



FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

RCMT váš partner pro výzkum a vývoj

Možnosti a limity navrhování nosných struktur obráběcích strojů s využitím digitálních dvojčat

Ing. Petr Kolář, Ph.D.

Strojírenské fórum 2018 | Praha | 8.11.2018

www.rcmt.cvut.cz

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení | RCMT

Horská 3 | 128 00 Praha 2 | Česká republika | tel.: +420 221 990 914 | email: info@rcmt.cvut.cz



Obsah

1. Stručné představení RCMT
2. Požadavky na výrobní stroje a konkurenceschopnost nabídky
3. Nosná struktura a nástroje pro její návrh
4. Příklad vývoje stroje
5. Shrnutí a závěr

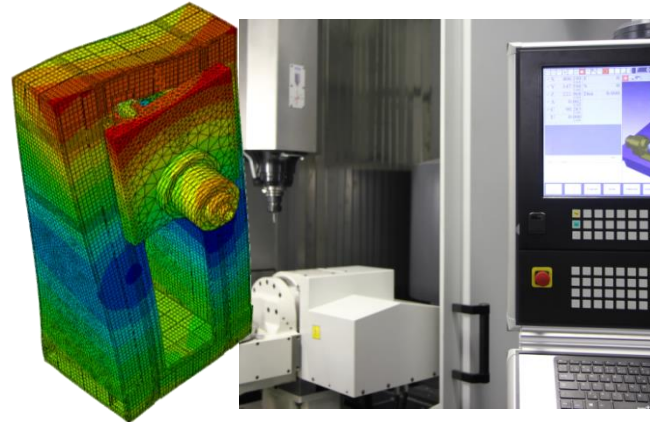
Představení RCMT (Research Center of Manufacturing Technology)

- Odborný ústav Fakulty strojní ČVUT v Praze
- Pracoviště aplikovaného výzkumu | 3 odborná oddělení | 80 pracovníků
- Důraz na spolupráci s firmami, VaV projekty s českými i zahraničními subjekty
- **Strategické úkoly RCMT:**



Vzdělávání odborníků
v oboru

do 10 % aktivit



Výzkum s podniky v oborou
výrobních strojů a technologií

cca 70 % aktivit



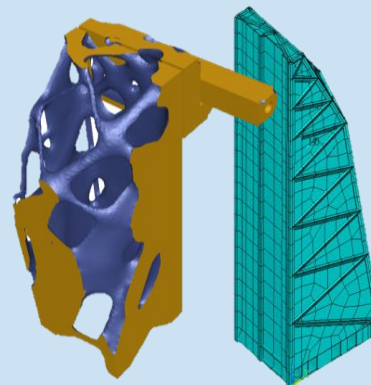
Podpora firem ve
výzkumu a vývoji –
komerční spolupráce

cca 20 % aktivit

Ukázky témat spolupráce v oblasti vývoje strojů

Diagram illustrating the integration of a machine tool (obráběcí stroj) with a CNC control system (CNC řídicí systém analogové vstupní moduly). The system includes temperature measurement (měřené teploty) sensors and NC data exchange. The control system also provides position corrections (korekce posunutí) back to the machine tool. A computer monitor displays the control interface.

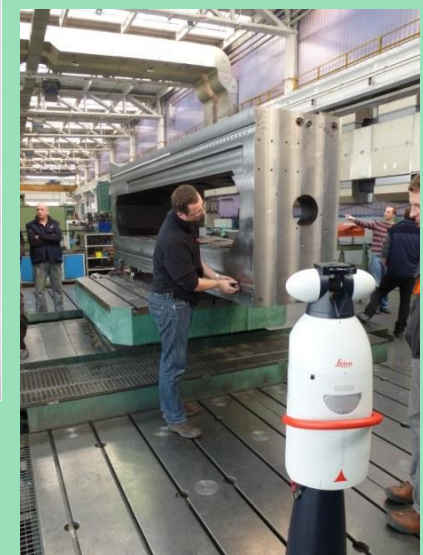
Pohony a řízení strojů



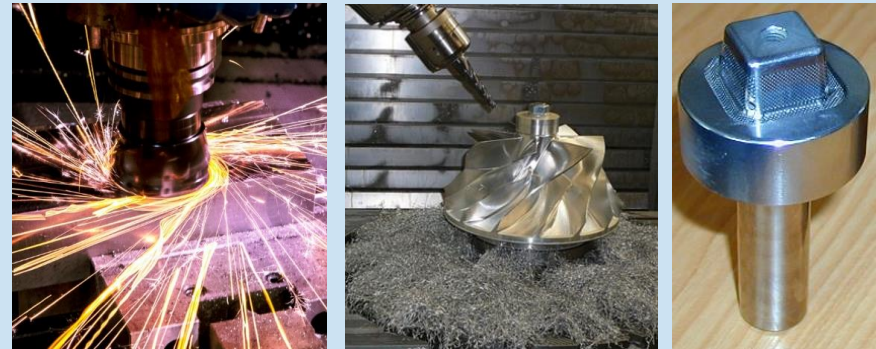
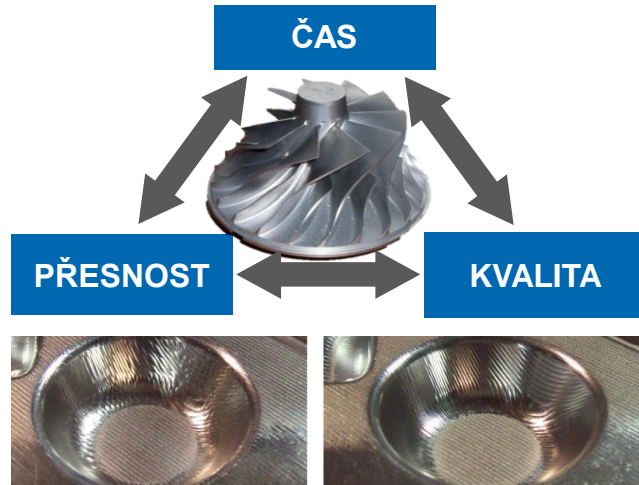
Návrhy struktur z pohledu funkčních vlastností



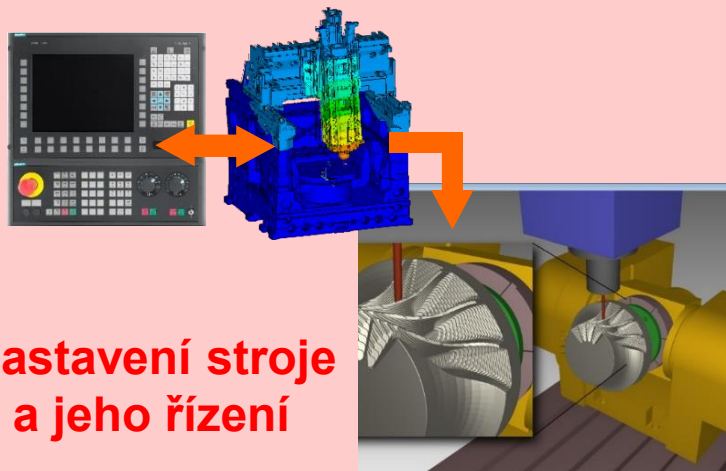
Zkoušení a diagnostika strojů



Ukázky témat spolupráce v oblasti vývoje technologií



Znalost procesu
(třískové a laserové technologie)



Nastavení stroje
a jeho řízení

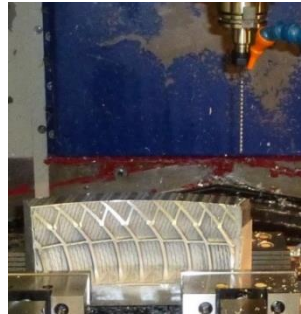
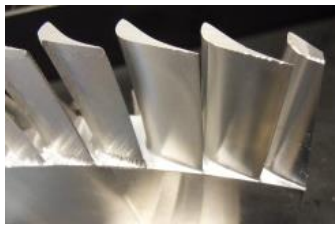


Přídavná
mechatronická zařízení

Reference – výrobci strojů, nástrojů a komponent



Reference – spolupráce mimo výrobní techniku



Vývoj technologií
a prototypová výroba



Pokročilé teplotní simulace pro
ropný průmysl



Vývoj flexotiskových strojů



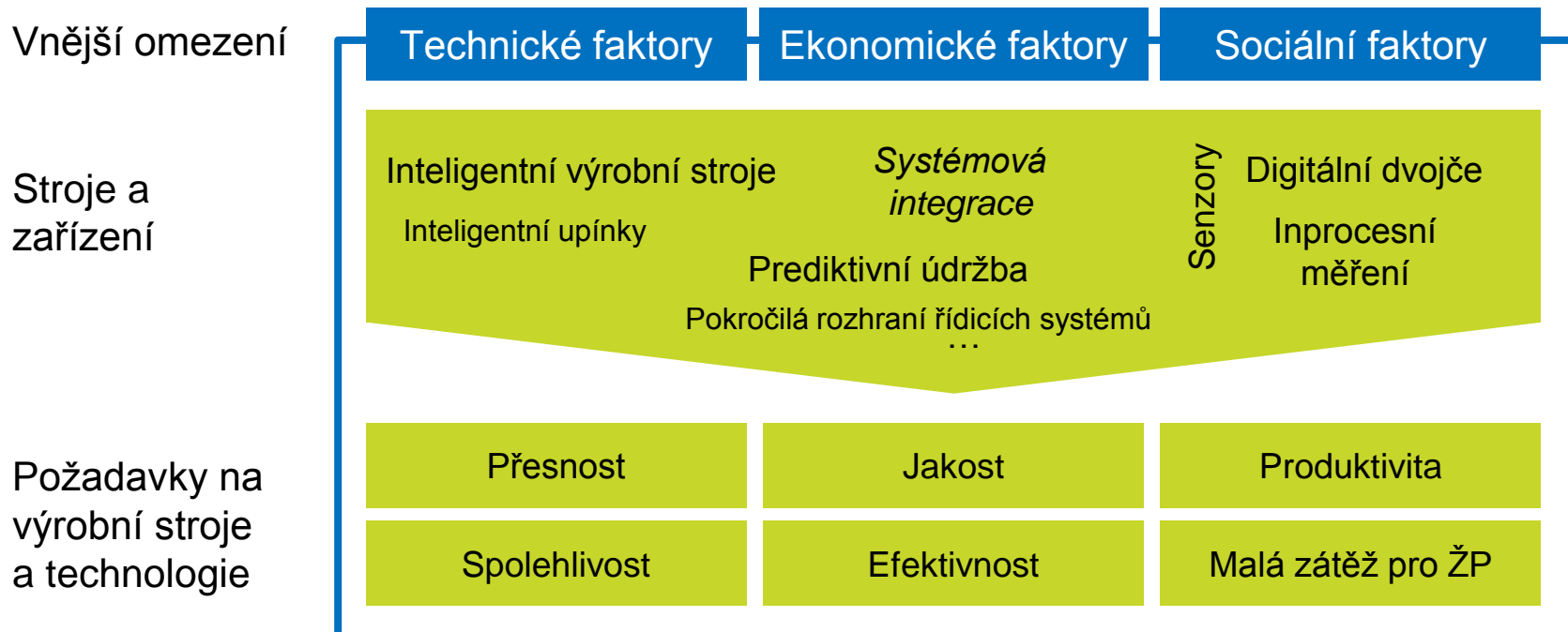
Vývoj uzlů pro balicí stroje

Obsah

1. Stručné představení RCMT
- 2. Požadavky na výrobní stroje a konkurenceschopnost nabídky**
3. Nosná struktura a nástroje pro její návrh
4. Příklad vývoje stroje
5. Shrnutí a závěr

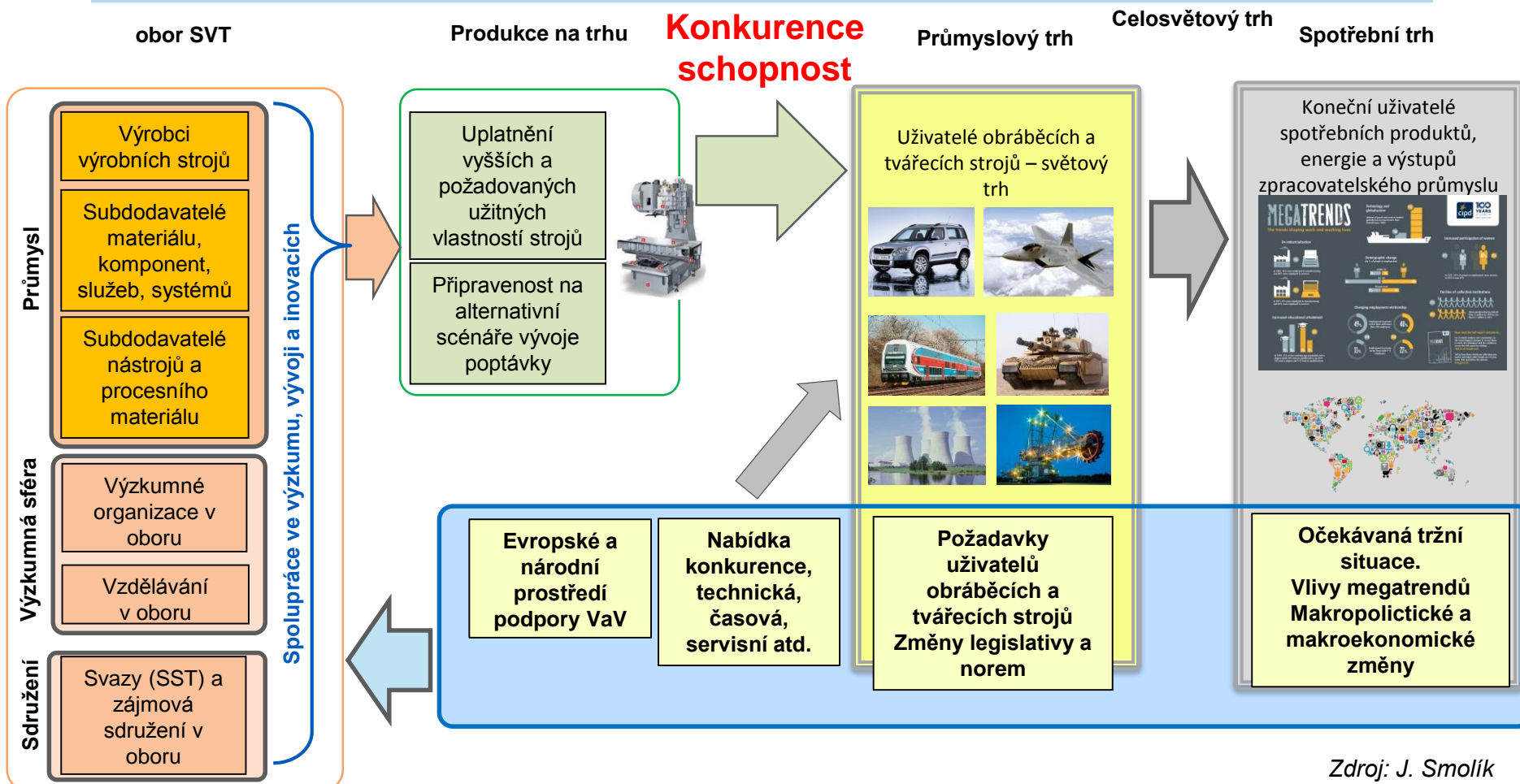
Požadavky na výrobní stroje

- Existuje šest trvalých a nadčasových požadavků na výrobní stroj a technologie
- Pro jejich naplnění vyvíjíme stále dokonalejší technická řešení
- Aplikační nasazení nových řešení je limitováno třemi vnějšími faktory



Inovace pro konkurenceschopnost

- Konkurenceschopnost je (obvykle chápána jako) schopnost prodat konkrétní stroj na určitém trhu za ziskovou cenu.



Obsah

1. Stručné představení RCMT
2. Požadavky na výrobní stroje a konkurenceschopnost nabídky
- 3. Nosná struktura a nástroje pro její návrh**
4. Příklad vývoje stroje
5. Shrnutí a závěr

Nosná struktura: základ stavby obráběcího stroje

- skládá se z nepohyblivých a pohyblivých těles, vazeb, pohonů a jejich řízení;
- přenáší silový tok od sil řezného procesu, zatížení dynamickými silami působícími na pohybující se části a zatížení vlastní vahou;
- je významnou vazbou mezi výrobním procesem a jeho hlavními parametry - přesností, jakostí, produktivitou.

skupina soustružnického vřetene
(vřeteno s upnutím obrobku,
nepohyblivé těleso vřeteníku vč.
rotačních vazeb a pohonů)

řídící systém

**Provedení nosné struktury zásadně
ovlivňuje náklady a realizační
termíny budoucího stroje, tedy i
konkurenceschopnost stroje.**

skupina frézovacího vřetene
(vřeteno s upnutím nástroje,
pohyblivá tělesa vč. lineárních a
rotačních vazeb a pohonů)

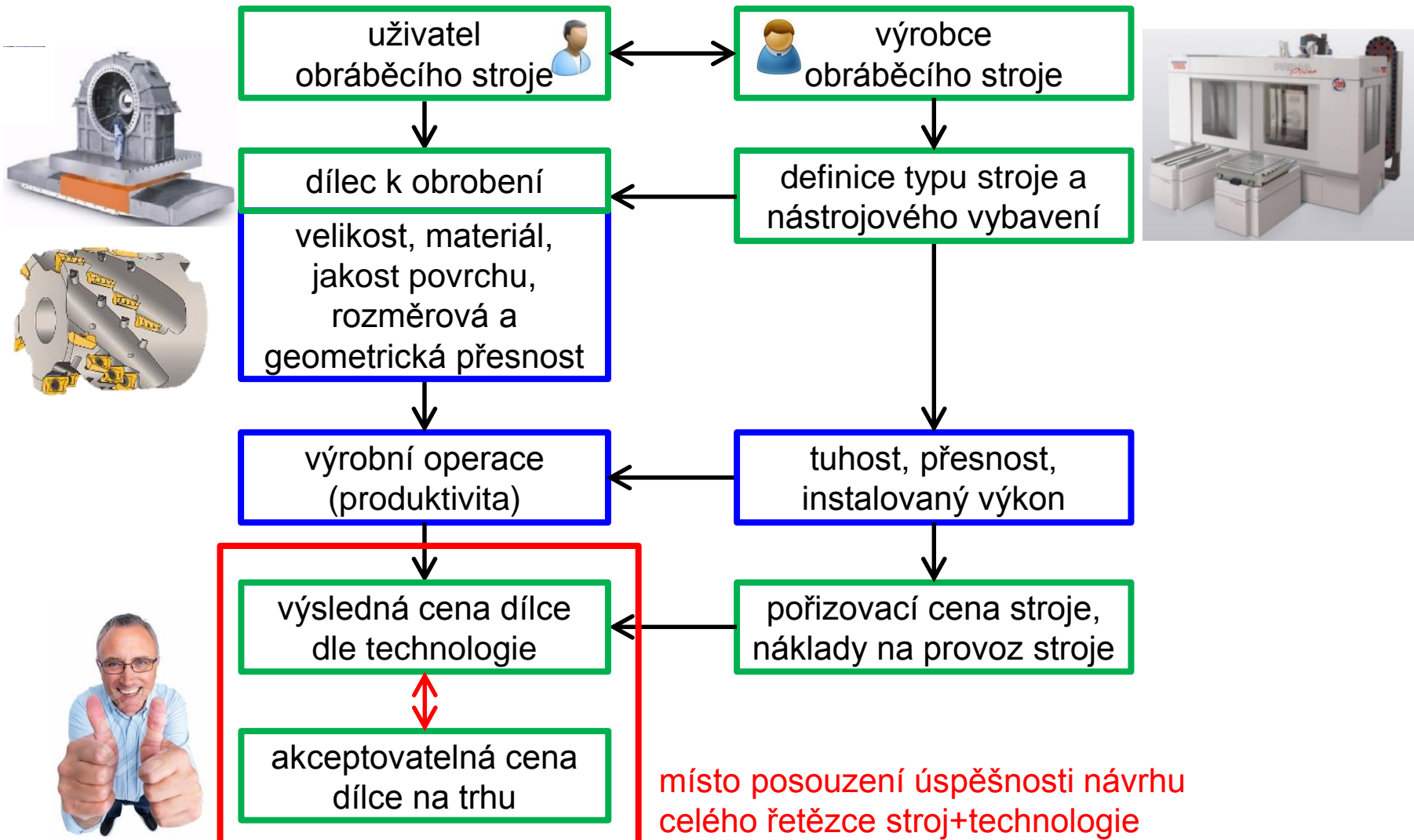
skupina protivřetena
(vřeteno s upnutím obrobku,
pohyblivé těleso vč. lineárních
a rotačních vazeb a pohonů)

skupina spodní revolverové hlavy
(upnutí nástroje, pohyblivá tělesa vč.
lineárních a rotačních vazeb a pohonů)

lože ukotvené do základu
(nepohyblivé těleso)

Zdroj: DMG

Vztah mezi výrobcem a uživatelem stroje



Komplexnost vývoje obráběcího stroje

Vstupy:

Spektrum obrobků



Požadavky technologie
(výkon, rychlost, síly)

Další požadavky zákazníka
(zdvihy os, energ. náročnost)

Cenový limit stroje

Koncept obráběcího stroje

Konstrukce obráběcího stroje



Moderní optimalizační metody mohou pomoci podpořit rozhodovací proces v každé fázi vývoje stroje.

Proměnné:

kinematika a velikost stroje

strukturální materiál

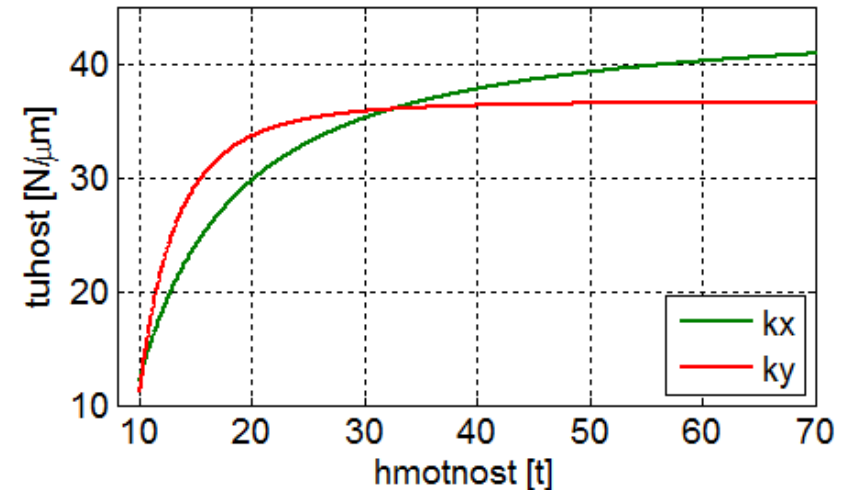
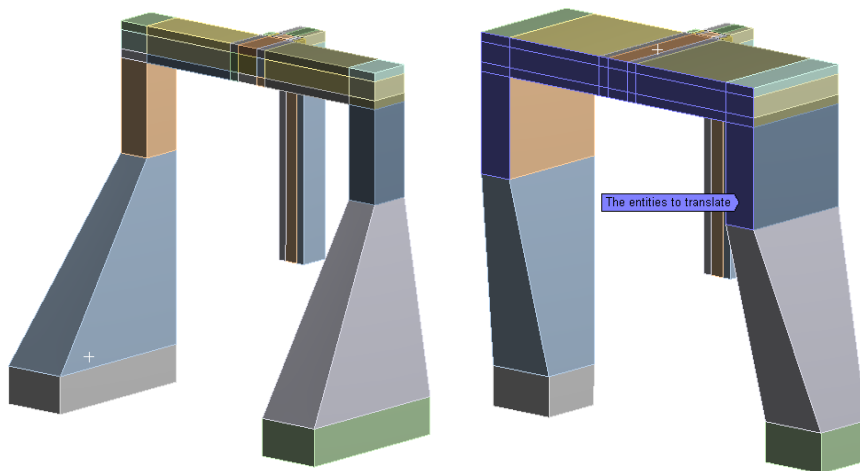
modulární konstrukce

koncept/typy pohonů

návrh rotačních
a lineárních vazeb

Vývojový proces obráběcího stroje

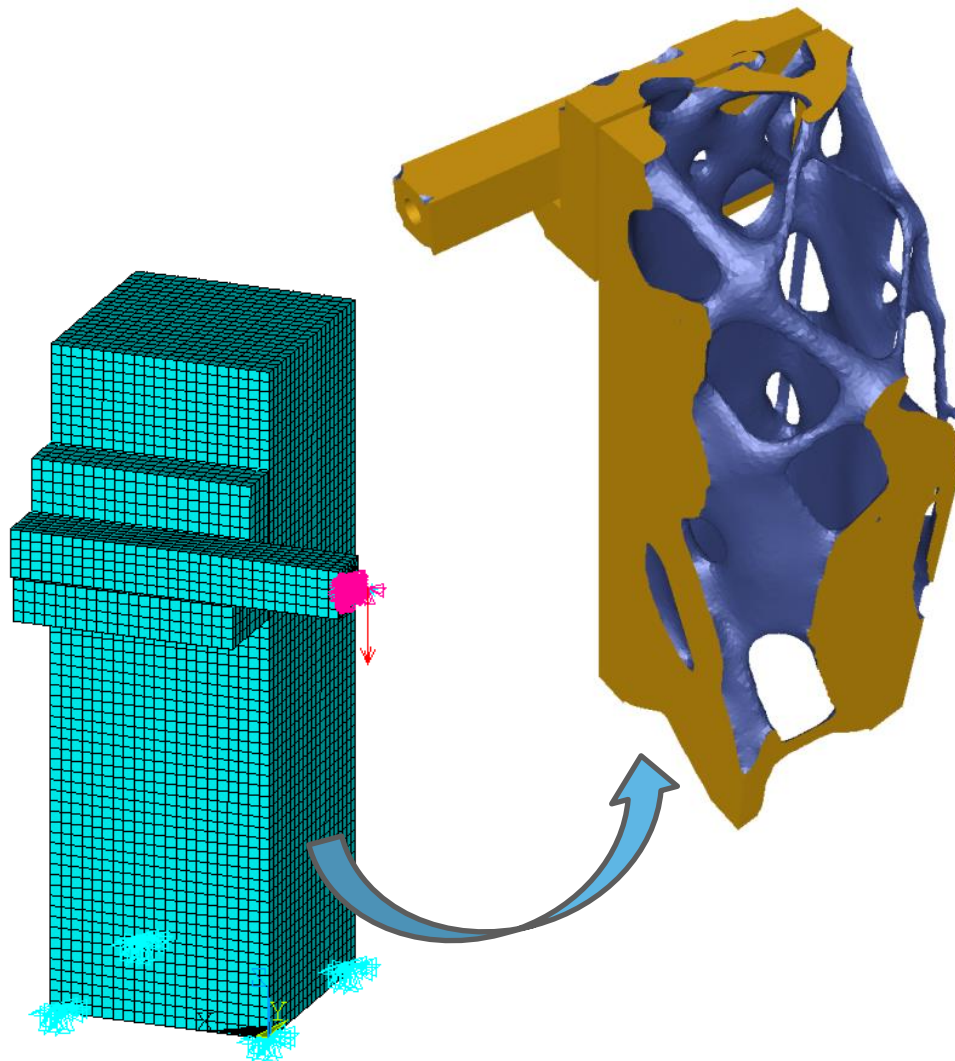
Optimalizační metody pro návrh nosných struktur



Konceptuální topologická optimalizace (s parametrizací):

- Vstupem jsou **parametrizované geometrické modely a okrajové podmínky**.
- Cílem je odhadnout vliv jednotlivých částí na statickou tuhost. Řešením je paretofronta **závislosti tuhosti na hmotnosti**.
- Výsledkem tedy není rozložení hmoty v prostoru, ale jen **potřebná hmota k dosažení určité tuhosti**. Výsledek lze použít pro porovnání koncepcí různých topologických variant. Objem materiálu stačí pro **předběžný odhad ceny dílce**.

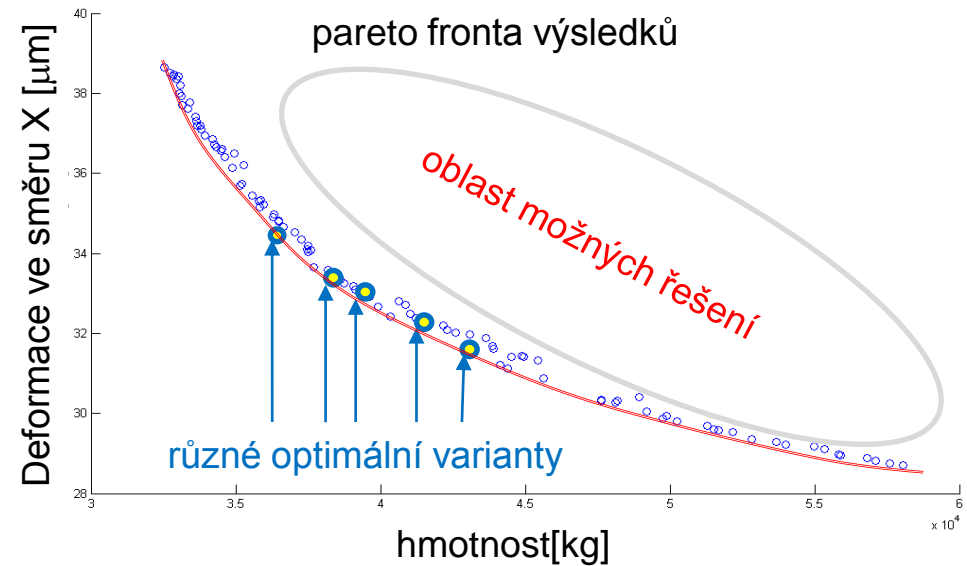
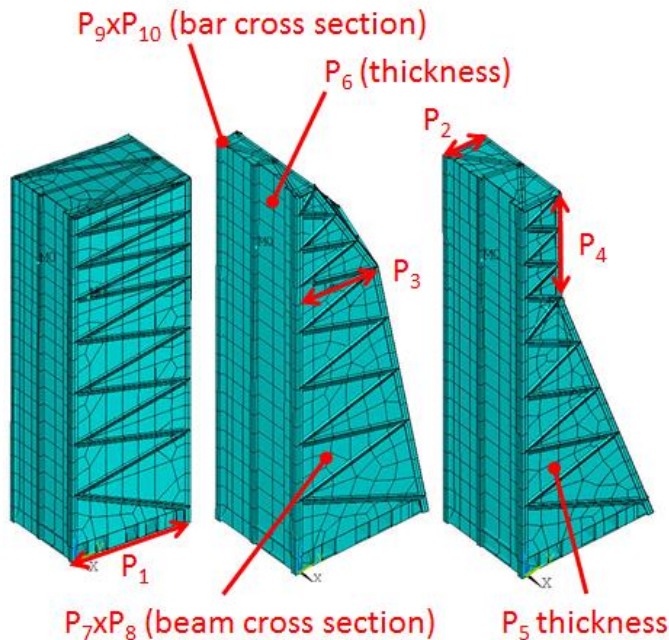
Optimalizační metody pro návrh nosných struktur



Topologická optimalizace:

- Na začátku je definovaný **konstrukční prostor a okrajové podmínky** (zatížení, uložení)
- Výsledkem je **doporučení pro rozmístění materiálu** v konstrukčním objemu
- Do zadání lze zohlednit strukturální i teplotní zatížení a požadavky.
- Jedná se o podklad pro konkrétní konstrukční návrh.

Optimalizační metody pro návrh nosných struktur

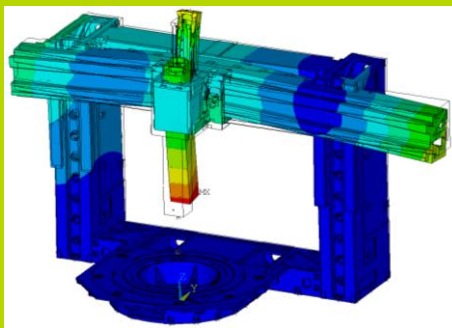
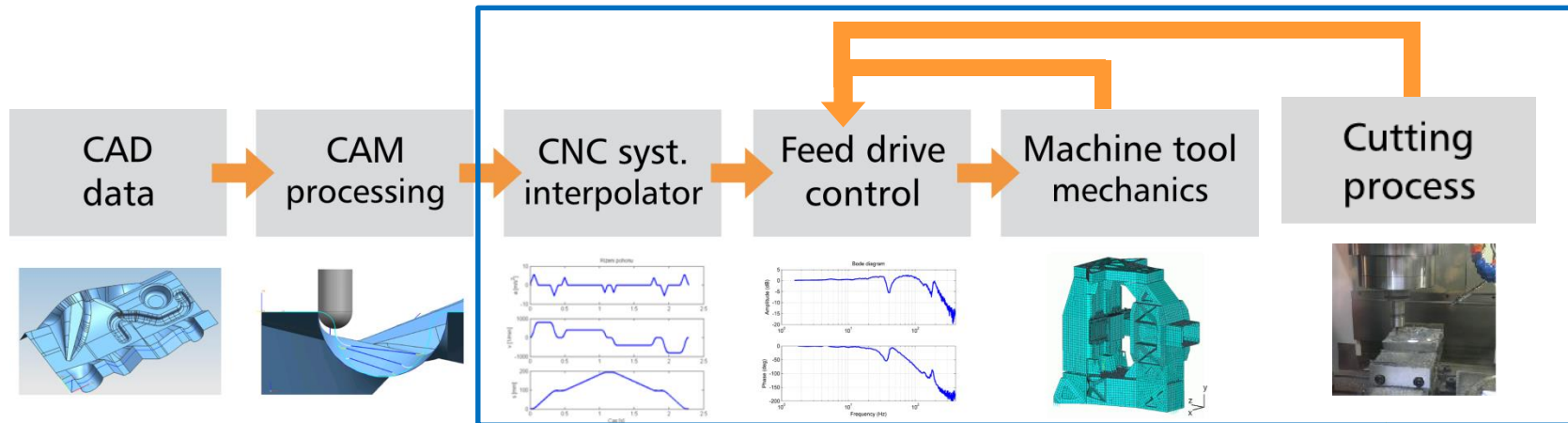


Parametrická optimalizace:

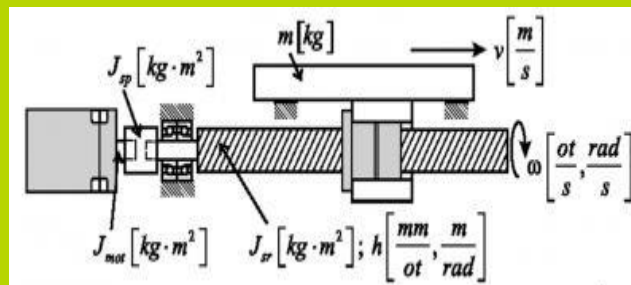
- Na začátku je **parametrický model známé topologie stroje a okrajové podmínky** (zatížení, uložení).
- Výsledkem je **doporučení pro optimální kombinaci parametrů konstrukce**.
- Parametrický model umožňuje zohlednit **modulární koncepci stroje** (možno optimalizovat současně různé velikostní provedení stroje).

Digitální dvojče stroje pro simulaci procesního chování

- Komplexní modely umožňují kontrolovat chování stroje při procesu



MKP model
konstrukce



Propojený model struktury
a pohonů posuvu

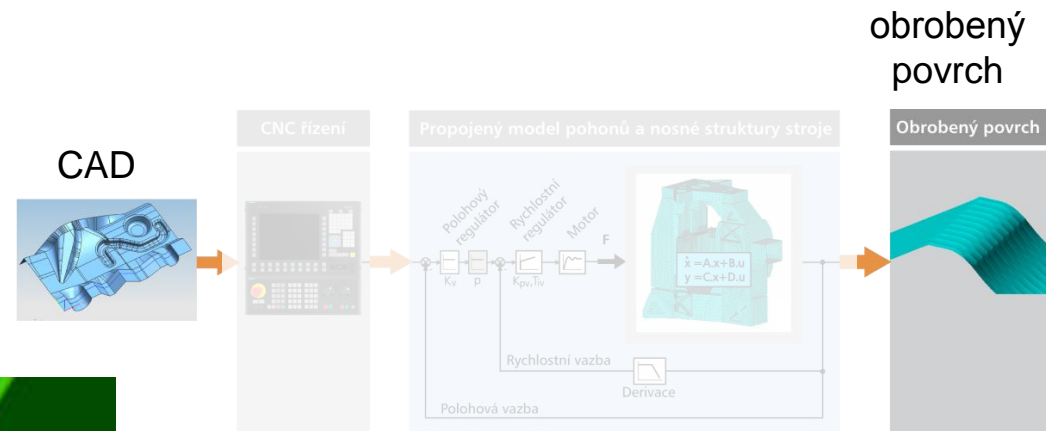


řídící systémy

virtuální
obrábění

CAM simulace obrábění

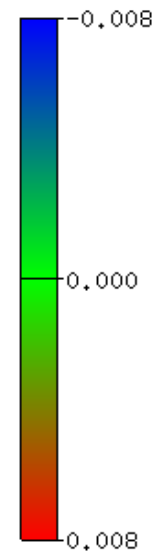
- CAM simulace - zobrazení výsledku kinematické analýzy soustavy obrobek-nástroj.



vizualizace CL dat

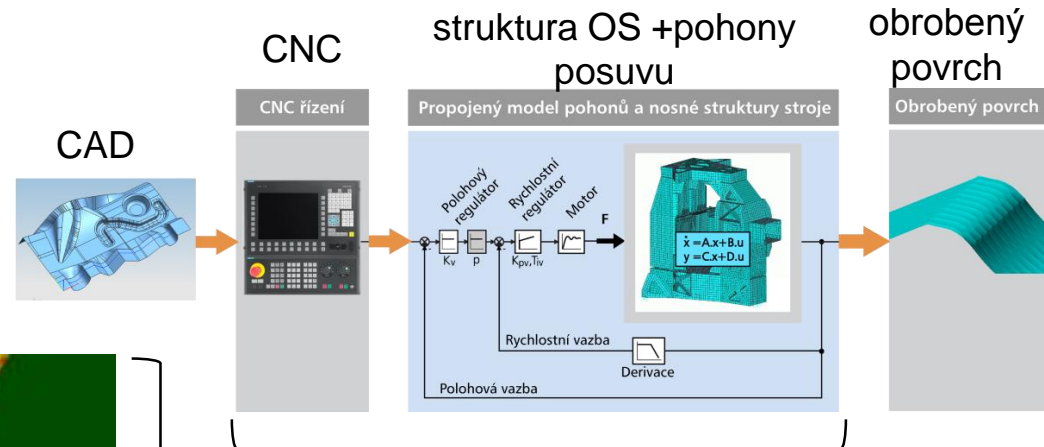


Deviations [mm]

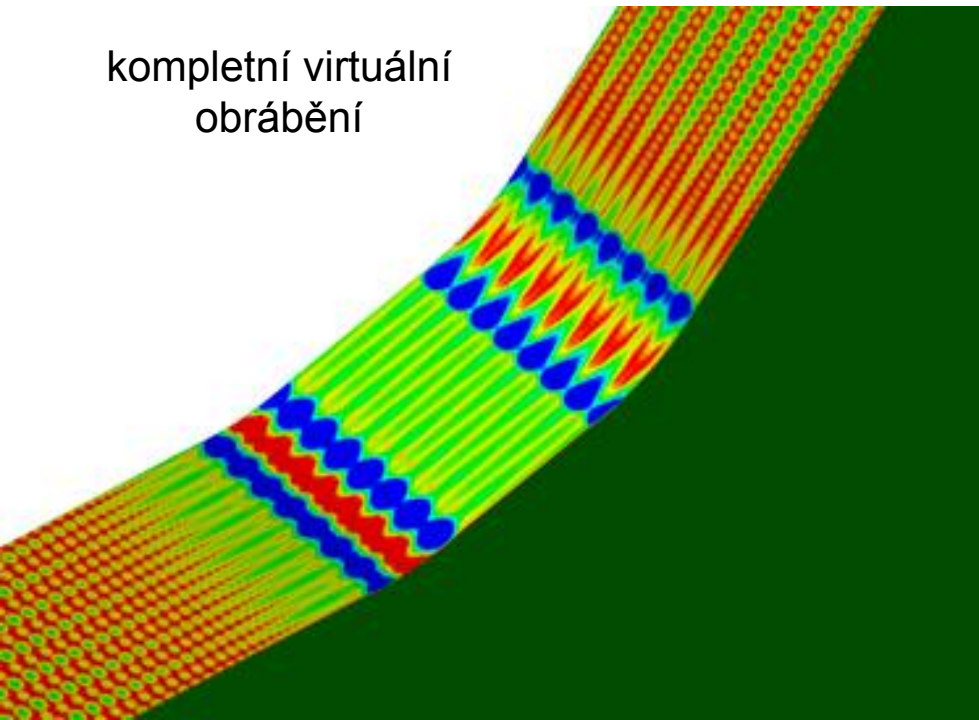


Digitální dvojče obrobku: využití DT stroje

- Interpolace CNC systému
- Dynamický model OS



kompletní virtuální obrábění



Deviations [mm]

-0.008

0.000

0.008

Digitální dvojče OS



Digitální dvojče obrobku

Simulační modely vs. nejistota výsledku („limity DT“)

- Jak bylo ukázáno, existují různě komplexní simulační metody, které umožňují predikovat chování stroje. Jejich použití je jednak různě časově náročné a jednak s rostoucí komplexností roste nejistota vypočítaného výsledku.

	Simulovaná veličina	Typ modelu	Vstupy pro simulaci	Odchylka simulace od měření
1	Statická tuhost, vlastní frekvence, vlastní tvary	MKP model struktury	Geometrie těles, údaje o materiálu, vazbách, zatížení.	do $\pm 10 \%$
2	Amplituda dynamické poddajnosti (FRF)	Stavový model struktury	Matice hmotnosti a tuhosti soustavy (viz 1), odhad tlumení.	do $\pm 20 \div 80 \%$
3	První antirezonanční frekvence pohonu	Propojený model těles a pohonu nosné struktury	Matice hmotnosti a tuhosti soustavy (viz 1), popis vlastností* komponent pohonu.	cca $-50 \div 200 \%^*$
4	Mez stability (SLD) pro konkrétní technologii	Model samobuzeného kmitání	Dynamická poddajnost (viz 2), řezný odpor.	cca $-80 \div 400 \%$

**Uvedená nejistota je vázána na nejistotu katalogových parametrů komponent pohonů (zejména torzní tuhost). Pokud jsou parametry komponent pohonů známy, např. z měření, je odchylka výpočtu do $\pm 10\%$.*

Příklad: nejistota strukturálního tlumení

- V oblasti tlumení struktur strojů provádíme výzkum:
 - co pomáhá zvýšit tlumení
 - jak hodnotu tlumení predikovat vzhledem ke stavbě stroje

Úroveň materiálová		Úroveň tělesa		Úroveň sestavy	
Ocel	GREC	Ocelové smykadlo	Hybr. smykadlo (ocel + GREC)	Ocelové smykadlo	Hybr. smykadlo (ocel + GREC)
$\zeta = 0.01 \%$	$\zeta = 1.3 \%$	$\zeta = 0.1 \%$	$\zeta = 0.99 \%$	$\zeta = 0.9 \%$	$\zeta = 1.3 \%$
Vzorek GREC výplňového materiálu má 130x větší materiálové tlumení než vzorek oceli.		Těleso hybridního smykadla z oceli a GREC má 10x větší tlumení než celooceľové těleso smykadla.		Hybridní smykadlo upnuté na základ má 1,4x větší tlumení než stejně montované ocelové smykadlo.	



Zdroj: disertace P. Vrba



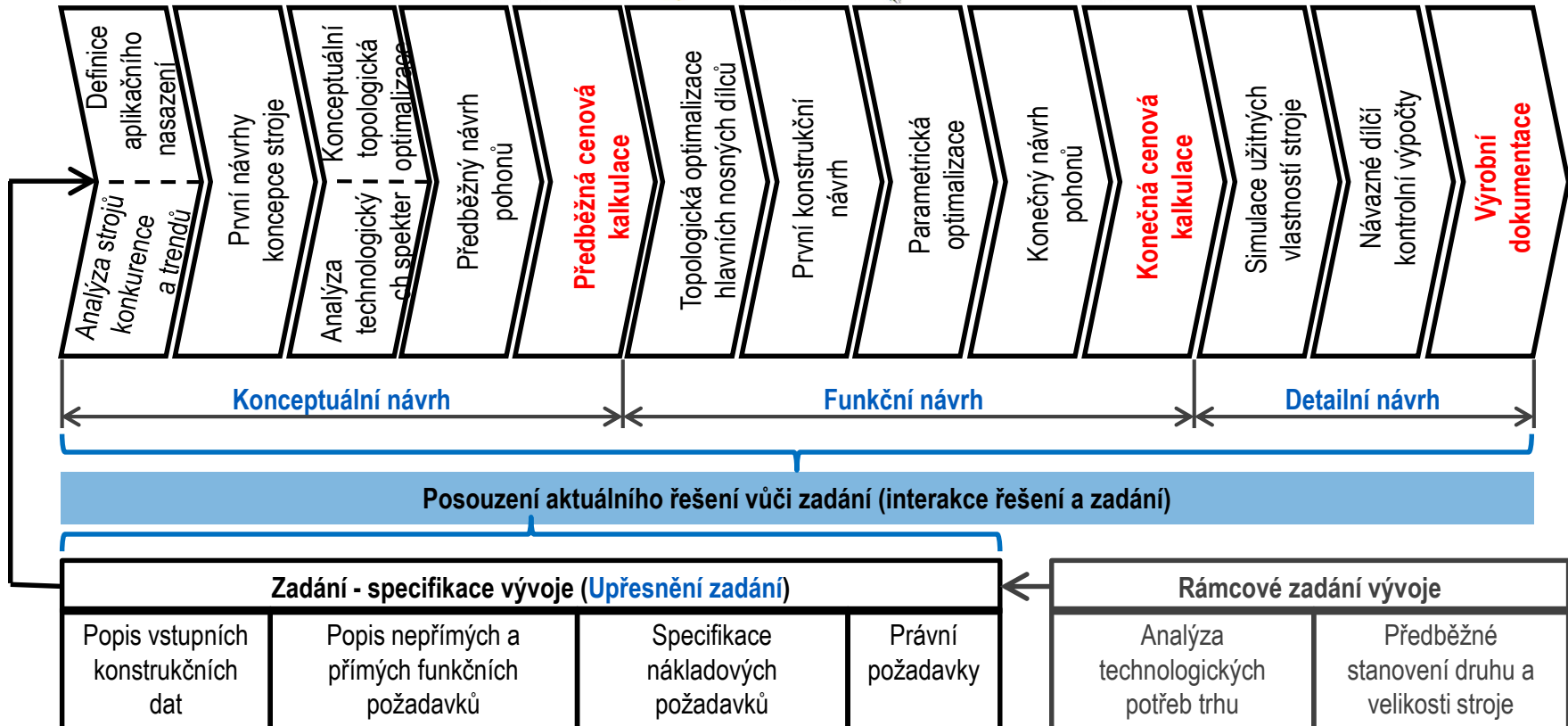
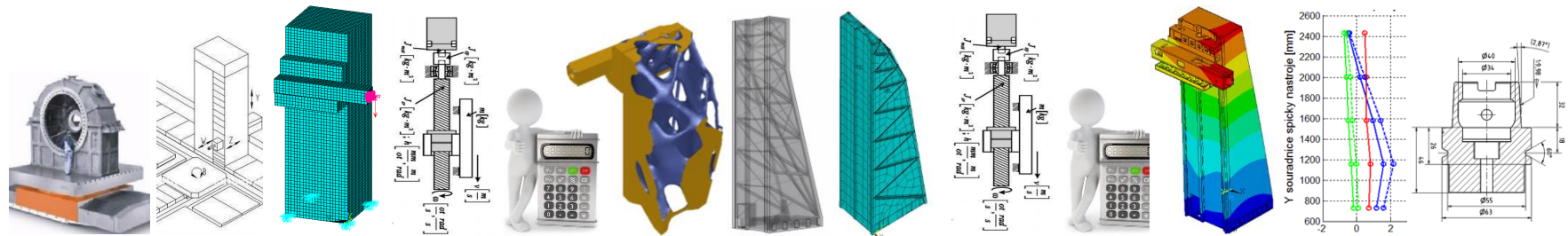
Tři paradoxy vývoje stroje

- **Exaktnost vs. nekvantifikovanost:** vývojový proces lze podpořit pokročilými simulacemi a optimalizacemi, které však na vstupu potřebují konkrétní kvantifikovaná kritéria; v rané fázi návrhu však existuje **často jen slovní zadání** a kvantifikace hlavních parametrů se musí teprve hledat.
- **Komplexnost vs. nejistoty:** chování výrobních strojů lze simulovat až na úroveň procesu; čím komplexnější modely se používají, tím více vstupních parametrů potřebují a **tím více vstupuje do simulace nejistota**; výsledkem je sice srozumitelný procesní parametr, jehož predikce je však zatížena velkou chybou.
- **Potřeba rozhodování v krátkých intervalech vs. dlouhodobost vývoje:** vývoj komplexního zařízení, jakým jsou obráběcí stroje, vyžaduje poměrně dlouhý čas pro řadu zřetězených a časově náročných vývojových kroků; zadávací požadavky vázané na tržní situace se však mohou rychle měnit a výstupy vývoje nutné pro operativní rozhodování a řízení musí přicházet k kratším časovým intervalech.

Metodika návrhu nosných struktur obráběcích strojů s ohledem na konkurenceschopnost

- Komplexní simulační modely jsou užitečným nástrojem pro řadu dílčích rozhodnutí při vývoji, musí se však využívat s ohledem na konkrétní situaci.
- Pro hlavní rozhodnutí se užívají simulace pomocí tzv. rozšířené sady nepřímých parametrů:
 - **statická tuhost, modální vlastnosti** (vlastní frekvence, vlastní tvary) - ty charakterizují chování stroje při zatížení řezným procesem, ukazují strukturálně slabá místa a pomáhají odhadnout, jak bude možno stroj zatěžovat;
 - **orientovaná dynamická poddajnost** – ta představuje první krok k užší vazbě strukturálních vlastností stroje a budoucího technologického využití (charakterizuje budoucí výkonnost obrábění);
 - **propustné pásmo pohonů lineárních os** – další parametr struktury s přímým dopadem na technologické využití stroje; charakterizuje možnosti naladění pohonů a tím možnosti v nastavení produktivity, přesnosti a jakosti při operacích i interpolovaným pohybem více os.
- Používaná metodika vývoje strojů má **čtyři hlavní fáze**, které umožňují **průběžně vyhodnocovat stav** navrhované nosné struktury, resp. stroje a ev. **učinit modifikaci zadání nebo navrhovaného řešení** s minimálním dopadem na čas a náklady vývoje.

Metodika vývoje nosných struktur OS



Shrnutí a závěr

- **Vývoj pokročilých simulačních metod je klíčovým prvkem pro podporu vývoje stroje**, jeho virtuální testování, zkracování doby uvedení na trh a snižování technické nejistoty ve vývoji.
 - Je však nutné nepodlehnout „kouzlu technické predikce“ a vždy **zvažovat přiměřenost nasazení jednotlivých metod** s ohledem na disponibilní čas a akceptovatelnou míru nejistoty.
- Jednotlivé metody vyvinuté a používané v RCMT **jsou propojeny v jedné komplexní metodice**, která je užívána v rozsahu dle konkrétní situace.
 - Hlavní vlastností metodiky je **rozdělení vývojového postupu na jednotlivé fáze**, kde je možno realizovat a vyhodnocovat výsledky dílčích kroků vzhledem k aktuální podobě zadání **s krátkou časovou prodlevou**.
- Nasazení správných nástrojů může pomoci vytvořit konkurenceschopný produkt. Nevhodné nasazení přináší zvýšené časové a finanční náklady. **V RCMT máme zkušenost s vhodnými vývojovými nástroji** a nabízíme toto vlastní know-how firmám v rámci společných vývojových projektů.

Děkuji za pozornost

Kontakt

Ing. Petr Kolář, Ph.D.

Vedoucí RCMT | FS ČVUT

Zástupce vedoucího IPA | CIIRC ČVUT

E: p.kolar@rcmt.cvut.cz

T: +420 605 205 926