



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**MODELOVÁNÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ PŮSOBÍCÍCH NA DOPRAVNÍ A MANIPULAČNÍ  
ZAŘÍZENÍ S CÍLEM JEJICH OPTIMALIZACE**

MODELLING OF LOAD IMPACTS ACTING ON TRANSPORT AND HANDLING EQUIPMENTS  
WITH THE AIM OF THEIR OPTIMIZATION

ZKRÁCENÁ VERZE PhD. THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Ing. Antonín Šťastný

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

Doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.

BRNO 2015

**OBSAH**

Obsah.....	2
1 Úvod.....	3
2 Popis řešené problematiky .....	4
2.1 Formulace řešeného problému.....	6
3 Stručný přehled dílčích metod.....	7
3.1 Metoda konečných prvků .....	7
3.2 Plánování a analýza experimentu, metamodeling .....	7
3.2.1 Některé důležité aproximační metody.....	8
3.2.2 Hodnocení kvality metamodelů .....	10
3.3 Optimalizace.....	10
3.3.1 Výběr vhodných matematických optimalizačních metod.....	11
3.4 Ztráta stability konstrukcí.....	12
4 Schematický popis Optimalizační metodiky.....	15
5 Některé aplikace matematických optimalizačních metod při návrhu svařovaných nosníků manipulačních zařízení.....	16
6 Aplikace navržené metodiky.....	18
6.1 Formulace optimalizačního problému .....	18
6.1.1 Normativní požadavky .....	18
6.1.2 Parametrizace modelu nosné traverzy.....	18
6.1.3 Účelová funkce.....	19
6.1.4 Obecná formulace omezujících podmínek.....	19
6.2 Řešení optimalizačního problému .....	20
6.2.1 Parametrický konečno-prvkový model .....	20
6.2.2 Konstrukce metamodelů.....	21
6.2.3 Řešení optimalizace.....	21
6.2.4 Druhý krok optimalizace .....	24
7 Závěr.....	25
8 Seznam použitých zkratk.....	27
9 Seznam použitých symbolů a jednotek .....	28
10 Seznam citovaných zdrojů .....	29

## 1 ÚVOD

Proces konstruování prošel v posledních dvaceti letech řadou zásadních metodologických změn spojených zejména s nasazováním výpočetní techniky a CAx technologií. CAD systémy přinesly lepší možnosti vizualizace a zvýšení produktivity práce konstruktérů. CAEA systémy doplňují CAD systémy o možnost vytváření výpočtových modelů různých typů, které slouží k predikci chování navrhovaného výrobku v různých konfiguracích a za různých podmínek. Tyto modely bývají často označovány jako „virtuální prototypy“, protože pomocí těchto modelů jsme schopni experimentovat s navrhovaným výrobkem, aniž bychom fyzicky cokoli vytvořili. Práce s touto abstraktní formou modelu je ve srovnání s fyzicky vytvořenými modely velmi pružná, protože umožňuje získání výsledků ve velmi krátkém čase a s relativně nízkými náklady.

Při návrhu výrobku jsou vždy některé parametry pevně zadány a některé může konstruktér měnit. V oboru nosných konstrukcí manipulačních zařízení bývá pevně zadaná například nosnost konstrukce, pracovní teplota, životnost, maximální hmotnost, cena, přičemž na volbě konstruktéra zůstává návrh koncepce konstrukce, materiálů a rozměrů. Po návrhu koncepčního řešení konstrukce se obvykle postupuje iterativním způsobem od výchozí až ke konečné podobě zvoleného koncepčního řešení. Výchozí konfigurace často vychází z podobného, již realizovaného řešení, které se postupně modifikuje tak dlouho, dokud nesplní všechny požadavky. Z konstrukčního pohledu je nutné konstrukci navrhnout a dimenzovat tak, aby splnila všechny pevnostní, legislativní, technologické a funkční požadavky. Silně konkurenční prostředí posunuje do popředí ekonomická kritéria, které žádají co nejnižší náklady z důvodu zvýšení konkurenceschopnosti a maximalizace zisku. Snahou vývojářů je nalézt optimální uspořádání konstrukcí, která minimalizují cenu za současného splnění všech dalších požadavků. Někdy je ekonomická stránka druhotná a prioritní je například dosažení co nejnižší hmotnosti nebo nejvyšší tuhosti.

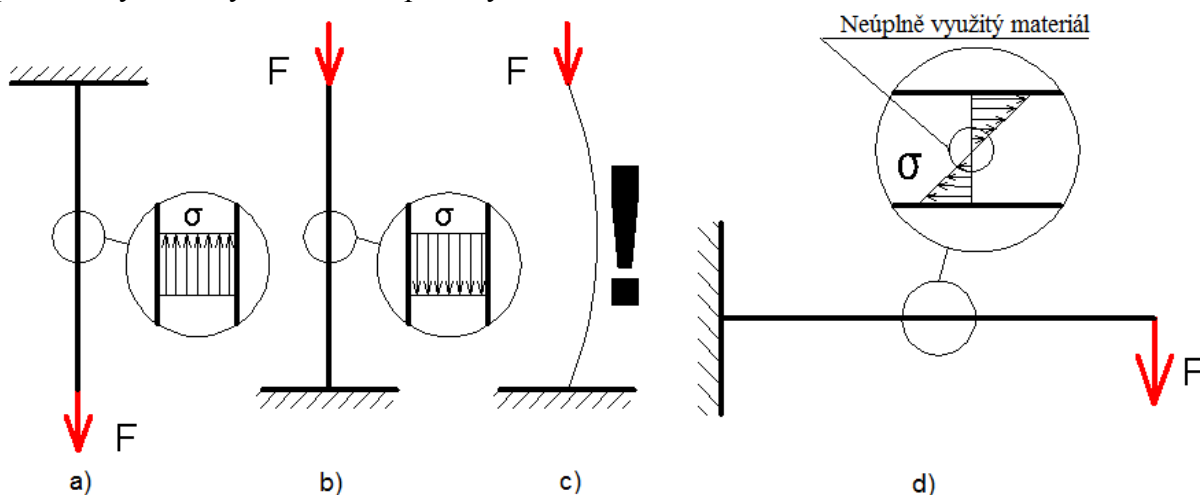
**Splnění naznačených požadavků vyžaduje nasazení komplexních přístupů, které dokážou simultánně zohledňovat všechny požadavky a generovat výsledné řešení. Jelikož hledáme řešení optimální vzhledem ke zvolenému optimalizačnímu kritériu (kritériím), nabízí se možnost využití teorie matematické optimalizace, kdy řešitel formuluje tzv. optimalizační problém. V tomto problému vystupuje vše, co konstruktér může měnit, jako konstrukční (návrhová) proměnná, optimalizační kritérium má podobu účelové funkce a všechny další požadavky jsou formulovány jako omezující podmínky. Ve výsledku se často jedná o soubor rovnic a nerovnic, které se řeší na předem vymezeném definičním oboru, který v tomto případě nazýváme návrhovým prostorem. Optimalizace je ve srovnání s klasickým přístupem náročnější, protože jsou uplatňovány poměrně složité matematické metody na rozdíl od převažující empirie u klasického přístupu.**

Tato práce se zaměřuje na využití matematických optimalizačních metod při návrhu nosných uzlů ocelových konstrukcí manipulačních zařízení.

## 2 POPIS ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Požadavky spojené s prokázáním kompetence nosné konstrukce manipulačního zařízení jsou dány legislativně a smluvně. Splnění legislativních požadavků docílíme např. využitím tzv. harmonizovaných norem, které podrobně popisují jednotlivá návrhová kritéria. **Splnění všech normativních požadavků kladených na konstrukci však obecně nezaručuje její optimální uspořádání.** Konstrukční tým má většinou určitou možnost konstrukci dále měnit tak, aby bylo dosaženo optimálního uspořádání vzhledem k určitému kritériu, kterým je velmi často minimální hmotnost konstrukce. Společným znakem konstrukcí manipulačních zařízení je jejich pohyb. Opakovaná akcelerace těchto konstrukcí vyžaduje energii, která je úměrná jejich hmotnosti. Lehčí konstrukce tedy neznamena pouze menší spotřebu materiálu na její výrobu, ale také menší spotřebu provozních energií z důvodu redukce setrvačných hmot. Hmotnost konstrukce tedy vstupuje jak do výrobních tak do provozních nákladů a konstruktér ji může na rozdíl od ceny lidské práce zásadním způsobem ovlivnit.

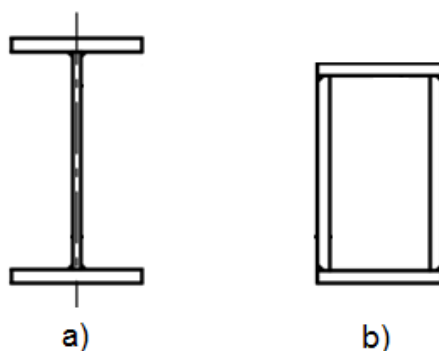
Redukce hmotnosti konstrukcí souvisí se stupněm využití materiálu. Ideálním případem je taková konstrukce, kde je materiál namáhán na jeho mezních hodnotách v celém objemu (obr. 2.1a). U tlakového namáhání je situace obdobná (obr. 2.1b), ale je zde jeden zásadní problém, kterým je sklon k nestabilitě tvaru štíhlých prvků (obr. 2.1c). V manipulační technice ovšem s taženými nebo tlačnými prvky konstrukcí nevystačíme. Konstrukce manipulačních zařízení téměř vždy obsahují nosníky, které přenášejí ohyb jako dominantní složku namáhání. Z hlediska využití materiálu jsou na tom ohýbané prvky konstrukcí podstatně hůř než prvky tažené nebo tlačené (obr. 2.1d). Pro lepší využití materiálu lze nosník konstruovat jako příhradový nebo využít složené průřezy.



Obr. 2.1 Využití materiálu v příčném průřezu prutů

Složené průřezy se skládají z pásnic přenášejících převážně ohybový moment a stojin přenášejících převážně smyk. Podle uvedeného pravidla se stojiny a pásnice také obvykle dimenzují. Tyto průřezy se dělí podle technologie výroby na válcované, svařované a nýtované. Podle typu příčného průřezu rozlišujeme průřezy otevřené (obr. 2.2a) a uzavřené (obr. 2.2b). Otevřené průřezy jsou však velmi poddajné při kroucení. V případě svařovaných a nýtovaných nosníků se jedná o parametrický návrh, kde výpočtář volí rozměrové parametry

tak, aby vyhověl dané aplikaci. Snahou je rozměry stanovit tak, aby bylo požadované zatížení přeneseno při minimální hmotnosti a požadované tuhosti konstrukce. Ohýbané nosníky mají část příčného průřezu tlačenu, což znamená riziko ztráty tvarové stability. Otázka ztráty tvarové stability je aktuální u konstrukcí, které se snažíme odlehčovat, protože snižování hmotnosti vede na tenkostěnnost.

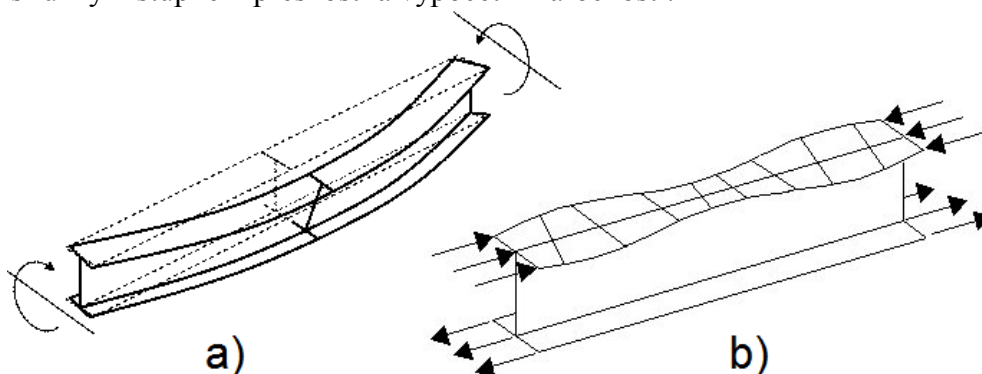


Obr. 2.2 Příklady složených průřezů [1]

Složené ohýbané nosníky mohou ztratit stabilitu tvaru ve dvou základních módech v závislosti na typu zatížení, uspořádání průřezu a okrajových podmínkách.

- Prvním módem je klopení nosníku, které je módem globálním (obr. 2.3 a).
- Druhým módem je lokální boulení pásnic a/nebo stojin (obr. 2.3 b).

Ztráta stability musí být při optimalizaci konstrukce patřičně zohledněna v podobě omezujících podmínek. Pro predikci zatížení na počátku nestabilního chování existuje několik přístupů s různým stupněm přesnosti a výpočetní náročnosti.



Obr. 2.3 Globální a lokální mód ztráty stability ohýbaného nosníku [2], [3]

Je prokázáno, že zatížení, při kterém konstrukce ztrácí stabilitu tvaru je ovlivněno imperfekcemi konstrukce. V zohlednění imperfekcí se liší i výpočetní přístupy. Nejjednodušší modely imperfekce jednoduše ignorují. Takto vypočtené zatížení však může být nekonzervativním odhadem skutečného zatížení způsobující nestabilní chování. Sofistikovanější metody imperfekce zohledňují a poskytují mnohem přesnější výsledky za cenu větší výpočetní náročnosti. Přístupy se obecně dají rozdělit na analytické, analyticko-empirické a numerické. Analytické přístupy jsou postaveny na silně zjednodušujících

předpokladech a jsou poměrně složité i pro jednouché nosníky. Numerické přístupy si poradí s konstrukcemi komplexnějších tvarů a okrajových podmínek. Analyticko-empirické metody obvykle využívají analyticky vypočtené kritické zatížení pro stanovení štíhlosti, která je využívána pro odečítání z příslušné mezní křivky zahrnující vlivy imperfekcí. V práci jsou využity moderní postupy založené na aplikaci MKP v souladu s normativními doporučeními z EC3.

Pro návrh metodiky je důležitá forma popisu účelové funkce a omezujících podmínek optimalizace. Ideálním případem je popis formou spojitých funkcí více reálných proměnných nad celým návrhovým prostorem. Tento popis je možný v případě využití analytických metod pružnosti a pevnosti pro popis návrhových kritérií. Optimalizační algoritmus je potom schopen velmi rychle vyčíslovat funkční hodnoty návrhových kritérií a jeho práce je velmi rychlá. Analytický popis je však možný jen pro jednouchá abstrahovaná tělesa. Všechna návrhová kritéria konstrukcí manipulačních zařízení analyticky popsat nelze, protože se většinou jedná o konstrukce vybočující z předpokladů pro abstrahovaná tělesa. Z uvedeného důvodu je v praxi a také v této práci pro analýzu těchto konstrukcí využívána MKP, která nevyžaduje tak vysoký stupeň abstrakce jako analytické metody. MKP však není schopná přímo poskytnout spojitý funkční popis všech návrhových kritérií nad celým návrhovým prostorem. Jedna konečno-prvková analýza poskytne pouze sadu výsledků v jednom bodě návrhového prostoru (tj. pro jednu konkrétní konfiguraci řešeného konstrukčního uzlu). Celou situaci dále komplikuje skutečnost, že jedna analýza může trvat řádově hodiny. Optimalizace s přímým propojením konečno-prvkových analýz na optimalizační algoritmus se jeví jako prakticky nerealizovatelná a proto je potřeba využít metody, které umožní realizaci optimalizačního algoritmu v rozumném čase.

## 2.1 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

Na základě výše uvedeného popisu problémové situace lze problém řešený v této práci formulovat následovně:

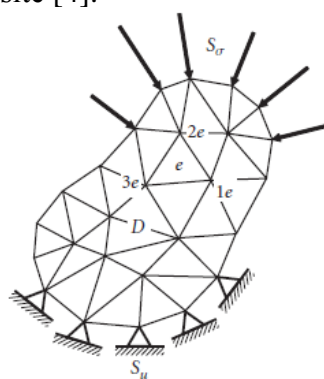
**Návrh optimalizační strategie, která umožní generování optimálních rozměrů koncepčně navržených prvků ocelových nosných konstrukcí manipulačních zařízení. Navržená strategie má využít moderní výpočtové a optimalizační metody. Ztráta stability tvaru má být zakomponována do omezujících podmínek optimalizace s využitím soudobých postupů pro ocelové konstrukce.**

### 3 STRUČNÝ PŘEHLED DÍLČÍCH METOD

Tato část práce obsahuje stručný přehled dílčích metod, které se jeví jako vhodné pro zahrnutí do navrhované optimalizační metodiky. Podrobnější popis je uveden v plné verzi práce.

#### 3.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

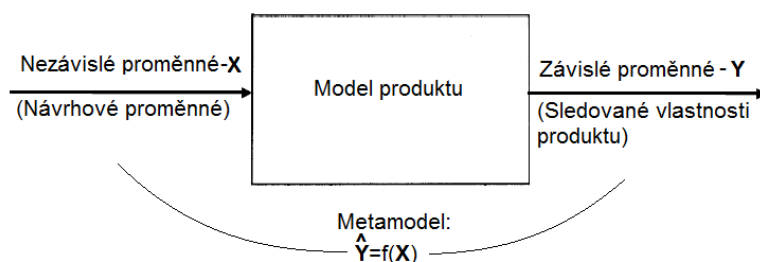
Charakteristickým znakem MKP je diskretizace spojitého prostředí na prvky konečných rozměrů (obr. 3.1), na rozdíl od nekonečně malých prvků využívaných v klasických analytických metodách. Problém hledání spojitých funkcí řešením diferenciálních rovnic, který je analyticky velmi obtížně řešitelný a prakticky aplikovatelný jen u několika základních těles, je převeden na hledání konečného počtu neznámých parametrů. MKP je využívána především ve své deformační variantě, kdy řešíme aproximaci spojitého pole posuvů v diskretních bodech (tzv. uzlech) sítě [4].



Obr. 3.1 Diskretizace kontinua [5]

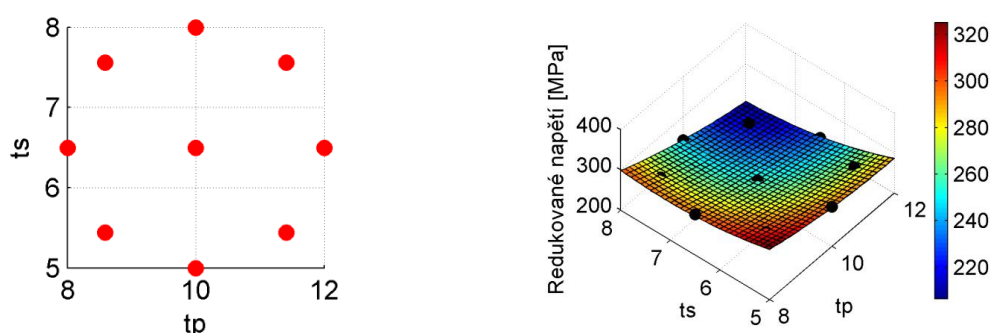
#### 3.2 PLÁNOVÁNÍ A ANALÝZA EXPERIMENTU, METAMODELING

Experimentování s modelem je součástí mnoha vědeckých a inženýrských metod. **Správně navržený experiment (může jít jak o fyzický tak o počítačový experiment) má za cíl při co nejmenším počtu měření (vyčíslení) získat co nejvíce informací o chování navrhovaného produktu.** Chování modelu je možné popsat formou matematické závislosti vektoru výstupních (závislých) proměnných na vektoru proměnných vstupních (nezávislých). Pro studium chování produktu pomocí modelu je důležité alespoň přibližně popsat sledované závislosti při změně nezávislých proměnných. Matematický popis nám umožní lépe pochopit chování navrhovaného produktu a jeho optimální nastavení vzhledem k daným kritériím. Schematické znázornění je na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Obecné schéma experimentování na modelu.

Jednou z možností popisu chování modelů je vytvoření aproximačního matematického popisu z množiny dat získaných výpočtem nebo měřením při vhodně volených nastaveních vstupních proměnných. Ke konstrukci přibližného popisu lze využít matematické aproximační metody spolu s metodami plánování experimentu. Metoda responzních ploch zahrnuje různé aproximační modely, pomocí kterých lze popsat i značně nelineární závislosti. Metodika plánování experimentu se zabývá strategickým výběrem bodů z návrhového prostoru pro provedení experimentů tak, aby bylo možné získat co „nejlepší“ parametry aproximačního modelu, tj. abychom dostali co nejvíce vypovídající popis hledané závislosti při co nejmenším vynaloženém úsilí (tj. minimálním počtu měření nebo výpočtů). Kombinace uvedených přístupů je označována souhrnným názvem **METAMODELING** jehož produktem je **METAMODEL**. Příklad využití centrálně-kompozičního plánu pro identifikaci parametrů lineárního regresního metamodelu je na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Centrálně-kompoziční plán experimentu a lineární regresní metamodel

### 3.2.1 Některé důležité aproximační metody

V následující kapitole budou uvedeny aproximační metody, které jsou potenciálně využitelné v oblasti optimalizace nosných uzlů ocelových konstrukcí manipulačních zařízení. Prezentované metody byly vybrány na základě studia [6], [7], [8], [9], [10], [11], [6], [12], [13], [14], [15].

#### 3.2.1.1 Lineární regresní modely (klasické responzní plochy)

Vzhledem k historickému vývoji je dnes pod pojmem „klasická responzní plocha“ obvykle myšlena aproximace pomocí lineárního regresního metamodelu. Lineární regresní metamodel druhého řádu pro  $k$  proměnných lze vyjádřit [16]:

$$\hat{Y}(\mathbf{X}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Kde:  $\hat{Y}(\mathbf{X})$ - aproximace výstupní proměnné

$\beta$ - regresní koeficienty

$x_i$ - nezávislé proměnné

$k$ -počet nezávislých proměnných

Výhodou metody je zejména jednoduchost, nenáročnost na množství zdrojových dat a získání popisu účelové funkce a omezujících podmínek formou funkce více proměnných. Nevýhodou je omezená schopnost aproximace silně nelineárních závislostí. Tuto nevýhodu lze někdy odstranit opakovanou aproximací nad postupně zmenšovaným návrhovým prostorem. Pro aplikaci této metody lze využít statistický software Minitab nebo Matlab.

### 3.2.1.2 Radiální bázové funkce<sup>1</sup>

Metoda využívá lineární kombinace výrazů založených na radiálně symetrických bázových funkcích, kterých je více typů [17], [6], [13]. Tyto funkce mají tu vlastnost, že jejich hodnota závisí pouze na euklidovské vzdálenosti od počátku. Vhodné aproximace je dosaženo vhodným přidělením váhových koeficientů jednotlivým bázovým funkcím, jejichž počátky jsou umístěny v jednotlivých bodech návrhového prostoru, kde bylo provedeno měření (výpočet). Lineární kombinace těchto vážených příspěvků potom dává celkovou aproximaci hledané závislosti. Aproximaci lze obecně vyjádřit vztahem [18]:

$$\hat{Y}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^n w_i \varnothing(\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_i\|) \quad (2)$$

Kde:  $\hat{Y}(\mathbf{X})$  - aproximace výstupní proměnné

$w_i$  - váhové koeficienty

$\varnothing$  - bázová funkce

$\mathbf{X}$  - návrhový vektor

$\mathbf{X}_i$  - středy bázových funkcí (celkem  $n$  bázových funkcí)

Výhodou této metody je její schopnost aproximovat silně nelineární závislosti. Toto je dáno možností volby váhových koeficientů a různých typů bázových funkcí [10].

### 3.2.1.3 Umělé neuronové sítě<sup>2</sup>

Umělé neuronové sítě představují výpočtové modely lidského mozku. Existuje několik topologických uspořádání umělých neuronových sítí. Často jsou využívány tzv. vrstvené sítě. Tyto sítě lze použít k řešení řady problémů, z nichž jedním je právě aproximace silně nelineárních závislostí, pro které je těžké nalézt vhodný popis tradičními metodami [19], [20]. Vrstvené neuronové sítě se skládají ze vstupní vrstvy, výstupní vrstvy a vrstev skrytých. Jednotlivé vrstvy se skládají z umělých neuronů, které v rámci jedné vrstvy nejsou vzájemně propojeny. Neurony jednotlivých vrstev si navzájem předávají signály systémem každý s každým, které transformují pomocí přenosových funkcí a synaptických vah [21], [22]. Pro vrstvené sítě je charakteristické, že při dostatečné mohutnosti sítě (dána počtem skrytých vrstev a počtem neuronů) můžeme určit její parametry tak, aby aproximovala jakoukoliv závislost s danou přesností. Určení parametrů sítě probíhá v procesu jejího učení [22]. Pro praktickou implementaci umělých neuronových sítí lze využít například Matlab-Neural Network Toolbox [23].

<sup>1</sup> V anglicky psané literatuře označováno akronymem RBF (Radial Basis Functions)

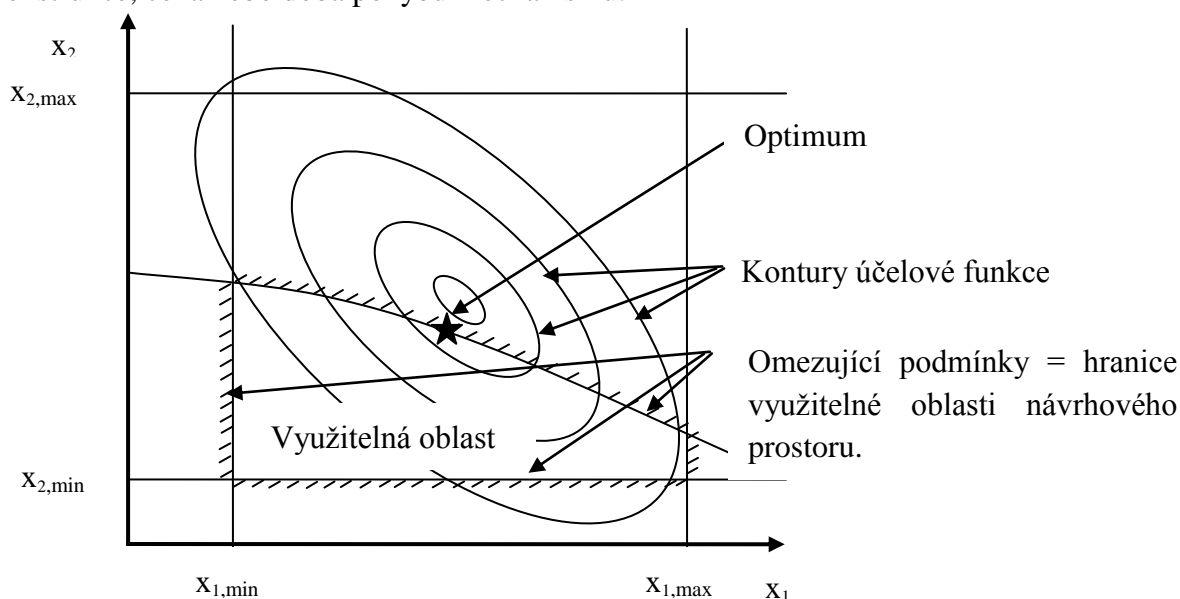
<sup>2</sup> V anglicky psané literatuře označováno akronymem ANN (Artificial Neural Network).

### 3.2.2 Hodnocení kvality metamodelů

Pro hodnocení schopnosti metamodelu aproximovat účelovou funkci a omezující podmínky optimalizace lze využít celou řadu metrik. V rámci práce je využíván koeficient determinace, maximální absolutní chyba (MAX), maximální relativní chyba (REL), průměrná absolutní chyba (MAE). Definice jsou uvedeny v plné verzi práce.

### 3.3 OPTIMALIZACE

Optimalizace je proces hledání extrému účelové funkce při dodržení daných omezujících podmínek [24]. Účelová funkce je vhodně formulovaná závislost optimalizované veličiny na konstrukčních (návrhových) proměnných. Účelovou funkcí může být například hmotnost konstrukce, cena nebo doba pohybu mechanismu.



Obr. 3.4 Kontury účelové funkce, zobrazení omezujících podmínek a vázaného optima

Omezující podmínky mají podobu rovnic a nerovnic:

$$g_i(\mathbf{X}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$h_j(\mathbf{X}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

$$x_k \in \langle x_{k,\min}; x_{k,\max} \rangle \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Kde:  $x_k$  – návrhové proměnné

$g_i$  – omezující podmínky ve tvaru rovnosti

$h_j$  – omezující podmínky ve tvaru nerovnosti

$\mathbf{X}$  – návrhový vektor skládající se z  $n$  návrhových proměnných

Podmínka (5) definuje  $n$ -dimenzionální návrhový prostor. Aplikací (3) a (4) je návrhový prostor redukován a minimum účelové funkce je hledáno pouze na této podmnožině. Minimum funkce se na této podmnožině návrhového prostoru může nacházet buď uvnitř (tzv. volné minimum) nebo na jejím okraji (tzv. vázané minimum, obr. 3.4).

### 3.3.1 Výběr vhodných matematických optimalizačních metod

Metody matematického řešení optimalizačních problémů<sup>3</sup> jsou vyvíjeny pro řešení užší třídy problémů se speciální strukturou. Jelikož metodika navržená v rámci této práce využívá spojitě metamodely, výběr optimalizačních metod je omezen na optimalizační metody pro spojitě funkce. Vzhledem ke skutečnosti, že v optimalizačních problémech zaměřených na optimalizaci nosných uzlů ocelových konstrukcí manipulačních zařízení existují vždy omezující podmínky ve tvaru nerovností (např: podmínky vymezující návrhový prostor, maximální napětí v konstrukci, apod.) je výběr optimalizačních metod omezen na metody zohledňující omezující podmínky ve tvaru nerovností. Dalším faktem, který komplikuje zvolený přístup je obecná nelinearita účelové funkce a/nebo omezujících podmínek. Na základě studia odborné literatury zaměřené na metody matematické optimalizace je pro metodiku navrženou v této dizertační práci volena kombinace dvou metod, přičemž jedna je gradientní a druhá heuristická. Využití dvou principiálně odlišných metod je vhodné z důvodu vzájemné verifikace výsledku. Zařazení heuristické metody také zajistí, aby nalezené minimum nebylo pouze minimem lokálním. Z gradientních metod je zvoleno sekvenční kvadratické programování (SKP) a z heuristických metod je zvolen genetický algoritmus (GA). Obě metody lze realizovat v rámci Matlabu.

#### 3.3.1.1 Sekvenční kvadratické programování

Sekvenční kvadratické programování (SKP) představuje jednu z nejlepších moderních metod nelineárního programování [25], [26]. SKP je iterační metoda, která v rámci každé iterace aproximuje účelovou funkci prvními třemi členy Taylorovy řady (až po kvadratický člen) rozvinuté v aktuálním bodě iterace. V případě, že levé strany omezujících podmínek jsou nelineární, jsou linearizovány pomocí prvních dvou členů Taylorovy řady (až po lineární člen) rozvinuté v aktuálním bodě iterace [27]. V každé iteraci je definován dílčí optimalizační podproblém, který je řešen pomocí metody kvadratického programování. SKP je součástí optimalizačního toolboxu programu Matlab. Pro implementaci je využíván algoritmus Fmincon.

#### 3.3.1.2 Genetické algoritmy

Genetické algoritmy (GA) představují matematické modely biologického evolučního procesu, které umožňují řešení optimalizačních problémů. Typicky je na začátku simulace populace složena z náhodných členů. V rámci tvorby nové generace je pro každého jedince spočtena hodnota fitness funkce, která vyjadřuje kvalitu řešení reprezentovaného tímto jedincem. Podle této kvality jsou stochasticky selektováni jedinci, kteří zůstanou v populaci beze změny s tím, že zbylí jedinci jsou modifikováni pomocí mutací a křížení, čímž vznikne nová generace jedinců. Tento postup se iterativně opakuje, čímž se kvalita řešení v populaci postupně zlepšuje. Algoritmus se obvykle zastaví při dosažení postačující kvality řešení, případně po předem dané době [28].

<sup>3</sup> Tyto metody jsou často označovány jako metody matematického programování i když toto označení se nezdá býti příliš výstižné.

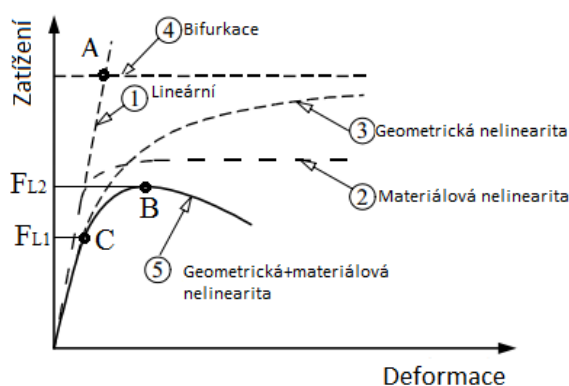
### 3.4 ZTRÁTA STABILITY KONSTRUKCÍ

Výzkum v této oblasti se soustřeďuje převážně do stavebnictví, které bezesporu produkuje největší množství ocelových konstrukcí. Výpočtová predikce ztráty stability tvaru je součástí všech moderních výpočtových norem pro ocelové konstrukce. Jedná se zejména o stavební normy (např. v Evropě platné eurokódy [29], [30]), na které se strojírenské normy většinou odkazují. V normách jsou zavedeny metodiky pro výpočet limitních zatížení reálných konstrukcí s empirickým uvážením imperfekcí a v některých normách se dokonce začínají objevovat počátky kodifikace analýz provedených metodou konečných prvků (např.: příloha C ČSN EN 1993-1-5 ed.2 [29], která bude v této práci prakticky použita). Pro využití stavebních norem ve strojní oblasti je nutné reformulovat některá kritéria tak, aby bylo zaručeno využívání materiálu pouze v elastické oblasti, protože ve stavebnictví je často využívána únosnost elasto-plastická.

**Z pohledu idealizace a modelování rozlišujeme ztrátu stability tvaru při rozdělení rovnováhy (bifurkaci) a při dosažení limitního zatížení [31], [32], [33].**

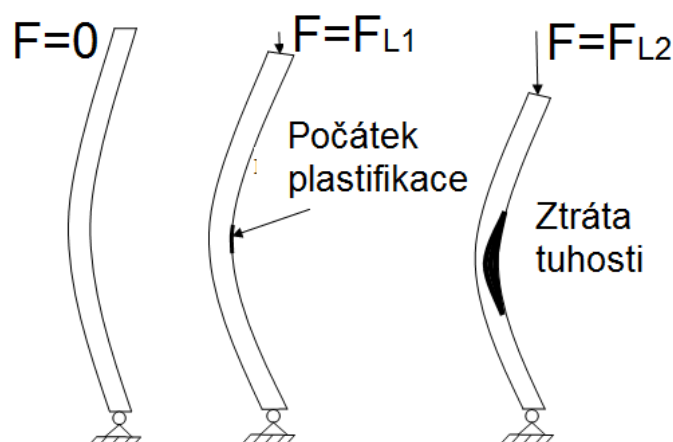
**Bifurkace je teoretický výpočtový stav, který je určen dosažením tzv. kritického zatížení** ideálně přímých, rovinných nebo válcovitých prvků konstrukce, které jsou zatíženy tak, že v nich vzniká prostý tlak nebo tlaková membránová napjatost při lineárně-elastickém chování materiálu. Tento stav má na zatěžovacím diagramu ostrou hranici (bod A na Obr. 3.5), po jejímž překročení se křivka rozděluje na stabilní a labilní větev. Stabilní větev reprezentuje novou deformaci konstrukce v některém charakteristickém módu, labilní větev pokračuje v deformaci původní.

Průběh zatěžování reálného a ideálního konstrukčního prvku je rozdílný, protože reálný prvek se vlivem imperfekcí prohýbá již od začátku zatěžování, což má za následek vznik přídavných ohybových napětí vedoucích k postupnému snižování tuhosti. Limitní zatížení způsobující ztrátu únosnosti reálné konstrukce není definováno tak exaktně jako kritické zatížení při bifurkaci. Za limitní zatížení je obvykle považováno takové zatížení, při kterém tuhost konstrukčního prvku poklesne téměř na nulu, což znamená, že prvek již není schopen vydržet další přírůstek zatížení. Okamžitá tuhost je dána směrnicí tečny zatěžovacího diagramu, která je v bodě kolapsu nulová. Limitní zatížení podle naznačené definice odpovídá maximu zatěžovacího digramu (zatížení  $FL_2$  na obr. 3.5) [34], [35], [36]. Takto určené limitní zatížení často leží v oblasti elasto-plastického stavu materiálu a je typické pro stavebnictví.



Obr. 3.5 Typy analýz v oboru ocelových konstrukcí [37]

Průběh degradace tuhosti závisí na štíhlosti a velikosti imperfekcí. U prvků malých relativních štíhlostí je vliv geometrické nelinearity zanedbatelný. Limitní zatížení těchto prvků je taktéž minimálně ovlivněno velikostí imperfekcí [3].



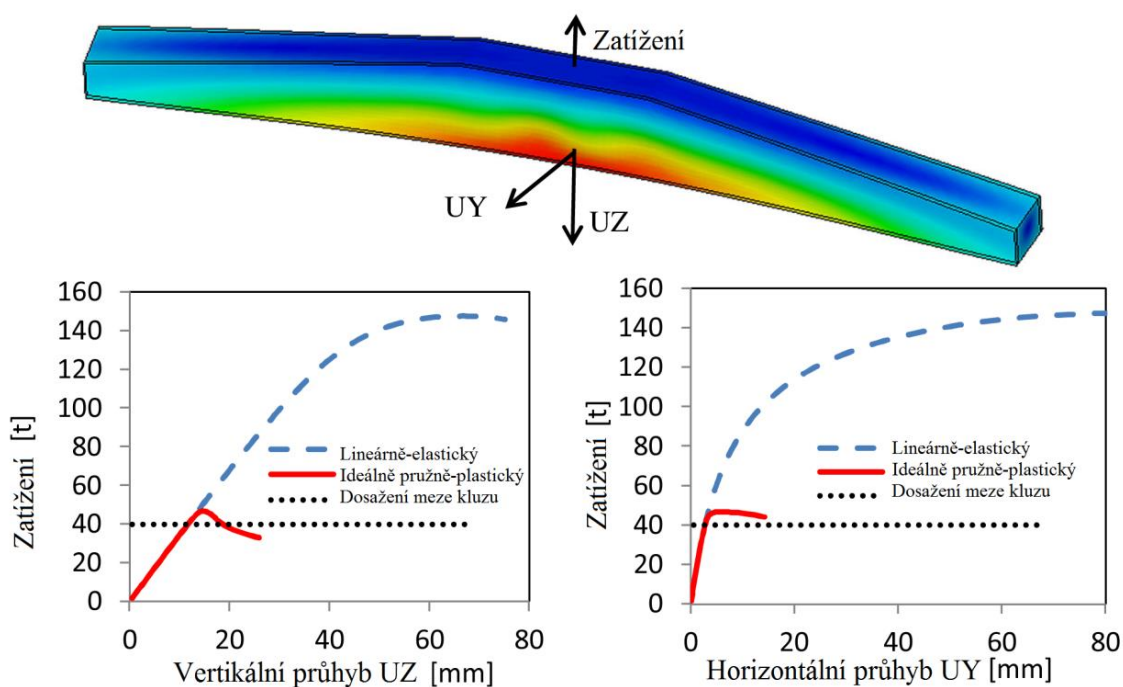
Obr. 3.6 Mechanismus ztráty únosnosti reálného prutu v tvárném stavu

U prvků středních štíhlostí se projevuje geometrická nelinearita zvětšováním přídavného ohybu a s tím spojeným poklesem tuhosti. Při určitém zatížení ( $FL_1$  na obr. 3.5 a obr. 3.6) dojde k dosažení meze kluzu v krajních vláknech. Při dalším zatěžování dochází k progresi plastifikovaného objemu materiálu jak do hloubky příčného průřezu tak také délkově, přičemž tento plastifikovaný objem již téměř nepřispívá k odolnosti konstrukčního prvku vůči dalšímu přírůstku zatížení. Při dosažení jistého limitního zatížení (zatížení  $FL_2$  na obr. 3.5 a obr. 3.6) dojde ke kompletní ztrátě tuhosti konstrukce. Tento stav odpovídá maximu zatěžovacího diagramu (bod B na křivce 5 na obr. 3.5). Degradace tuhosti je tedy způsobena interakcí geometrické a materiálové nelinearity podle obr. 3.5. Únosnost prvků středních štíhlostí je nejvíce ovlivněna imperfekcemi.

Pro definování limitního zatížení nosných konstrukcí dopravních a manipulačních zařízení je nutné vzít do úvahy nepřipustnost globálních plastických deformací [38], [39]. Tento fakt má dva zásadní důsledky:

- Mezi mezní stavy bývá vždy zařazen mezní stav pružnosti, který kompetentní konstrukce nesmí při předepsaném zatížení překročit. Zatížení způsobující trvalé deformace je tím z přípustných zatížení vyřazeno. Limitním zatížením je tedy zatížení  $FL_1$  na obr. 3.5 a obr. 3.6.
- S ohledem na předchozí bod není nutné pro ocel s lineárním chováním v elastické oblasti do nelineárního výpočtu zahrnovat elasto-plastické chování materiálu. Stabilita konstrukce s imperfekcemi se posoudí podle limitního zatížení vypočteného pomocí geometricky nelineární analýzy imperfektovaného modelu.

Z obr. 3.7 je patrné, že zatěžovací diagram s uvážením ideálně pružně-plastického materiálu se až do dosažení meze kluzu přimyká k zatěžovacímu diagramu s uvážením lineárně elastického materiálu a geometrické nelinearity.



Obr. 3.7 Průběh zatěžování v horizontální a vertikální rovině, 2D varianta:  $t_p=8\text{mm}$ ,  $t_s=4\text{mm}$

Zásadní otázkou vystupující již v etapě tvorby modelu je způsob zadání imperfekcí. Realistické zahrnutí všech typů imperfekcí do modelu není prakticky možné z následujících důvodů:

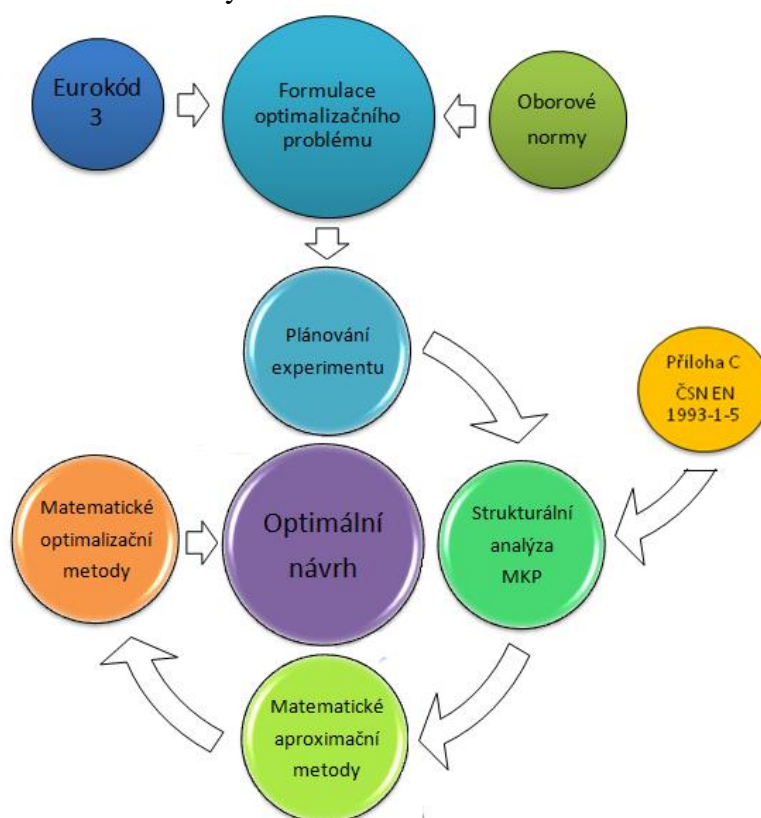
- Neznalost velikosti imperfekcí v návrhové fázi konstrukcí
- Působení náhodných výrobních vlivů na jejich velikost
- Obtížná měřitelnost některých typů imperfekcí (nehomogenity, reziduální napětí)

Vzhledem k působení náhodných vlivů na parametry imperfekcí lze pro každou ideální geometrickou konfiguraci vymyslet nekonečně mnoho imperfektovaných scénářů. Analyzovat všechny možné scénáře je nemožné a zbytečné. V praxi je nutné použít inženýrský úsudek a dostupné zdroje informací pro správné zavedení imperfekcí pro daný typ konstrukce. Obecná doporučení pro výpočty realizované metodou konečných prvků jsou kodifikována v příloze C ČSN EN 1993-1-5 ed.2 [29]. Jedná se první normativní dokument, který obsahuje doporučený postup pro analýzy provedené metodou konečných prvků. Příloha obsahuje řadu doporučení pro posouzení tvarové stability konstrukcí na základě MKP výpočtů. Norma doporučuje modelování napěťových (vniřní pnutí po technologických operacích) a geometrických imperfekcí (nedokonalé tvary a rozměry v rámci geometrických tolerancí). Tvar geometrických imperfekcí může vycházet z kritických vlastních tvarů získaných lineární stabilitní analýzou. Mají se zohlednit jak globální tak lokální módy. Při kombinaci více druhů

imperfekcí se má vybrat imperfekce rozhodující a další imperfekce považovat za doprovodné. Imperfekce se mají kombinovat tak, aby bylo dosaženo nejméně příznivého vlivu na únosnost. Amplituda rozhodující imperfekce se doporučuje stanovit jako 80% geometrických výrobních tolerancí<sup>4</sup> a amplituda doprovodných imperfekcí se redukuje na 70% velikosti rozhodující imperfekce. Napět'ové imperfekce lze modelovat zjednodušeně zavedením náhradních obrazců reziduálních napětí odpovídající výrobě s amplitudami odpovídajícími středním (očekávaným) hodnotám. Modelování je technicky složité a proto se tento typ imperfekce v modelu zohledňuje modifikací velikosti geometrické imperfekce tak, aby výsledná únosnost byla ekvivalentní. Výsledná geometrická imperfekce zohledňující i vliv reziduálních napětí na únosnost se nazývá **Ekvivalentní Geometrická Imperfekce**. Ekvivalentní geometrické imperfekce lze nahradit fiktivním zatížením působícím na daný prvek. Fiktivní zatížení je vhodné zejména pro generování globálních tvarů imperfekcí. [29], [34], [35]. K zavedení ekvivalentních geometrických imperfekcí lze použít tabulku C.2 a obr. C.1 z přílohy C [29]. Pro zvolení rozhodující a doprovodných imperfekcí je třeba použít inženýrský úsudek a další dostupné zdroje. Lze modelovat i více scénářů.

#### 4 SCHEMATICKÝ POPIS OPTIMALIZAČNÍ METODIKY

Metodika představuje systematické propojení všech dílčích metod do uceleného postupu, který vede k optimálnímu řešení navrhovaného uzlu nosné konstrukce. Obr. 4.1 schematicky znázorňuje tok informací metodiky.



Obr. 4.1 Obecné schéma metodiky

<sup>4</sup> Pro stanovení geometrických tolerancí lze využít například EN1090- 2

## 5 NĚKTERÉ APLIKACE MATEMATICKÝCH OPTIMALIZAČNÍCH METOD PŘI NÁVRHU SVAŘOVANÝCH NOSNÍKŮ MANIPULAČNÍCH ZAŘÍZENÍ

Obecně se dá říct, že matematické optimalizační metody jsou při praktických návrzích ocelových konstrukcí manipulačních zařízení<sup>5</sup> využívány spíše sporadicky. Při návrhu převládá využití empirického přístupu s tím, že lepší řešení jsou hledána metodou pokusu a omylu popř. porovnáním více analyzovaných scénářů. Tento postup bývá často nazýván optimalizací, i když se o optimalizaci ve striktně matematickém smyslu nejedná. Příkladem uvedeného postupu je „optimalizace“ tloušťek stojin a pásnic hlavních nosníků mostového jeřábu [40] nebo optimalizace profilu jeřábové traverzy [41]. Existují však publikace popisující matematicky korektní optimalizaci svařovaných nosníků mostových jeřábů.

Pavlovič a kolektiv [42] popisují metodiku optimalizace skříňového nosníku mostového jeřábu s uvážením omezení na klopení a boulení stěn popsané analyticky s využitím norem. Optimalizace je provedena analyticky pro dvě proměnné (šířka a výška nosníku) metodou Lagrangeových multiplikátorů.

Kolektiv čínských autorů z univerzity v Shenyangu [43] popisuje metodiku zaměřenou na řešení hmotnostní optimalizace skříňového nosníku mostového jeřábu s uvážením omezení na napětí, tuhost a další geometrické proporce nosníku. Stabilita však není v omezujících podmínkách zohledněna. Účelová funkce i omezující podmínky jsou formulovány analytickou cestou. Optimalizace je řešena numericky pomocí nelineárního programování.

Sun a kolektiv [44] popisuje využití metody optimalizace hejnem částic<sup>6</sup> modifikované pro diskrétní návrhové proměnné při hmotnostní optimalizaci hlavního nosníku mostového jeřábu. Do optimalizačního problému je zahrnuto celkem 6 návrhových proměnných a 10 omezujících podmínek, které jsou formulovány a vyčíslovány analyticky. Pro nalezení optimálního řešení bylo potřeba 400040 vyčíslení účelové funkce a omezujících podmínek. Vysoký počet vyčíslení je charakteristický pro všechny heuristické optimalizační metody. V případě analytické formulace účelové funkce a omezujících podmínek je využití heuristických metod možné, avšak pro přímé propojení na MKP je provedení tak vysokého počtu analýz prakticky nemožné.

Velmi komplexní přístup pro hmotnostní optimalizaci skříňových nosníků mostových jeřábů popisuje kolektiv autorů z BIT [45]. Při formulaci omezujících podmínek jsou zohledněna kritéria na napětí, průhyb a stabilitu formulovaná v CMAA 70 a F.E.M. Optimalizace je řešena s využitím nelineárního optimalizačního řešiče v Excelu<sup>7</sup>. V rámci verifikace je optimalizace provedena s využitím přímých optimalizačních řešičů Ansysu s tím, že pomocí MKP není řešeno stabilitní omezení, ale jen napětí a průhyby. Stabilita je zohledňována

<sup>5</sup> Pod pojmem manipulační zařízení jsou zde myšlena zařízení, jejichž funkční část tvoří ocelová nosná konstrukce. Jedná se zejména o zdvihací zařízení a těžké manipulátory.

<sup>6</sup> Tato heuristická optimalizační metoda je v anglické literatuře označována jako Particle Swarm Optimization.

<sup>7</sup> Je využíván řešič GRG2 (Generalized Reduced Gradient).

analyticky s využitím podmínek z CMAA a F.E.M. Optimalizace je řešena pro 11 návrhových proměnných.

Výše uvedené práce využívají buď analytickou formu popisu účelové funkce a omezujících podmínek nebo přímé propojení optimalizačního řešiče a konečno-prvkového systému. Žádný z výše uvedených přístupů neřeší stabilitní omezení pomocí MKP. Při řešení stability je vždy využíváno norem, které obsahují pravidla zohledňující vliv imperfekcí (např. křivky vzpěrné pevnosti a klopení z EC3). Žádná z výše uvedených prací rovněž nezohledňuje únavu materiálu. Většina autorů také publikuje výsledné optimální tloušťky plechů jako desetinná čísla [45], [43]. Je třeba zdůraznit, že pouhé zaokrouhlení na dostupné tloušťky bez další korekce může způsobit významnou odchylku od optimálního řešení.

Vzhledem k výše uvedené diskuzi se metodika navržená v rámci této práce jeví jako zajímavá alternativa k výše uvedeným postupům z následujících důvodů:

- Je využíváno nepřímého propojení konečno-prvkového modelu a optimalizačního algoritmu prostřednictvím metamodelů.
- Některé aproximační metody umožní popsat závislosti mezi návrhovými proměnnými a výstupními veličinami ve formě spojitých funkcí, což umožní lepší pochopení těchto závislostí.
- Všechny potřebné výstupní veličiny včetně limitního zatížení pro stabilitní omezení jsou řešeny pomocí konečno-prvkových analýz.
- Metodika má při využití sofistikovanějších aproximačních metod (např.: umělé neuronové sítě nebo radiální bázové funkce) potenciál k zahrnutí únavy materiálu do omezujících podmínek.

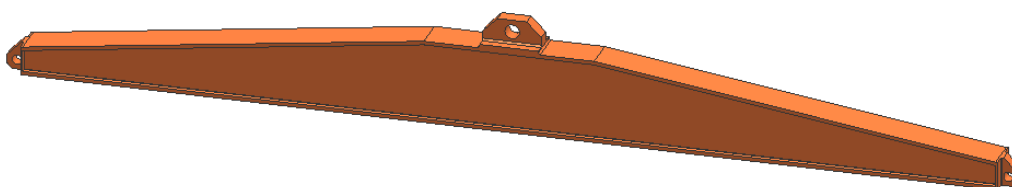
## 6 APLIKACE NAVRŽENÉ METODIKY

Cílem této kapitoly je praktická ukázka využití navržené optimalizační metodiky prostřednictvím případové studie zabývající se problematikou návrhu hmotnostně optimalizovaných svařovaných nosníků.

### 6.1 FORMULACE OPTIMALIZAČNÍHO PROBLÉMU

Cílem je návrh co nejlehčí varianty nevyztuženého svařovaného skříňového nosníku nosné traverzy s tím, že tento hmotnostně optimalizovaný nosník splní pevnostní požadavky dané platnou legislativou. Traverza má mít následující parametry:

- Nosnost:  $WLL=20000\text{kg}$
- Délka nosníku:  $L=4\text{m}$
- Životnost: minimálně 10000 zátěžných cyklů
- Materiál: S355J2G3 ( $f_y=355\text{MPa}$ )
- Maximální vertikální průhyb:  $\delta_{max}=L/500=8\text{mm}$



Obr. 6.1 Nosná traverza se skříňovým uzavřeným průřezem

#### 6.1.1 Normativní požadavky

Norma [39] předepisuje výpočtový zatěžovací stav daný rovnicí (6).

$$F_{NORM} = S_{DL} + 2 \cdot S_{WLL} = 2 \cdot WLL \cdot g = 2 \cdot 20000 \cdot 9.81 = 392400 \text{ [N]} \quad (6)$$

Kde:  $F_{NORM}$  - normativní výpočtové zatížení [N]

$S_{DL}$  - účinek vlastní hmotnosti uchopovacích prostředků [N] (nepodstatný vůči WLL)

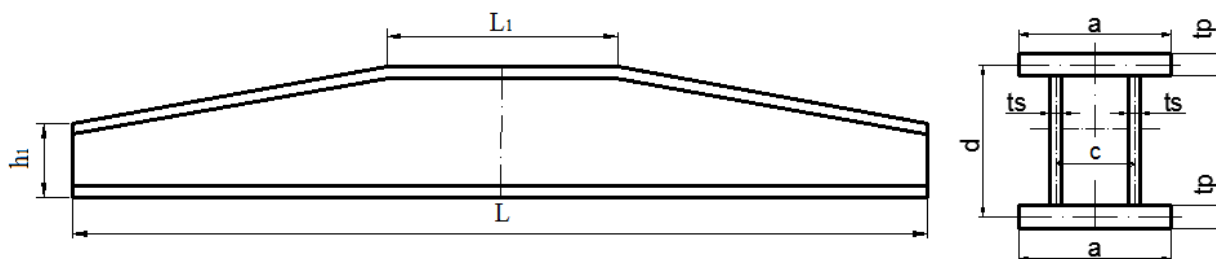
$S_{WLL}$  - účinek zatížení od nosnosti [N]

$g$  - tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]

Norma vyžaduje, aby při statickém zatížení podle (6) redukované napětí v nosníku nepřekročilo mez kluzu materiálu a nosník zůstal tvarově stabilní.

#### 6.1.2 Parametrizace modelu nosné traverzy

Parametrizace je znázorněna na obr. 6.2. Parametry  $L$ ,  $L_1$ ,  $h_1$  jsou předem dané (nepředstavují návrhové proměnné). Předmětem optimalizace je hledání optimálních hodnot rozměrů příčného průřezu. Jsou uvažovány čtyři návrhové proměnné  $tp$ ,  $ts$ ,  $a$ ,  $d$ . Rozteč stojin  $c$  je co největší z důvodu maximalizace torzní tuhosti a tím odolnosti vůči klopení. Rozteč je odvozena od šířky pásnic  $a$  tak, aby na okrajích bylo dostatek místa pro svar. Tabulka 6-1 uvádí uvažované rozsahy hodnot návrhových proměnných a hodnoty fixních parametrů.



Obr. 6.2 Parametrizace nosné traverzy (návrhové proměnné jednotlivých variant zarámovány)

Tabulka 6-1 Rozsahy návrhových proměnných a hodnoty fixních parametrů optimalizace (návrhové proměnné jsou podtržené).

Para- metr	Hodnota [mm]	Para- metr	Hodnota [mm]	Para- metr	Hodnota [mm]
<u>a</u>	<200,300>	<u>tp</u>	<4,8>	<u>L<sub>1</sub></u>	800
<u>c</u>	a-40-ts	<u>ts</u>	<4,6>	<u>h<sub>1</sub></u>	200
<u>d</u>	<450,500>	<u>L</u>	4000		

### 6.1.3 Účelová funkce

Účelovou funkcí je objem materiálu nosné traverzy. Hodnota je odečítána přímo z Ansysu.

### 6.1.4 Obecná formulace omezujících podmínek

- Redukované napětí ve stojinách a pásnicích nosníku zatíženého podle (6) nesmí překročit mez kluzu materiálu (legislativní požadavek).

$$\sigma_{red} \leq f_y [MPa] \quad (7)$$

Kde:  $\sigma_{red}$  – redukované napětí [MPa]  
 $f_y$  – napětí na mezi kluzu materiálu [MPa]

- Nosník nesmí při zatěžovacím stavu (6) vykázat globální ani lokální nestabilitu tvaru (legislativní požadavek).

$$k_B = \min(k_{B_L}; k_{B_N}) \geq 1 [-]$$

$$k_{B_L} = \frac{F_{cr}}{F_{Norm}} [-] \quad (8)$$

$$k_{B_N} = \frac{F_{L1}}{F_{Norm}} [-]$$

Kde:  $k_B$  – výsledný součinitel stabilitní bezpečnosti vzhledem k normativnímu zatížení  $F_{Norm}$  podle (6) [-]  
 $k_{B_L}$  – součinitel stabilitní bezpečnosti určený z bifurkačního zatížení  $F_{cr}$  vzhledem k normativnímu zatížení  $F_{Norm}$  podle (6) [-]

$k_{B\_N}$  – součinitel stabilitní bezpečnosti určený z limitního zatížení  $F_{L1}$   
vzhledem k normativnímu zatížení  $F_{Norm}$  podle (6) [-]

- Nosník musí být dostatečně ohybově tuhý. Tento požadavek je kvantifikován maximální velikostí průhybu při zatížení jmenovitým břemenem (smluvní požadavek).

$$\delta \leq \delta_{max} [mm] \quad (9)$$

Kde:  $\delta$  – průhyb nosníku [mm]  
 $\delta_{max}$  – dovolený průhyb nosníku [mm]

- Omezení rozsahu jednotlivých návrhových proměnných.

$$\begin{aligned} ts &\in \langle ts_{min}, ts_{max} \rangle [mm] \\ tp &\in \langle tp_{min}, tp_{max} \rangle [mm] \\ d &\in \langle d_{min}, d_{max} \rangle [mm] \\ a &\in \langle a_{min}, a_{max} \rangle [mm] \end{aligned} \quad (10)$$

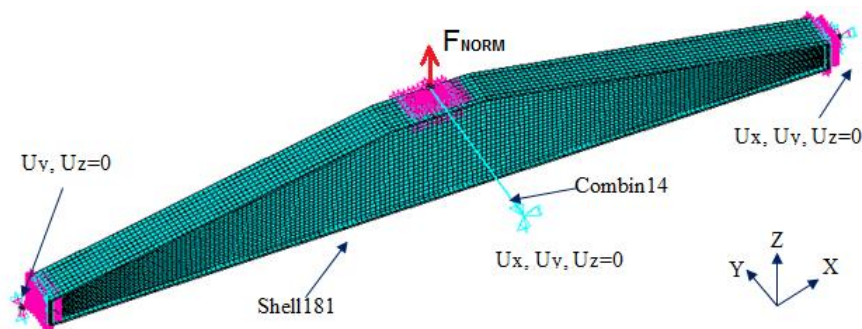
Kde:  $ts$  – tloušťka stojin [mm]  
 $tp$  – tloušťka pásnic [mm]  
 $d$  – střednicová rozteč pásnic [mm]  
 $a$  – šířka pásnic [mm]

## 6.2 ŘEŠENÍ OPTIMALIZAČNÍHO PROBLÉMU

Na řešení optimalizačního problému je aplikována metodika schematicky popsaná v kap. 4.

### 6.2.1 Parametrický konečno-prvkový model

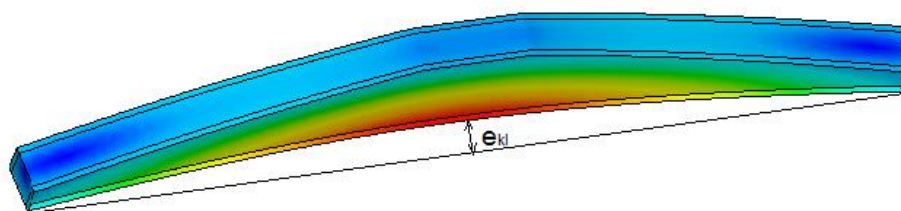
Parametrický konečno-prvkový model nosné traverzy je realizován pomocí programovacího jazyka APDL systému Ansys verze 13. Jelikož nosník je svařen z tenkých pásnic a stojin, model je koncipován jako skořepinový. Základem modelu je skořepinový prvek SHELL181 mající membránovou i ohybovou tuhost. Zatížení, okrajové podmínky a souřadný systém modelu jsou patrné z obr. 6.3.



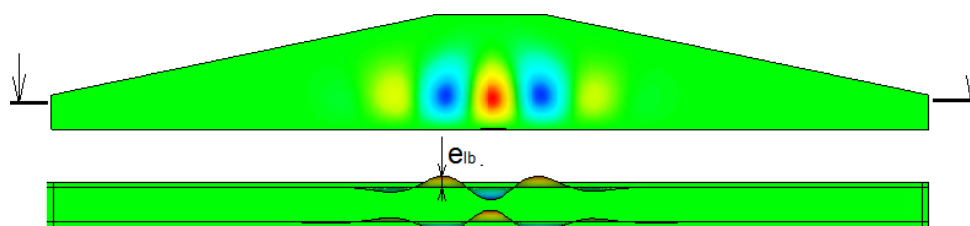
Obr. 6.3 Konečno-prvkový model

Tvar globální imperfekce je generován laterálním fiktivním zatížením rovnoměrně rozloženým ve spodní pásnici. Tvar lokální imperfekce je generován lineární analýzou stability (první lokální vlastní tvar). Velikosti imperfekcí jsou nastaveny podle normy [30] a

přílohy C normy [29] jako **ekvivalentní geometrické imperfekce**, kde řídicí imperfekcí je globální ohybově torzní mód (klopení) a doprovodnou imperfekcí je lokální boulení. Zavedení imperfekcí do modelu je v Ansysu provedeno pomocí příkazu UPGEOM.



Obr. 6.4 Globální imperfekce-klopení nosníku



Obr. 6.5 Lokální imperfekce (lokální boulení stojin)

## 6.2.2 Konstrukce metamodelů

Vzhledem k očekávání mírně nelineárního průběhu u všech aproximovaných omezujících podmínek, bude využíván lineární regresní metamodel (1). Metamodely jsou z důvodu lepší funkčnosti GA konstruovány v normalizovaném návrhovém prostoru (rozsah návrhových proměnných je interval  $\langle 0,1 \rangle$ ) na základě identifikace parametrů  $\beta_0$  až  $\beta_{14}$  následující rovnice (11). Parametry jsou vypočteny pomocí funkce REGRESS v Matlabu.

$$\hat{Y}(\mathbf{X}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot tp + \beta_2 \cdot ts + \beta_3 \cdot a + \beta_4 \cdot d + \beta_5 \cdot tp^2 + \beta_6 \cdot ts^2 + \beta_7 \cdot a^2 + \beta_8 \cdot d^2 + \beta_9 \cdot tp \cdot ts + \beta_{10} \cdot tp \cdot a + \beta_{11} \cdot tp \cdot d + \beta_{12} \cdot ts \cdot a + \beta_{13} \cdot ts \cdot d + \beta_{14} \cdot a \cdot d \quad (11)$$

Kde:

$\hat{Y}(\mathbf{X})$  - metamodel ve tvaru kvadratického polynomu ve čtyřech proměnných

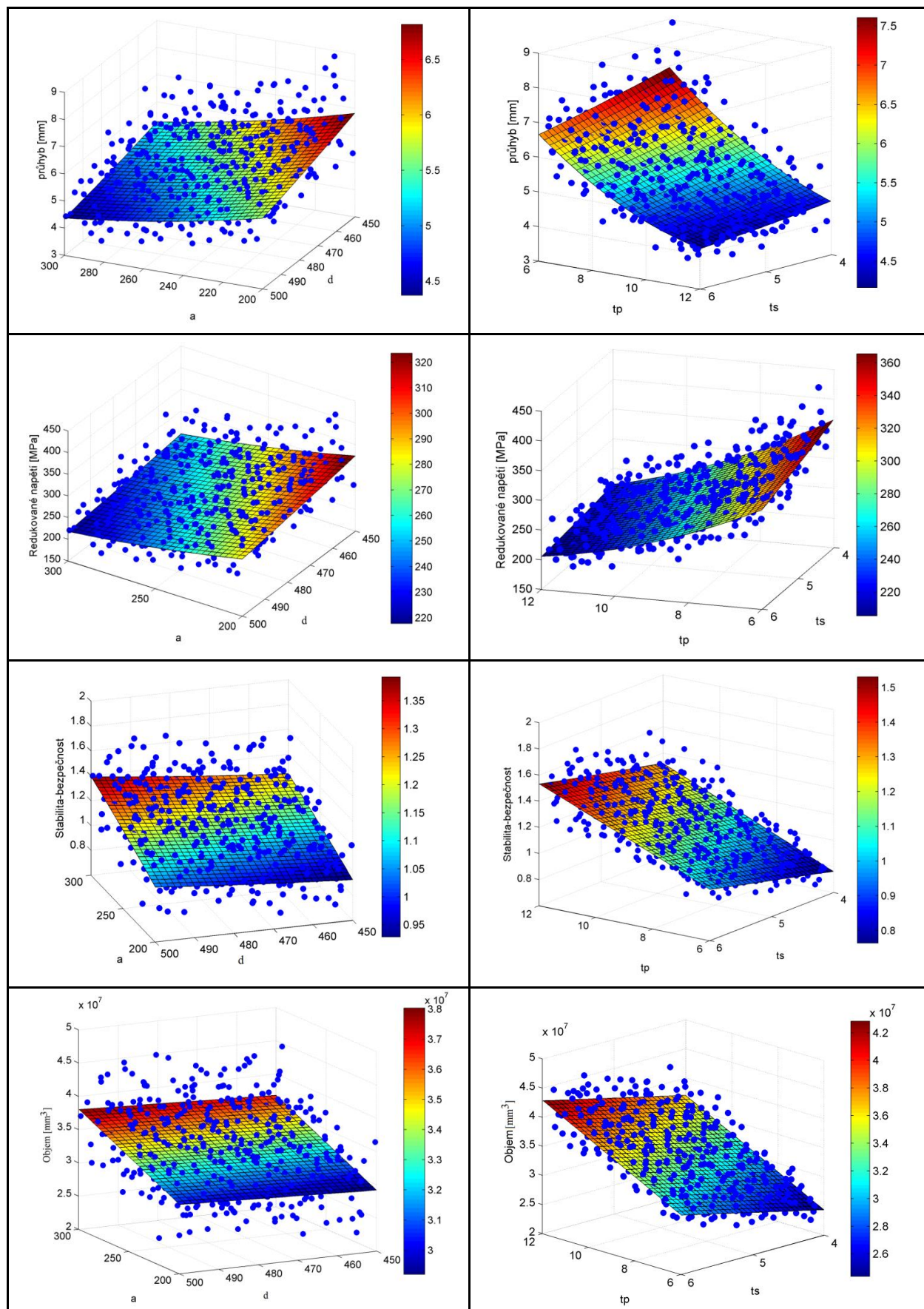
$\beta_0$  až  $\beta_{14}$  - parametry metamodelu

tp, ts, a, d – normalizované návrhové proměnné

$\mathbf{X}$  – návrhový vektor obsahující normalizované návrhové proměnné

## 6.2.3 Řešení optimalizace

Tabulka 6-2 prokazuje dobrou kvalitu aproximace omezujících podmínek pomocí lineárního regresního metamodelu (1). Vzhledem k dimenzi návrhového prostoru není možná úplná grafická prezentace metamodelů; nicméně, je možné vykreslení řezů, kde jsou vždy dvě proměnné považovány za konstanty nastavené na střed jejich rozsahu. V řezech jsou pro názornost zobrazeny všechny vypočtené hodnoty (modré body). Řezy jsou zobrazeny na obr. 6.6. Řezy jsou pro lepší názornost vykresleny ve fyzickém rozsahu proměnných. Tabulka 6-3 porovnává optima vypočtená pomocí SKP a GA z metamodelů jednotlivých experimentálních plánů. V rámci sady metamodelů jednoho experimentálního plánu jsou pro oba optimalizační algoritmy nalezená optima téměř shodná. Optima se (podle očekávání) pro metamodely různých plánů mírně liší.



Obr. 6.6 Řezy metamodelů, HS 500 (a, d, tp, ts v mm)

Jelikož tloušťky plechů nejsou ve skutečnosti spojitými proměnnými, optimální tloušťky je nutné zaokrouhlit na nejbližší dostupné vyráběné tloušťky, tj.  $t_p=8\text{mm}$  a  $t_s=4\text{mm}$  a provést druhý optimalizační krok. Ve druhém optimalizačním kroku se zaokrouhlené tloušťky vyřadí z návrhových proměnných. Cílem druhého kroku optimalizace je korekce optimálních rozměrů  $a$  a  $d$  vzhledem k zaokrouhlení tlouštěk plechů pásnic  $t_p$  a stojin  $t_s$ . Rozsah návrhových proměnných  $a$  a  $d$  je omezen na blízké okolí optima. Vzhledem omezení rozsahu návrhových proměnných na okolí optima a informaci o variabilitě metamodelů v okolí optima z řezů na obr. 6.6 jsou metamodely sestrojeny na základě úsporného centrálně-kompozičního plánu podle obr. 6.7 *a* (již bez normalizace). Tabulka 6-4 spolu s grafickým zobrazením metamodelů (obr. 6.8) prokazuje velmi dobrou kvalitu aproximace. Tabulka 6-5 uvádí identická optima vypočtená pomocí obou optimalizačních algoritmů. Obr. 6.7 *b* znázorňuje situaci v návrhovém prostoru a polohu optima.

Na závěr je v Ansysu proveden verifikační výpočet optimální konfigurace z důvodu porovnání aproximovaných a přesných hodnot účelové funkce a omezujících podmínek. Tabulka 6-6 prokazuje validnost vypočteného optima.

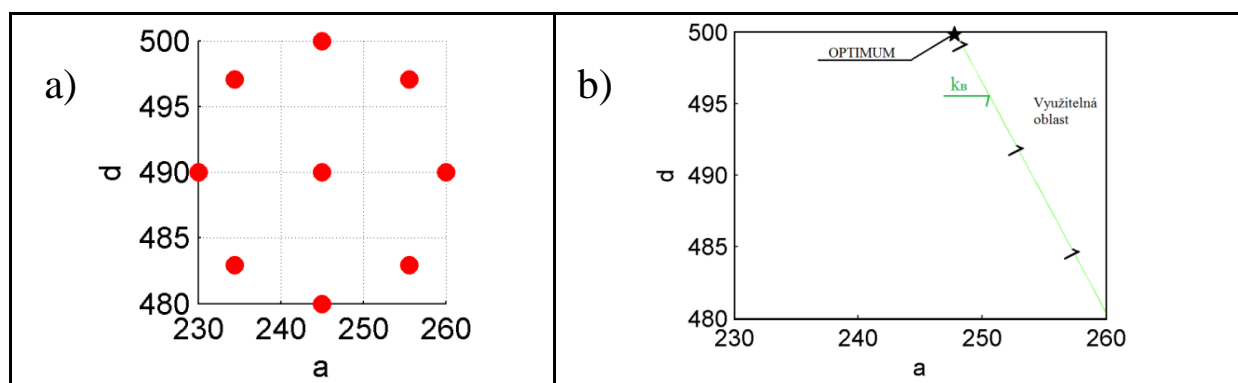
Tabulka 6-2 Hodnocení kvality metamodelů

Plán	Metamodel	R <sup>2</sup>	Radj <sup>2</sup>	REL	MAX
CKP	$\delta$ [mm]	0,9996	0,9990	0,91%	0,04
	$\sigma_{\text{red}}$ [MPa]	0,9997	0,9992	0,76%	1,89
	$k_B$ [-]	0,9865	0,9676	4,55%	0,05
	Obj [mm <sup>3</sup> ]	1,0000	1,0000	0,00%	178
UFP 4x4x4x4	$\delta$ [mm]	0,9992	0,9992	4,06%	0,18
	$\sigma_{\text{red}}$ [MPa]	0,9993	0,9993	3,44%	7,66
	$k_B$ [-]	0,9858	0,9850	7,62%	0,08
	Obj [mm <sup>3</sup> ]	1,0000	1,0000	0,01%	1585
HS 500	$\delta$ [mm]	0,9996	0,9995	1,87%	0,15
	$\sigma_{\text{red}}$ [MPa]	0,9996	0,9996	1,66%	6,27
	$k_B$ [-]	0,9769	0,9763	11,26%	0,10
	Obj [mm <sup>3</sup> ]	1,0000	1,0000	0,00%	1329

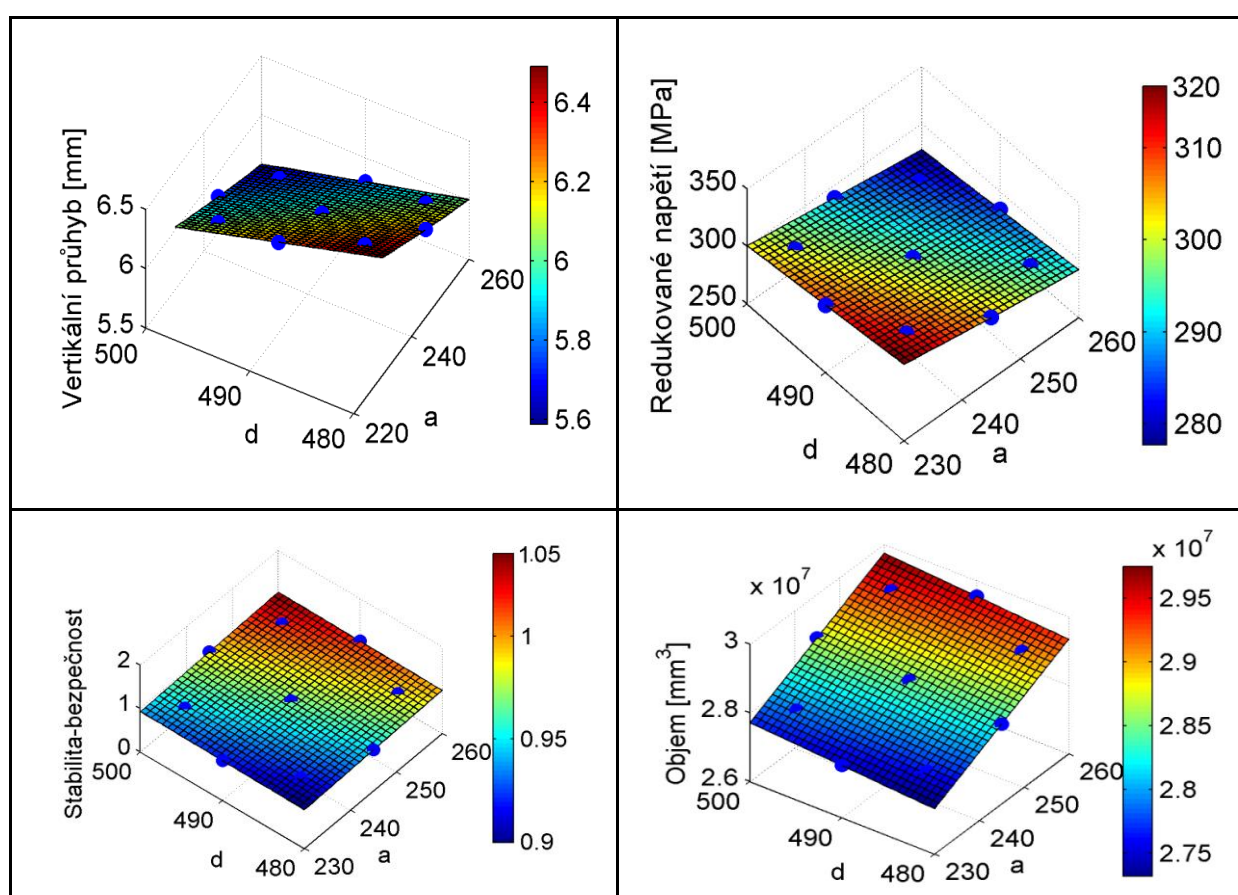
Tabulka 6-3 Optimální hodnoty návrhových proměnných

Experimentální plán	Optimalizační algoritmus	$t_p$ [mm]	$t_s$ [mm]	$a$ [mm]	$d$ [mm]
CKP	SKP	8,2	4,0	240,7	482,7
	GA	8,1	4,0	242,3	482,9
UFP 4x4x4x4	SKP	8,1	4,0	244,7	500,0
	GA	8,2	4,0	241,7	499,9
HS 500	SKP	8,1	4,0	243,8	500,0
	GA	8,3	4,0	237,3	500,0

## 6.2.4 Druhý krok optimalizace



Obr. 6.7 CKP, druhý krok optimalizace, (a,d v mm)



Obr. 6.8 Metamodely omezujících podmínek a účelové funkce, druhý krok optimalizace (a,d v mm)

Tabulka 6-4 Hodnocení kvality metamodelů, druhý krok optimalizace

Plán	Metamodel	R <sup>2</sup>	Radj <sup>2</sup>	REL	MAX
CKP	$\delta$ [mm]	1,0000	1,0000	0,01%	0,018
	$\sigma_{red}$ [MPa]	1,0000	0,9999	0,03%	0,002
	$k_B$ [-]	0,9999	0,9996	0,06%	0,001
	Obj [mm <sup>3</sup> ]	1,0000	1,0000	0,00%	1,412

Tabulka 6-5 Optimální hodnoty, druhý krok optimalizace

Experimentální plán	Optimalizační algoritmus	tp [mm]	ts [mm]	a [mm]	d [mm]
CKP	SKP	8	4	247,8	500,0
	GA	8	4	247,9	499,9

Tabulka 6-6 Verifikace optima přímým výpočtem v Ansysu

tp [mm]	ts [mm]	a* [mm]	d* [mm]	$\delta$ [mm]	$\sigma_{red}$ [MPa]	$k_B$ [-]	Obj [mm <sup>3</sup> ]	Vyhovuje?
8	4	248	500	5,76	286,6	1,00	28936236	ANO

\* Rozměry zaokrouhleny na celé mm nahoru.

## 7 ZÁVĚR

Dizertační práce řeší možnost využití metody konečných prvků a moderních matematických optimalizačních metod při návrhu optimálního rozměrového uspořádání nosných uzlů ocelových konstrukcí manipulačních zařízení. Základem práce je matematicky korektní formulace optimalizačního problému, na jehož řešení je aplikována metodika navržená v rámci práce. Optimalizační metody jsou v rámci práce aplikovány jako součást ucelené metodiky, která využívá parametrické konečno-prvkové modely pro provedení strukturální analýzy v různých konfiguracích navrhovaného uzlu konstrukce a matematické aproximační metody pro popis účelové funkce a omezujících podmínek optimalizace. Limitní zatížení je predikováno pomocí nelineární analýzy stability na imperfektovaných modelech podle doporučení z EC3 pro analýzy provedené metodou konečných prvků. Nelineární analýza s uvážením vlivu imperfekcí dnes představuje nejvyšší výpočtovou úroveň stabilitních analýz. Prezentovaná metodika má univerzální využití, ale práce se blíží zaměřuje na řešení optimálního uspořádání svařovaných nosníků. Lze také říct, že vzhledem k využití EC3 je metodika přímo využitelná pro svařované ocelové konstrukce např. v jeřábové technice, jejíž oborové normy se na Eurokódy přímo odkazují nebo využívají obdobná kritéria. Metodika je zpracována programovou formou umožňující automatické řešení bez intervence výpočtáře.

Práce poskytuje návod pro řešení obdobných optimalizačních problémů. Je však nutno zdůraznit, že aplikace metodiky vyžaduje tvůrčí myšlení kvalifikovaného inženýra, který je seznámen s principem všech využitých metod. Při řešení každého problému totiž existují jistá specifika, která je nutno kvalifikovaně zohlednit.

Případová studie hmotnostní optimalizace skříňového nosníku krok po kroku ilustruje princip metodiky na typickém nosném uzlu vyskytující se v oboru manipulačních zařízení. V rámci studie bylo prokázáno, že klasické responzní plochy jsou plně dostačující pro aproximaci základních pevnostních omezení. Využití tohoto typu metamodelů ve formě spojitě funkce více návrhových proměnných umožňuje rychlý běh optimalizačních algoritmů a možnost vizualizace vlivu jednotlivých proměnných na účelovou funkci a omezující podmínky

optimalizace a tím lepší porozumění řešenému problému. V případě zahrnutí tloušťek plechů spolu s rozměry průřezů do návrhového vektoru se pro aplikaci GA v Matlabu ukázalo jako vhodné vytvořit metamodely nad normalizovaným návrhovým prostorem. Optimalizaci je v takovém případě nutné provést ve dvou krocích, přičemž ve druhém kroku již tloušťky plechů nejsou složkami návrhového vektoru a návrhový prostor nemusí být nutně normalizován. Druhý krok optimalizace je s výhodou proveden v návrhovém prostoru redukovaném na blízké okolí optima, což znamená kvalitnější aproximaci přesnější výsledky. Práce s tloušťkami plechů jako se spojitými návrhovými proměnnými v prvním kroku optimalizace umožní vytvoření spojitěho funkčního popisu hledaných závislostí a tím lepší představu o vlivu jednotlivých návrhových proměnných na účelovou funkci a omezující podmínky. Druhý krok optimalizace již zohlední diskrétní charakter návrhových proměnných diskrétního charakteru (např.: tloušťky plechů).

Je také nutno zmínit, že nejlepšího poměru hmotnosti k únosnosti konstrukce se dosahuje použitím výztuh, které zvyšují kritické zatížení. Navržená metodika je aplikovatelná i na vyztužené konstrukční prvky. Výztuhy musí být součástí parametrického konečno-prvkového modelu. Použití výztuh však závisí na preferencích konkrétní aplikace.

Vzhledem k univerzálnosti je pro výpočetní realizaci případové studie zvolen matematický software Matlab a konečno-prvkový software Ansys. Využití těchto konkrétních programů však není pro aplikaci metodiky podmínkou, protože postup dokumentovaný v práci lze realizovat v libovolných adekvátních programech. Matlab a Ansys však lze doporučit.

Práce je prvotní prací v oboru zdvihací techniky využívající uvedenou kombinaci metod v rámci automaticky pracujícího algoritmu. Bylo prokázáno, že aproximace účelové funkce a omezujících podmínek optimalizace kvadratickým polynomem ve více proměnných v kombinaci s vybranými optimalizačními metodami představuje účinný nástroj pro optimalizaci svařovaných nosníků. Přínosem je také zahrnutí vlivu imperfekcí v rámci nelineární analýzy stability na imperfektovaném výpočtovém modelu podle doporučení z EC3. Postup navržený v rámci práce je využitelný pro libovolné tenkostěnné pruty nebo stěno-deskové prvky ocelových nosných konstrukcí, kde jsou optimalizovány rozměry a tloušťky stěn. Výsledky práce jsou také přímo využitelné v oboru ocelových konstrukcí pozemních staveb.

Další výzkum v oblasti spočívá v možnosti aproximace únavových kritérií a jejich zahrnutí do omezujících podmínek optimalizace. Situace je zde komplikovaná tím, že každá konstrukce obsahuje různé konstrukční detaily, které mají různé únavové charakteristiky. Lze také očekávat silně nelineární závislosti, jejichž aproximace bude vyžadovat využití některé sofistikovanější aproximační metody, jako jsou například radiální bázové funkce nebo umělé neuronové sítě.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

APDL	Ansys Parametric Design Language (skriptovací jazyk Ansysu)
BIT	Beijing Institute of Technology
CAD	Computer Aided Design (Počítačová podpora konstruování)
CAEA	Computer Aided Engineering Analysis (Počítačová podpora inženýrských analýz)
CAX	Systémy počítačové podpory (Computer Aided )
CKP	Centrálně kompoziční plán
CMAA	Crane Manufacturers Association of America
EC3	Eurokód 3
F.E.M.	Federation Europeenne de la Mautention
FL <sub>1</sub>	Limitní zatížení odvozené z dosažení meze kluzu
FL <sub>2</sub>	Limitní zatížení odvozené z dosažení ztráty tuhosti
GA	Genetický algoritmus
HS	Haltonova sekvence
LHS	Latin Hypercube Sampling (Metoda Latinských čtverců)
MAE	Průměrná absolutní chyba metamodelu
MAX	Maximální absolutní chyba metamodelu
MKP	Metoda konečných prvků
Obj	Objem materiálu
REL	Maximální relativní chyba metamodelu
SKP	Sekvenční kvadratické programování
UFP	Úplný faktorový plán
$\hat{Y}$	Aproximovaná závislá proměnná (metamodel)
Y	Závislá proměnná (přesná hodnota)
WLL	Working Load Limit (nosnost)

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A JEDNOTEK

Význam symbolů a jednotky veličin použitých ve vzorcích jsou uvedeny přímo pod jednotlivými vzorci. Následující tabulka uvádí význam symbolů uvedených v textu, obrázcích a grafech spolu s jejich jednotkami. Vektory a matice jsou uvedeny tučným písmem.

Symbol	Jednotka	Popis
a	mm	Šířka pásnic skříňového nosníku
c	mm	Střednicová rozteč stojin skříňového nosníku
d	mm	Střednicová rozteč pásnic prizmatické části skříňového nosníku
$e_{kl}$	mm	Velikost globální imperfekce
$e_{lb}$	mm	Velikost lokální imperfekce
F	N	Síla (obecné označení síly)
$F_{cr}$	N	Zatížení při bifurkaci
$FL_1$	N	Limitní zatížení odvozené z dosažení meze kluzu
$FL_2$	N	Limitní zatížení odvozené z dosažení ztráty tuhosti
$F_{NORM}$	N	Normativní zatížení pro posouzení mezních stavů nosné traverzy
$f_y$	MPa	Napětí na mezi kluzu materiálu
g	$m\ s^{-2}$	Tíhové zrychlení ( $g=9,81\ m\ s^{-2}$ )
$h_1$	mm	Střednicová rozteč pásnic na okrajích nosníku
$k_B$	-	Výsledný součinitel stabilitní bezpečnosti vzhledem k normativnímu zatížení podle vztahu (8)
$k_{B\_L}$	-	Součinitel stabilitní bezpečnosti určený z bifurkačního zatížení $F_{krit}$ vzhledem k normativnímu zatížení podle vztahu (8)
$k_{B\_N}$	-	Součinitel stabilitní bezpečnosti určený z limitního zatížení $F_L$ vzhledem k normativnímu zatížení podle vztahu (8)
L	mm	Délka skříňového nosníku
$L_1$	-	Délka prizmatické části skříňového nosníku
Obj	$mm^3$	Objem materiálu
$R^2$	-	Koeficient determinace
$R^2_{adj}$	-	Upravený koeficient determinace
tp	mm	Tloušťka pásnic
ts	mm	Tloušťka stojin
$U_x, U_y, U_z$	mm	Posuvy v jednotlivých osách souřadnicového systému
WLL	kg	Working Load Limit (nosnost)
<b>X</b>	-	Návrhový vektor (složky tvoří návrhové proměnné)
$x_i$	individuální	i-tá návrhová proměnná
<b>X<sub>i</sub></b>	-	i-tý bod n-rozměrného návrhového prostoru
$\rho$	$kg\ m^{-3}$	Hustota oceli
$\sigma$	MPa	Normálové napětí
$\sigma_{cr}$	MPa	Napětí při bifurkaci
$\sigma_{red}$	MPa	Redukované napětí podle podmínky HMM

## 10 SEZNAM CITOVANÝCH ZDROJŮ

1. British Constructional Steelwork Association. *Handbook of structural steelwork*. 4th edition. London : British Constructional Steelwork Association Ltd. ISBN:978189421741.
2. Design of beams in composite bridges. *SteelConstruction.info*. [Online] Tata Steel, BCSA and the SCI. [Citace: 10. 4 2014.]  
[http://www.steelconstruction.info/Design\\_of\\_beams\\_in\\_composite\\_bridges](http://www.steelconstruction.info/Design_of_beams_in_composite_bridges).
3. ESDEP, The European Steel Design Education Programme. London : SCI, 1993.
4. Petruška, Jindřich. *Počítačové metody mechaniky II*.
5. Liu, G. R. and QUEK, S. S. *The Finite Element Method : Practical course*. : Butterworth Heinemann, 2003. ISBN: 0750658665.
6. Jin, R., Chen, W. and Simpson, T.W. Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria. *Struct.Multidisc. Optim.* 2001, Release 23, pp. 1-13.
7. Kleijnen, J.P.C. Design and Analysis of Computational Experiments: Overview. *Experimental Methods for the Analysis of Optimization Algorithms*. 2010, pp. 51-72.
8. RAJA, V.P., et al., et al. Design Optimization of Complex Structures Using Metamodels. *JJMIE- Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2010, Vol.4, pp. 653-664.
9. Montgomery, D.C. Experimental design for product and process design and development. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*. 1998, Vol. 2, VOL.:48, pp. 159-177.
10. Queipo, N.V., et al., et al. Surrogate-based analysis and optimization. *Progress in Aerospace Sciences*. 2005, Vol.41, Release 1, pp. 1-28.
11. Simpson, T.W., et al., et al. Approximation methods in multidisciplinary analysis and optimization: a panel discussion. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. vol.27, 2004, pp. 302-313.
12. Meckesheimer, M, et al., et al. Metamodeling of combined discrete/continuous responses. *AIAA Journal*. 2001, Vol.39, No.10, pp. 1950-1959.
13. Simpson, T.W., Lin, Dennis,K.J. and Chen, W. Sampling strategies for computer experiments: Design and analysis. *Internal Journal of Reliability and Applications*. 2001, Vol.2, pp. 209-240.
14. Wang, G.G. and Shan, S. Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization. *Journal of Mechanical Design*. 2007, Vol.129, No.4, pp. 370-380.
15. Simpson, T. W., et al., et al. Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations. *Engineering with computers*. 2001, Vol.17, pp. 129-150.
16. Montgomery, D. C. and Runger, G. C. *Applied Statistics and Probability For Engineers*. 3rd edition. : John Wiley & Sons, 2003. p. 720. ISBN:0471204544.
17. Radial basis function. *Scholarpedia*. [Online] [Citace: 1. 8 2012.]  
[http://www.scholarpedia.org/article/Radial\\_basis\\_function](http://www.scholarpedia.org/article/Radial_basis_function).
18. Radial basis function. *Wikipedie-otevřená encyklopedie*. [Online] [Citace: 1. 7 2012.]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Radial\\_basis\\_function](http://en.wikipedia.org/wiki/Radial_basis_function).
19. Rafiq, M.Y., Bugmann, G and Easterbrook, D.J. Neural network design for engineering applications. *Computers & Structures*. 2001, Vol.79,Rel.17, pp. 1541-1552.
20. Stefanov, E. Neural Networks. *EmilStefanov.net*. [Online] [Citace: 10. 6 2012.]  
<http://www.emilstefanov.net/Projects/NeuralNetworks.aspx>.
21. Neuronová síť. *Wikipedie-otevřená encyklopedie*. [Online] [Citace: 1. 7 2012.]  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Neuronová\\_síť](http://cs.wikipedia.org/wiki/Neuronová_síť).
22. Janíček, P. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí*. Brno : CERM, 2007. str. 682. Sv. 1. ISBN: 9788072045549.
23. Neural Network Toolbox. *Mathworks*. [Online] [Citace: 1. 6 2012.]  
<http://www.mathworks.com/products/neural-network/index.html>.
24. Belegundu, A. D and Chandrupatla, T. R. *Optimization concepts and applications in engineering*. 2nd edition. : Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-0-521-87846-3.

25. Rao, S.S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 4rd edition. : John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 978047018352-6.
26. Constrained Nonlinear Optimization Algorithms. *Documentation Center*. [Online] MathWorks. [Citace: 2. 6 2014.] <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html#f26965>.
27. Mareš, T. *Základy konstrukční optimalizace*. Praha : Vlastním nákladem, 2006. Sv. 2. ISBN: 8023965085.
28. Genetický algoritmus. *Wikipedie-Otevřená encyklopedie*. [Online] 24. 2 2014. [Citace: 8. 6 2014.] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Genetick%C3%BD\\_algoritmus](http://cs.wikipedia.org/wiki/Genetick%C3%BD_algoritmus).
29. ČSN EN 1993-1-5 ed.2 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn. 2013.
30. ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. : UNMZ, 2006.
31. Trahair, N.S. *Flexural-Torsional Buckling of Structures*. 1st edition. Boca Raton, Florida : CRC Press Inc., 1993. ISBN:0419171105.
32. Wang, C. M., Wang, C. Y. and Reddy, J. N. *Exact solutions for buckling of structural members*. Boca Raton, Florida : CRC Press LLC, 2004. p. 207. ISBN:0849322227.
33. GALAMBOS, T. V. *Guide to stability design criteria for metal structures*. 5th edition. New York : John Wiley, 1998. str. 911. ISBN:0471127426.
34. Johansson, B, et al., et al. *Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 "Plated structural elements"*. 1st edition. : ECCS, 2007. ISSN:10185593.
35. Beg, D. *Design of plated structures*. 1st edition. Berlin : ECCS, 2010. 978-92-9147-100-3.
36. ECCS Technical committee 8 - Structural stability. *Buckling of steel shells:European design recommendations*. 5th edition. : ECCS, 2008. ISBN: 92914700092.
37. Trahair, N.S, et al., et al. *The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3*. 4rd edition. : Taylor & Francis, 2008. p. 490. ISBN: 0203935934.
38. ČSN EN 13001-3-1 +A1 Jeřáby-návrh všeobecně-část 3-1:Mezní stavy a prokázání způsobilosti ocelových konstrukcí. : UNMZ, 2013.
39. ČSN EN 13155+A2 Jeřáby- Bezpečnost: Volně zavěšené prostředky pro uchopení břemen. : UNMZ, 2009.
40. Bečirovič, A, Vukojevič, D and Hadžikadunič, F. Optimization of double box girder overhead crane in function of cross section parameters of main girder. *15th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology"*. 2011.
41. Gairhe, N.R. Design and optimization of spreader beam. *Indian Streams Research Journal*. 2015, Vol. 5, Rel. 4.
42. Pavlovič, G., et al., et al. Optimization of the Box Section of the Main Girder of the Double Beam Bridge Crane According to the Criteria of Lateral Stability. *Machine Design*. 2012, Vol.4,No.4, pp. 197-204.
43. Tian, G., Zhang, S. and Sun, S. The Optimization Design of Overhead Traveling Crane's Box Girder. *Advanced Materials Research*. 2013.
44. Sun, CH, a další, a další. The Structure Optimization of Main Beam for Bridge Crane Based on An Improved PSO. *JOURNAL OF COMPUTERS*. 2011, Sv. Vol.6, NO.8.
45. Zuberi, R.H., Kai, L a Zhengxing, Z. Design Optimization of EOT Crane Bridge. *International Conference on Engineering Optimization*. 2008.

<b>Jméno, příjmení, titul:</b>	Antonín Šťastný, Ing
<b>Datum a místo narození:</b>	15. listopadu 1980, Kyjov
<b>Státní občanství:</b>	Česká Republika
<b>Vzdělání:</b>	
2010-2015	<b>VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství</b> Doktorské studium (kombinovaná forma) <i>Konstrukční a procesní inženýrství</i>
2002-2005	<b>VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství</b> Magisterské studium <i>Dopravní a manipulační technika</i>
2002-2005	<b>VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství</b> Magisterské studium <i>Dopravní a manipulační technika</i>
1999-2002	<b>VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství</b> Bakalářské studium <i>Stavba strojů a zařízení</i>
1995-1999	<b>ISŠ Hodonín</b> <i>Mechanik-seřizovač pro obráběcí stroje a linky</i>
<b>Zaměstnání:</b>	
2013-současnost	<b>L.K. Engineering, s.r.o.</b> <i>Analytik</i> -statické, dynamické, termální, únavové a seismické analýzy na primárním okruhu jaderných elektráren
2010-2012	<b>VUT Brno, Fakulta Strojního Inženýrství</b> <b>Ústav Automobilního a Dopravního Inženýrství</b> <i>Interní doktorand</i>
2009-2010	<b>Siemens Industrial Turbomachinery, s.r.o</b> <i>Manažer zakázek</i> -řízení zakázek hlavní výroby a zahraniční kooperace
2006-2009	<b>Vetropack Moravia glass a.s.</b> <i>Vedoucí dílny studeného provozu</i> -zodpovědnost za strojní kontrolu kvality, transportní a automatické balicí systémy studeného provozu, vedení týmu 24 zaměstnanců
2005-2006	<b>Vetropack Moravia glass a.s.</b> <i>Konstruktér</i>
<b>Řešené projekty:</b>	
2012	Verifikace výpočtového stavu napjatosti strojních součástí metodou odporové tenzometrie, projekt FRVŠ-G1-121, řešitel
2012	Modelování silových účinků na manipulační zařízení s cílem optimalizace provozních vlastností a snížení provozních a výrobních nákladů, projekt FSI-J-12-13, řešitel
2013	Identifikace modálních parametrů mechanických struktur, FRVŠ-G1-1348, řešitel
<b>Výuka:</b>	
	-Vedení cvičení z předmětů: Mechanické a hydraulické převody a Hydraulické převody strojů
	-Vedení bakalářských prací a diplomové práce

## ABSTRAKT

Předložená dizertační práce se zabývá využitím moderních výpočtových a optimalizačních metod při optimalizaci nosných uzlů ocelových konstrukcí manipulačních zařízení. Cílem práce je návrh ucelené metodiky umožňující generování optimálních rozměrů již koncepčně navržených nosných uzlů ocelových konstrukcí manipulačních zařízení.

Navržená metodika je tvořena souborem dílčích metod, jejichž postupná aplikace vede k optimální rozměrové konfiguraci řešeného uzlu konstrukce vzhledem ke zvolenému kritériu. V práci jsou využívány metody pro plánování experimentů, parametrické konečno-prvkové modely, moderní metody pro hodnocení tvarové stability, matematické aproximační metody a moderní optimalizační schémata založená na gradientní i heuristické bázi. Při řešení nelineární analýzy stability jsou prakticky aplikována doporučení z Eurokódu 3 pro zavádění imperfekcí do konečno-prvkového modelu.

Praktická část práce je zaměřena na optimalizaci svařovaných nosníků. Princip metodiky je krok po kroku ilustrován na případové studii návrhu hmotnostně optimalizované nosné traverzy o nosnosti 20 tun.

V rámci dizertační práce je navržená metodika realizována v prostředí programu Matlab, ve kterém jsou rovněž realizovány některé dílčí metody včetně aplikace matematických optimalizačních metod. Pro srovnání a vzájemnou verifikaci jsou aplikovány gradientní i heuristické metody. Strukturální výpočty jsou prováděny na parametrických konečno-prvkových modelech vytvořených v parametrickém programovacím jazyce APDL systému Ansys. Metodika řeší možnost ztráty tvarové stability tenkostěnných tlakově zatížených prvků konstrukcí pomocí automatizovaného vyhodnocení dat z nelineární analýzy stability na imperfektovaných konečno-prvkových modelech. Výstupem algoritmu je optimalizovaný návrh rozměrů konstrukce, který minimalizuje účelovou funkci a vyhovuje všem požadavkům zadaných v podobě omezujících podmínek.

Klíčová slova: Parametrické modely, MKP, optimalizace, tenkostěnné konstrukce, ztráta stability, metamodel