



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PŘI NÁVRHU LINEÁRNÍ  
OSY TĚŽKÉHO OBRÁBĚCÍHO STROJE**

SYSTEMS METHODOLOGY BY LINEAR AXIS DESIGN OF A HEAVY MACHINE TOOL

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ing. Dominik Hermanský

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA

BRNO 2022

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

virtuálny návrh, metóda konečných prvkov, systémová metodológia, ťažký obrábací stroj, lineárna os

## **KEYWORDS**

virtual prototyping, finite element method, systems methodology, heavy machine tool, linear axis

# OBSAH

1	ÚVOD .....	5
2	SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY .....	5
3	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE .....	8
3.1	Metodika pre systémový návrh lineárnej osi pre ťažký obrábací stroj .....	8
4	PRÍPADOVÉ ŠTÚDIE .....	19
4.1	FUT – TOS Kuřim .....	19
4.2	Zvislé multifunkčné sústružnícke centrum VT-260 AM Finance .....	20
4.3	Analýza stroja FRP – TOS Kuřim .....	21
5	PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE .....	22
6	ZHODNOTENIE DOSIAHNUTÉHO CIELA DIZERTAČNEJ PRÁCE .....	22
7	ZÁVERY A ODPORÚČANIE PRE PRAX .....	23
8	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....	24
9	ŽIVOTOPIS .....	25



# 1 ÚVOD

Globálny trh trieskových obrábacích strojov je dnes mimoriadne rozvinutou a pokročilou oblasťou ekonomiky. Stroje sú vyrábané a dodávané v širokej rozmerovej škále od malých stolových frézok až po rozmerné obrábacie centra pre obrobky o hmotnosti desiatok ton. Z hľadiska technologických operácií trh ponúka na jednej strane jednoduché produkčné stroje a na strane druhej multifunkčné stroje s možnosťou realizácie veľkého množstva technologických operácií na jedno upnutie obrobku.

V oblasti trieskového obrábania sme v posledných dekádach svedkami turbulentného vývoja a pokroku. Dodávatelia obrábacích strojov sú nútení neustále inovovať svoje produkty s cieľom uspokojiť požiadavky svojich zákazníkov, ktorí kladú stále väčší dôraz na zvyšovanie produktivity a pracovnej presnosti strojov a výslednú akosť obrobkov. Na obr. 1 je znázornená množina parametrov, ktoré ovplyvňujú zákazníka pri voľbe CNC obrábacieho stroja. Tieto parametre popisujú technický stav produktu. Ďalšími parametrami ktoré ovplyvňujú rozhodovací proces zákazníka sú dizajn stroja, ergonómia, energetická náročnosť (ekodizajn), spoľahlivosť a iné.

Dôležitým faktorom ktorý ovplyvňuje konkurencieschopnosť dodávateľov strojov je samotný trh. Ako dokáže byť dnes v tvrdej konkurencii firma úspešná, nemusí ovplyvniť len ponuka najvyšších možných technických riešení. Zákazník dneška vyžaduje „hodnotu“. Firmy musia byť agilné aby sledovali potreby a požiadavky svojich zákazníkov, na ktoré budú schopné pružne reagovať a priniesť požadovanú hodnotu. Najčastejšou z nich, obzvlášť v sektore ťažkých strojov je vysoký stupeň kustomizácie finálneho produktu. Pre dodávateľa to väčšinou znamená skonštruovať vždy nový prototyp stroja s presne definovanými parametrami v oblasti presnosti, produktivity, automatizácie a iných. Jedná sa o mimoriadne náročnú úlohu obzvlášť pre konštrukčné a vývojové oddelenie. Často sa stáva že stroj po stránkach presnosti a mechanických parametrov nespĺní očakávania zákazníka. Tento fakt môže byť často spojený s nedostatočnou investíciou firmy do pokročilých metód v priebehu životného cyklu produktu. Je potreba opustiť konvenčné prístupy vo vývoji stroja, ktoré sú z hľadiska časovo-ekonomického nerentabilné a prijať nové trendy v procese návrhu a inovácie produktu.

## 2 SÚČASNÝ STAV RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

V sektore ťažkých obrábacích strojov majú zákazníci neustále sa zvyšujúce požiadavky na výkonnosť, pracovnú presnosť, statickú a dynamickú tuhosť, prípadne teplotnú stabilitu stroja. Je to spôsobené s rozvojom techniky a požiadavkami na vysokú kvalitu finálnych produktov smerujúcich väčšinou do hi-tech odborov (letecký, energetický, lodný, zbrojársky priemysel). V posledných rokoch sme tiež svedkami výrazného pokroku v odbore rezných nástrojov, ktoré užívateľom umožňujú vysoko-produktívne obrábanie a výrazné skrátenie obrábacieho času. Logická je potreba stroja s vlastnosťami, ktoré tento typ obrábania umožní.

Aby boli výrobcovia ťažkých obrábacích strojov schopní zabezpečiť vysoké parametre stroja, je potrebné investovať zdroje do vývojovej fázy produktu. V moderných podnikoch sa stále viac začínajú nasadzovať softvéry (s príslušným výkonným hardvérom), ktoré úzko

súvisia s pojmom „Virtual prototyping“, vo voľnom preklade virtuálne vytváranie prototypov, ktoré dokážu predikovať a následne ovplyvňovať výsledné vlastnosti obrábacieho stroja ešte na vývojovej úrovni. Simulačné analýzy dokážu analyzovať deformácie pri silovom zaťažení obrábacieho stroja, modálne vlastnosti, dynamické parametre, teplotne-deformačné chovanie, vplyv rezného procesu a ďalšie fyzikálne procesy, prípadne dokážu odhaliť medzné stavy, ktoré by mohli viesť k nežiadúcim dôsledkom. Jedna z najdôležitejších podskupín obrábacieho stroja je lineárna os. Pre stanovenie konečných charakteristických parametrov obrábacieho stroja je potrebné tomuto konštrukčnému uzlu venovať náležitú pozornosť. Nie je však možné posudzovať samostatne, ale je potreba pristupovať k danej problematike systematicky a posúdiť chovanie lineárnej osi v kontexte stroja ako celku.

Nároky na obrábacie stroje sa neustále zvyšujú napr. v oblastiach výkonnosti, geometrickej presnosti, teplotnej stability, ovládateľnosti, spoľahlivosti a mnohých iných. Všetky tieto prípady viac alebo menej súvisia s dvomi hlavnými požiadavkami kladenými na obrábací stroj – produktivita a kvalita (akosť) práce. Pri použití konvenčného (trieskového) spôsobu obrábania je možné definovať súbor parametrov, ktoré tieto dve hlavné požiadavky významne ovplyvňujú:

- Obrobiteľnosť materiálu polotovaru
- Rezná rýchlosť a otáčky vretena
- Výkon stroja (vretena)
- Hĺbka rezu
- Rýchlosť posuvu
- Materiál rezného nástroja
- Geometria nástroja
- Chladenie nástroja
- Mechanické vlastnosti stroja

Produktivita práce je výrazne ovplyvňovaná technickou úrovňou obrábacieho stroja. Zvyšovanie produktivity práce logicky súvisí so skracovaním výrobných časov. Celkový výrobný čas je daný súčtom času strojného (z obrobku sa uberá trieska) a vedľajších časov, kedy obrábací stroj nepracuje (napr. upnutie obrobku, výmena nástroja, nastavenie rezných podmienok atď.). Pomer strojného a vedľajšieho času je daný charakterom výroby. Podmienky, ktoré platia pre sériovú a hromadnú výrobu sa líšia od prípadu kusovej a malosériovej výroby. Vedľajšie časy je možné výhodne skracovať s využitím mechanizácie, automatizácie a dômyselných konštrukčných riešení. Strojný čas skrátime zvyšovaním reznej rýchlosti a posuvu, čo má za následok nárast reznej sily. Vyššie rezné a posuvové rýchlosti znamenajú aj vyššie príkony pre vretená a lineárne pohybové osi. S nárastom reznej sily sa zvyšuje statické a dynamické namáhanie obrábacieho stroja a rastie požiadavka na vyššiu statickú a dynamickú tuhosť stroja. Produktivita práce obrábacieho stroja je často definovaná ako maximálny objem odoberaného materiálu za jednotku času (MRR – Material Removal Rate). [1], [3]

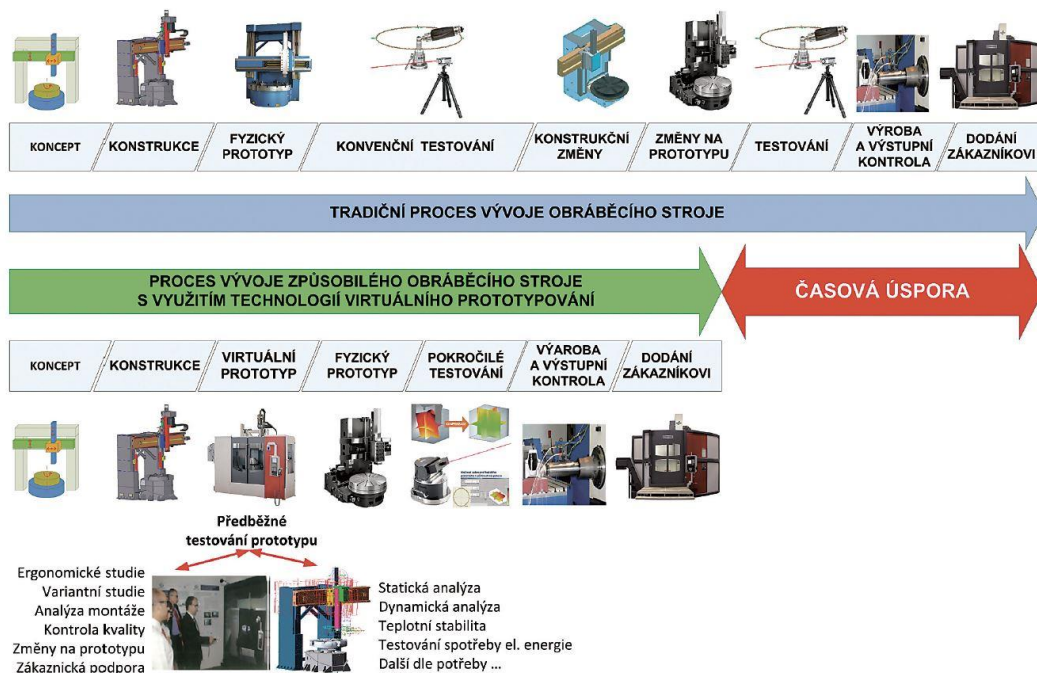
Kvalita práce je stanovená dodržaním tvarovej a rozmerovej presnosti obrobku spolu s akosťou obrobených plôch, v porovnaní s hodnotami predpísanými vo výkresovej dokumentácii. Kvalita je ovplyvnená kinematickou konfiguráciou, statickou a dynamickou tuhosťou, použitým materiálom, presnosťou montáže, geometricou presnosťou atď. Akosť

práce ale nie je závislá len na vlastnom obrábacom stroji. Veľký vplyv má tiež použitá technológia výroby a voľba rezných podmienok. [1] , [2],

Z predchádzajúcich úvah jednoznačne vyplýva, že na produktivitu stroja a na kvalitu obrobenej súčiastky majú zásadný vplyv mechanické prevádzkové vlastnosti stroja. Moderné obrábacie stroje sú mimoriadne zložité mechatronické systémy, na ktoré sú kladené neustále sa zvyšujúce požiadavky týkajúce sa týchto parametrov: [4]

- statická a dynamická tuhosť
- teplotná stabilita
- parametre pohonných sústav
- pracovná presnosť obrábania
- presnosť polohovania

Tradičný prístup produkcie obrábacích strojov spočíva vo výrobe a testovaní fyzického prototypu, na základe ktorého vznikne štandard následne vyrábaný vo väčších či menších sériách s minimálnym počtom konštrukčných zmien. Z hľadiska časového a ekonomického nie je možné v dnešnej dobe tento postup aplikovať. Navyše ťažké obrábacie stroje sú vždy unikátne svojou konštrukciou s vysokým stupňom kustomizácie. Snahou výrobcov je vyrobiť stroj v najkratšom možnom čase pri splnení všetkých požiadaviek a zahrnutí inovačných prvkov. Preto sú fyzické prototypy z konzervatívneho prístupu nahrádzané modernými virtuálnymi prototypmi. Rozdiel medzi oboma spôsobmi je zrejmý z obr. 2. Virtuálny model je vlastne počítačom vytvorená analýza ktorá umožňuje testovať stroj a predikovať jeho vlastnosti už v predvýrobnej fáze a následnými úpravami vo viacerých iteratívnych cykloch je dosiahnutá optimálna konštrukcia s požadovanými parametrami. : [2]



Obr. 1 Porovnanie tradičného prístupu vývoja stroja a procesu vývoja s využitím virtuálneho prototypu [3]

### 3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Hlavným cieľom dizertačnej práce je vytvorenie systémového prístupu pre návrh lineárnej osi pre ťažký obrábací v prototypovej fáze s využitím simulačných prostriedkov. Tento spôsob návrhu by mal viesť k lepšiemu pochopeniu systému lineárnej osi v kontexte stroja ako celku. Finálnym výstupom bude metodika a súbor odporúčaní pre konštrukčné a vývojové oddelenie, ktoré by mali výrazne zefektívniť návrh ťažkého obrábacieho stroja a jeho lineárnej osi s cieľom dosiahnuť optimálne finálne parametre.

V súlade s danou témou a problematikou boli stanovené tieto čiastočné ciele, bez ktorých nie je možné dosiahnutie hlavného cieľa:

- pochopiť obrábací stroj a jeho lineárnu os ako komplexný systém
- vytvorenie pokročilého, komplexného výpočtového modelu obrábacieho stroja s dôrazom na chovanie pri pôsobení statických a dynamických síl
- experimentálne overenie a odladenie modelov
- experimentálne získanie potrebných fyzikálnych veličín pre okrajové podmienky modelu
- citlivostná analýza posúdenia vplyvu konkrétnej lineárnej osi na prejavy celého stroja
- zostavenie metodiky návrhu lineárnej osi pre ťažký obrábací stroj s rešpektovaním všetkých vzťahových entít (systémový prístup)
- využitie metodiky pri návrhu nového ťažkého obrábacieho stroja – prípadová štúdia

Táto metodika bude využiteľná pre:

- Vývoj prototypu ťažkého obrábacieho stroja bez ohľadu na kinematickú konfiguráciu
- Optimalizáciu konkrétnych skupín stroja
- Modulárnu konfigurovateľnosť konkrétneho typu obrábacieho stroja (rôzne veľkostné a výkonnostné prevedenia)

#### 3.1 Metodika pre systémový návrh lineárnej osi pre ťažký obrábací stroj

Navrhovaná metodika vychádza zo všeobecných princípov, ktoré sú platné pre akýkoľvek obrábací stroj, ale ťažké stroje majú svoje špecifiká, preto metodika nebude zovšeobecnená. Je prakticky overená a platná len pri návrhu ťažkého stroja.

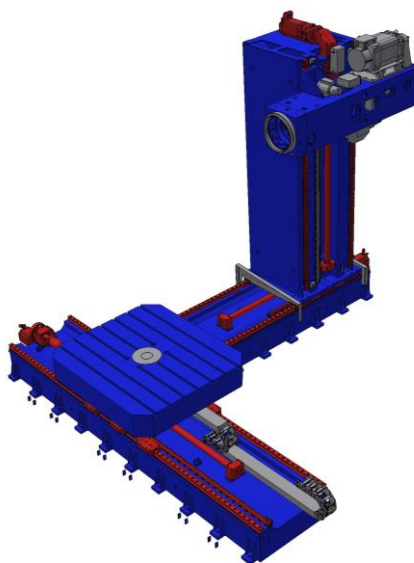
Ako je uvedené v predchádzajúcej kapitole, nemôžeme zabúdať na súčinnosť všetkých častí stroja, pretože ten sa chová ako celok. Na obr. 57 sú farebne znázornené jednotlivé skupiny stroja:

- nosná sústava (štruktúra) – modrá
- lineárne osi – červená
- ostatné – šedá

Môj systémový prístup spočíva v tom, že nie je možné stroj rozdeliť na jednotlivé skupiny, ale je vždy nutné posudzovať ako celkovú zostavu, na ktorú pôsobia tieto dielčie skupiny. Z týchto dôvodov je potreba v navrhovanej metodike postupovať nielen z pohľadu lineárnych osí, ale aj všetkých ďalších častí, ktoré výsledné parametre stroja ovplyvňujú. Konštruktér následne na základe metodiky bude schopný exaktne stanoviť vopred požadované parametre a to pre každú lineárnu os, ktorú chápem ako:



- náhonová sústava
- príslušné časti nosnej sústavy



*Obr. 2 Znáozornenie skupín stroja [TOS Kuřim]*

## Štruktúra metodiky:

### I. Stanovenie vstupných parametrov

V procese vývoja nového prototypu ťažkého stroja sa stáva, že nie vždy sú pri štarte projektu k dispozícii všetky potrebné parametre. Niekedy sa zadanie mení v priebehu vývojového a konštrukčného procesu napríklad z dôvodu zásahu zákazníka do konštrukcie stroja, výpadku subdodávateľa dôležitých komponent...atď. V ideálnom prípade, by ale zúčastnené subjekty mali mať vopred stanovené a nemenné požiadavky na stroj a teda vstupné parametre pre vývojový proces. Jedná sa o súbor parametrov, ktoré majú vplyv na mechanické prevádzkové charakteristiky. Konkrétne je potrebné stanoviť minimálne tieto parametre:

- typ stroja (kinematická konfigurácia)
- typy realizovaných technologických operácií na stroji (percentuálne vyjadrenie)
- maximálne rezné sily pôsobiace na stroj
- maximálne zastavbové rozmery stroja
- maximálna hmotnosť stroja
- maximálna hmotnosť a rozmery obrobku
- stanovené fixné rozmerové parametre (napríklad priemer upínacej dosky)
- výkonové parametre (vreteno, karuselovací stôl...)
- rozsah pojazdov, rýchlosti a zrýchlenia v jednotlivých osách
- technologické a ekonomické obmedzenia

### II. Stanovenie výstupných parametrov

Obdobne ako pri vstupných parametroch je potreba poznať aj požadované hodnoty výstupných veličín. Neexistujú žiadne obecné manuály, normy, predpisy kde sú uvedené konkrétne hodnoty (čísla) daných veličín. Kvantifikácia týchto parametroch vychádza výlučne zo skúseností a znalostných databáz výrobných podnikov. Konkrétne je potreba vopred stanoviť požadované hodnoty týchto parametrov:

- požadovaná statická tuhosť stroja
- požadovaná dynamická tuhosť stroja
- požadovaná miera teplotnej stability\*

\* Teplotnú stabilitu uvádzam, pretože je to možné do tejto metodiky zahrnúť, dokonca v rámci výskumu pre účely tejto práce boli realizované viaceré projekty s cieľom dosiahnuť teplotne stabilný stroj, konštrukčnými úpravami v predvýrobnej fáze alebo dodatočnými zásahmi na samotnom stroji. Daná problematika je ale mimoriadne robustná a zložitá, preto budem síce zmieňovať v metodike, ale len v teoretickej rovine. Primárne bude pozornosť zameraná na mechanické charakteristiky – statika, dynamika.

### III. Vytvorenie konceptu stroja

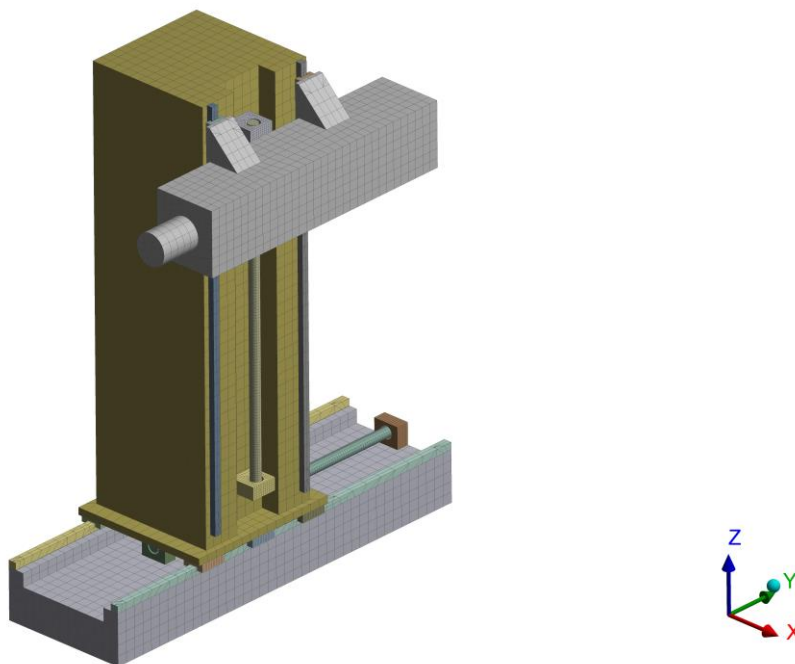
Koncept stroja je vytvorenie zástavovej konštrukcie stroja, na ktorej sa vizuálne overuje zástavba stroja, rozsahy pojazdov, možné kolízie častí stroja, konfigurácie jednotlivých rozmerových variant, layout a podobne. Tento koncept slúži následne ako podklad pre detailnú konštrukciu. V tejto fáze vývoja je výstupom nasledovné:

- - kinematická schéma stroja
- - 3D CAD adaptabilný model
- - 2D rozmerový výkres

Z hľadiska predstavivosti a minimalizácie chýb je z praktického hľadiska najlepšou voľbou adaptabilný 3D CAD model. Jedná sa o 3D model zástavby stroja, s možnosťou adaptabilného pohybu jednotlivých komponent v daných pohybových osiach. Moderné systémy umožňujú kvalitnú vizualizáciu a animáciu s možnosťou nastavenia krajných medzných polôh.

#### Mechanický koncept

Jedna sa o môj originálny prístup k vývoju ťažkého obrábacieho stroja a jeho lineárnej osi. Využíva princípy systémového prístupu a pokročilých metód z teórie modelovania. Prístup spočíva v tom, že pri prechode od konceptu stroja, popísaného v predchádzajúcom texte k detailnej konštrukcii stroja sa vytvorí ešte jeden medzikrok, ktorý som nazval „Mechanický koncept“. Zo zástavového modelu, ktorý slúžil na vizualizáciu rozmerových parametrov sa vytvorí model mechanický, ktorý umožní stanoviť požadované mechanické parametre stroja a jednotlivých komponent (nosná sústava + lineárna os) ešte pred realizáciou samotnej konštrukcie stroja.



*Obr. 3 Mechanický koncept obrábacieho centra s vodorovnou osou vretena*

Jedná sa o výpočtový model, ktorý je v mojej metodike koncipovaný na báze metódy konečných prvkov (MKP). Mechanický model má tieto parametre:

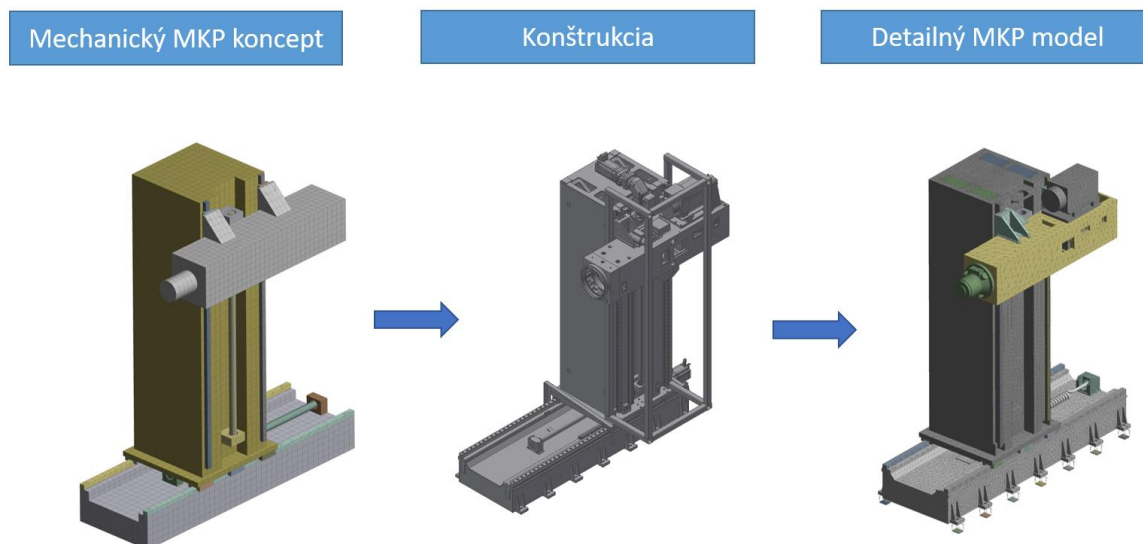
- všetky entity sú bez detailnej topológie (rebrovanie, striktné geometrické rozmery...)
- každá entita má dva parametre – tuhosť a hmotnosť
- z výpočtového hľadiska je tuhosť a hmotnosť definovaná pomocou dvoch materiálových charakteristík - modulu pružnosti a hustoty
- každý diel ma priradený unikátny (výpočtový) modul pružnosti a hustotu
- variáciou (zmenou) týchto parametrov, je možné sledovať vplyv zmeny tuhosti a hmotnosti jednotlivých dielov na celkové chovanie stroja
- prvky lineárnej osi musia vždy korešpondovať s vlastnosťami nadväzujúcich častí nosnej sústavy (napríklad ak sa zvýši hmotnosť pohyblivej časti, je potreba aktualizovať časti lineárnej sústavy – náhon + vedenie tak, aby odpovedali danému zaťaženiu a požadovaným vlastnostiam – rýchlosť, zrýchlenie, trvanlivosť ložísk atď.)
- geometria všetkých častí „mechanického modelu“ musí byť „dostatočne jednoduchá“ aby bolo možné vytvoriť jednoduchú konečnoprvkovú sieť tvorenú z veľkej časti HEX (hexahedral) elementami
- výpočtový model dokáže potom veľmi pružne a rýchlo spočítať veľké množstvo rôznych variant a konfigurácií
- pri tvorbe modelu je potreba postupovať podľa obecných zásad modelovania, ktoré sú vysvetlené v kapitole V tejto metodiky.
- rozmerové parametre (zástavba) jednotlivých dielov je možné meniť len v „rozumných“ medziach, aby nebola narušená rozmerová koncepcia stroja

Výstupy z mechanického konceptu:

- požadované hmotnosti a tuhosti dielov nosnej sústavy
- požadované tuhosti lineárnych valivých vedení
- tuhosť guľôčkovej skrutky a matice vrátane uloženia v ložiskových domčekoch
- podiel jednotlivých komponent na celkovej statickej a dynamickej tuhosti stroja
- teplotne-mechanické javy je na tejto úrovni modelu bez detailnej topológie veľmi náročné skúmať

#### IV. Detailná konštrukcia stroja

Prínos mechanického konceptu spočíva v tom, že konštruktéri, ktorí sa budú zaoberať detailnou konštrukciou nosných sústav a lineárnych (rotačných) osí už vopred budú na základe výpočtov, vedieť aké tuhostné a hmotnostné parametre musia mať konkrétne entity, a ako by mali vyzeráť vzťahy medzi nimi.



*Obr. 4 Postup pri tvorbe konštrukcie a MKP modelu CNC stroja*

Najdôležitejšou otázkou je, ako dosiahnuť parametre (tuhosť a hmotnosť) reálneho dielu, napríklad lôžka v zhode s modelom mechanického konceptu, resp. ako overiť túto zhodu na výpočtovej úrovni. Odpoveď je – modálna analýza. Výpočet vlastných frekvencií a odpovedajúcich deformačných tvarov konkrétneho dielu vo voľnom stave a porovnanie. Navyše je tento parameter možné veľmi jednoducho overiť aj experimentálne. Ak má daný diel identické rozmerové parametre, identickú hmotnosť tak zmeny v tuhosti sú dané len úpravou topológie. Ladením vnútornej topológie (rebrowaním), prípadne úpravou materiálu sa snažíme priblížiť k vlastnej frekvencii referenčného dielu. Názorné vysvetlenie bude realizované v nasledujúcej kapitole na prípadovej štúdii.

## V. Vytvorenie detailného MKP modelu stroja

### Podmnožina S0:

Za okolie entity stroja považujeme okolie stroja vo výrobnej hale (vzduch) a tiež základ stroja ku ktorému je stroj kotvený. Keďže predmetom nie je skúmanie teplotných deformácií ani chovanie základu pod strojom, tieto veličiny zanedbáme. Základ stroja bude považovať za dokonale tuhý.

### Podmnožina S1

Jedná sa o veličiny, ktoré popisujú štruktúru a topológiu entity. Patria sem všetky konštrukčné prvky, z ktorých sa skladá obrábací stroj (časti nosnej sústavy, lineárne a rotačné osi, kotvenie stroja, nástroj...atď.). Konkrétne sa jedná o rozmiestnenie jednotlivých prvkov entity v priestore (topológia) a ich vlastná geometria, tvar.

### Podmnožina S2

Ťažké stroje sú kotvené k základu pomocou staviteľných pätiiek. Tieto pätky majú určitú tuhosť udávanú výrobcom vo vzájomne kolmých smeroch. Päťka je vo výpočtovej analýze nahradená väzbou s presne definovanými tuhosťami v konkrétnych smeroch.

Lineárne osi sú tvorené mechanickou náhodnou sústavou a lineárnym vedením. Z hľadiska výpočtového modelu sú tieto objekty modelované kombináciou poddajných telies a sústavou pružných väzieb (napríklad tuhosť v ložiskách, tuhosť medzi vozíkom a koľajnicou vedenia, tuhosť dvoch trecích klzných plôch...)

Parametre tuhosti gulôčkovej skrutky a matice je možné stanoviť podľa normy ISO 3408-1:2006 (Part 4 – Static axial rigidity). Pri MKP modelovaní je možné skrutku modelovať ako 3D objemové teleso alebo nahradiť pomocou „beam“ prvku. Z hľadiska presnosti výpočtovej analýzy je potreba zadať správne tuhosti v kontaktoch (matica-skrutka, ložiská). Hodnoty týchto tuhostí sa zadávajú do tabuľky a je potreba definovať tuhosti vo všetkých potrebných rovinách a smeroch pôsobenia.

Ďalšie prvky výpočtových modelov ako sú napríklad skrutkové spoje, klzné vedenie, pohon pomocou systému ozubený hrebeň-pastorok a ďalšie, sú z výpočtového hľadiska náročnejšie na realizáciu, kde nie je možné jednoducho zistiť parametre tuhosti, prípadne tlmenia v týchto entitách. Preto je potrebné realizovať viaceré pokročilé doplnujúce výpočty, ktoré väčšinou vedú na nelineárne úlohy. Výsledky z týchto výpočtov sú potom použité ako okrajové podmienky pre komplexný model. Popis týchto postupov a metód nie je súčasťou tejto práce.

### Podmnožina S3

Za aktiváciu veličiny z okolia je možné považovať:

- sily od rezného procesu – statické (kvazistatické)
- sily od rezného procesu – dynamické
- gravitačné zrýchlenie
- budiace sily od rotujúcich nevyvážených častí
- teplotné ovplyvnenie z okolia

### **Podmnožina S4**

Táto podmnožina kvantifikuje ovplyvňovanie entity jej vlastným okolím. Do tejto skupiny môžeme zaradiť napríklad povahu rezných síl, ktoré spôsobujú nežiadúce statické a dynamické odchýlky špičky nástroja od teoretickej trajektórie. Vzhľadom k tomu, že vo fáze návrhu vystačíme s obmedzenými parametrami a navyše pracujeme s hodnotami pomernými (relatívnymi) – statická / dynamická tuhosť nie potreba exaktne poznať tieto charakteristiky.

### **Podmnožina S5**

Do tejto skupiny patria veličiny, ktoré vyjadrujú vlastnosti objektov entity. Konkrétne sa jedná rozmerové a materiálové charakteristiky. Zahŕňa to napríklad:

- vnútorná topológia (rebrovanie) častí nosnej sústavy
- materiálové charakteristiky (modul pružnosti, Poissonov pomer, hustota...)
- rozmerové veličiny všetkých prvkov

### **Podmnožina S6**

Vzhľadom k tomu že riešime problém na makroúrovni, procesy ktoré prebiehajú v štruktúre jednotlivých objektov nás nezaujímajú.

### **Podmnožina S7**

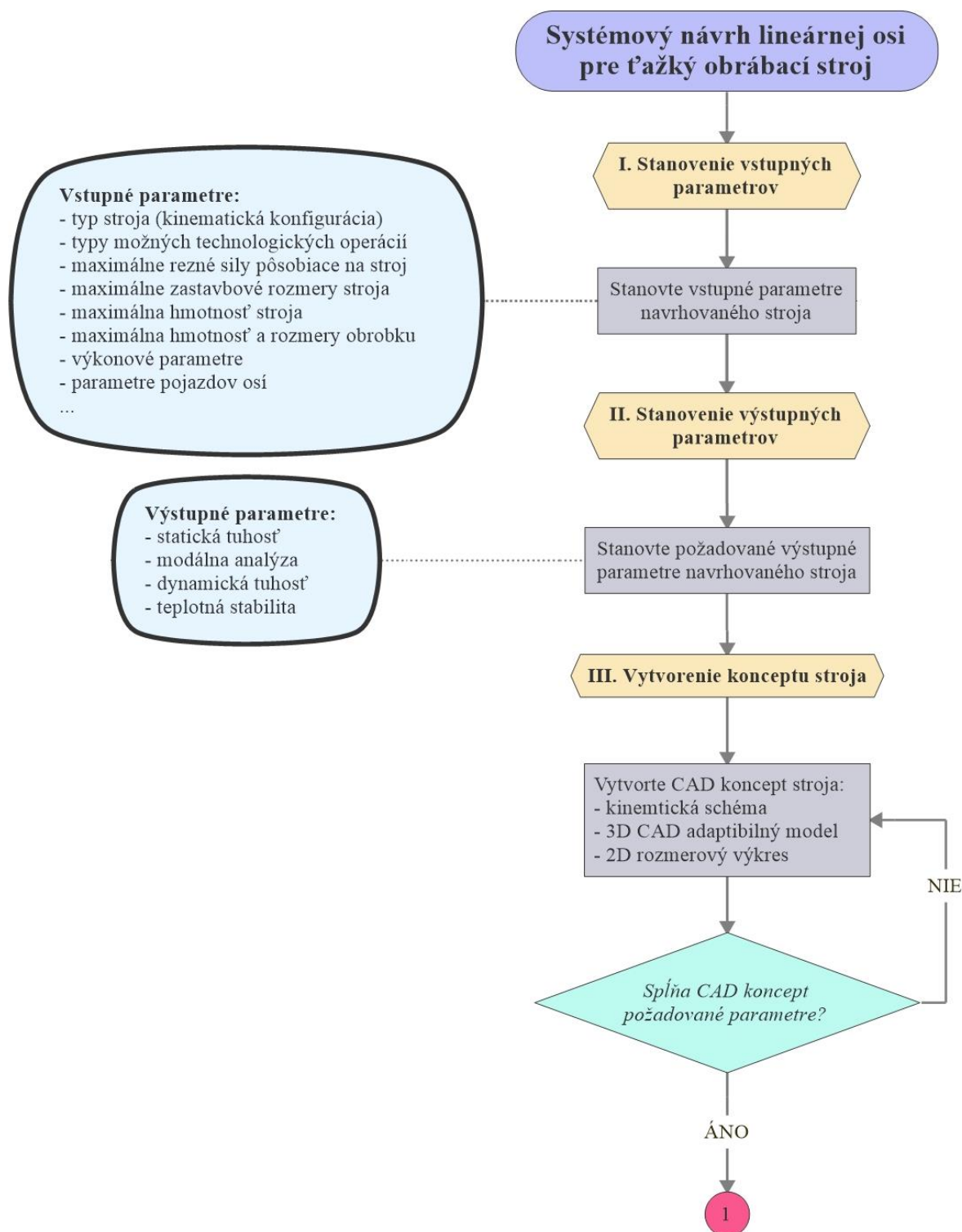
Pôsobením aktivačných veličín na entite (obrábací stroj) prebiehajú rôzne zmeny. Konkrétne pri pôsobení silového zaťaženia dochádza na entite k deformačným zmenám statickým alebo dynamickým. V prípade pôsobenia teplotných gradientov dochádza na entite k zmene rozloženia teplôt v štruktúre stroja.

### **Podmnožina S8**

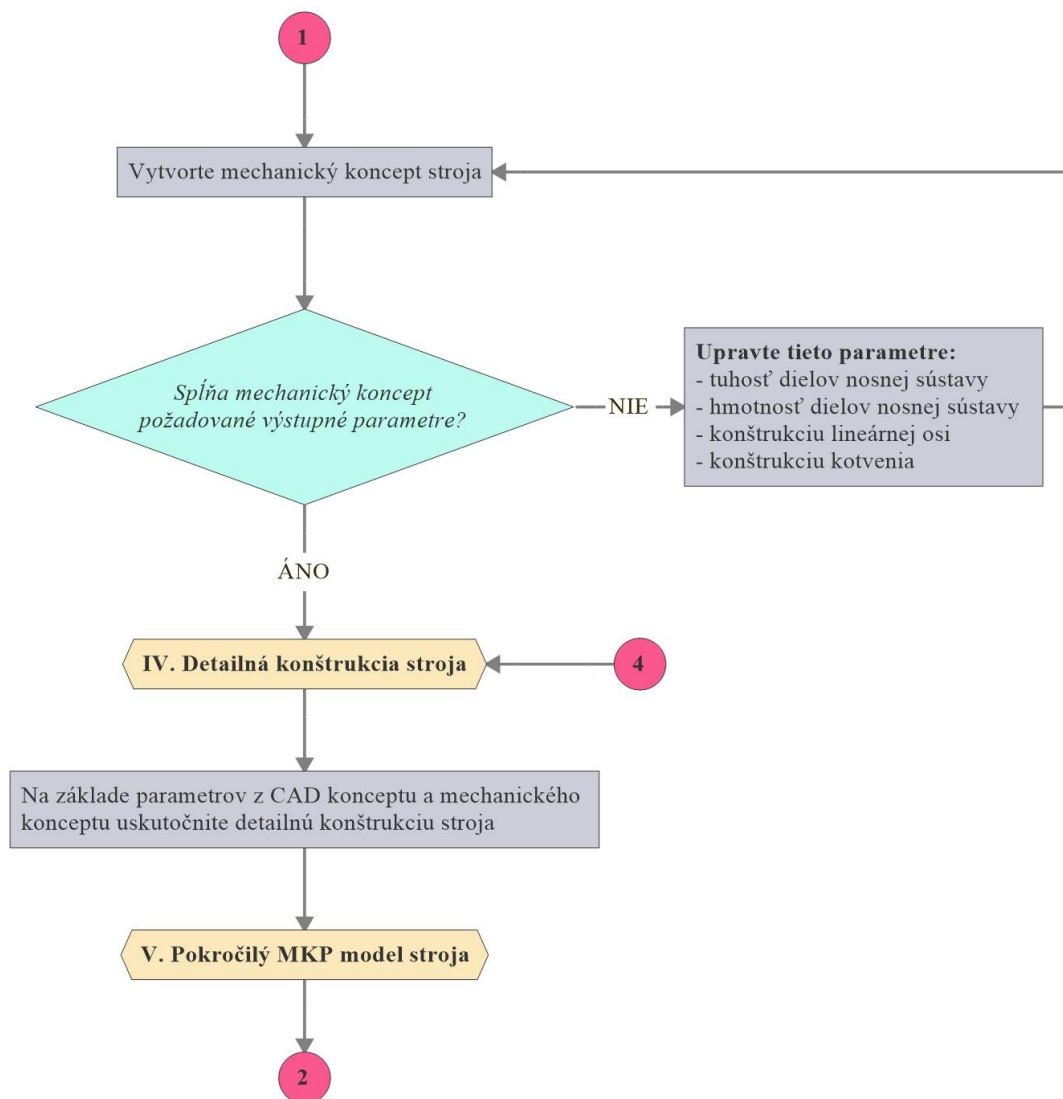
Dôsledkom je nežiadúca deformácia častí entity, ktorá sa môže kumulovať a prenáša sa na špičku nástroja. V prípade odchýlky konca nástroja od teoretickej trajektórie sa logicky znižuje pracovná presnosť stroja. Odolnosť voči statickým a dynamickým silám sa nazýva statická, resp. dynamická tuhosť. Opakom tuhosti je poddajnosť.

## **VI. Verifikácia a testovanie**

Po vyrobení stroja je potrebné výpočtové modely odladiť a verifikovať na základe výsledkov experimentov. Napríklad dynamické parametre systému sú zisťované experimentálnymi metódami. Pri analýze vibrácií obrábacieho stroja je najdôležitejšie určenie frekvenčnej prenosovej funkcie mechanickej sústavy stroja. Frekvenčná prenosová funkcia dáva do vzťahu odozvu systému na budenie. Pri zisťovaní dynamických parametrov mechanickej sústavy obrábacieho stroja sa väčšinou realizujú dva typy analýz – modálna analýza a FRF analýza (frequency response function).

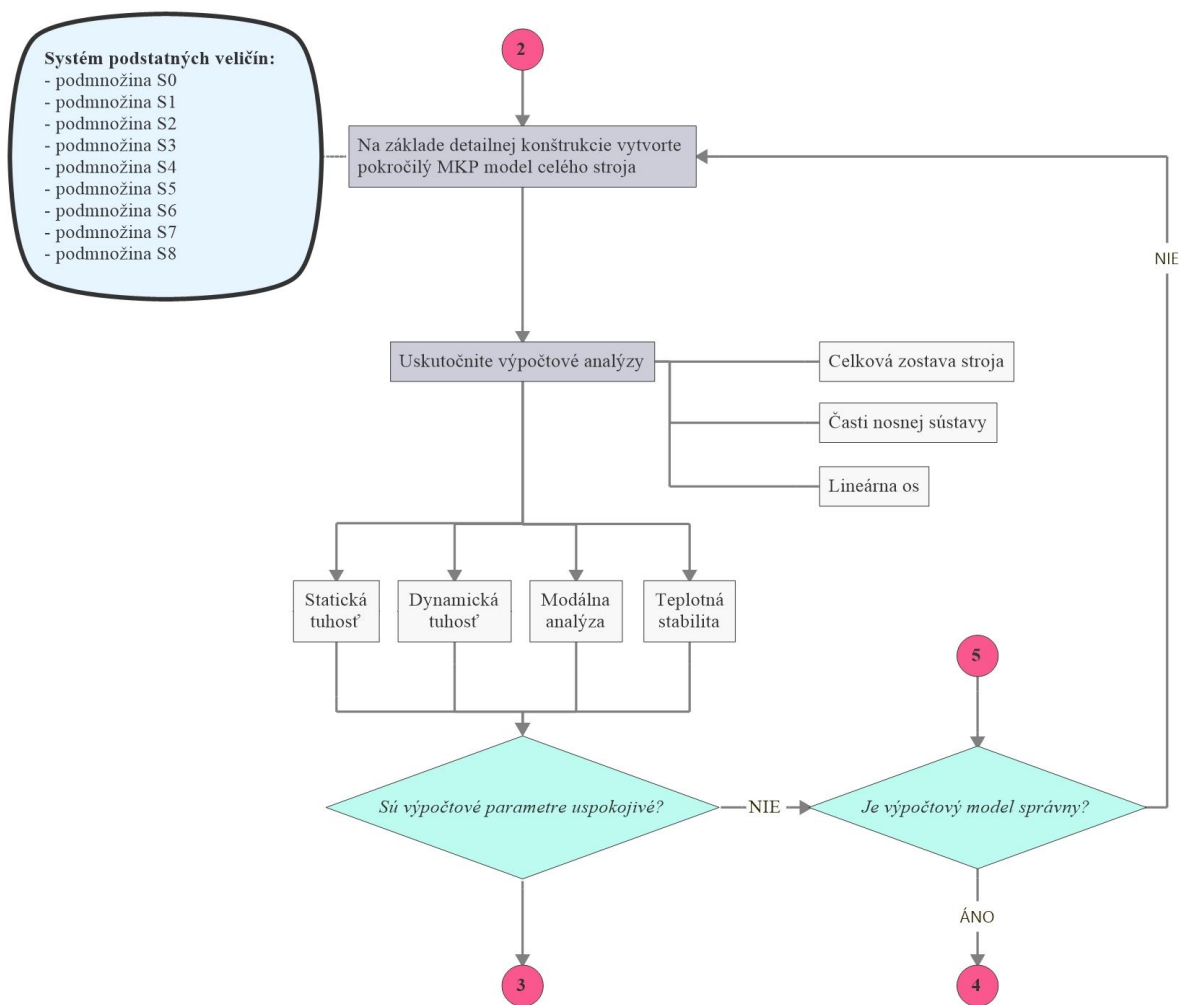


Obr. 5 Metodika - časť 1

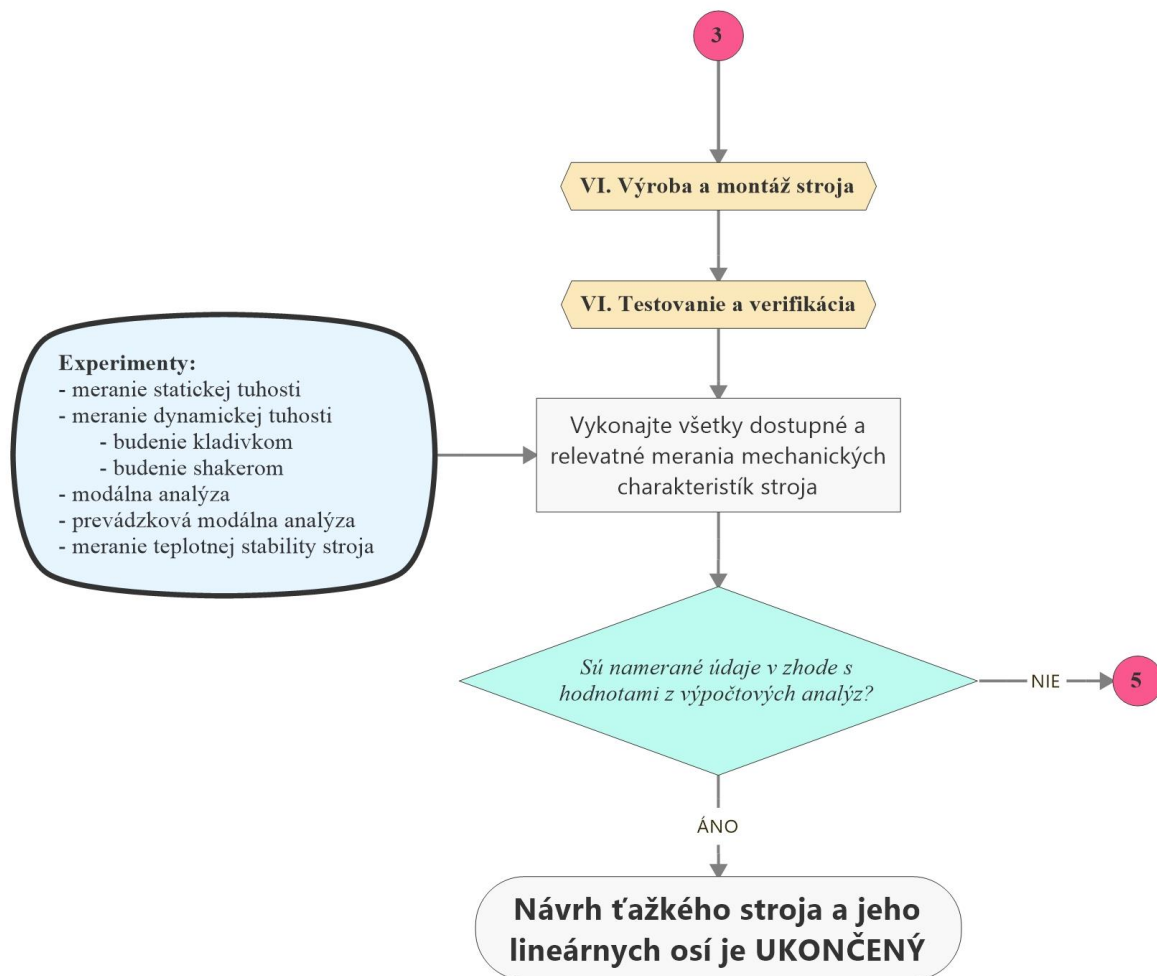


Obr. 6 Metodika - časť 2





Obr. 7 Metodika - časť 3



Obr. 8 Metodika - časť 4

## 4 PRÍPADOVÉ ŠTÚDIE

### 4.1 FUT – TOS Kuřim

Vôbec prvý stroj, na ktorom bola použitá metodika popísaná v predchádzajúcej kapitole bol stroj FUT, frézovacie (vyvrtávacie) centrum s krížovým stolom z produkcie spoločnosti FUT. Pre tento stroj boli vyvinuté nové pokročilé nosné štruktúry z oceľobetónového kompozitu. Okrem toho sa vyznačuje vysokými pojazdovými rýchlosťami a zrýchleniami (rýchlosposuv až 30m/min)



*Obr. 9 Stroj FUT - TOS Kuřim*

Výsledkom analýzy boli viaceré zaujímavé výstupy, konkrétne:

- požadované tuhosti a hmotnosti častí nosnej sústavy
- na základe toho vzniklo lôžko stroja z oceľobetónového kompozitu – oceľový zvärok vyplnený vysokopevnostným betónom v celom objeme
- stojan bol koncipovaný obdobne z oceľobetónového kompozitu, ale betónová výplň nebola realizovaná v celom objeme z dôvodu dosiahnutia vypočítanej hmotnosti
- boli navrhnuté lineárne valivé (profilové vedenia), ktoré boli oproti teoreticky vypočítaným (únosnosť, trvanlivosť...) zväčšené o jednu radu z dôvodu výrazného vplyvu na dynamickú tuhosť celého stroja

- guľôčkové skrutky boli navrhnuté z ohľadom na požadované rýchlosti a zrýchlenia jednotlivých osí, ale z mechanického konceptu bolo zistené, že zvýšenie parametrov (celková tuhosť) skrutky a matice neovplyvní výrazne v pozitívnom zmysle aj celkovú tuhosť stroja

#### 4.2 Zvislé multifunkčné sústružnícke centrum VT-260 AM Finance



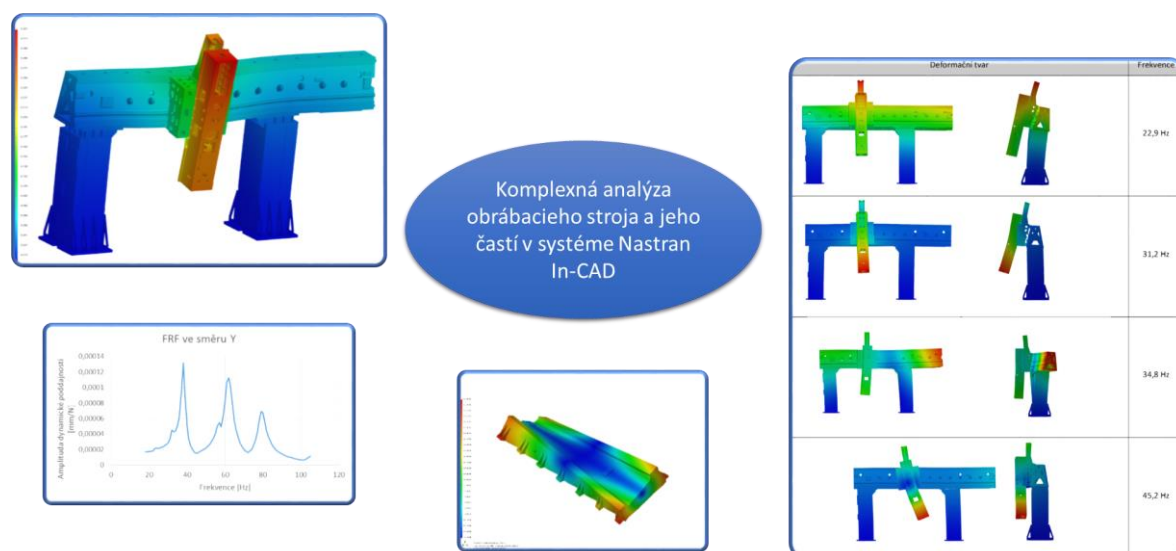
*Obr. 10 VT-260 (AM Finance)*

Jedná sa o multifunkčné obrábacie centrum zo zvislou osou vretena. Prevažujúca operácia je sústruženie, ale s možnosťou plnohodnotného obrábania inými typmi nástrojov. Tento stroj má vybrané časti nosnej štruktúry tiež z oceľobetónového kompozitu. S využitím popísanej metodiky boli na stroji optimalizované nasledovné skupiny:

- optimalizácia lôžka stroja
- optimalizácia lineárnych osí v osách X a Y
- optimalizácia priečnika, čiastočne vyplnenie betónom pri zachovaní optimalnej hmotnosti
- optimalizácia stojanov vyrobených z oceľobetónového kompozitu
- posúdenie a optimalizácia kombinovaného klzno-valivého vedenia

### 4.3 Analýza stroja FRP – TOS Kuřim

Tu by som len krátko chcel zmieniť, že pri tomto projekte a pri aplikácii mnou navrhnuté metodiky došlo k malej odchýlke oproti ostatným projektom. Všetky projekty vývoja ťažkých obrábacích strojov a ich lineárnych osí boli riešené v rámci výskumu s možnosťou využitia robustného a zrejme najznámejšieho MKP softvéru Ansys. Tento softvér zvláda prakticky všetky fyzikálne úlohy, ktoré je možné riešiť s využitím numerickej metódy konečných prvkov. Nevýhodou toho softvéru je jeho mimoriadne vysoká cena a tým pádom si môžu dovoliť jeho prevádzku len výskumné organizácie, resp. vysoké školy. Z toho dôvodu bolo snahou nahradiť tento softvér niečím cenovo a užívateľsky dostupnejším. Bol zvolený softvér Autodesk Nastran In-CAD. Pri implementácii tohto softvéru v rámci vyvinutej metodiky boli v rámci projektu vývoja portálového obrábacieho centra FRP – TOS Kuřim, vytvárané súbežne výpočtové modely v oboch prostrediach, ako ANSYS, tak aj Nastran. Dosiahnuté výsledky všetkých potrebných analýz sa pri vyhodnotení projektu zhodovali, resp. boli takmer 100% identické. Preto je možné pre navrhnutú metodiku použiť aj softvér, ktorým disponuje prakticky akákoľvek konštrukčná kancelária.



Obr. 11 Využitie výpočtového softvéru Autodesk Nastran In-CAD

## 5 PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE

Prínos dizertačnej práce je možné posudzovať v dvoch rovinách:

- aplikácia systémového prístupu
- praktická metodika s prípadovými štúdiami

Aplikácia systémového prístupu dáva návod ako sa pozerat' komplexne na problémy a ich riešenie. Častokrát daný problém je vedome alebo nevedome prehliadaný. V tomto prípade už len formulácia problému poukazuje na to, že častokrát prístupy k návrhu a konštrukcii strojov sú živelné, vychádzajú síce zo skúseností a praxe, ale obmedzujú potenciál využitia nových metód.

Praktická časť pojednáva o metodike pri návrhu a vývoji ťažkého obrábacieho stroja spolu s jeho lineárnymi osami. Za veľký prínos tejto práce považujem vytvorenie komplexných modelov MKP, ktoré sú použiteľné a prenositeľné za určitých podmienok v podstate na akýkoľvek typ CNC obrábacieho stroja. Tieto modely boli postupne vyvíjané a zdokonaľované v reálnej praxi. Bohužiaľ nie je možné v rámci jednej dizertačnej práce postihnúť celé spektrum zákonitostí a súvislostí. V niektorých oblastiach priemyslu sa modelovanie využíva pri vývoji prototypov úplne samozrejme, z vlastnej skúsenosti viem, že v sektore obrábacích strojov hlavne u domácich výrobcov, je toto využitie častokrát výrazne obmedzené a v niektorých prípadoch dokonca úplne absentuje. Verím že aj v tomto by mohla byť moja práca prínosom a môže ukázať že komplexný a systémový prístup v súčinnosti s modelovaním a experimentom je cesta k návrhu prototypu obrábacieho stroja, ktorý bude vykazovať aj po vyrobení vopred stanovené a vytýčené parametre.

## 6 ZHODNOTENIE DOSIAHNUTÉHO CIEĽA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Ciele dizertačnej práce vznikli v prostredí priemyslovej praxe, kde som mal možnosť sa naplno zapojiť do vývoja nových prototypov obrábacích strojov. V počiatočnom výskume a vývoji boli naše znalosti značne obmedzené, ale dovoľm si tvrdiť že po realizácii viacerých projektov, ktoré boli v podstate všetky z technického hľadiska úspešné, je možné hovoriť o splnení cieľa. Postupy a metódy, ktoré boli v rámci tejto práce uvedené naplnili očakávania a sú plne funkčné.

Cieľom bolo vytvorenie metodiky a popis jednotlivých metód, ktoré je potreba brať do úvahy pri návrhu ťažkého obrábacieho stroja. Táto metodika je veľmi jednoduchá z principiálneho hľadiska. Výrazne zložitejšie je ale použitie konkrétnych metód, najmä modelovanie sústav CNC strojov pomocou metódy konečných prvkov. To vyžaduje mnoho skúseností a trikov, ktoré sa dajú získať len praxou.

Jedným z cieľov bolo aj pochopenie správania lineárnej osi v kontexte komplexného stroja. Na základe skúseností môžem tvrdiť že u niektorých typových strojov môže malá zmena v parametroch napr. vedenia zmeniť výrazne výsledné parametre stroja. Naopak, niekedy aj väčšia zmena nemá zásadný vplyv. Všetko tiež závisí od parametrov nosnej sústavy, ktoré sú s danou osou spojené, pretože tieto komponenty nie je možné posudzovať samostatne, ale je

potreba uvažovať s kontexte celého stroja. Preto je potrebné chápať všetko v súvislostiach. Modelovanie stroja či už v predkonštrukčnej alebo pokonštrukčnej fáze nám dáva výborný pohľad na odhalenie súvislostí.

## 7 ZÁVERY A ODPORÚČANIE PRE PRAX

V predloženej práci bol predstavený návrh metodiky a systémového prístupu pri návrhu lineárnej osi pre ťažký obrábací stroj. Lineárna os ako taká samostatne nič neznamená – je to motor s prevodovým mechanizmom, vedenie, odmeriavanie, prípadne nejaký systém mazania. Preto metodika nebola o návrhu komponent ktoré zahŕňa pojem lineárna os, ale vychádzal z návrhu ťažkého obrábacieho stroja a lineárna os je len ako jedna z podsústav celkovej zostavy stroja. Sama o sebe nemá opodstatnenie, vždy musí byť koncipovaná s časťami nosnej štruktúry. Metodika bola zostavená s využitím systémového prístupu. Jedná sa o prístup kedy je potreba na problém pozeráť komplexne. Tento prístup má každý prirodzene v podvedomí, ale keď sa pri návrhu alebo tvorbe modelu začne rozvíjať je to veľmi dobrá pomoc, aby boli do návrhu zahrnuté všetky podstatné skutočnosti a daný model odpovedal realite.

Samotná metodika popisuje akýsi návod ako postupovať. V praktickej časti práce sa nevyskytujú žiadne konkrétne hodnoty, grafy a porovnania. Je to z toho dôvodu, že všetky výskumy prebiehali na reálnych strojoch z priemyselovej praxe a nie je možné hodnoty parametrov týchto strojov zverejniť. Na druhej strane je to zbytočné. Čo znamená, že stroj je dobrý? Aké je číslo, hodnota tuhosti statickej alebo dynamickej, ktoré je dobré? Nič také neexistuje, každý stroj je iný, pre iné použitie, pre inú aplikáciu. Jediné čo je možné, je budovať systematicky databázu znalostí a na základe nej sa rozhodovať pri vývoji ďalších prototypov.

Metodika sa niekoľkokrát výborne osvedčila v praxi. Preto odporúčam k zavedeniu a osvojeniu do výrobných podnikov, ktoré sa zaoberajú vývojom a návrhom ťažkých obrábacích strojov a problematika modelovania nie je v danom podniku ešte osvojená. Výhodou metodiky je, že niekedy stojí konštruktér pre súborom viacerých, často protichodných požiadaviek, ale aj napriek tomu, je možné s využitím metodiky vytvoriť stroj, ktorý napríklad bude mať výborne parametre pri nízkej obstarávacej cene. Podstatné je len, aby sa konštruktéri a výpočtári pokúsili hľadať súvislosti. Niekedy aj drobný detail v predvýrobnej fáze dokáže výrazne zlepšiť kvalitu stroja, resp. jeho prevádzkové parametre.

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] BORSKÝ, Václav. *Obráběcí stroje*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0470-1.
- [2] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [3] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [4] Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., & Witt, S. (2005). Virtual Machine Tool. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(2), 115–138. [http://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60022-5](http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60022-5)



## 9 ŽIVOTOPIS

### Osobné údaje

Ing. Dominik Hermanský, narodený 17.12.1989 v Trnave (SR)

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Odbor výrobních strojů

Fakulta strojního inženýrství

Vysoké učení technické v Brně

Technická 2896/2

616 69 Brno

### Vzdelanie

2009-2012	Bc., Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, obor Stavba strojů a zařízení
2012-2014	Ing., Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, obor Výrobní stroje, systémy a roboty
2014 - súčasnosť	PhD student, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, obor Konstrukční a procesní inženýrství

### Prehľad zamestnaní

2013	Konstruktér, Diplomat Dental, s.r.o., Piešťany (SR)
2014-2019	Výskumný pracovník, Intemac Solutions, s.r.o., Kuřim
2018 - súčasnosť	Konateľ, H&D Construction, s.r.o. (SR)
2018 - súčasnosť	Konateľ, Kovymont, s.r.o. (SR)

### Významné vedecko-výskumné a projekty

TA04011473 *Prediktivní systém tepelné regulace pro obráběcí stroje*

zahájenie: 10/2014, ukončenie: 06/2017

FV10635 *Multifunkční obráběcí centrum s kompozitní strukturou*

zahájenie: 01/2016, ukončenie: 06/2017

FV20595 *Ocelobetonová konstrukce přesných obráběcích strojů*

zahájenie: 07/2017, ukončenie: 12/2020

## **ABSTRAKT**

Dizertačná práca pojednáva o možnosti nového prístupu pri návrhu lineárnej osi pre ťažký obrábací stroj s využitím systémového prístupu a pokročilých simulačných prostriedkov na báze metódy konečných prvkov. Výsledkom práce je obecná metodika použiteľná pri vývoji a konštrukcii ťažkého obrábacieho stroja akejkoľvek kinematickej konfigurácie bez ohľadu na požadované prevádzkové parametre stroja. Práca je koncipovaná tak, že s využitím systémového prístupu je vytvorená metodika a následne je detailne popísaný postup pri tvorbe komplexného výpočtového modelu, ktorý je pre danú metodiku nevyhnutné vytvoriť. Na základe systémového prístupu a z neho vytvorenej metodiky návrhu lineárnej osi a tvorby komplexného modelu boli realizované prípadové štúdie. Dosiahnuté výsledky boli verifikované experimentálnymi metódami. Dosiahnuté výsledky sú využiteľné v praxi, pri vývoji CNC ťažkého obrábacieho stroja pre konštrukčné a výpočtové oddelenie.

## **ABSTRACT**

The dissertation thesis deals with the possibility of a new approach to the design of a linear axis for a heavy machine tool using a system approach and advanced simulation tools based on the finite element method. The result of the thesis is a general methodology applicable in the development and design of heavy machine tools of any kinematic configuration, regardless of the required operating parameters of the machine. The thesis is designed so that using a system approach, a methodology is created and then the procedure for creating a complex computational model, which is necessary for the methodology, is described in detail. Case studies were carried out on the basis of a system approach and the methodology of linear axis design and the creation of a complex model created from it. The obtained results were verified by experimental methods. The achieved results can be used in industry in the design stage of a CNC heavy machine tool for the design and computation department.