

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA  
V NITRE

MECHANIZAČNÁ FAKULTA

Katedra mechaniky a strojnictva

**Zhodnotenie a porovnanie optimalizačných postupov pri  
konštrukčnom návrhu meracích zariadení pre  
pôdohospodárstvo**

Autoreferát dizertačnej práce  
na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor  
vo vednom odbore: 41-15-9  
Technika a mechanizácia poľnohospodárskej a lesníckej výroby

Ing. Pavol Sedlár

Nitra, 2007

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre mechaniky a strojnictva Mechanizačnej fakulty Slovenskej poľnohospodárskej univerzity v Nitre.

Doktorand: Ing. Pavol Sedlár  
Katedra mechaniky a strojnictva  
Mechanizačná fakulta  
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre

Vedúci dizertačnej práce:  
doc. Ing. Ján Gaduš, PhD.  
Katedra mechaniky a strojnictva  
Mechanizačná fakulta  
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre

Oponenti: **doc. Ing. Ľubomír Gonda, PhD.**  
Slovenské centrum poľnohospodárskeho výskumu Nitra  
Výskumný ústav trávnych porastov a horského  
poľnohospodárstva, Banská Bystrica

**doc. Ing. Miroslav Bošanský, PhD.**  
Katedra častí strojov  
Strojnícka fakulta  
Slovenská technická univerzita v Bratislave

**doc. Ing. Štefan Drabant, PhD.**  
Katedra vozidiel a tepelných zariadení  
Mechanizačná fakulta  
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre

Autoreferát bol odoslaný dňa .....

Stanovisko k dizertácii vypracovala Katedra mechaniky a strojnictva, Mechanizačná fakulta, Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre.

Obhajoba doktorandskej dizertácie sa koná dňa **25.03.2008** o **10:00** h pred komisiou pre obhajobu dizertačných práce vedného odboru **41-15-9 Technika a mechanizácia poľnohospodárskej a lesníckej výroby** na Mechanizačnej fakulte, Slovenskej poľnohospodárskej univerzity v Nitre.

Miesto konania: **Mechanizačná fakulta**  
**Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre**  
**Tr. A. Hlinku 2**  
**949 76 Nitra**

Miestnosť: **veľká zasadačka, IV. poschodie, hala MF**  
S dizertačnou prácou sa možno oboznámiť na dekanáte Mechanizačnej fakulty.

Predseda komisie pre obhajoby vo vednom odbore **41-15-9**

**prof. Ing. Jozef Hrubec, PhD.**  
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre

## ABSTRAKT

V dizertačnej práci boli vykonané optimalizačné postupy prostredníctvom softvérových nástrojov pre pôvodný konštrukčný návrh závesu bevametra a porovnanie a interpretácia týchto procesov. Optimalizácia je zameraná na minimalizáciu hmotnosti konštrukcie. Výpočet bol vykonaný v dvoch dostupných softvérových produktoch – *CATIA V5 R17* a *I-DEAS NX 11*. Najväčšie úspory hmotnosti boli dosiahnuté prostredníctvom gradientovej metódy pri maximalizácii napätí. V našom konkrétnom prípade predstavuje maximálna dosiahnutá úspora hmotnosti cca 36 %. Ostatné metódy vykazovali nižšiu materiálovú úsporu v rozmedzí od 7 % do 23 %. Týmto spôsobom bol potvrdený najefektívnejší postup optimalizácie, ktorým je maximalizácia napätí von Mises.

Ďalšia časť práce je verifikácia a porovnanie manuálne a softvérovo vypočítaných napätí a deformácií konštrukčne jednoduchého prvku metódou konečných prvkov. Rôzne variácie rozmerov elementov predstavovali vo výsledkoch najväčšie rozdiely napätia cca 20 MPa v porovnaní k manuálnemu výpočtu. Manuálny výpočet sme považovali za referenčný. Preukázané boli väčšie rozdiely napätí medzi jednotlivými výpočtami pri väčších zaťaženiach nosníka. U deformácií boli dosiahnuté výsledky prakticky zhodné.

**Kľúčové slová:** konštrukcia, optimalizácia, citlivostná analýza, CAD

## ABSTRACT

In the dissertation thesis, optimizing processes were performed through the software tools for the original constructive design of the bevameter hanger and a comparison and interpretation of these processes were realized. The optimization is concentrated on weight minimizing of a construction. It is be carried out to compare two available software products – *CATIA V5 R17* and *I-DEAS NX 11*. The biggest savings of mass were achieved through the Algorithm for Gradients with a maximization of stresses. Our concrete case presents the maximal achieved saving around 36 %. Other methods showed a lower cut in the consumption of material in the area of 7 % to 23 %.

The most effective optimizing progress was confirmed through the maximizing of stresses von Mises.

The next part of the dissertation thesis is a verification and a comparison of manual and software computed stresses and deformations of a simple constructional part through the Finite Element Method. Different variations of elements presented in the results the biggest stress differences of about 20 MPa in comparison to a hand computation. The hand computation we took for reference. The larger stress differences were achieved among computations with the larger loads of a beam. The achieved results were in all deformations practically equal.

**Key words:** framework, optimalization, sensitivity analyse, CAD

## O B S A H

Ú V O D .....	5
C I E Ľ P R Á C E .....	5
M A T E R I Á Ľ A M E T Ó D Y .....	6
V Ý S L E D K Y, Z Á V E R Y .....	6
<b>ANALÝZY ZÍSKANÉ PROSTREDNÍCTVOM SOFTVÉRU CATIA .....</b>	<b>7</b>
<i>Alternatíva s kruhovým prierezom .....</i>	<i>7</i>
<i>Gradientová metóda so zadaním obmedzujúcich podmienok.....</i>	<i>8</i>
<i>Algoritmus pre simulované žihanie .....</i>	<i>9</i>
<i>Alternatíva so štvorcovým prierezom .....</i>	<i>9</i>
<i>Gradientová metóda so zadaním obmedzujúcich podmienok.....</i>	<i>10</i>
<i>Algoritmus pre simulované žihanie .....</i>	<i>10</i>
<b>ANALÝZY ZÍSKANÉ PROSTREDNÍCTVOM SOFTVÉRU I-DEAS .....</b>	<b>10</b>
<i>Alternatíva s kruhovým prierezom .....</i>	<i>10</i>
<i>Newtonova metóda .....</i>	<i>10</i>
<i>Alternatíva so štvorcovým prierezom .....</i>	<i>11</i>
<b>POROVNANIE A ZHODNOTENIE JEDNOTLIVÝCH METÓD.....</b>	<b>11</b>
<b>POROVNANIE PRESNOSTI POČÍTAČOVÝCH VÝSLEDKOV S RUČNÝM</b>	
<b>VÝPOČTOM.....</b>	<b>13</b>
N Á V R H N A V Y U Ž I T I E P O Z N A T K O V P R E Ď A Ľ Š Í R O Z V O J V E D Y .....	14
Z Á V E R .....	17
P O U Ž I T Á L I T E R A T Ú R A .....	18
P U B L I K O V A N É P R Á C E S Ú V I S I A C E S P R O B L E M A T I K O U .....	19

# Ú V O D

Numerické metódy predstavujú už mnoho rokov popredný výpočtový nástroj. Metóda konečných prvkov sa dnes stala jedným z hlavných výpočtových prostriedkov. Svoju nezastupiteľnú úlohu zohráva pri vývoji, návrhu a konštrukcii nových výrobkov, tiež v rozmerovej či materiálovej optimalizácii strojných súčiastok. Hlavná prednosť MKP spočíva v grafickej interpretácii často veľmi abstraktných javov, v ktorých klasická technika riešenia zavádza často značné zjednodušenia na úkor presnosti. V súčasnosti sa v procese návrhu strojových súčiastok uplatňuje podpora konštruktérskej činnosti a jej racionalizácia prostredníctvom výpočtovej techniky s výkonným softvérovým vybavením. Tento systém sa nazýva CAE (*Computer Aided Engineering*). Uplatňuje sa hlavne pre výhody ako je skrátenie času od začiatku návrhu výrobku až po výrobu, vytvorenie výhodnej ponuky s pružnejšou reakciou na prianie zákazníka, preskúšanie funkčnosti pomocou simulácie, podpora pri štandardizácii, automatizácia rutinných činností, zvýšenie kvality výrobných podkladov, znižovanie počtu chýb a zefektívnenie práce konštruktérov.

## C I E Ľ P R Á C E

Dizertačná práca je projektovo - konštrukčného a teoretického zamerania. Poskytne analýzu súčasného stavu poznania v oblasti návrhu nosných prvkov strojov s využitím moderných počítačom podporovaných systémov konštruovania a pevnostnej kontroly jednotlivých prvkov. Pri riešení zadanej úlohy budú využívané všetky základné princípy a metódy vedeckej práce, a to indukcia, dedukcia, analógia - modelovanie, analýza, syntéza a logická formalizácia.

Cieľom riešenia práce je verifikácia napätí a deformácií vybraného jednoduchého konštrukčného prvku výpočtom MKP pomocou softvéru s ručne vypočítanými údajmi. Získané údaje budeme štatisticky spracovávať. Ďalší cieľ je vykonať optimalizačné postupy prostredníctvom softvérových nástrojov na pôvodnom konštrukčnom návrhu závesu bevametra a tieto postupy následne porovnať a vyhodnotiť. Optimalizácia bude zameraná na minimalizáciu hmotnosti, resp. ceny konštrukcie a maximalizáciu napätí von Mises a bude vykonaná pre porovnanie v dvoch softvérových produktoch – *CATIA V5 R 17* a *I-DEAS NX 11*.

## MATERIÁL A METÓDY

Riešenie našej úlohy sa vykoná v troch základných etapách, a to tvorba geometrie modelu a príprava vstupných dát (*preprocessing*), vlastný výpočet (*processing*), spracovanie výsledkov (*postprocessing*). Prvým krokom riešenia je tzv. *preprocessing*, teda vytvorenie geometrického modelu riešenej konštrukcie. Druhý krok je *processing*, v ktorom ide o riešenie pripravenej úlohy. Posledná fáza je *postprocessing*. Táto fáza zahŕňa interpretáciu získaných výsledkov.

V zmysle vyššie uvedeného postupu vytvoríme CAD model súčiastky – prizmatický nosník. Bežnými procedúrami softvéru pre MKP zistíme napätia v hlavných osiach a deformácie. Taktiež výpočtom klasickou metódou pružnosti a pevnosti zistíme napätia a deformácie rovnakého modelového nosníka. Virtuálny model závesu namodelujeme v dvoch alternatívach, a to z rúrky s prierezom medzikružia a z joklovho profilu so štvorcovým prierezom. Potom zvolíme jednotlivé konštrukčné parametre. Ďalej vykonáme analýzu citlivosti konštrukcií na zmenu týchto rozmerov. Nasleduje formulácia cieľovej funkcie, ktorou je minimalizácia hmotnosti a ceny, resp. maximalizácia napätí a obmedzujúce podmienky, t.j. určenie intervalov, v ktorých sa majú hodnoty danej funkcie meniť. Vychádzame z matematickej formulácie optimálneho návrhu v tvare

$$Z = F(X) \rightarrow \min \quad (1)$$

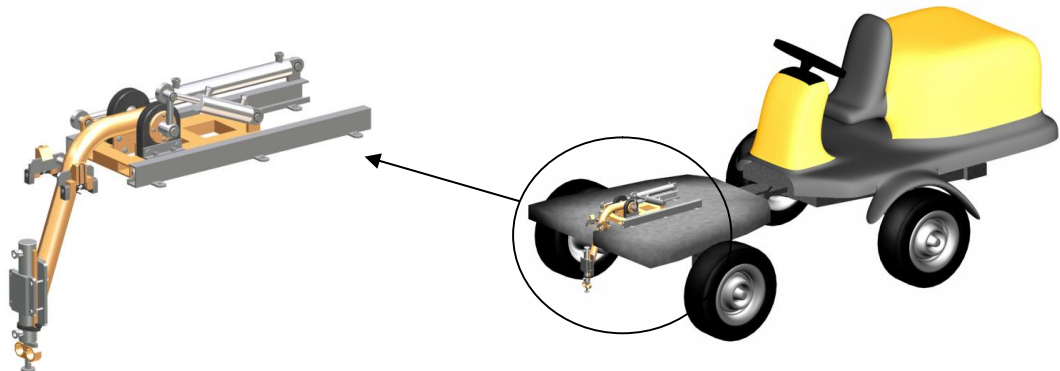
kde  $X$  je vektor premenných návrhu. Pri realizácii optimalizačného výpočtu použijeme Newtonovu metódu v softvéri *I-DEAS NX 11*. V softvéri *CATIA V5* použijeme gradientovú metódu a metódu pre simulované žíhanie.

## VÝSLEDKY, ZÁVERY

Pri riešení tejto úlohy sme zariadenie vyhotovili ako virtuálny model s využitím CAD systémov *CATIA V5 R17*<sup>®</sup> a *I-DEAS NX 11*<sup>®</sup>. Záves tvorí samostatnú montážnu jednotku a je konštrukčne prispôsobený na inštaláciu na mobilný nosič navrhnutý na Katedre mechaniky a strojnictva. Perspektívny pohľad na prístroj poskytuje obrázok 1.

Vlastnú optimalizáciu sme vykonali na konštrukčnom prvku ramena závesu. Ako obmedzujúcu podmienku sme uvažovali deformačné posunutie 0,5 mm vo vertikálnom smere nahor, teda proti zmyslu pôsobenia sily zatlačacieho hydromotora,

ktorej veľkosť je 6000 N. Uvedené deformačné posunutie nepriaznivo neovplyvní výsledky merania. Hodnoty pôvodných ako aj optimálnych rozmerov sú uvedené v príslušných tabuľkách.

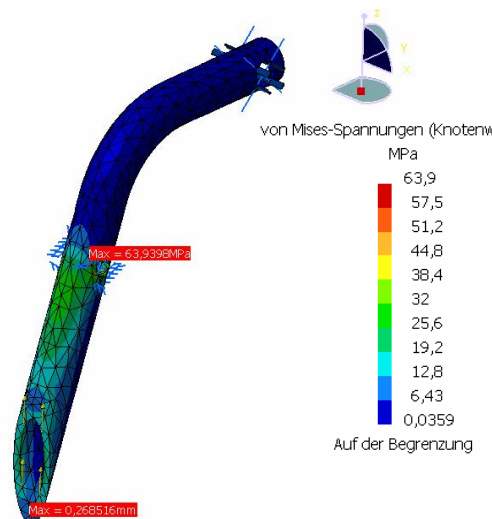


Obrázok 1 Virtuálny návrh montážnej jednotky alternatívy 1 s mobilným nosičom

## ANALÝZY ZÍSKANÉ PROSTREDNÍCTVOM SOFTVÉRU CATIA

### *Alternatíva s kruhovým prierezom*

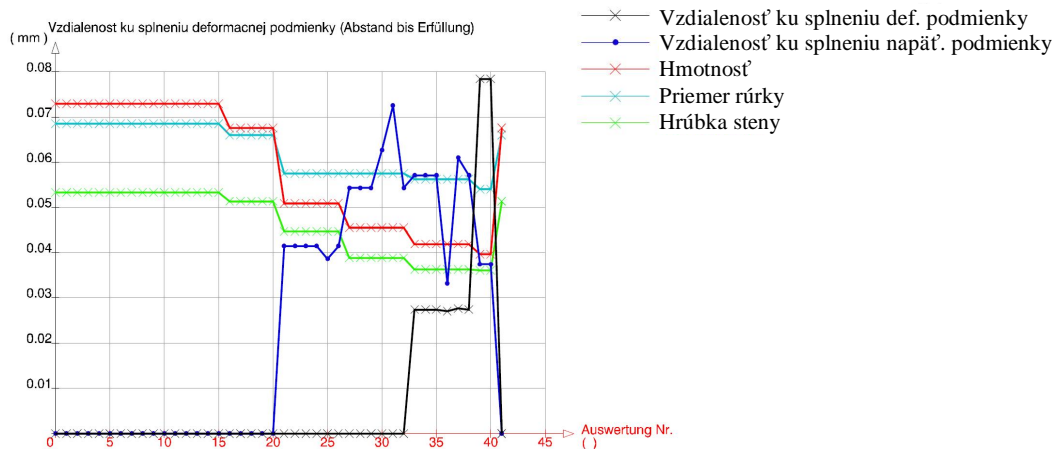
V texte je táto alternatíva označovaná aj ako alternatíva 1, obrázok 2. Základné charakteristiky pôvodného modelu sú: povrch telesa  $0,219 m^2$ , objem telesa  $1,272e+006 mm^3$  a hmotnosť 8,208 kg. Hodnoty napätí a deformácií, ktoré znázorňuje obrázok 2, sú v telese rúrky pomerne nízke. Preto je tento prvok vhodný pre optimalizáciu.



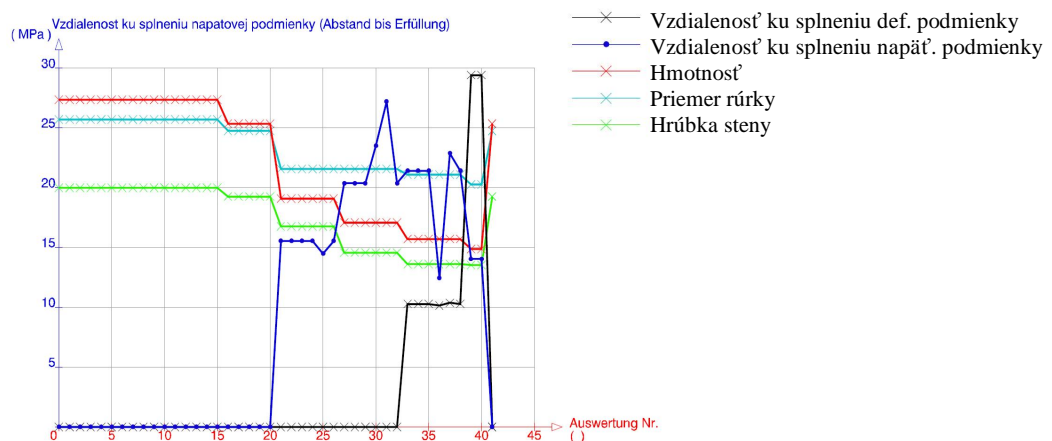
Obrázok 2 Riešenie pevnostnej a tuhostnej analýzy konštrukčného prvku určeného pre optimalizáciu so znázornením maximálnej hodnoty napätia von Mises 63,9398 MPa a maximálnej hodnoty celkovej deformácie 0,2685 mm nedeformovaného modelu

## Gradientová metóda so zadaním obmedzujúcich podmienok

Minimalizácia pôvodnej hmotnosti o hodnote 8,208 kg bola zvolená za typ optimalizácie pre cieľovú funkciu. Pre dosiahnutie tohto cieľa menil softvérový algoritmus dva parametre – vonkajší priemer rúrky s pôvodnou hodnotou 60 mm a hrúbku steny rúrky s pôvodnou hodnotou 10 mm. Rozmedzie zmeny pre prvý parameter sme stanovili od 35 mm do 85 mm, pre druhý parameter od 3 mm do 12 mm s automatickým krokováním. Ako okrajové obmedzujúce podmienky boli zadané kritérium maximálneho dovoleného napätia von Mises, ktoré má byť menšie ako 70 MPa a kritérium maximálnej dovolenej deformácie, ktoré má byť menšie ako 0,5 mm. Výsledky sú znázornené na obrázkoch 3, 4 a v tabuľke 1.



Obrázok 3 Vzdialenosť ku splneniu okrajovej podmienky v priebehu optimalizácie (y – ová stupnica platí len pre parameter *Vzdialenosť ku splneniu deformačnej podmienky*)



Obrázok 4 Vzdialenosť ku splneniu okrajovej podmienky v priebehu optimalizácie (y – ová stupnica platí len pre parameter *Vzdialenosť ku splneniu napät. podmienky*)



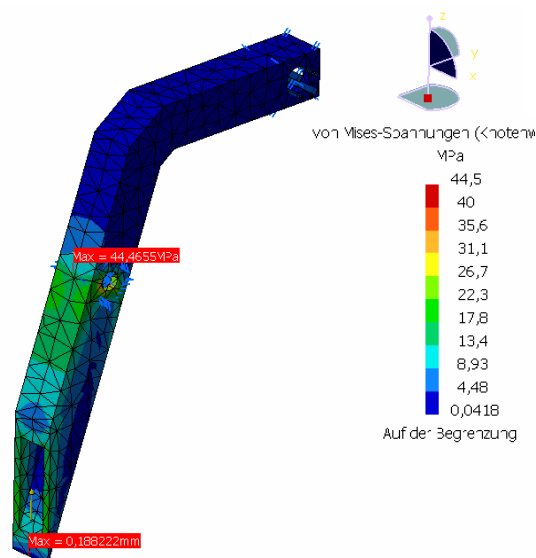
Ďalej sme vykonali zmenu cieľovej funkcie, a to maximalizovanie napätí von Mises. Ako variovaný parameter sme ponechali len hrúbku steny rúrky (interval od 3 mm do 12 mm), pretože zmeny priemeru rúrky sú na tomto konkrétnom konštrukčnom prvku pri použití optimalizačných algoritmov veľmi malé. Obmedzujúcimi podmienkami sú hmotnosť, ktorá nemala presiahnuť 7,5 kg a maximálna povolená deformácia 0,5 mm. Výsledky sú uvedené v tabuľke 2.

### Algoritmus pre simulované žihanie

Pri tomto algoritme sme tiež použili rovnaké vstupné podmienky ako v postupe s gradientovou metódou s obmedzujúcimi podmienkami. Výsledky sú znázornené v tabuľke 1.

### Alternatíva so štvorcovým prierezom

Druhá alternatíva sa odlišuje tým, že pre návrh vlastného telesa sme použili štvorhrannú rúrku so štvorcovým prierezom s dĺžkou strany 60 mm a hrúbkou steny 10 mm. Základné charakteristiky pôvodného modelu sú: povrch telesa  $0,287 m^2$ , objem telesa  $1,378e+006 mm^3$  a hmotnosť 10,832 kg. Tento prvok je tiež vhodný pre optimalizáciu ako vyplýva z obrázku 5.



Obrázok 5 Riešenie pevnostnej a tuhostnej analýzy konštrukčného prvku určeného pre optimalizáciu so znázornením maximálnej hodnoty napätia von Mises 44,4655 MPa a maximálnej hodnoty celkovej deformácie 0,18822 mm nedeformovaného modelu

## **Gradientová metóda so zadaním obmedzujúcich podmienok**

Ako typ optimalizácie sme zvolili minimalizáciu pôvodnej hmotnosti o hodnote 10,832 kg. Softvérový algoritmus menil pre dosiahnutie tohto cieľa dva parametre – dĺžku vonkajšej hrany rúrky s pôvodnou hodnotou 60 mm a hrúbku steny rúrky s pôvodnou hodnotou 10 mm. Rozmedzie zmien pre oba parametre sme stanovili rovnako ako v prípade alternatívy 1. Ako okrajová obmedzujúca podmienka bolo zadané kritérium maximálneho dovoleného napätia von Mises, ktoré muselo byť menšie ako 50 MPa a maximálna deformácia, ktorá nesmela presiahnuť 0,5 mm. Tabuľka 3 znázorňuje výsledky výpočtov.

Maximalizovanie napätí von Mises sme použili ako ďalšiu zmenu cieľovej funkcie. Ako variovaný parameter sme ponechali hrúbku steny rúrky (interval od 3 mm do 12 mm). Hmotnosť ako obmedzujúca podmienka nesmela prekročiť hranicu 10 kg a maximálna deformácia hranicu 0,5 mm. Výsledky sú uvedené v tabuľke 4.

### **Algoritmus pre simulované žihanie**

Pri tomto algoritme sme tiež použili rovnaké vstupné podmienky ako v predchádzajúcom postupe a výsledky sme zaznamenali do tabuľky 3.

## **ANALÝZY ZÍSKANÉ PROSTREDNÍCTVOM SOFTVÉRU I-DEAS**

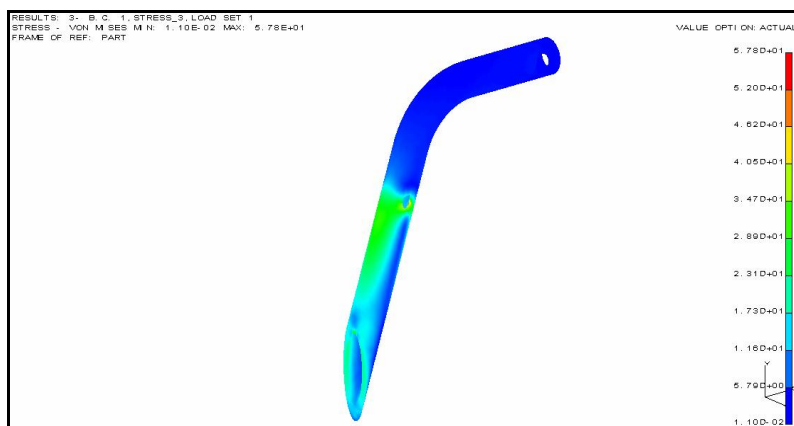
V softvéri I-DEAS je implementovaná len jedna optimalizačná metóda, a to Newtonova metóda. Okrajové podmienky pre obidve alternatívy sú podobné ako v CATII V5. Hranica pre maximálnu dovolenú deformáciu je 0,5 mm a hranica pre maximálne dovolené napätie je 100 MPa pri minimalizácii hmotnosti. V tomto softvéri nebolo možné zvoliť rovnaké napäťové hranice, lebo výsledky citlivostnej analýzy nie sú totožné so softvérom CATIA V5.

### ***Alternatíva s kruhovým prierezom***

#### **Newtonova metóda**

Podľa vykonanej pevnostnej a tuhostnej analýzy v tomto softvéri je tiež možné tento prvok optimalizovať (obrázok 6). Intervaly zmien oboch parametrov pri

minimalizácii hmotnosti sú zhodné s intervalmi použitými v CATII. Pri maximalizácii napätí je interval zmeny hrúbky steny tiež rovnaký ako u CATIE. Tabuľka 1 uvádza výsledky.



Obrázok 6 Riešenie pevnostnej a tuhostnej analýzy konštrukčného prvku určeného pre optimalizáciu so znázornením maximálnej hodnoty napätia von Mises 57,85 MPa s maximálnou hodnotou celkovej deformácie 0,262 mm na nedeformovanom modeli

Ako ďalšiu možnosť optimalizácie sme požili maximalizáciu napätí s hraničnou hodnotou maximálnej deformácie 0,5 mm pri maximálnej hmotnosti 7,5 kg. Optimalizovaným parametrom bola hrúbka steny. Výsledky poskytuje tabuľka 2.

### ***Alternatíva so štvorcovým prierezom***

Podobný postup (Newtonova metóda) bol aplikovaný aj u alternatívy so štvorcovým prierezom, t.j. rovnaké intervaly zmeny parametrov ako v softvéri CATIA V5 pri riešení alternatívy so štvorcovým prierezom. Odlišnosti sú iba u dovolenej napäťovej podmienky (max. 100 MPa) pri minimalizácii hmotnosti a u hmotnostnej podmienky (max. 8,5 kg) pri maximalizácii napätí von Mises. Výsledky sú v tabuľkách 3 a 4.

## **POROVNANIE A ZHODNOTENIE JEDNOTLIVÝCH METÓD**

Výsledky dosiahnuté obidvoma softvérmi za použitia rôznych optimalizačných metód boli následne porovnané a vyhodnotené. Nasledujúce štyri tabuľky uvádzajú jednotlivé údaje. Cena jedného kg ocele, z ktorej by bolo uvažované teleso závesu vyrobené, je 25 Sk.

Tabuľka 1 Vyhodnotenie výsledkov alternatívy 1 – minimalizácia hmotnosti

Optimalizačná metóda (softvér)	Hmotnosť, kg		Rozmery, mm				Úspora materiálu, kg/%/Sk			Napätia von Mises, MPa		Deformácia, mm	
			Priemer rúrky		Hrúbka steny					Vých. stav	Optim. stav	Vých. stav	Optim. stav
	Východzí stav	Optimaliz. stav	Východzí stav	Optimaliz. stav	Východzí stav	Optimaliz. stav							
<b>Gradientová metóda (CATIA V5)</b>	8,208	7,65	60	57,5	10	9,7	0,56	6,8	13,95	63,94	72,54	0,2685	0,298
<b>Metóda pre simulované žihanie (CATIA V5)</b>	8,208	6,885	60	60	10	7,86	1,32	16	33	63,94	74,064	0,2685	0,321
<b>Newtonova metóda (I-DEAS 11)</b>	8,208	6,31	60	59,5	10	7,25	1,898	23,12	47,45	57,85	100,12	0,262	0,325

Tabuľka 2 Vyhodnotenie výsledkov alternatívy 1 – maximalizácia napätí

Optimalizačná metóda (softvér)	Hmotnosť, kg		Rozmery, mm		Úspora materiálu, kg/%/Sk			Napätia von Mises, MPa		Deformácia, mm	
			Hrúbka steny					Vých. stav	Optim. stav	Vých. stav	Optim. stav
	Východzí stav	Optimaliz. stav	Východzí stav	Optimaliz. stav							
<b>Gradientová metóda (CATIA V5)</b>	8,208	5,254	10	5,9	2,95	36	73,7	63,94	86,5	0,2685	0,407
<b>Newtonova metóda (I-DEAS 11)</b>	8,208	6,31	10	7,25	1,898	23,12	47,45	57,85	100,12	0,262	0,325

Tabuľka 3 Vyhodnotenie výsledkov alternatívy 2 – minimalizácia hmotnosti

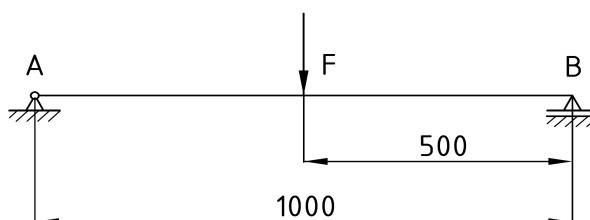
Optimalizačná metóda (softvér)	Hmotnosť, kg		Rozmery, mm				Úspora materiálu, kg/%/Sk			Napätia von Mises, MPa		Deformácia, mm	
			Dĺžka hrany rúrky		Hrúbka steny					Vých. stav	Optim. stav	Vých. stav	Optim. stav
	Východzí stav	Optimaliz. stav	Východzí stav	Optimaliz. stav	Východzí stav	Optimaliz. stav							
<b>Gradientová metóda (CATIA V5)</b>	10,832	9,385	60	52,53	10	10,28	1,45	13,4	36,2	44,47	50,17	0,1882	0,3
<b>Metóda pre simulované žihanie (CATIA V5)</b>	10,832	8,611	60	80	10	5,52	2,22	20,5	55,5	44,47	42,92	0,1882	0,171
<b>Newtonova metóda (I-DEAS 11)</b>	10,832	9,395	60	63,5	10	8,2	1,437	13,27	35,93	46,32	52,6	0,186	0,213

Tabuľka 4 Vyhodnotenie výsledkov alternatívy 2 – maximalizácia napätí

Optimalizačná metóda (softvér)	Hmotnosť, kg		Rozmery, mm		Úspora materiálu, kg/%/Sk			Napätia von Mises, MPa		Deformácia, mm	
			Hrúbka steny					Vých. stav	Optim. stav	Vých. stav	Optim. stav
	Východzí stav	Optimaliz. stav	Východzí stav	Optimaliz. stav							
<b>Gradientová metóda (CATIA V5)</b>	10,832	8,539	10	7,5	2,3	21,2	57,5	44,47	53,37	0,1882	0,238
<b>Newtonova metóda (I-DEAS 11)</b>	10,832	8,332	10	7,36	2,5	23,1	62,5	46,32	58,26	0,186	0,211

## POROVNANIE PRESNOSTI POČÍTAČOVÝCH VÝSLEDKOV S RUČNÝM VÝPOČTOM

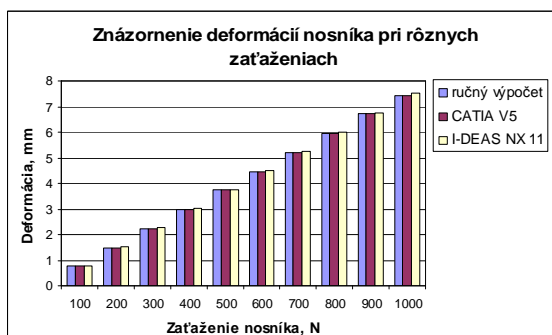
V tejto kapitole sme na jednoduchom príklade prizmatického nosníka overovali presnosť počítačových výsledkov s výsledkami získanými ručným výpočtom. Schému nosníka znázorňuje obrázok 7. Nosník má štvorcový prierez s dĺžkou hrany 20mm. Bol namodelovaný v softvéroch CATIA V5 a I-DEAS NX 11. Výsledky uvádzajú tabuľky 5 až 9 a nasledovné obrázky 8 až 13.



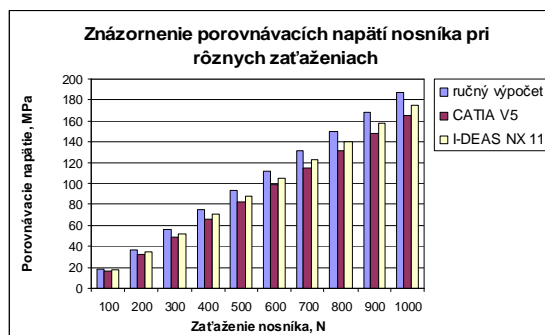
Obrázok 7 Schéma zaťažovaného nosníka

Tabuľka 5 Hodnoty napätí a deformácií vypočítaných ručne pri rôznych zaťaženiach

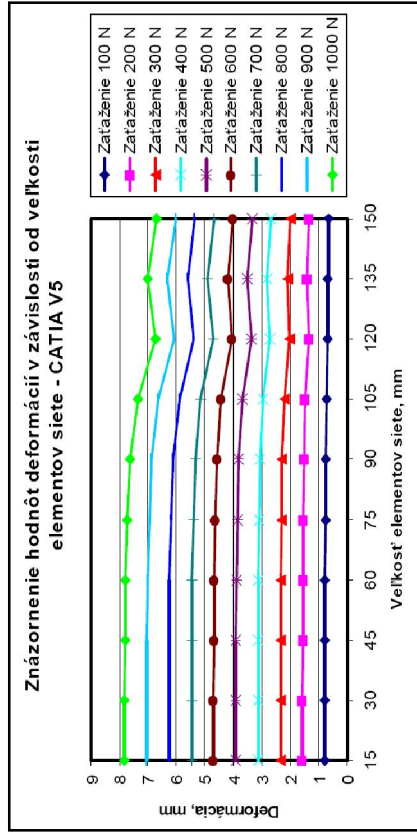
Zaťaženie, N		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Výpočtový nosník (Ručný výpočet)	Deformácia, mm	0,744	1,488	2,232	2,976	3,720	4,464	5,208	5,952	6,696	7,440
	Porovnávacie napätie, MPa	18,75	37,5	56,25	75	93,75	112,5	131,25	150	168,75	187,5



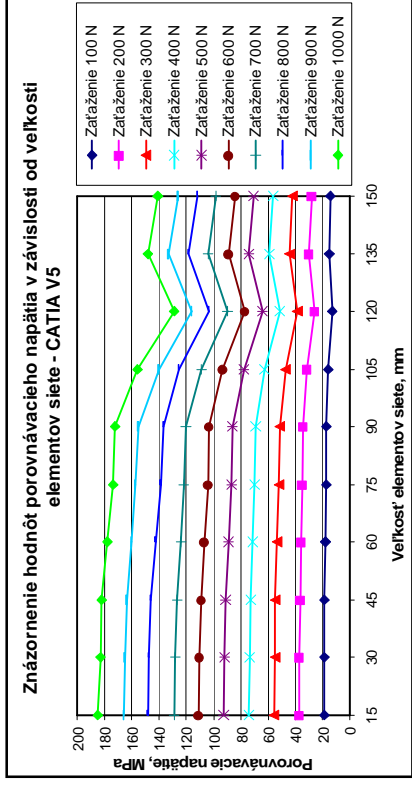
Obrázok 8 Znázornenie deformácií nosníka z ručného a softvérového výpočtu pri rôznych zaťaženiach



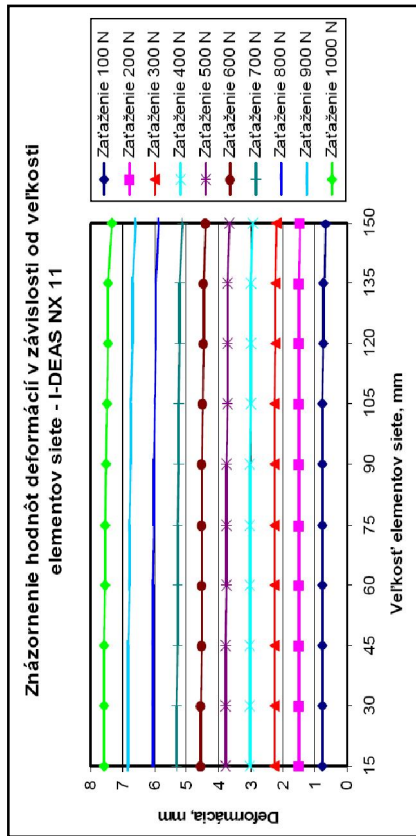
Obrázok 9 Znázornenie napätí von Mises nosníka z ručného a softvérového výpočtu pri rôznych zaťaženiach



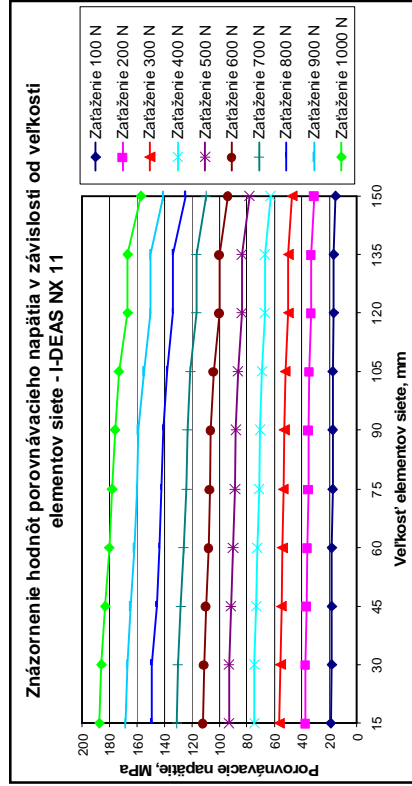
Obrázok 10 Znázornenie hodnôt deformácií v závislosti od veľkosti elementov siete – softvér CATIA V5



Obrázok 11 Znázornenie hodnôt porovnávacieho napätia v závislosti od veľkosti elementov siete – softvér CATIA V5



Obrázok 12 Znázornenie hodnôt deformácií v závislosti od veľkosti elementov siete – softvér I-DEAS NX 11



Obrázok 13 Znázornenie hodnôt porovnávacieho napätia v závislosti od veľkosti elementov siete – softvér I-DEAS NX 11

Tabuľka 6 Vyhodnotenie hodnôt deformácií popisnou štatistikou (CATIA V5)

Zatáženie, N	Veľkosť elementov siete, mm										Stredná hodnota	Chyba strednej hodnoty	Medián	Modus	Smer. odchýlka	Rozptyl	Špicatosť	Šikmosť	Max-Min	Min.	Max.	Hladina spoľahlivosti (95%)
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150												
100	0,783	0,782	0,782	0,779	0,771	0,763	0,736	0,675	0,701	0,669	0,7441	0,014539	0,767	0,782	0,045975	0,002114	-1,08494	-0,85418	0,114	0,669	0,783	0,032888183
200	1,565	1,565	1,562	1,559	1,543	1,525	1,472	1,349	1,402	1,338	1,488	0,029106	1,534	1,565	0,092039	0,008471	-1,08192	-0,85637	0,227	1,338	1,565	0,06584134
300	2,348	2,347	2,344	2,339	2,314	2,288	2,21	2,024	2,104	2,007	2,2325	0,043626	2,301	-	0,137957	0,019032	-1,06435	-0,86306	0,341	2,007	2,348	0,098688289
400	3,13	3,129	3,125	3,119	3,086	3,05	2,943	2,698	2,805	2,677	2,9762	0,058154	3,068	-	0,183898	0,033818	-1,08557	-0,85383	0,453	2,677	3,13	0,131552559
500	3,913	3,912	3,906	3,898	3,857	3,813	3,679	3,374	3,506	3,345	3,7203	0,072696	3,835	-	0,229886	0,052848	-1,08281	-0,85444	0,568	3,345	3,913	0,164450528
600	4,695	4,694	4,687	4,678	4,629	4,575	4,415	4,048	4,208	4,014	4,4643	0,087231	4,602	-	0,275847	0,076092	-1,0779	-0,85614	0,681	4,014	4,695	0,197329055
700	5,478	5,476	5,468	5,458	5,4	5,338	5,151	4,723	4,909	4,683	5,2084	0,101767	5,369	-	0,321816	0,103565	-1,07894	-0,85601	0,795	4,683	5,478	0,230212873
800	6,26	6,259	6,25	6,238	6,172	6,1	5,887	5,397	5,611	5,352	5,9526	0,116359	6,136	-	0,367959	0,135394	-1,07664	-0,85635	0,908	5,352	6,26	0,263222008
900	7,043	7,041	7,041	7,017	6,943	6,863	6,623	6,071	6,312	6,021	6,6975	0,131209	6,903	7,041	0,414918	0,172157	-1,08059	-0,85351	1,022	6,021	7,043	0,296814263
1000	7,826	7,823	7,812	7,797	7,715	7,626	7,359	6,747	7,013	6,691	7,4409	0,145368	7,6705	-	0,459695	0,211319	-1,08021	-0,85587	1,135	6,691	7,826	0,3288456

Tabuľka 7 Vyhodnotenie hodnôt pomerných napätí popisnou štatistikou (CATIA V5)

Zatáženie, N	Veľkosť elementov siete, mm										Stredná hodnota	Chyba strednej hodnoty	Medián	Modus	Smer. odchýlka	Rozptyl	Špicatosť	Šikmosť	Max-Min	Min.	Max.	Hladina spoľahlivosti (95%)
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150												
100	18,5	18,3	18,2	17,8	17,4	17,2	15,6	12,9	14,8	14,1	16,48	0,628367	17,3	-	1,987069	3,948444	-0,90514	-0,74307	5,6	12,9	18,5	1,421463751
200	36,9	36,7	36,4	35,6	34,8	34,3	31,1	25,7	29,6	28,1	32,92	1,267351	34,55	-	4,007715	16,06178	-0,90532	-0,74061	11,2	25,7	36,9	2,866946441
300	55,4	55	54,6	53,3	52,2	51,5	46,7	38,6	44,4	42,2	49,39	1,893348	51,85	-	5,987292	35,84767	-0,90048	-0,74107	16,8	38,6	55,4	4,283050742
400	73,9	73,3	72,8	71,1	69,6	68,7	62,3	51,4	59,1	56,2	65,84	2,535184	69,15	-	8,016954	64,27156	-0,90336	-0,74377	22,5	51,4	73,9	5,734983581
500	92,4	91,6	91,1	88,9	87	85,8	77,9	64,3	73,9	70,3	82,32	3,165361	86,4	-	10,00976	100,1951	-0,90625	-0,73973	28,1	64,3	92,4	7,160544348
600	111	110	109	107	104	103	93,4	77,2	88,7	84,3	98,76	3,797959	103,5	-	12,0102	144,2449	-0,92022	-0,73038	33,8	77,2	111	8,591579043
700	129	128	127	124	122	120	109	90	104	98,4	115,14	4,37336	121	-	13,82978	191,2627	-0,8325	-0,76678	39	90	129	9,893224778
800	148	147	146	142	139	137	125	103	118	112	131,7	5,094769	138	-	16,11108	259,5667	-0,94306	-0,72037	45	103	148	11,525167116
900	166	165	164	160	157	155	140	116	133	126	148,2	5,715087	156	-	18,0727	326,6222	-0,97242	-0,73941	50	116	166	12,92842552
1000	185	183	182	178	174	172	156	129	148	141	164,8	6,28367	173	-	19,87069	394,8444	-0,90514	-0,74307	56	129	185	14,21463751

Tabuľka 8 Vyhodnotenie hodnôt deformácií popisnou štatistikou (I-DEAS NX 11)

Zatáženie, N	Veľkosť elementov siete, mm										Stredná hodnota	Chyba strednej hodnoty	Medián	Modus	Smer. odchýlka	Rozptyl	Špicatosť	Šikmosť	Max-Min	Min.	Max.	Hladina spoľahlivosti (95%)
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150												
100	0,757	0,756	0,756	0,754	0,753	0,752	0,749	0,744	0,744	0,732	0,7497	0,002463	0,7525	0,756	0,00779	6,07E-05	1,988239	-1,43963	0,025	0,732	0,757	0,00557234
200	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,5	1,5	1,49	1,49	1,46	1,499	0,005044	1,505	1,51	0,015951	0,000254	3,750664	-1,85198	0,05	1,46	1,51	0,011410883
300	2,27	2,27	2,27	2,26	2,26	2,25	2,25	2,23	2,23	2,2	2,249	0,007218	2,255	2,27	0,022828	0,000521	0,995904	-1,17828	0,07	2,2	2,27	0,016330066
400	3,03	3,03	3,02	3,02	3,01	3,01	3	2,98	2,98	2,93	3,001	0,009713	3,01	3,03	0,030714	0,000943	2,402738	-1,49793	0,1	2,93	3,03	0,02197128
500	3,78	3,78	3,78	3,77	3,77	3,76	3,74	3,72	3,72	3,66	3,748	0,012275	3,765	3,78	0,038816	0,001507	1,894572	-1,43576	0,12	3,66	3,78	0,027767154
600	4,54	4,54	4,53	4,53	4,52	4,51	4,49	4,47	4,47	4,39	4,499	0,014716	4,515	4,54	0,046536	0,002166	2,655023	-1,56636	0,15	4,39	4,54	0,033289513
700	5,3	5,3	5,29	5,28	5,27	5,26	5,24	5,21	5,21	5,12	5,248	0,017689	5,265	5,3	0,055937	0,003129	2,16263	-1,43394	0,18	5,12	5,3	0,040014541
800	6,05	6,05	6,05	6,04	6,02	6,01	5,99	5,96	5,96	5,85	5,998	0,019822	6,015	6,05	0,062681	0,003929	2,861223	-1,60382	0,2	5,85	6,05	0,044839178
900	6,81	6,81	6,8	6,79	6,78	6,76	6,74	6,7	6,7	6,59	6,748	0,021848	6,77	6,81	0,069089	0,004773	2,125247	-1,44882	0,22	6,59	6,81	0,049423518
1000	7,57	7,56	7,56	7,54	7,53	7,52	7,49	7,44	7,44	7,32	7,497	0,024633	7,525	7,56	0,077896	0,006068	1,988239	-1,43963	0,25	7,32	7,57	0,0557234

Tabuľka 9 Vyhodnotenie hodnôt pomerných napätí popisnou štatistikou (I-DEAS NX 11)

Zatáženie, N	Veľkosť elementov siete, mm										Stredná hodnota	Chyba strednej hodnoty	Medián	Modus	Smer. odchýlka	Rozptyl	Špicatosť	Šikmosť	Max-Min	Min.	Max.	Hladina spoľahlivosti (95%)
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150												
100	18,7	18,6	18,3	18	17,8	17,6	17,3	16,7	16,7	15,2	17,49	0,337458	17,7	16,7	1,067135	1,138778	1,122058	-1,04776	3,5	15,2	18,7	0,763382615
200	37,3	37,1	36,6	36,1	35,5	35,3	34,5	33,4	33,4	31,3	35,05	0,604106	35,4	33,4	1,910352	3,649444	-0,02955	-0,73493	6	31,3	37,3	1,366583433
300	56	55,7	54,9	54,1	53,3	52,9	51,8	50,1	50,1	47	52,59	0,905471	53,1	50,1	2,863351	8,198778	-0,06507	-0,71088	9	47	56	2,048317762
400	74,6	74,3	73,2	72,2	71,1	70,6	69	66,8	66,8	62,6	70,12	1,212875	70,85	66,8	3,835449	14,71067	-0,04256	-0,73266	12	62,6	74,6	2,743714703
500	93,3	92,8	91,6	90,2	88,8	88,2	86,3	83,5	83,5	78,3	87,65	1,512411	88,5	83,5	4,782666	22,87389	-0,06389	-0,71852	15	78,3	93,3	3,421312758
600	112	111	110	108	107	106	104	100	100	93,9	105,19	1,819185	106,5	100	5,752768	33,09433	-0,03508	-0,77947	18,1	93,9	112	4,115281915
700	131	130	128	126	124	123	121	117	117	110	122,7	2,087263	123,5	117	6,600505	43,56667	-0,12725	-0,61621	21	110	131	4,721716847
800	149	149	146	144	142	141	138	134	134	125	140,2	2,402776	141,5	149	7,598245	57,73333	0,224879	-0,75349	24	125	149	5,435457317
900	168	167	165	162	160	159	155	150	150	141	157,7	2,740843	159,5	150	8,667308	75,12222	-0,2084	-0,68478	27	141	168	6,200218384
1000	187	186	183	180	178	176	173	167	167	157	175,4	3,015515	177	167	9,535897	90,93333	-0,13793	-0,66034	30	157	187	6,821569825

# NÁVRH NA VYUŽITIE POZNATKOV PRE ĎALŠÍ ROZVOJ VEDY

V posledných desaťročiach sa zásadne zmenili postupy pri riešení konštrukčnej úlohy. Súčasné metódy konštruovania sú založené na plnej podpore výpočtovou technikou vybavenou vhodným CAD programovým systémom. Základom, od ktorého sa odvíjajú ďalšie činnosti, je potom matematický model budúceho výrobku, ktorý je nositeľom informácií o jeho geometrii, o funkcii jednotlivých prvkov, použitých materiáloch, postupoch výroby, atď. Dnešné CAD/CAE systémy umožňujú podrobiť tieto parametrické modely prvkov pevnostnej a tuhostnej kontrole a následne optimalizácii vhodne využívajúcej citlivostnú analýzu.

Predkladaná práca poskytuje prehľad o použití a aplikácii optimalizačných metód na konštrukčnom prvku meracieho zariadenia, ktorým je rameno bevametra. Meracie zariadenia majú v súčasnej dobe pre poľnohospodárstvo značný význam. Nielen u tohto typu zariadení, ale aj u ostatných typov konštrukcií podobného charakteru, t.j. u rámových konštrukcií, je kladený dôraz na vysokú efektívnosť pri ich samotnej výrobe a aj prevádzke. Tento význam sa zvyšuje ak ide o strojové súčiastky pre mobilnú techniku. Nízka hmotnosť, nízke prevádzkové náklady a vysoká spoľahlivosť, to sú v súčasnosti dôležité atribúty vhodne navrhutej konštrukcie. Návrh takmer optimálnej konštrukcie vyžaduje značné praktické skúsenosti a mnoho pokusných výpočtov a overovacích sérii. Konštruktér prostredníctvom optimalizačného postupu má možnosť takýto konštrukčný návrh zdokonaľiť a navrhnúť ako optimálny, teda najlepší zo všetkých možných. Keďže pri optimalizácii dochádza k zmene niektorých rozmerov (parametrov) a iné zostávajú zase konštantné, musia byť príslušné rozmery správne parametrizované podľa matematických vzťahov. Tieto odporúčania sme sa usilovali pri riešení uvedenej problematiky dodržať. Aplikáciou uvedených postupov sme dospeli k viacerým konštrukčným návrhom, ktoré sme v relatívne krátkom čase a s vysokou presnosťou mohli spracovať, pretože boli parametrizované. Preto je v súčasnej dobe výhodné pri návrhu, vývoji a zdokonaľovaní nových produktov využívať optimalizačné nástroje softvérových produktov.

Tieto overené postupy a metódy sú prínosom pre rozvoj nových metód konštruovania využívajúcich optimalizáciu a postupy citlivostnej analýzy konštrukcie.



Optimalizačný postup je účinný nástroj pre znižovanie hmotnosti konštrukcie, ktorá patrí medzi hlavné ukazovatele kvality konštrukčného návrhu.

## ZÁVER

Vykonanými optimalizáciami v spojení s analýzami citlivosti sme dospeli ku konštrukčnému návrhu, ktorý spĺňa všetky požiadavky na pevnosť materiálu a tuhosť konštrukcie, ktorú požadujeme z hľadiska meracích prístrojov. Zároveň sme docielili úsporu materiálu. Pôvodná hmotnosť ramena u prvej alternatívy bola cca 8,2 kg, po optimalizovaní daných rozmerov (priemeru a hrúbky steny) je hmotnosť u najlepšieho riešenia (Newtonova metóda) cca 6,31 kg, čo predstavuje 23,12 % úsporu. Úspora vyjadrená v peňažných jednotkách predstavuje 47,45 Sk. Deformácia ramena vzrástla z 0,262 mm na 0,325 mm; to je však pre tento druh merania zanedbateľná hodnota. Pri optimalizovaní len jedného parametra vykázala najlepšie výsledky gradientová metóda. Úspora predstavuje 2,95 kg, resp. 36 %, resp. 73,7 Sk. Pôvodná hmotnosť poklesla na 5,25 kg. Ostatné varianty riešenia predstavujú pri minimalizácii hmotnosti úsporu nižšiu v rozmedzí od 6,8 % do 16% a pri maximalizácii napätí 23,12%.

U druhej alternatívy je úspora materiálu výraznejšia. Pôvodná hmotnosť cca 10,8 kg poklesla u najlepšieho riešenia za použitia metódy pre simulované žhanie a pri variácii oboch parametrov (dĺžky hrany a hrúbky steny) o 20,5 %, čo predstavuje cca 2,22 kg a 55,5 Sk. Konštrukcia v takomto stave vykazuje deformáciu len 0,213 mm (oproti pôvodnej 0,186 mm). Pri variácii hrúbky steny, teda len jedného parametra, vykázala najlepšie výsledky Newtonova metóda. Úspora je 2,5 kg, čo predstavuje 23,1 %, resp. 62,5 Sk. Hodnota deformácie vzrástla len málo z pôvodných 0,186 mm na 0,211 mm. Zvyšné varianty predstavujú nižšiu úsporu pri minimalizácii hmotnosti cca 13 % a pri maximalizácii napätí cca 21%. Ich použitie je však v praktickom návrhu tiež opodstatnené.

Aj keď peňažné hodnoty úspory nepredstavujú veľké hodnoty, pri prepočte na 5000 alebo 10000, alebo vyššiu sériu nadobúdajú zmysel. Náš konkrétny príklad nepredpokladá uplatnenie v sériovej výrobe. Avšak pre aplikáciu jednotlivých optimalizačných metód a preukázanie materiálových, resp. finančných úspor je dostatočne názorný.

Ďalšou časťou práce bolo porovnanie počítačových výsledkov s výsledkami manuálneho výpočtu klasickou metódou pružnosti pevnosti na jednoduchom príklade prizmatického nosníka na dvoch podperách, u ktorého sme v oboch softvéroch menili parametre parabolických tetraedrálnych elementov. Výsledkami počítačových výpočtov sme preukázali odlišnosti, ktoré boli závislé na hustote siete MKP, resp. na rozmeroch elementov tejto siete. Rôzne variácie rozmerov elementov predstavovali najväčšie rozdiely v porovnaní k manuálnemu výpočtu cca 20 MPa. Po štatistickom vyhodnotení vykazovali riešenia softvéru CATIA V5 v porovnaní k manuálnym výpočtom väčšie rozdiely ako riešenia softvéru I-DEAS NX 11. Taktiež boli preukázané väčšie rozdiely medzi jednotlivými výpočtami pri väčších zaťaženiach nosníka. Manuálny výpočet sme považovali za referenčný. U deformácií boli dosiahnuté výsledky prakticky zhodné.

Táto práca je zameraná na možnosti minimalizácie hmotnosti konštrukcií a tým aj vstupných nákladov na ich výrobu a prevádzku. Pri súčasných obmedzených materiálových zdrojoch má teda pri práci konštruktéra značný význam.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- ANDERSON, B. et al. 1997. *Using Structure with Pro/ENGINEER*. Waltham: PTC, 1997, 450 s.
- BOTKIN, E. Mark, 2003. *Structural Optimization of Automotive Body Components Based on Parametric Solid Modeling*. In: *Engineering with Computers*. London: Springer Verlag London Limited, 2003
- COLLEEN, E. – GLENNON, E. 1994. *Design Study Reference Manual*. San Jose, California: Rasna Corporation, 1994, 416 s.
- DASSAULT SYSTEMES S. A. 2005. *Online Help CosmosWorks 2005*. Paris, 2005
- HOSNEDL, S. – KRÁTKÝ, J. 1999. *Průručka strojího inženýra. Obecné strojí části 1*. Praha: Computer Press, 1999, 313 s., ISBN 80 – 7226 – 055 – 3
- KOEHLDORFER, Werner. 2004. *Finite – Elemente – Methoden mit CATIA V5*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2004, ISBN 3-446-22872-1
- KOLÁŘ, V. et al. 1997. *Principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, 1997, 401 s., ISBN 80 – 7226 – 021 – 9
- KŘÍŽ, R. – VÁVRA, P. 1993. *Strojírenská příručka*. Praha: Scientia, 1993, 220 s., ISBN 80 – 85827 – 00 – X

- LAWRY Mark, *I-DEAS Master Series-Student Guide*, 1998. Structural Dynamics Research Corporation, 2000 Eastman Drive, Milford, Ohio 45150, 1998, ISBN 0 - 9638178-3-3
- MATEK, Wilhelm. et al. 1994. *Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung*. Wiesbaden: Vieweg Verlagsgesellschaft mbH, 1994
- NĚMEC, J. et al. 1989. *Pružnost a pevnost ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1989, 600 s., ISBN 80 – 03 – 00193 – 5
- STRUCTURAL DYNAMICS RESEARCH CORPORATION. 1990. *User's Guide. I-DEAS Model Solution and I-DEAS Optimization*. 2000 Eastman Drive, Milford, Ohio 45150
- WOYAND, H. – HEIDERICH, H. 1998. *I-DEAS Praktikum CAE/FEM*. Wiesbaden: VIEWEG, 1998, 175 S., ISBN 3 – 528 – 03899 – 3
- ŽMINDÁK, M. et al. 2000. *Optimalizácia mechanických sústav*. Žilina: EDIS, 2000, 261 s., ISBN 80 – 7100 – 631 – 9

## **PUBLIKOVANÉ PRÁCE SÚVISIACE S PROBLEMATIKOU**

- Gaduš, J. – Sedlár, P. 2006. *Počítačom podporované konštruovanie*. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2006, 149 s., ISBN 80-8069-703-5
- Gaduš, J., Sedlár, P., Malý, V. 2005. *Citlivostná analýza rámovej konštrukcie závesu meracieho zariadenia*. In: *Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie: zborník vedeckých prác, 2005*. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2006, ISBN 80-8069-517-2. s. 46-51
- Šárgová, S., Gaduš, J., Sedlár, P. 2005. *Návrh a pevnostná kontrola fermentora*. In: *Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie: zborník vedeckých prác, 2005*. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2005, ISBN 80-8069-517-2. s. 112-119
- Gaduš, J., Sedlár, P., Malý, V. 2005. *Aplikovanie hydraulických mechanizmov pre pohon závesu bevametra*. In: *Hydraulické mechanizmy mobilnej techniky: zborník z medzinárodnej vedeckej konferencie*, Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2005. ISBN 80-8069-601-2. s. 84-90.

Gaduš, J. – Sedlár, P. 2005. *Citlivostná analýza pri návrhu rámcových konštrukcií*. In: Strojné inžinierstvo 2005: 10. ročník medzinárodnej konferencie, Bratislava : Slovenská technická univerzita, 2005. ISBN 80-227-2314-2. s.867-874.

Gaduš, J. – Sedlár, P. 2006. *Pevnostná analýza pravouhlej nádoby aplikáciou CAE prístupu*. In: Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie 2006: zborník vedeckých prác, Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2006. ISBN 80-8069-701-9. s. 37-45.

Sedlár, P. - Gaduš, J. *Návrh spôsobu experimentálneho overenia výsledkov počítačovej simulácie namáhania súčiastok*. In: Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie 2006, Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2006. ISBN 80-8069-701-9. s. 109-112.

Gaduš, J. – Sedlár, P. 2006. *Konštrukčný návrh alternatív vyrovnávacieho mostíka*. In: Strojné inžinierstvo 2006: 10. ročník medzinárodnej konferencie, Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2006. ISBN 80-227-2513-7. s. 272-277.

Sedlár, P., Woyand, H.B., Gaduš, J. 2007. *Use of the Finite Element Methods for the Simulation of Welded Joints*. In: Acta Technologica agriculturae, Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2007, ISSN 1335-2555-Roč. 10, č. 1 (2007)

Woyand, H.B., Sedlár, P., Gaduš, J. 2007. *Stress analysis of the welding joints of an attachment system using finite element methods*. In: Nové trendy v konštruovaní a v tvorbe technickej dokumentácie 2007, Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2007. ISBN 978-80-8069-883-6. s. 103 - 108

Woyand, H.B., Sedlár, P., Gaduš, J. 2007. *Finite Element Simulation Models for Welding Joints in Assembly Structures*. In: 48. Medzinárodná konferencia katedier častí strojov a mechanizmov 2007, Bratislava, Smolenice: Slovenská technická univerzita, 2007. ISBN 978-80-227-2708-2. s. 528 - 537