

## POČÍTAČOVÉ ANALÝZY MECHANISMŮ

ŠMERINGAIOVÁ Anna, SK

### Resumé

V příspěvku je uvedeno zhodnocení přípravy, průběhu a výsledků výuky předmětu "Počítačové analýzy mechanismů" v jeho prvním "pilotním ročníku". Obsahově je předmět zaměřen na kinematickou analýzu mechanických soustav a jeho zařazení do učebních plánů je výsledkem hledání nových forem a metod vhodných k použití ve výuce technické mechaniky. Výuka probíhá formou přednášek a laboratorních cvičení. Při řešení všech úkolů jsou v rámci cvičení aplikovány tři různé přístupy ke kinematické analýze jednoduchých mechanických soustav – analytické řešení, grafické řešení a řešení s počítačovou podporou. Uvedený je příklad kinematické analýzy centrického klikového mechanismu. Pro funkční simulaci mechanických soustav jsou v počítačové laboratoři k dispozici softwarové aplikace PTC Creo a Autodesk Inventor Professional.

**Klíčové slová:** CAD systém, modelování, simulace, specializovaná laboratoř

## COMPUTER ANALYSIS OF MECHANISMS

### Abstract

The paper presents the evaluation of the preparation, course and results of the subject "Computer Analysis of Mechanisms" in its first "pilot year". Content is focused on kinematic analysis of mechanical systems and its inclusion in curricula is the result of the search for new forms and methods suitable for use in the teaching of technical mechanics. Teaching takes the form of lectures and laboratory exercises. Three different approaches to kinematic analysis of simple mechanical systems, such as analytical solutions, graphical solutions, and computer-aided solutions, are applied to solve all the tasks. The article provides an example of a kinematic analysis of the central crank mechanism. For functional simulation of mechanical systems, PTC Creo software and Autodesk Inventor Professional are available in the computer lab.

**Keywords:** CAD system, modeling, simulation, specialized laboratory

### Úvod

Zavedení CA technologií do všech oblastí technické praxe vyvolalo potřebu nových forem a metod odborné přípravy budoucích inženýrů. Úkolem technického vzdělávání je vybavit studenty obecným technickým know-how, což dnes kromě teoretických znalostí zahrnuje také pochopení základních principů práce v 3D CAD systémech a přehled o možnostech praktického využití různých softwarových aplikací. Implementací CAD / CAM / CAE technologií do procesu výuky se studenti učí aktivně je využívat při konstrukčním a technologickém navrhování a řešení různých technických problémů.

Výsledkem hledání nových forem a metod vhodných k použití ve výuce technické mechaniky je zařazení předmětu "Počítačové analýzy mechanismů" do učebních plánů. Z hlediska požadavků na znalosti a počítačové dovednosti studentů předmět navazuje na odborné předměty Technická mechanika a Počítačové modelování. Obsahová náplň na sebe navazujících předmětů je koncipována tak, aby byla dosažena jejich vzájemná synergie.

## 1 Počítačová analýza mechanismů ve výuce technické mechaniky

Obsahově je předmět "Počítačové analýzy mechanismů" zaměřen na kinematickou analýzu mechanických soustav. Při návrhu a konstrukci převodových mechanismů technických zařízení je nutno skloubit znalosti a dovednosti z různých oblastí, ke kterým v podstatné míře patří i poznatky z oblasti počítačové simulace a analýzy pohybu mechanických soustav, podpořené teoretickou bází. V této souvislosti jsou v procesu výuky dané problematiky kladeny vysoké nároky nejen na studenty, ale i na pedagogy a celkovou přípravu výuky a studijních podkladů. Při sestavení programu výuky byly v první řadě plně respektovány zásady didaktiky (Turek, 1998):

- Zásada vytvoření optimálních podmínek pro proces výuky.
- Zásada spojení teorie s praxí.
- Zásada přiměřenosti a individuálního přístupu.
- Zásada vědeckosti.
- Zásada názornosti.
- Zásada motivace, uvědomělosti a aktivity.
- Zásada soustavnosti a posloupnosti.
- Zásada trvalých výsledků a operativnosti vyučovacího procesu.

Výuka probíhá formou přednášek a laboratorních cvičení. Přednášky jsou vedeny prezenční metodou a jejich obsahem jsou teoretické základy kinematiky s důrazem na teorii kinematiky převodových mechanismů a standardní postupy řešení úloh v kinematice.

Pro praktická cvičení byla zřízená počítačová laboratoř. Laboratoř pro CAD / CAE systémy kombinuje učební a laboratorní prostředí, které umožňuje teoretické i praktické vzdělávání v oblastech CAD a CAE. Laboratoř je určena pro počítačové modelování komponent a sestav konstrukčních celků, tvorbu výkresové dokumentace a realizaci různých typů analýz. Studenti se učí simulovat chování konstrukcí a konstrukčních částí s využitím metody MKP prostřednictvím tvorby geometrických a výpočetních modelů. Současně je možná realizace kinematických a dynamických analýz mechanismů (konstrukčních sestav). Pro modelování a funkční simulaci mechanických soustav je v počítačové laboratoři k dispozici dvacet počítačových stanic vybavených softwarovými aplikacemi Autodesk Inventor Professional a PTC Creo.

Pro praktická cvičení byly připraveny studijní materiály a pomůcky. Studentům jsou k dispozici základní postupy řešení úloh v kinematice, manuály pro práci v softwarech Autodesk Inventor Professional a PTC Creo a virtuální modely jednoduchých rovinných mechanismů.

Aplikované byly metody výuky: heuristická (řešení úkolů na cvičeních) a výzkumná metoda (semestrální práce). Studenti pracovali samostatně podle instrukcí pedagogů. Algoritmy řešení studenti objevují samostatně nebo ve spolupráci s učitelem. Procvičená byla kinematická řešení jednoduchých rovinných mechanismů (klikový a kulisový mechanismus) a převodů s ozubenými koly. Použité byly tři různé přístupy ke kinematické analýze mechanických soustav:

**Analytické řešení** - k řešení problémů používá matematické definice, jako jsou funkce, derivace, integrály, rovnice, trigonometrické pravidla, atd. Výhodami této metody jsou minimální materiální požadavky (papír, pero, tužka), možnost použití matematických tabulek, možnost řešit úkoly kdekoliv. Nevýhodou je, že se požadují vynikající matematické vědomosti, odvození matematických závislostí je časově náročné a pravděpodobnost chyby při výpočtu je vysoká.

**Grafické řešení** - metoda vhodná k řešení jen omezených typů problémů. Využívá pravidla geometrie. Je vhodná zejména pro řešení "rovných problémů", protože pracuje s vektory. Výhodou jsou minimální náklady na realizaci řešení, možnost použít grafický software a poměrně rychlé řešení pro určení výstupních hodnot pro jednu konkrétní kombinaci nebo definované vstupní parametry.

Nevýhodou je, že pro každou změnu nebo vstupní hodnotu je třeba udělat nové grafické řešení, a nedostatečná přesnost při „ručním“ řešení.

**Řešení s počítačovou podporou** - Kinematická a dynamická analýza mechanismů s počítačovou podporou nabízí komplexní pohled na chování jednoduchých i složitých mechanických soustav. Určení závislostí kinematických a dynamických veličin funkčních částí mechanismů ve virtuálním prostředí je výhodným testovacím a simulačním prostředkem ještě před samotným vytvořením prototypu mechanismu. Výhodou je možnost sledování kinematických veličin všech členů mechanismu v kterékoliv poloze, zobrazení sledovaných veličin ve formě grafu nebo vektoru, přímý přechod od kinematické analýzy k dynamické simulaci a pevnostní analýze, použití získaných dat pro jiné aplikace. Nevýhodou jsou zvýšené požadavky na odbornost uživatele CAD / CAM systému (nutnost zaškolení nebo samostudia pracovníka pracujícího se softwarem) a vysoké náklady na softwarové a hardwarové vybavení.

Převážná část hodinové dotace laboratorních cvičení byla vyhrazena řešení s počítačovou podporou. K sestavení virtuálních modelů klikového a kulisového mechanismu použili studenti předem připravené modely komponent. Důraz byl kladen na správné definice vazeb funkčních členů mechanismu a nastavení podmínek simulovaného pohybu. Pro kinematickou analýzu kombinovaného dvoustupňového převodu (ozubený a řemenový převod) bylo zapotřebí připravit konstrukční návrh, virtuální model a realizovat kinematickou simulaci převodového mechanismu.

## 2 Metodika řešení úloh

Praktická cvičení byla vedena podle níže uvedeného scénáře:

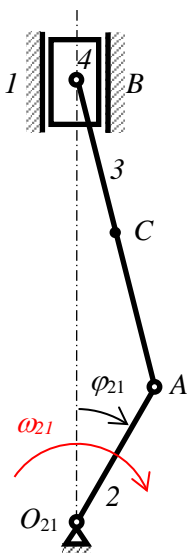
1. Zadání úlohy: kinematické schéma mechanismu, text zadání, vstupní hodnoty.
2. Kinematický rozbor pohybu mechanismu. Příklady použití daného mechanismu v praxi.
3. Základní výpočty vstupních parametrů potřebné pro řešení.
4. Analytické řešení.
5. Grafické řešení.
6. Řešení s počítačovou podporou.
  - a) *Sestavení modelu mechanismu* v softwaru Autodesk Inventor Professional. V případě klikového a kulisového mechanismu byly k dispozici modely jednotlivých komponent mechanismu. Modely ozubených a řemenových převodů byly modelovány pomocí speciálního nástroje pro navrhování převodových mechanismů, který je součástí základního balíku Autodesk Inventor Professional.
  - b) *Nastavení podmínek kinematické analýzy* v prostředí pro „Dynamickou analýzu“ aplikace Autodesk Inventor Professional - definování kinematických vazeb, pohonů, krajních poloh, sledovaných veličin.
  - c) *Spuštění simulace, záznam a zpracování výsledků* - výstup ze softwaru v tabulkové a grafické podobě (funkční závislosti výstupních veličin na čase, konkrétní hodnoty hledaných veličin pro zadanou polohu mechanismu).
7. Porovnání výsledků dosažených různými metodami řešení.

## 3 Kinematická analýza centrického klikového mechanismu

Jednou z řešení úloh byla kinematická analýza centrického klikového mechanismu. Studenti měli k dispozici již připravené komponenty pro sestavení virtuálního modelu klikového mechanismu motoru motocyklu Jawa 50 (výroba od roku 1954, objem spalovacího motoru je  $49,9 \text{ cm}^3$ , výkon  $2,6 \text{ kW}$  při  $6500 \text{ ot/min}$ ). Na obr. 1 je kinematické schéma a 3D model klikového mechanismu. Hnacím členem je klika 2, která se otáčí stálou úhlovou rychlostí  $\omega_{21} = 7,07 \text{ rad.s}^{-1}$ . Pro dané hodnoty

$\overline{O_{21}A} = 0,022 \text{ m}$ ,  $\overline{AB} = 0,1 \text{ m}$  a okamžitou polohu  $\varphi_{21}$  kliky 2 v čase  $t_1 = 1 \text{ s}$ ,  $t_2 = 2 \text{ s}$ ,  $t_3 = 3 \text{ s}$  bylo potřeba najít:

- rychlost a zrychlení bodu A,
- rychlost a zrychlení pístu 4 (resp. bodu B),
- rychlost a zrychlení bodu C,
- úhlovou rychlost a úhlové zrychlení tělesa 3 vzhledem na rám.



Obrázek 1 – Kinematické schéma a 3D model klikového mechanismu motoru motocyklu Jawa 50

Pohyb hnacího členu mechanismu (kliky 2) byl určen za předpokladu  $\alpha_{21} = 0$ , resp.  $\omega_{21} = \text{konst.}$ :

$$\omega_{21} = \text{konst.} \quad \text{Rovnice úhlové rychlosti kliky 2 jako funkce času} \quad (1)$$

Změnu úhlu pootočení  $\varphi_{21}$  kliky 2 od uvažované počáteční polohy v závislosti na čase odvodíme:

$$\omega_{21} = \text{konšt.} = \frac{d\varphi}{dt}; \quad \omega_{21} \int_0^t dt = \int_0^{\varphi_{21}} d\varphi$$

$$\varphi_{21} = \omega_{21} t \quad \text{Rovnice úhlové dráhy kliky 2 jako funkce času} \quad (2)$$

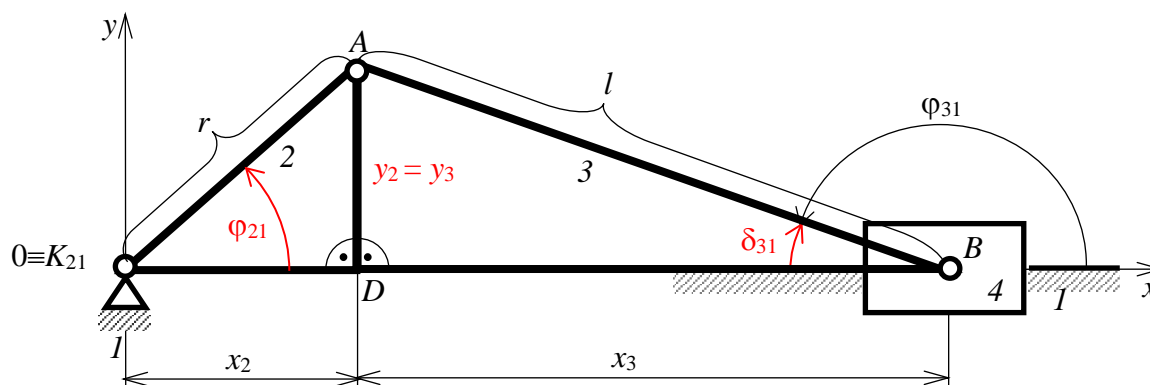
Pro úhlovou dráhu kliky 2 v čase  $t_1$ ,  $t_2$  a  $t_3$  potom platí:

$$\begin{aligned} t_1 = 1 \text{ s} & \rightarrow \varphi_{21} = \omega_{21} \cdot t_1 = 7,07 [\text{rad.s}^{-1}] \cdot 1 [\text{s}] = 7,07 \text{ rad} = 405^\circ \\ t_2 = 2 \text{ s} & \rightarrow \varphi_{21} = \omega_{21} \cdot t_2 = 7,07 [\text{rad.s}^{-1}] \cdot 2 [\text{s}] = 14,14 \text{ rad} = 810^\circ \\ t_3 = 3 \text{ s} & \rightarrow \varphi_{21} = \omega_{21} \cdot t_3 = 7,07 [\text{rad.s}^{-1}] \cdot 3 [\text{s}] = 21,21 \text{ rad} = 1215^\circ \end{aligned}$$

Mechanismus má 1° volnosti pohybu. Při pohybu celého mechanismu jsou okamžité polohy ojnice 3 a bodů A, B, C závislé na okamžité poloze kliky 2.

Při **analytickém řešení** byla pro určení této závislosti použita trigonometrická metoda. Pro mechanismus s 1° volností pohybu je možné vyjádřit závislost změny úhlové polohy ojnice 3 ( $\varphi_{31}$ ) na změně úhlové polohy kliky 2 ( $\varphi_{21}$ ) prostřednictvím pomocného úhlu  $\delta_{31}$ .

$$\varphi_{31} = \varphi_{31}(\varphi_{21}) \rightarrow \delta_{31} \quad (3)$$



Obrázek 2 – Princip řešení klikového mechanismu trigonometrickou metodou

Princip řešení spočívá v rozdělení obrazu kinematického schéma mechanismu na pravoúhlé trojúhelníky  $\triangle OAD$  a  $\triangle ABD$  podle obr. 2 a hledání souvislosti mezi délkami stran a úhly. Východiskem pro odvození závislostí všech hledaných parametrů na čase je potom vztah:

$$y_2 = y_3; \quad \text{resp.} \quad r \sin \varphi_{21} = l \sin \delta_{31} \quad (4)$$

Při **grafickém řešení** byly nalezeny hledané okamžité hodnoty rychlostí a zrychlení vybraných bodů ve třech různých polohách mechanismu. Na obr. 3 je příklad sestavení pole rychlostí a zrychlení pro jednu z možných poloh kliky 2.

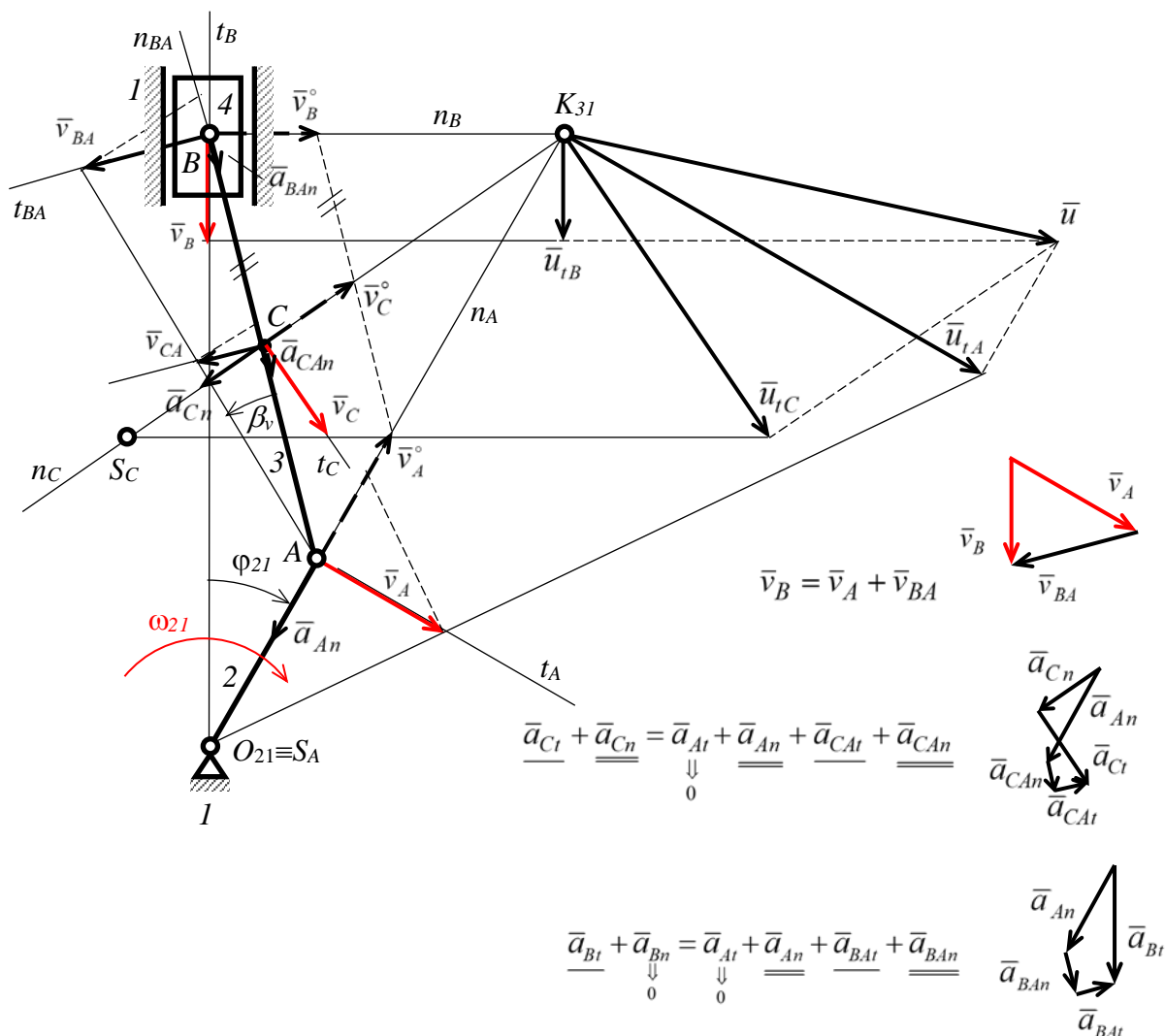
Pro **kinematickou analýzu klikového mechanismu s počítačovou podporou** byla vyhrazena časová dotace 2 x 90 minut. 3D model mechanismu byl sestaven v základním pracovním softwaru Autodesk Inventor Professional. Po přesunutí modelu do pracovního prostředí pro „Dynamickou analýzu“ byly nastaveny podmínky kinematické analýzy – definovány byly kinematické vazby, pohon hnacího členu, okrajové polohy a sledované parametry funkčních členů mechanismu – obr. 4. Po spuštění simulace byl vygenerován protokol s výsledky v tabulkové a grafické podobě – obr. 5.

#### 4 Podmínky klasifikace studentů

Podmínky pro úspěšné absolvování předmětu „Počítačové analýzy mechanismů“:

1. Semestrální práce:
  - Grafické a numerické řešení – 20 %
  - Řešení s počítačovou podporou – 40 %
2. Alternativní volba:
  - Nadstandardní forma vypracování semestrální práce dle vlastní volby (videosimulace, videopříručka pro modelování a simulaci mechanismu a pod.) – 40 %
  - Standardní zkušební test (Teoretické základy kinematiky) – 40 %

Semestrální práce byla zaměřena na kinematickou analýzu vybraných mechanismů všemi metodami s důrazem na návrh a vytvoření virtuálního modelu, počítačovou simulaci a správné zhodnocení dosažených výsledků. Model převodového mechanismu a výsledky kinematické analýzy na obr. 6 jsou výsledkem jedné z odevzdaných semestrálních prací. Obsahem zkušebního testu byly teoretické základy kinematiky.

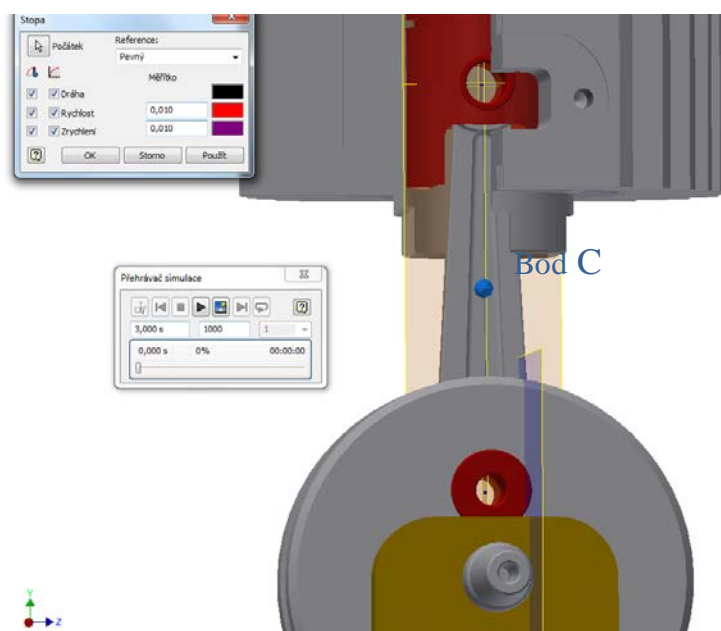


Obrázek 3 – Grafické řešení klikového mechanismu

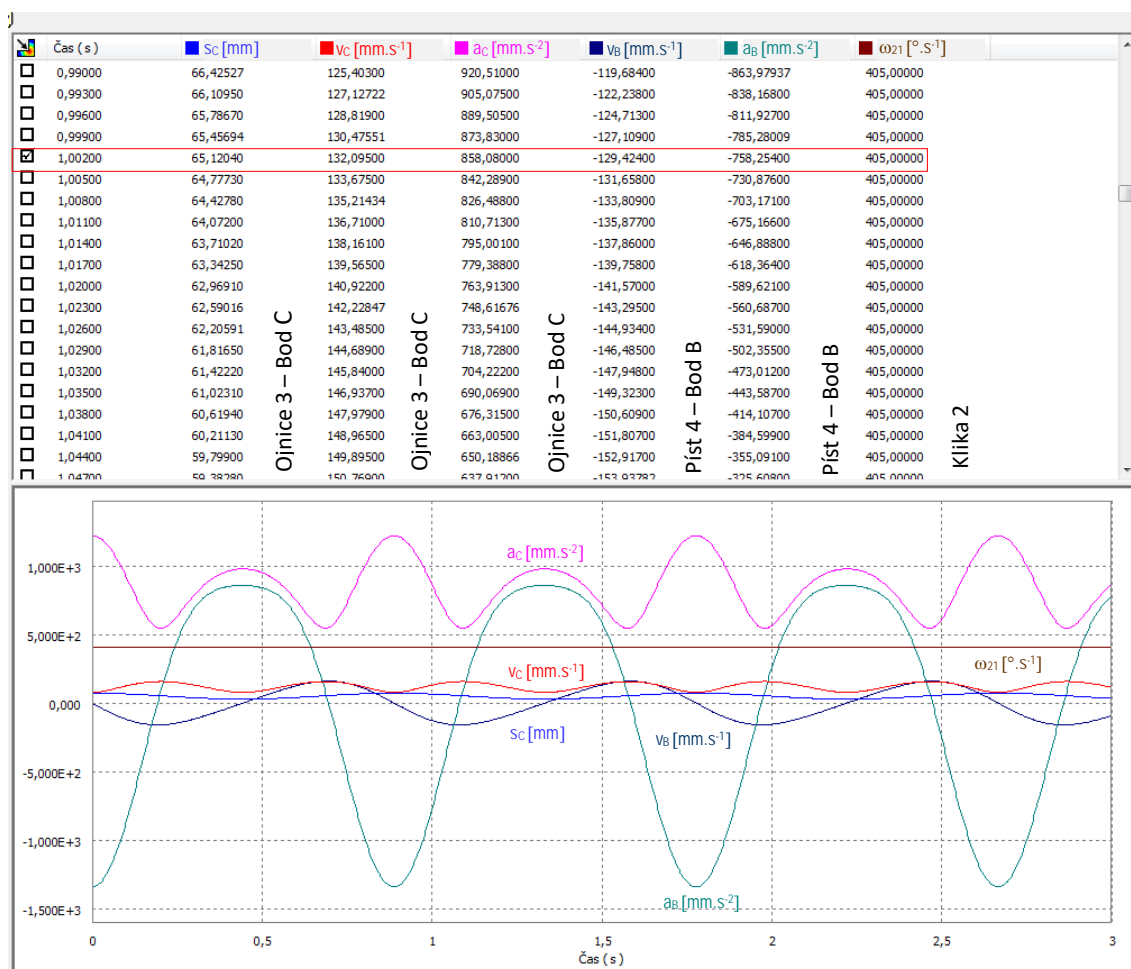
## 5 Diskuse

Zvládnutí teoretických základů technické mechaniky bylo, je a bude pro studenty náročné. Předpokladem správného řešení úloh v kinematice je pochopení teoretických základů mechaniky a správné posouzení řešeného problému. Z výsledků studentů, kteří absolvovali předmět Počítačová analýza mechanismů v prvním „pilotním ročníku“ můžeme konstatovat:

- Analytické řešení zvládalo samostatně pouze malé procento studentů – cca 10 %. Důvod vidíme v nedostatečných matematických vědomostech a často se vyskytujících chybách při odvození matematických závislostí. Největším problémem však bylo najít logické souvislosti mezi kinematickými veličinami popisujícími pohyb funkčních členů mechanismu.

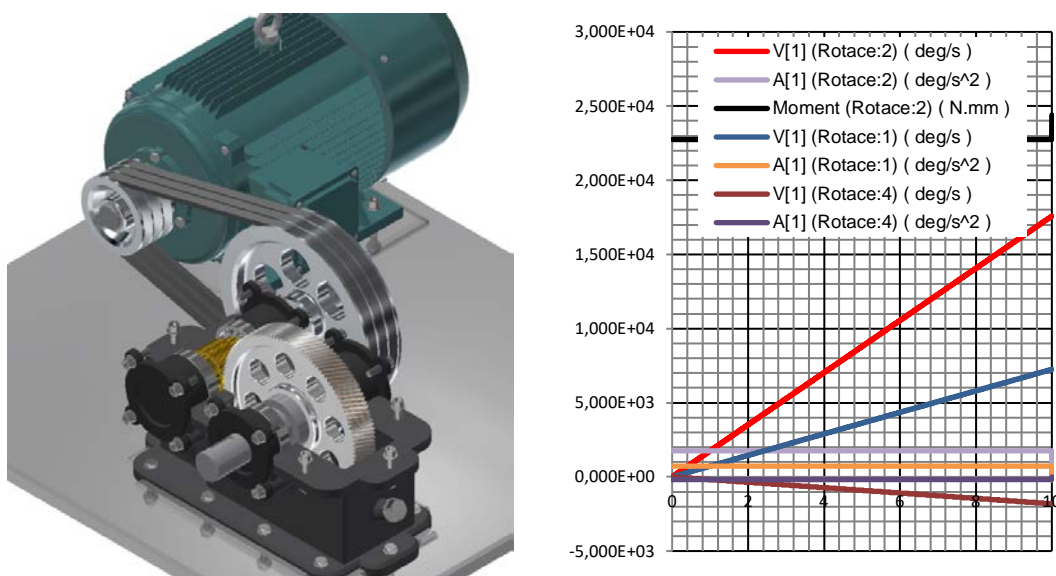


Obrázek 4 – Nastavení sledovaných parametrů a podmínek pro spuštění simulace



Obrázek 5 – Výsledky kinematické analýzy s podporou Autodesk Inventor Professional

- Grafické postupy řešení zvládlo bez problémů cca 75 % studentů. Příčinou nesprávných řešení u zbývajících 25 % studentů bylo nepochopení nebo nerespektování grafických konstrukcí polí rychlostí a zrychlení, příp. nedodržení přesnosti.
- Řešení úloh s počítačovou podporou studenty jednoznačně zaujalo. Tvorba virtuálního modelu, příprava simulace a realizace kinematických a dynamických analýz pomocí CAD / CAE systémů výrazně podpořila názornost a lepší pochopení problematiky převodových mechanismů. Pracovní postupy při modelování a přípravě simulace v daném CAD softwaru studenti zvládli bez problémů. Nejtěžší bylo funkční pochopení mechanismu a s tím související správné definování vzájemných vazeb a parametrů pohybu členů mechanismu.
- Při výchově budoucích inženýrů je důležité vzbudit zájem o techniku a motivovat ke studiu techniky na středních a vysokých školách už na základní škole. Centrum edukace a popularizace techniky (Pavelka, J., Pavlenko, S., 2016) je zaměřeno na podporu technického vzdělávání v ZŠ. Videosimulace a virtuální modely převodových mechanismů, které jsou výsledkem řešení semestrálních prací, je možné použít jako učební pomůcky v programu centra edukace. Prvotním vnímáním a analýzou technických objektů - funkčních 3D modelů - se vyvíjí schopnost žáků chápat různé mechanismy, jejich pohyby a principy činnosti.



Obrázek 6 – Model převodového mechanismu a výsledky kinematické analýzy

## Závěr

Předmět Počítačová analýza mechanismů absolvovali studenti druhého ročníku bakalářského studia. Absolvováním předmětu získali studenti základní teoretické znalosti z kinematiky a také praktické počítačové dovednosti při realizaci kinematických a dynamických analýz mechanismů ve virtuálním prostředí CAD / CAM systému Autodesk Inventor Professional, resp. PTC Creo. Zároveň si upevnili znalosti a rozšířili zkušenosti s navrhováním konstrukčního řešení mechanismů a přípravou 3D modelů jednotlivých komponent a sestavy mechanismu. Výsledky řešených úloh byly prezentovány ve formě různých typů simulačních a prezentačních mediálních výstupů. Cílem výše popsaného přístupu k výuce převodových mechanismů bylo názorné přiblížení dané problematiky studentům, lepší pochopení teoretických základů mechaniky a schopnost aplikovat je při řešení konkrétních úkolů v praxi.



## Literatura

- Haľko, J., Pavlenko, S., Maščeník, J. (2013). *Navrhovanie pohonných staníc s ozubenými, remeňovými a reťazovými prevodmi: učebné texty pre riešenie semestrálneho projektu z Časti strojov* - 1. vyd. Košice: TU.
- Monková, K., Šmeringaiová, A. (2017). *Krok za krokom v softvéri Inventor Professional*. Praha: Asociace RISE.
- Monková, K. (2015). *Kinematická analýza mechanizmov I. časť*. Praha: RISE Asociation, 157 s.
- Pavelka, J., Pavlenko, S. (2016). Podpora vzdelávania k technike a popularizácie techniky. In: *Technika a vzdelávanie*. 5(2), 6-8.
- Šmeringaiová, A. (2014). Modeling and simulation of mechanisms. In: *Quaere 2014: recenzovaný sborník*
- Turek, I. (1998). *Kapitoly z didaktiky vysokej školy*. Košice: TU KIP.

**Poděkování:** Příspěvek byl napsán za podpory grantového projektu VEGA1/0910/17.

## Kontaktní adresa:

Anna Šmeringaiová, Ing. Ph.D.,  
Katedra navrhovania a monitorovania technických systémov, Fakulta výrobných technológií TUKE,  
Štúrova 31, 080 01 Prešov, Slovakia, tel: 0042155 6026312, email: [anna.smeringaiova@tuke.sk](mailto:anna.smeringaiova@tuke.sk)