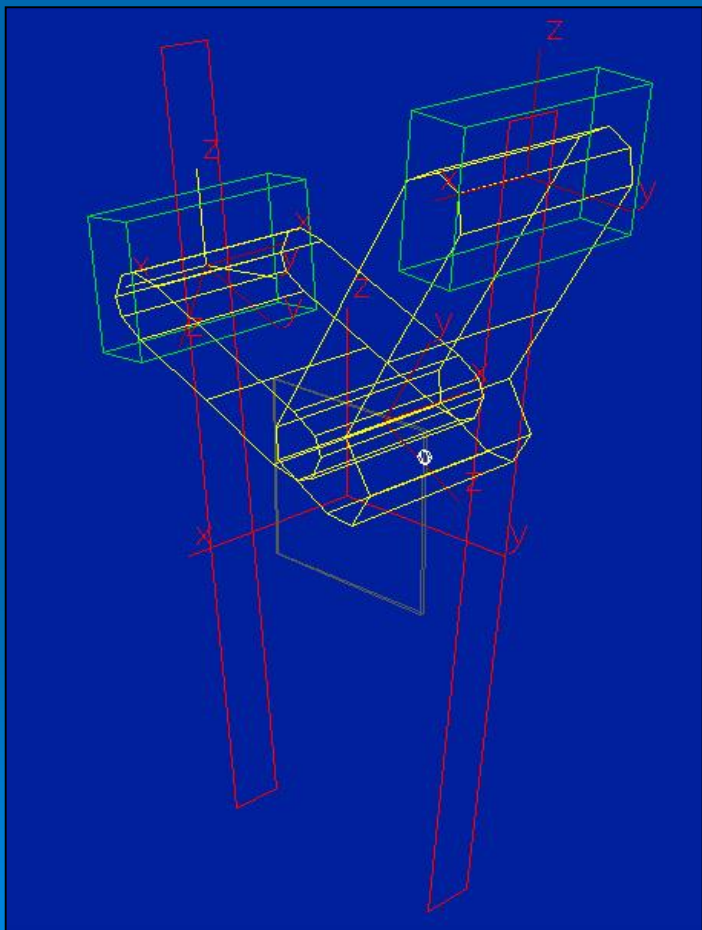
# Schéma ko-simulace v Simulinku



## Úprava části modelu řízení v Simulinku



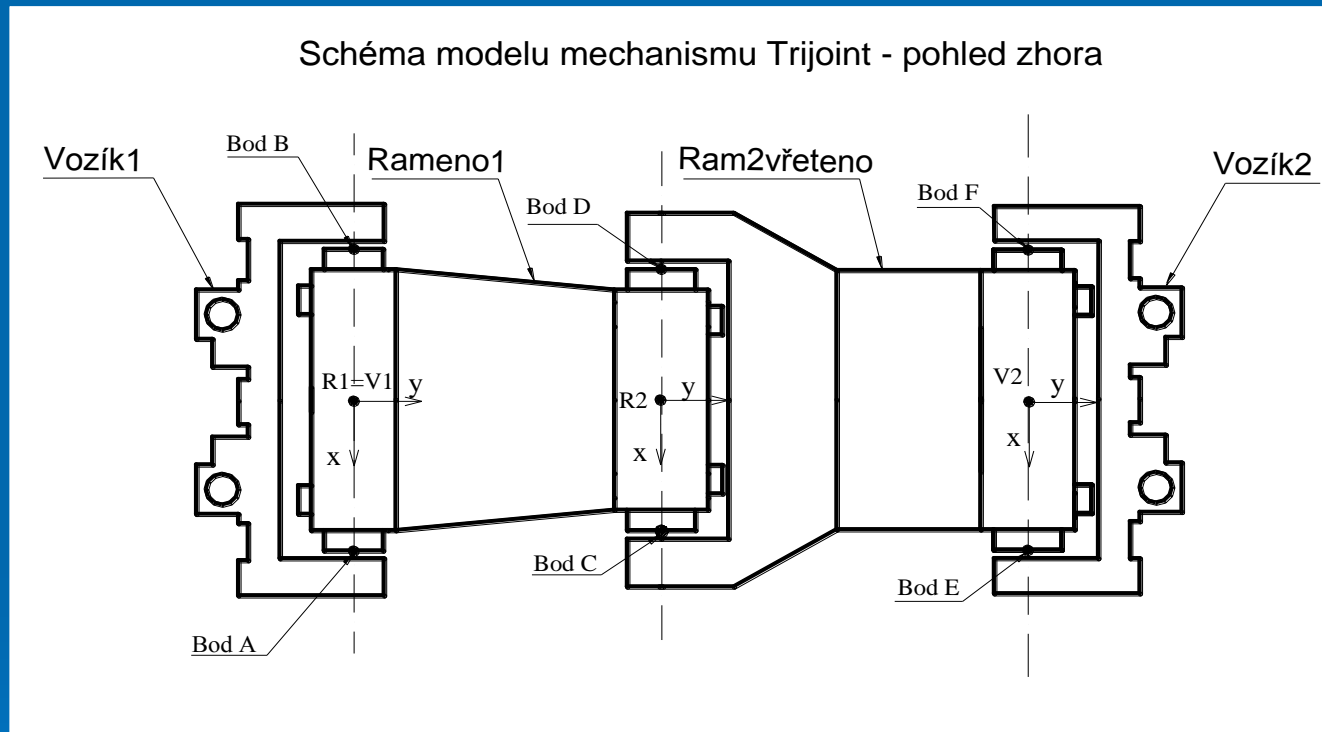
# Vytvořený tuhý model mechanismu Trijoint v Simpacku



# Vytvoření poddajného modelu mechanismu Trijoint

3D model - MKP modely těles mechanismu jsou 3D modely

- poddajná pouze obě ramena, vozíky modelovány jako tuhá tělesa



Sestavení mechanismu - joint s 6 DOF v bodech R1, R2

Vytvoření rotačních kinematických dvojic - constrain mezi tělesy v jednotlivých bodech A až F

# Úprava MKP modelů v Ansysu

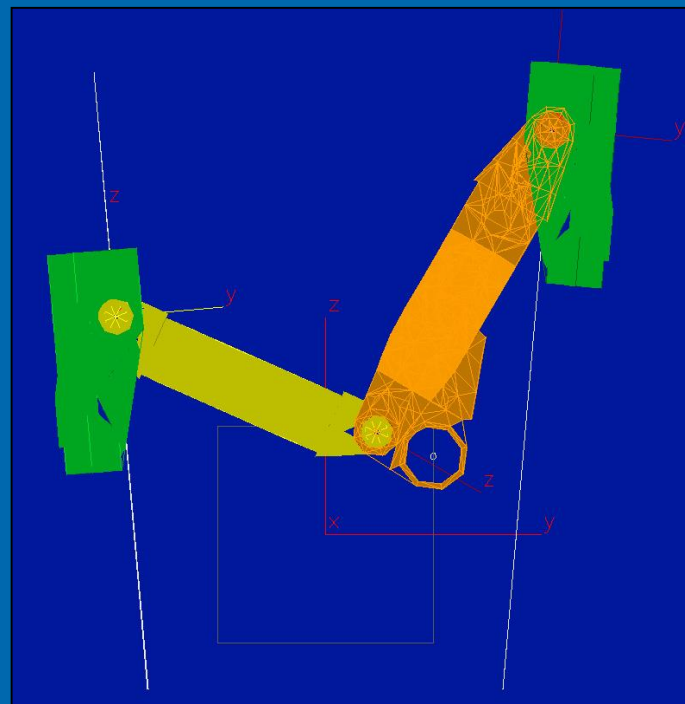
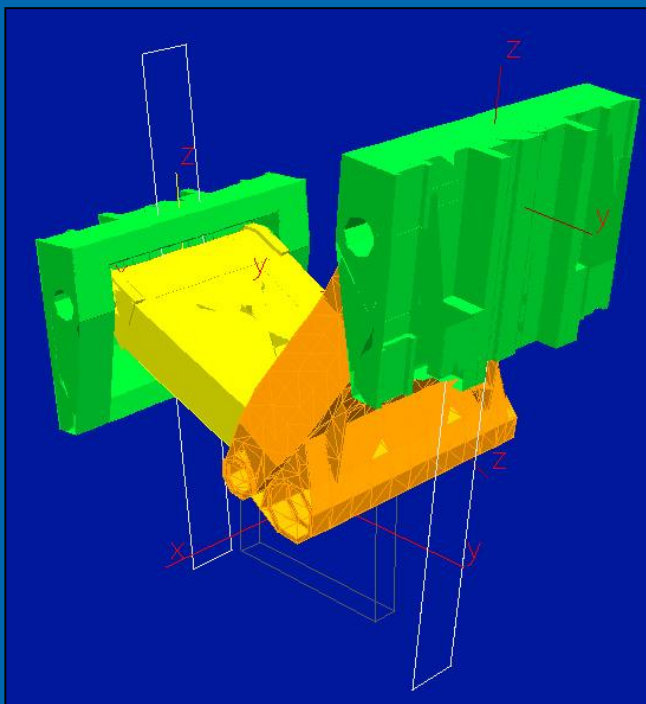
- 1) Transformace globálních souřadných systémů
- 2) Vytvoření nových uzlů na MKP modelech obou ramen
- 3) **Redukce modelů** obou ramen pomocí master uzlů (MDOF =  $u_x, u_y, u_z$ ) **na 1000 DOF**
- 4) **Modální analýza volných těles**

## Převod MKP modelů ramen modulem Fembs

2. krok – jako markery byly **vybrány čtyři nové uzly** na obou modelech
3. krok – **výběr prvních 20 nenulových vlastních tvarů**
4. krok – **výpočet 12 deformačních tvarů** pro zatížení ve čtyřech nových uzlech ve všech směrech (x ,y, z)

***Pole deformací obou modelů je aproximováno 32 tvary***

# Poddajný model mechanismu Trijoint v Simpacku

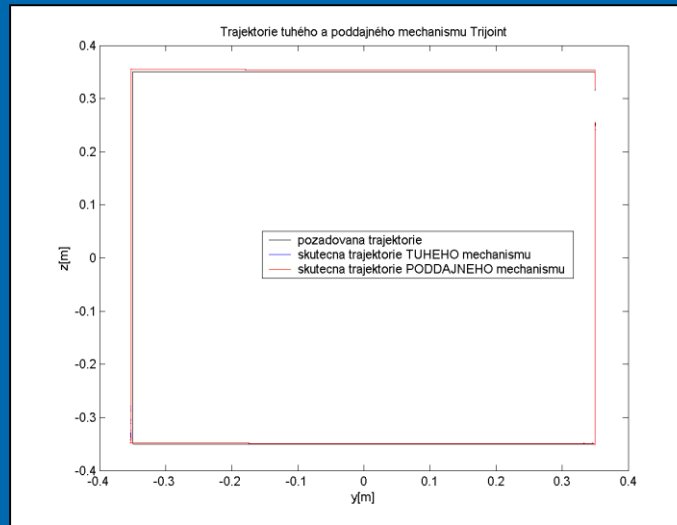


*Řízení bylo na poddajný model aplikováno ko-simulací  
obdobným způsobem jako na tuhý model*

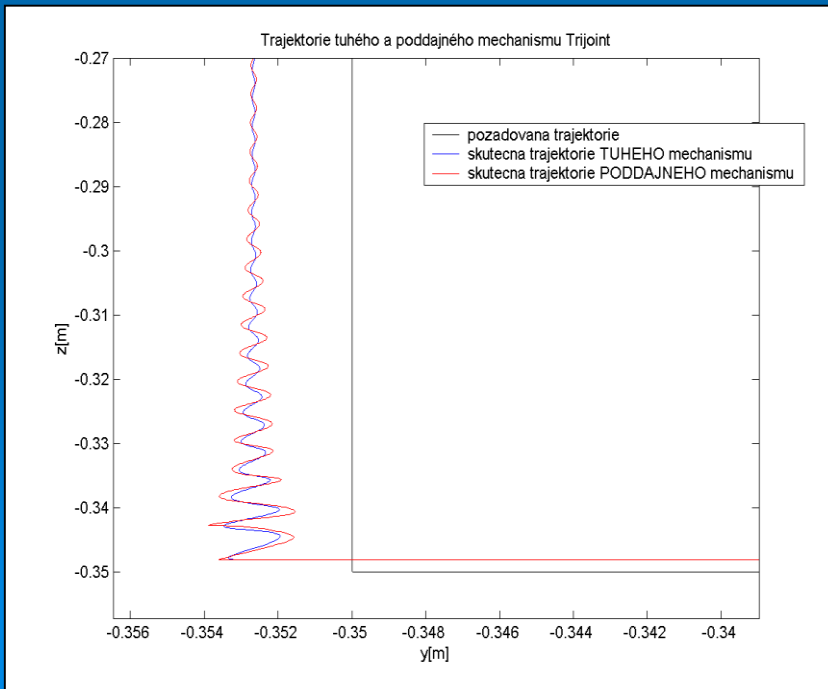
**Výsledný model poddajného mechanismu Trijoint je tvořen pouze poddajnými rameny, vozíky jsou modelovány jako tuhá tělesa**



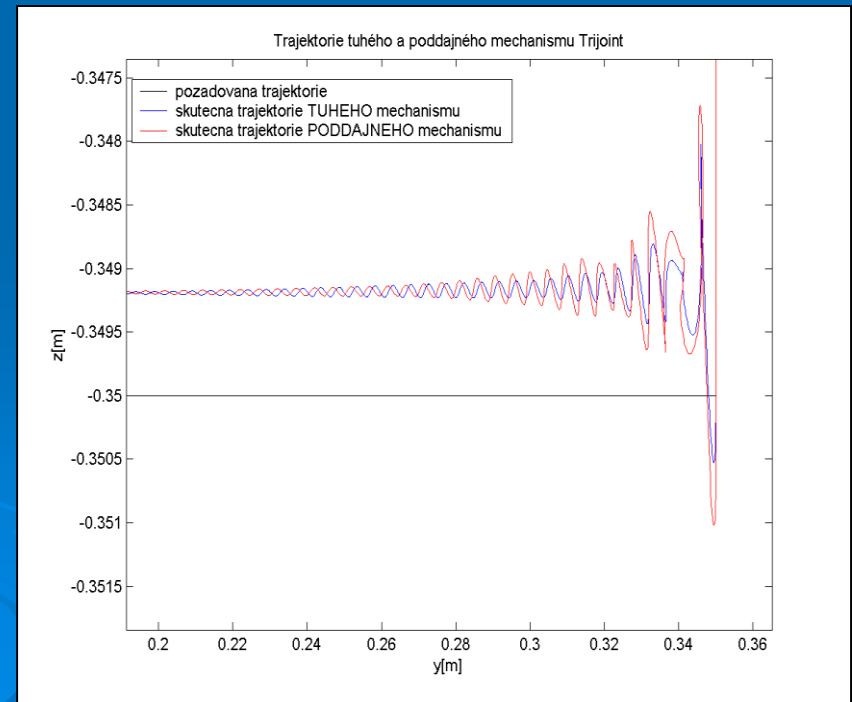
# Porovnání trajektorie tuhého a poddajného modelu



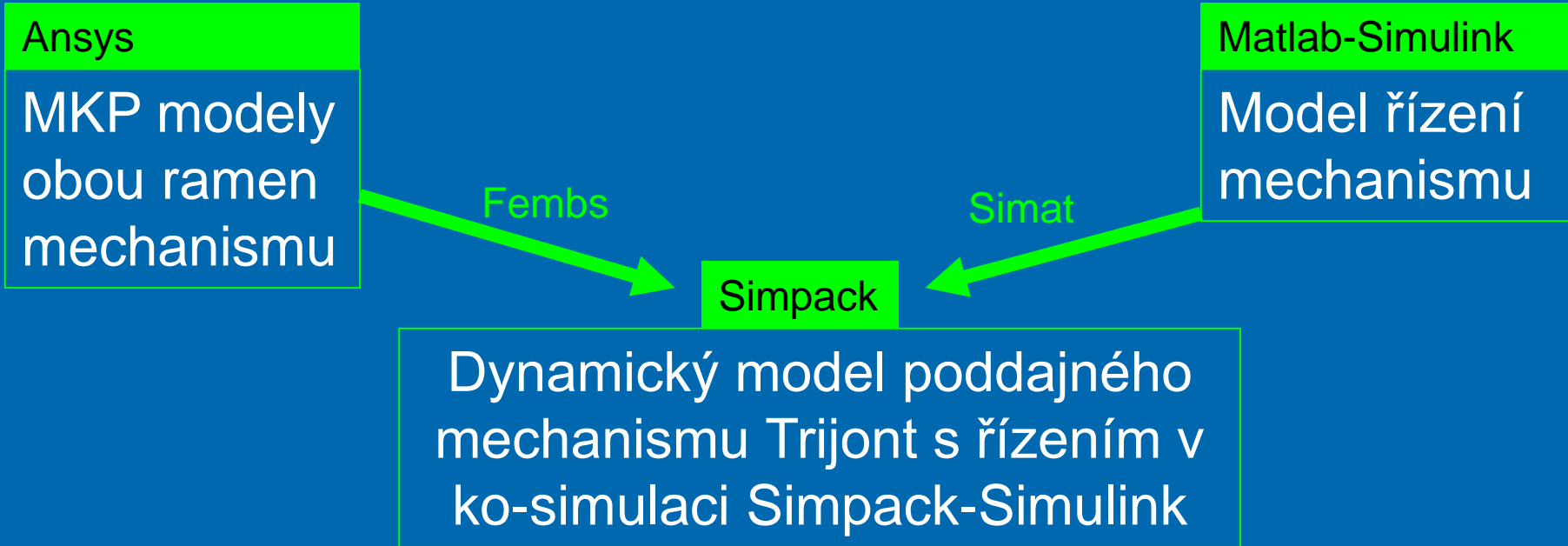
Detail levého dolního rohu trajektorie:



Detail pravého dolního rohu trajektorie:

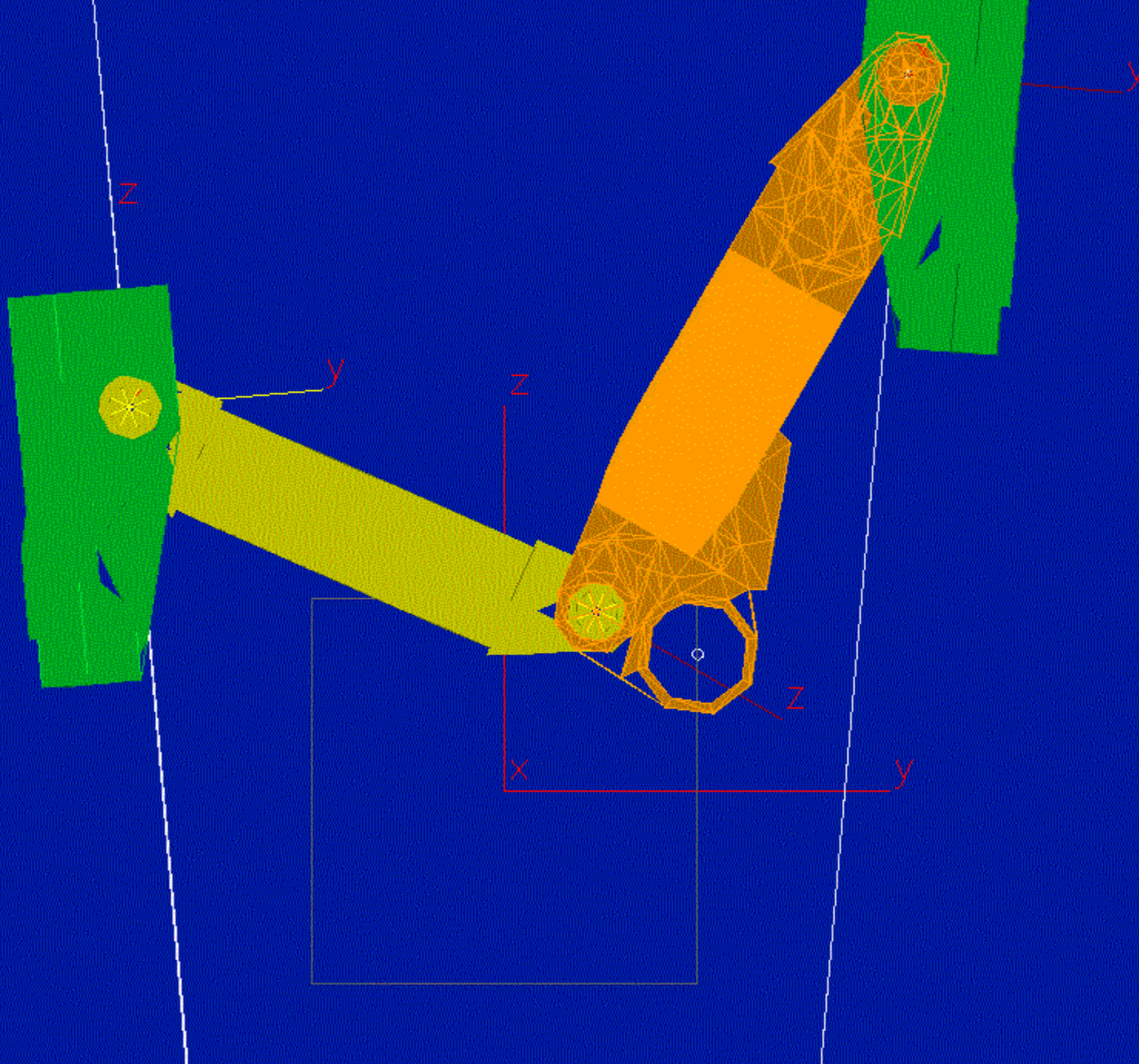


# Závěr



## Faktory ovlivňující výsledný poddajný model v Simpacku

- způsob redukce MKP modelu (Ansys)
- způsob aproximace pole deformací poddajných modelů těles  
= výběr vlastních tvarů a výpočet deformačních tvarů (Fembs)
- způsob vytvoření kinematických vazeb (Simpack)



Frame Number:

Speed-Factor:

Play Mode:

Recording:

Picture Name:

Pictures:

Animation Type:

Děkuji za pozornost