

# Produktivita a jakost při obrábění

**Pavel Zeman, Matěj Sulitka**

Setkání obchodních ředitelů členských podniků SST  
1.6.2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE | FAKULTA STROJNÍ  
Ústav výrobních strojů a zařízení | Ú12135

Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii | RCMT

[www.rcmt.cvut.cz](http://www.rcmt.cvut.cz)

# Obsah

1. Produktivita, jakost a náklady při výrobě obráběním
2. Přístupy k optimalizaci výroby
3. Příklady optimalizace
4. Podpora virtuálního obrábění pro optimalizace technologií obrábění

# NÁKLADY A PRODUKTIVITA PŘI VÝROBĚ OBRÁBĚNÍM

# Směry vývoje technologie obrábění

Aktuální trendy v technologii obrábění:

- **Zvyšování produktivity obrábění**
  - Cílem:  
„dosažení **vyšší produkce dílců** (stejně nebo vyšší jakosti) při stejných, nižších nebo i vyšších výrobních nákladech“.
- **Zvyšování hospodárnosti obrábění**
  - Cílem:  
„dosažení **nižších výrobních nákladů** na dílec (stejně nebo vyšší jakosti) při stejné nebo vyšší produkci dílců“.
- **Zvyšování jakosti obrábění**
  - Cílem:  
„dosažení **vyšší jakosti dílce** při stejné nebo vyšší produktivitě a stejných nebo nižších výrobních nákladech“.

**Potřeba optimalizace výroby**



**Know-how + sw, hw prostředky**



**Veškerý vývoj v oblasti výroby obráběním (stroje, nástroje, upínače, upínacích systémy, CAM sw) vede k dosažení některého z těchto cílů !**

# Důvody pro optimalizaci výroby

- **Celosvětová konkurence** vede k limitním cenám výrobků
- Potřeba optimalizace pro lepší **konkurenceschopnost** výrobku
- Výrobek:
  - Výrobní náklady v průměru asi 40% ceny.
  - Technologie obrábění se podílí na celkové pracnosti asi 40% (drahá dokončovací technologie).
- Optimalizace



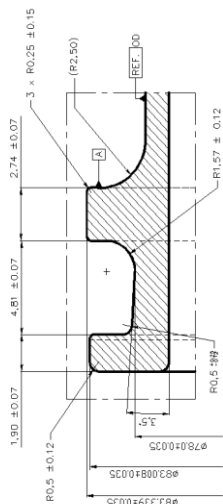
Vstup

Fáze přípravy výroby

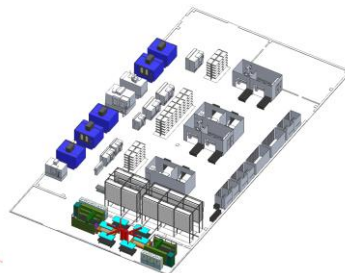
Návrh technologie

Výroba

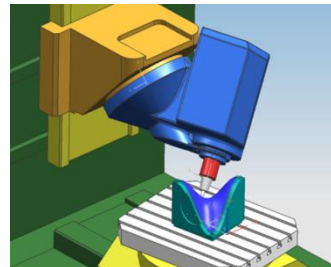
Výstup



- výrobní dokumentace
- polotovary pro výrobu
- výrobní postupy
- uspořádání výrobních jednotek



- stroje
- upnutí dílce
- obráběcí nástroje
- strategie
- pracovní podmínky
- NC programy



- při práci stroje (optimalizace pracovních podmínek)
- zkracování nevýrobních časů (prostoje, upínání, seřízení, ...)

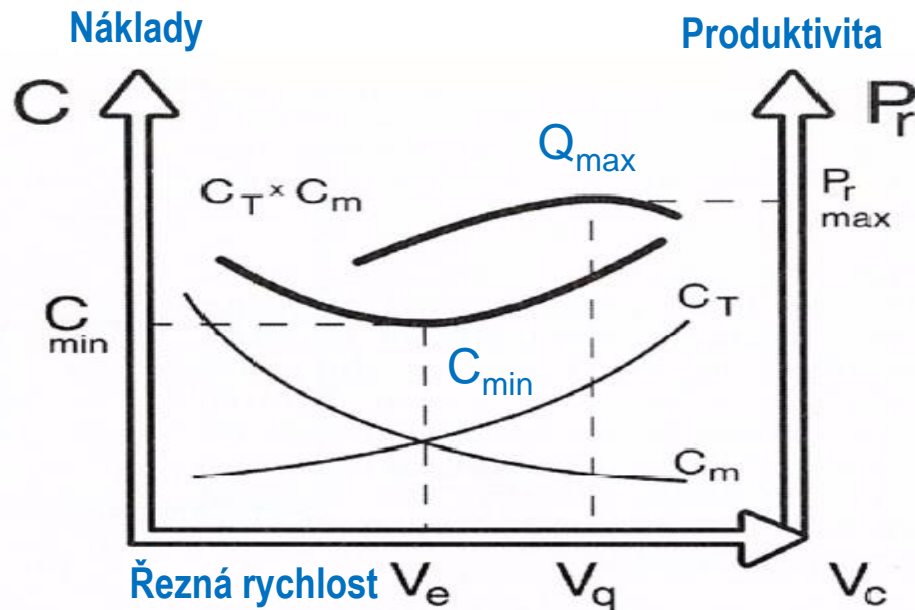


jakost  
produktivita  
náklady



## Konkrétní přístupy k optimalizaci výroby

- Variabilita zadání a původního stavu technologie = variabilita vhodných řešení
- Základní přístupy optimalizace nadefinovány pro samotný proces
- Optimalizace obrábění:
  - **Minimální výrobní náklady (C<sub>min</sub>)** - přímé snížení nákladů na výrobek.
  - **Maximální produktivita (Q<sub>max</sub>)** - zvýšení kapacity výroby.



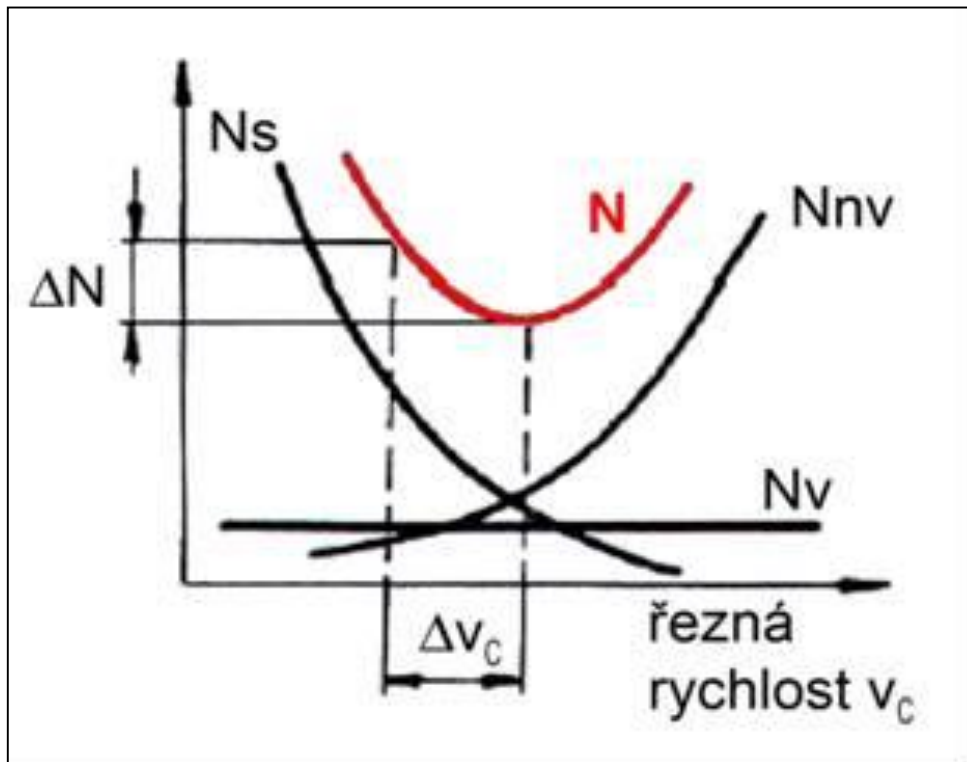
**Maximum produktivity** při jiných rezných podmínkách než **minimum výrobních nákladů** !

Optimalizace z hlediska minima výrobních nákladů je v praxi častěji uplatňovaný přístup !

# Optimalizace procesu pro minimální výrobní náklady

- Postupné kroky optimalizace:

- Optimalizace výběru stroje
- Optimalizace výběru nástroje (materiál, geometrie)
- Optimalizace řezných podmínek a trvanlivosti nástroje ( $a_p$ ,  $a_e$ ,  $f$ ,  $v_c$ )



$$N = N_s + N_v + N_{nv}$$

## Skladba výrobních nákladů

$N_s$  - náklady na strojní práci

$N_{nv}$  - náklady na nástroje a jejich výměnu

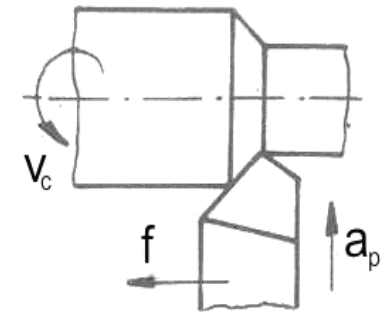
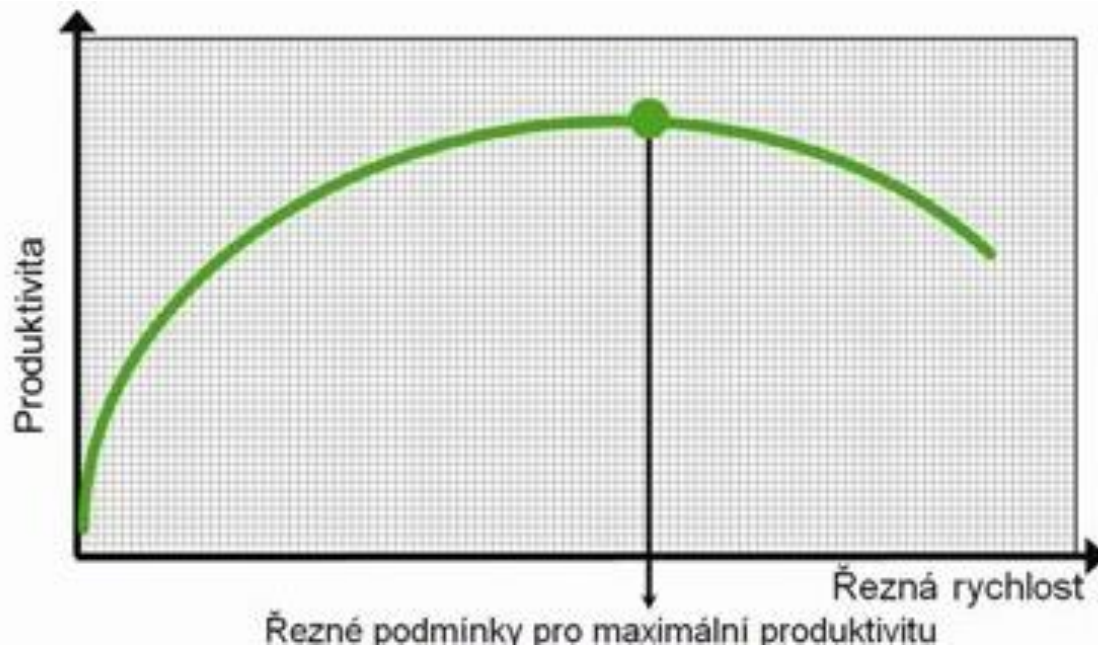
$N_v$  - náklady na vedlejší práci (fixní)

## Podmínka minimálních výrobních nákladů

$$N = N_s + N_n + N_{nv} \stackrel{!}{=} \min$$

# Optimalizace procesu pro maximální produktivitu

- Hledisko maximální produktivity ( $t = t_{as} + t_{vn} = \min$ )
  - maximální počet kusů za určitý čas
- Maximalizace úběru materiálu v čase ( $MRR = a_p \cdot f \cdot v_c = \max$ )
  - lze uplatňovat spolu s kritériem minimálních výrobních nákladů



## Symbols:

$t_{as}$  – čas automatického chodu stroje [min]

$t_{vn}$  – čas výměny nástroje [min]

MRR – úběr materiálu [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]

$a_p$  – hloubka řezu [mm]

$f$  – posuv [mm]

$v_c$  – řezná rychlost [m/min]



# Příklad z praxe - skladba nákladů na operaci

- Pro vybranou operaci (jeden obrobek, nástroj a řezné podmínky).
- Moderní CNC obráběcí stroj s **HRS = 1300 Kč/hod.**

		STROJ	
		Jedn.	Vstupy
OBSLUHA	<b>Náklady obsluhy</b>	[Kč/rok]	456 958
	<b>FIXNÍ NÁKLADY</b>		
	Pořizovací cena	[Kč]	4 200 000
	Životnost	[roky]	5
	Odpisy	[Kč/rok]	840 000
	Finanční náklady	[Kč/rok]	130 000
	Pojištění	[Kč/rok]	42 000
	Údržba	[Kč/rok]	220 000
	Náklady prostoru	[Kč/rok]	36 000
	Zabraná plocha	[m <sup>2</sup> ]	30
	Náklady na m <sup>2</sup>	[Kč/m <sup>2</sup> .rok]	1 200
	<b>Celkové fixní náklady</b>	[Kč/rok]	<b>1 724 958</b>
KAPACITA	Počet směn	[směny]	1
	Teoretická kapacita	[hod./rok]	2 000
	Prostoje	[hod./rok]	410
	Dovolená	[hod./rok]	60
	Plánovaná údržba v prac. době	[hod./rok]	50
	Neplánované opravy	[hod./rok]	200
	Technicko-organizační prostoje	[hod./rok]	100
	Přesčasy	[hod./rok]	100
	Disponibilní kapacita	[hod./rok]	1 690
	Koeficient využití disp. kapacity	[%]	80%
		[hod./rok]	1 352
		[hod./rok]	3 000
		[hod./rok]	1 352
	Hodinová režijní sazba	[Kč/hod.]	1 276

		OBSLUHA	
		měsíčně	ročně
	Hrubá mzda	[Kč]	23 000
	Odvody (SZP + sociální fond)	[Kč]	8 050
	Super hrubá mzda	[Kč]	31 050
	Odměny	[Kč]	44 000
	Příplatek za práci přesčas	[%]	25%
	Příplatek za práci ve 3. směně	[%]	20%
	Osobní náklady přesčasu	[Kč/hod.]	243
	Délka přesčasů	[hod.]	8
	Nákl. přesčasů	[Kč]	2 021
	Příspěvky	[Kč]	800
	Pracovní pomůcky	[Kč]	2 500
	Školení	[Kč]	3 000
	Ostatní náklady	[Kč]	1 000
	Náklady ckem na pracovníka	[Kč]	33 871
	Náklady práce ve 3. směně	[Kč]	
	Počet pracovníků ve směně	[prac.]	1,0
	Počet směn	[směny]	1
	<b>Celkem</b>	[Kč]	<b>33 871</b>
			<b>456 958</b>

		OSTATNÍ VSTUPY	
	Pojištění	1,0%	z pořizovací ceny
	Počet pracovních dní	250	dni/rok
	Počet hodin ve směně	8	hod./směnu
	Odvody (SZP)	35%	

**HRS stroje = 1276 Kč/hod**

# Příklad z praxe - skladba nákladů na operaci

- Pro vybranou operaci (jeden obrobek, nástroj a řezné podmínky).
- Moderní CNC obráběcí stroj s **HRS = 1300 Kč/hod.**

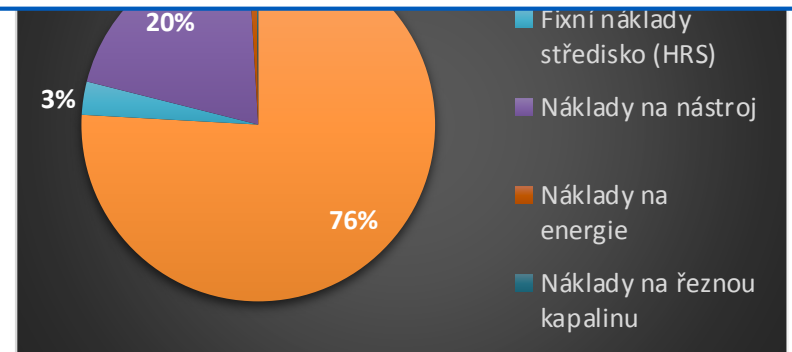
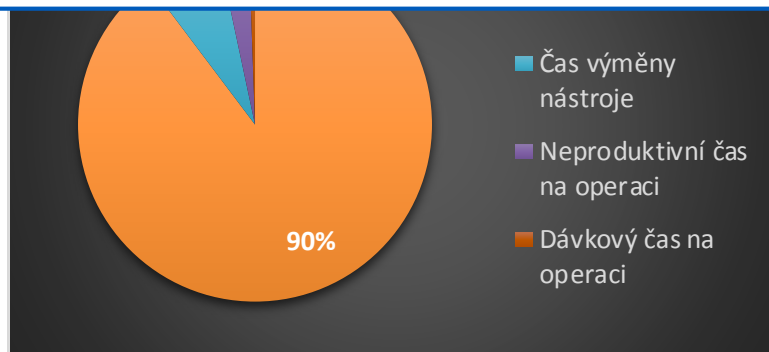
### Skladba časů výroby při výrobě

Časy		
Celkový čas operace	[min./op]	17,9
Strojní čas	[min./op]	16,1
Čas výměny nástroje	[min./op]	1,2
Neproduktivní čas na operaci	[min./op]	0,5
Dávkový čas na operaci	[min./op]	0,1

### Skladba výrobních nákladů

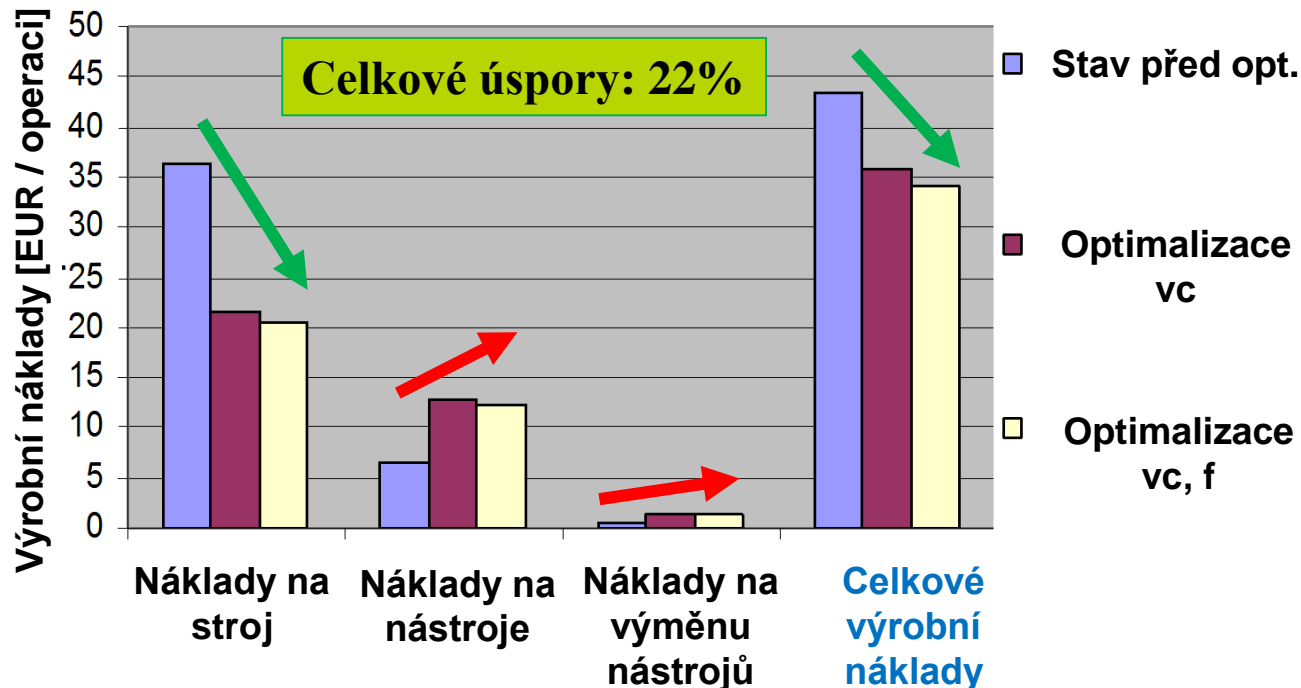
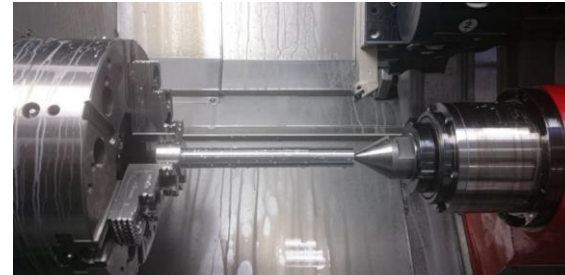
Náklady		
Náklady celkem na operaci	[Kč/op.]	394,1
Fixní náklady stroj (HRS)	[Kč/op.]	299,1
Fixní náklady středisko (HRS)	[Kč/op.]	12,0
Náklady na nástroj	[Kč/op.]	79,3
Náklady na energii	[Kč/op.]	3,1
Náklady na řeznou kapalinu	[Kč/op.]	0,7

Na výrobní náklady u moderního CNC obráběcího stroje má zásadní vliv způsob využití a kapacita využití stroje !



# Příklad z praxe - Optimalizace výrobních nákladů

- Hrubovací soustružení hřídelů z chrom-molybdenové oceli.
- Optimalizace řezných podmínek.

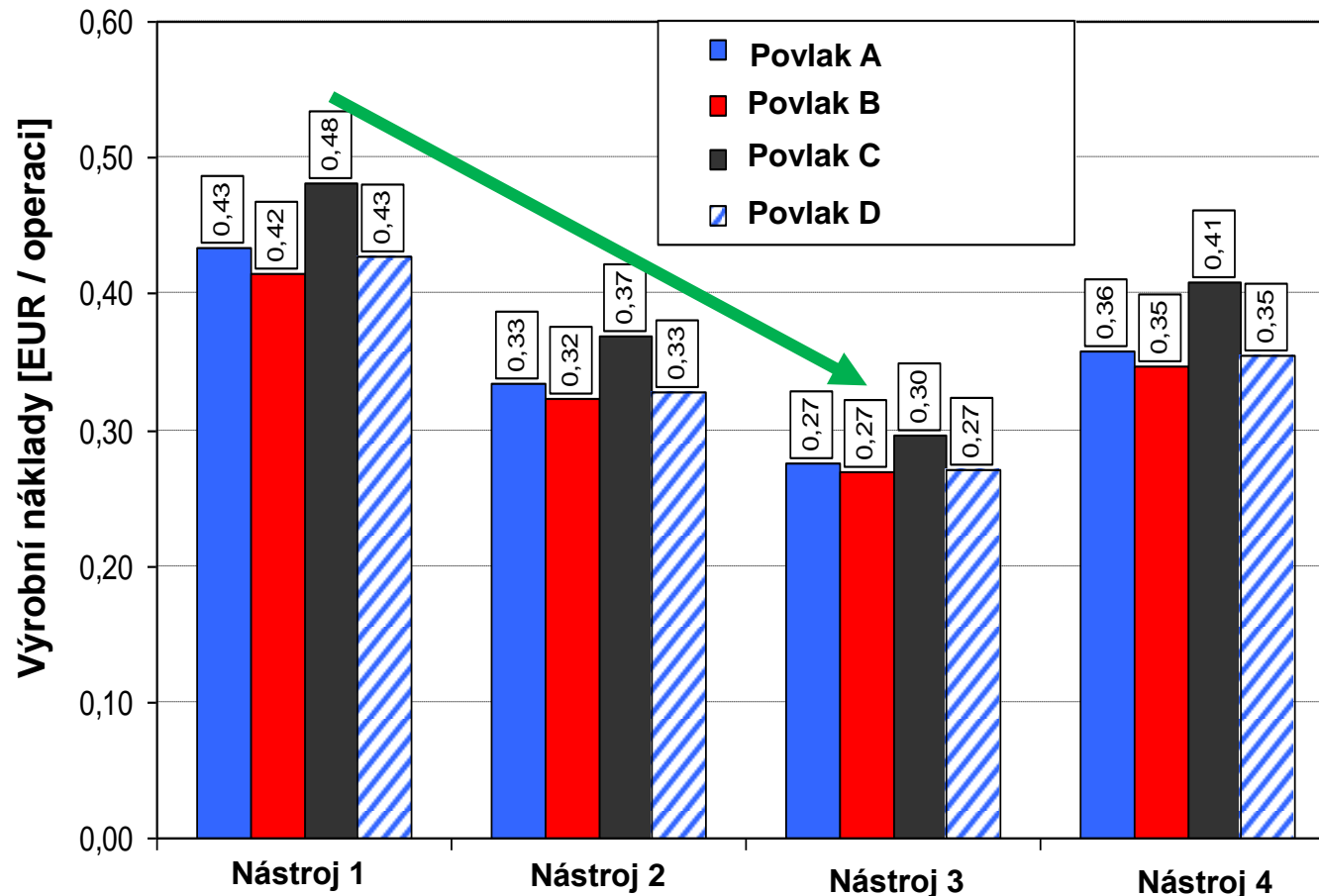


**Výsledek:**  
 Optimalizací řezných podmínek (bez dalších zásahů do technologie) bylo možné **uspořit 22%** výrobních nákladů na operaci.

$$N = N_s + N_v + N_{nv}$$

## Příklad z praxe - Optimalizace výrobních nákladů

- Hrubovací frézování dílců z nástrojové oceli v žíhaném stavu.
- Optimalizace volby rezného nástroje a povlaku.
- CNC frézka, HRS = 25 EUR/hod.



### Výsledek:

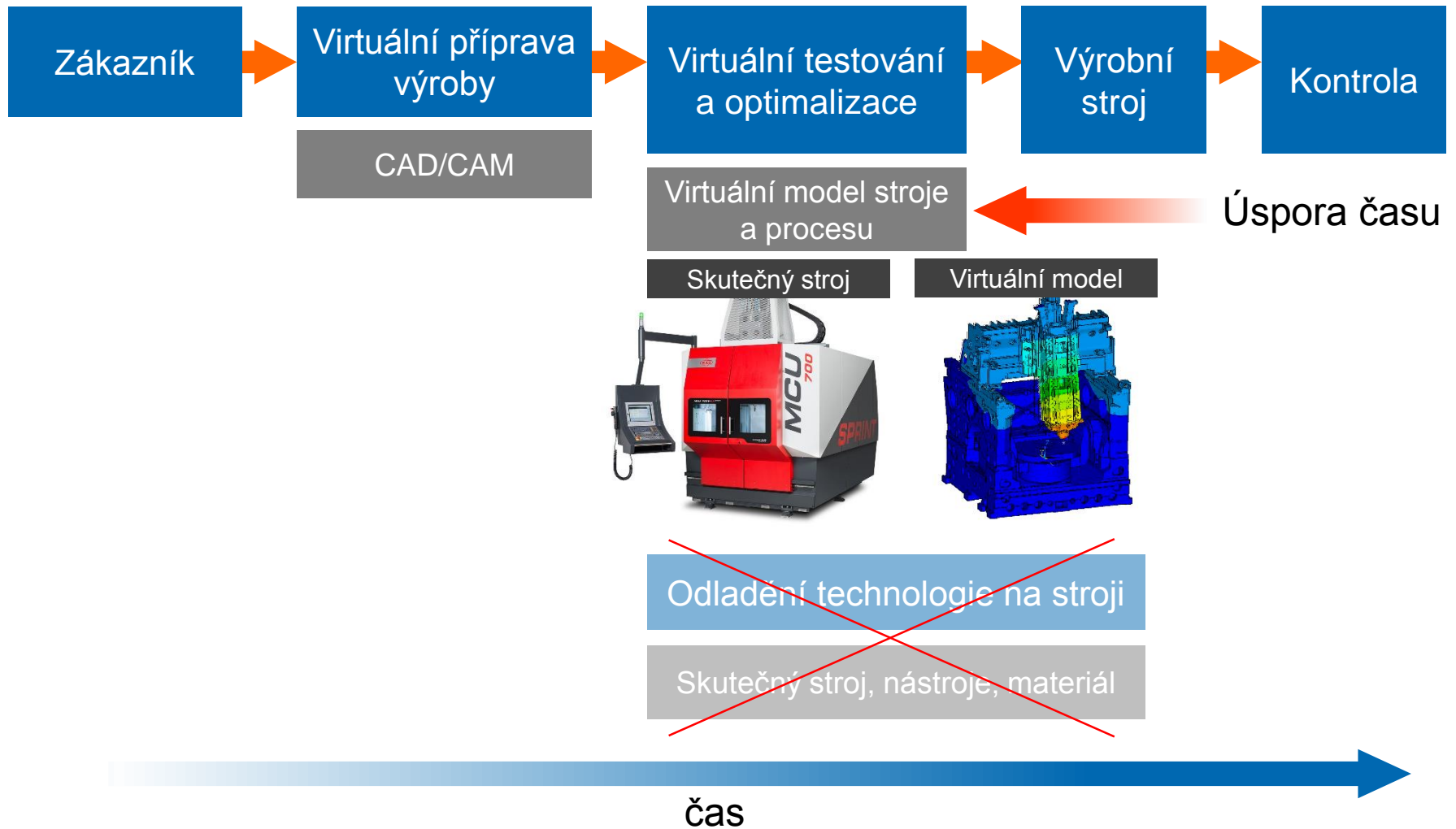
Vhodnou volbou výrobce nástroje a povlaku je možné **ušetřit až 40%** výrobních nákladů na danou operaci.

## Optimalizace výroby - shrnutí

- V oblasti snižování výrobních nákladů nebo zvyšování produktivity je stále **velký potenciál**.
- Optimalizaci lze provádět **v různých fázích** celého **procesu výroby** a na více úrovních, a to včetně samotného procesu výroby na stroji.
- Optimalizace výroby **nemusí být řešena pouze nákladnými investicemi** do výrobního zařízení.
- **Dražší výrobní zařízení** vedou k potenciálně **větším ztrátám výrobních nákladů**.
- **Přesná optimalizace** je složitou záležitostí **se zahrnutím mnoha technicko-ekonomických vlivů**.

# PODPORA VIRTUÁLNÍHO OBRÁBĚNÍ PRO OPTIMALIZACE TECHNOLOGIÍ OBRÁBĚNÍ

# Digitální příprava a virtuální testování CNC obrábění



# Zvyšování produktivity CNC obrábění

- Faktory podílející se na produktivitě v procesu přípravy a realizace obrábění

Upnutí dílce

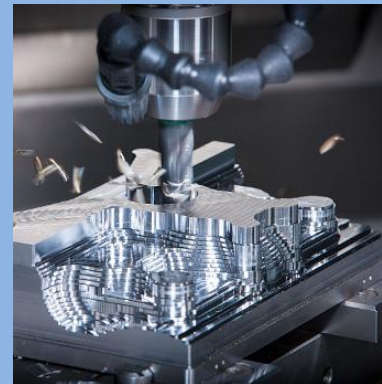


Volba nástrojů a jejich geometrie



Volba strategie dráhy nástroje

Volba řezných podmínek



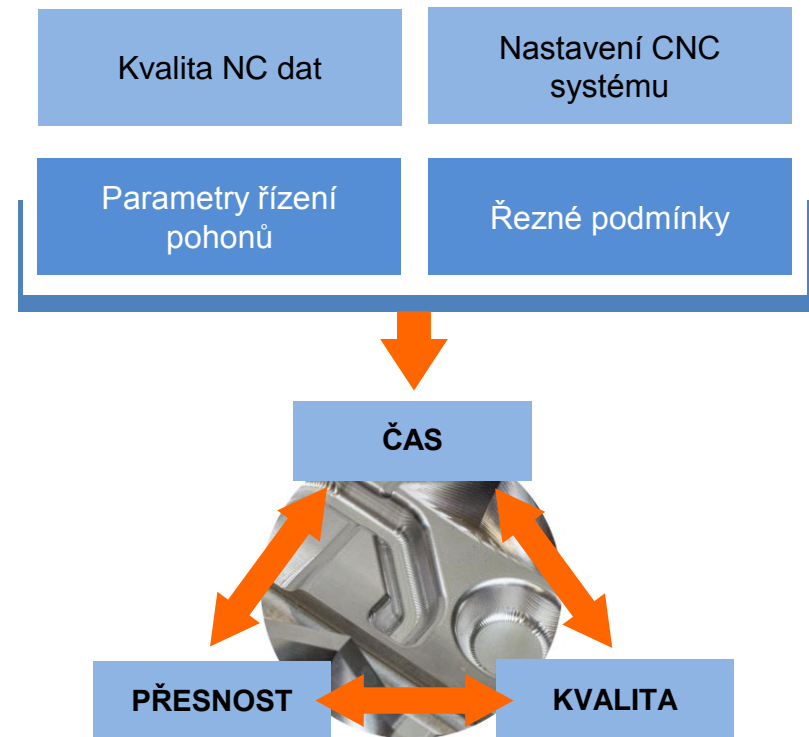
Nastavení řízení stroje





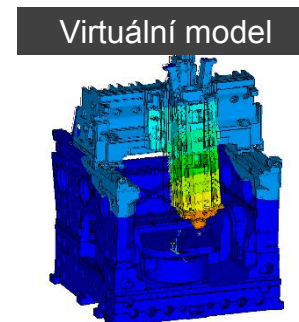
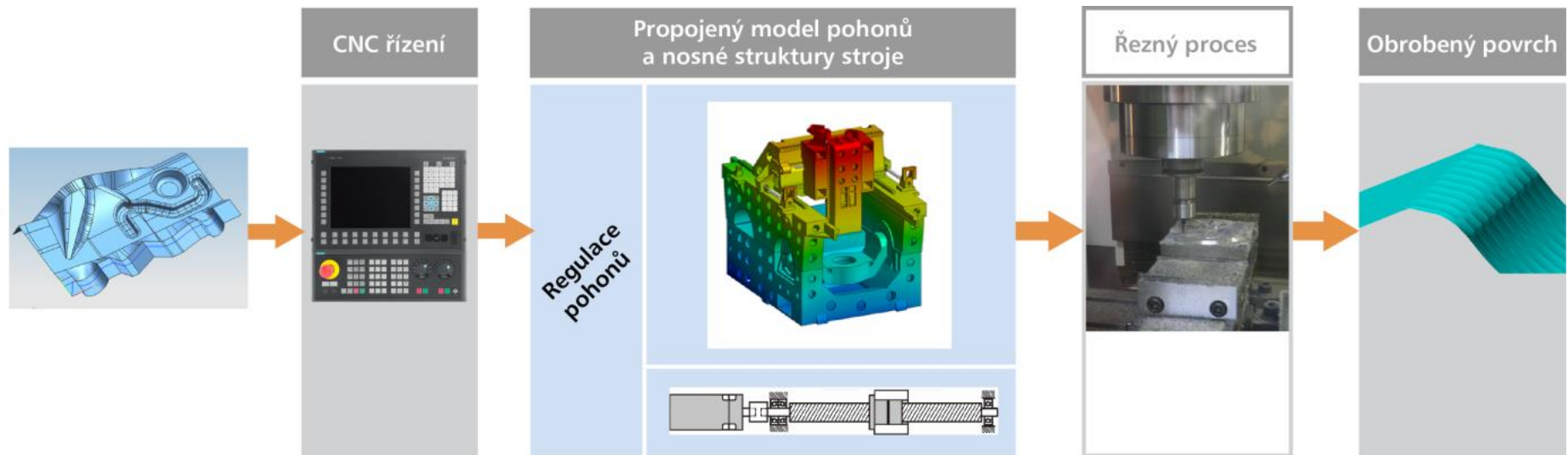
# Nastavení procesu CNC obrábění

- Běžné postupy přípravy obrábění **nevyužívají plně potenciálu možností nastavení CNC řízení stroje a dynamických vlastností**
- Odladění technologií obrábění probíhá jen prostřednictvím **zkušebních testů**
  - Při daném NC kódu testování nastavení rezných podmínek, případně nastavení parametrů pohonů a některých parametrů CNC interpolátoru
  - **Vliv dynamiky systému stroj – nástroj – obrobek není předem znám**



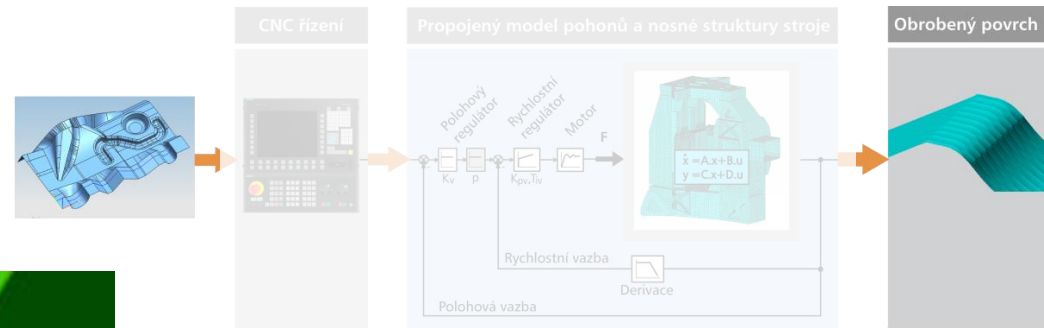
# Virtuální model stroje a obrábění

- Digitální dvojče skutečného stroje a procesu
- Predikce komplexních chyb obrábění



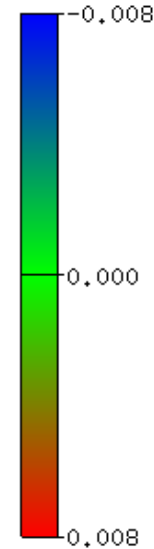
# Kontrola výsledků simulací obrábění

- Běžná CAM simulace



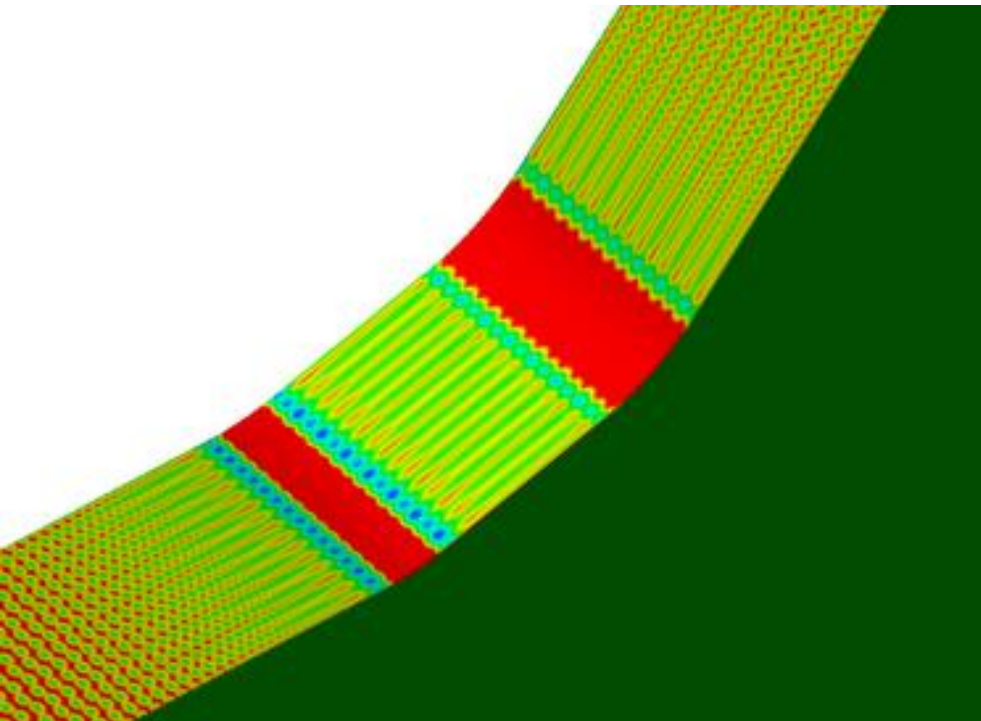
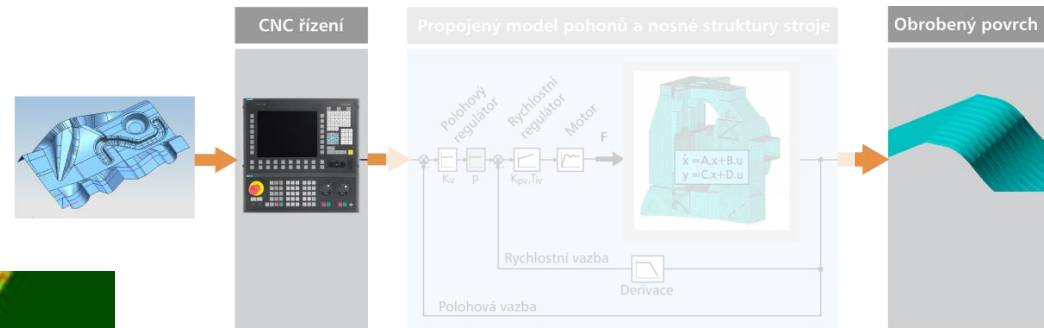
CL data

Deviations [mm]



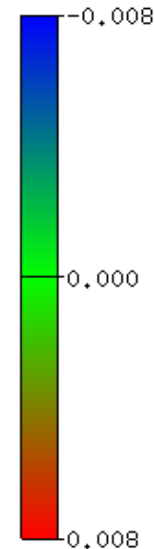
# Kontrola výsledků simulací obrábění

- CNC interpolace
- Časové studie 1:1



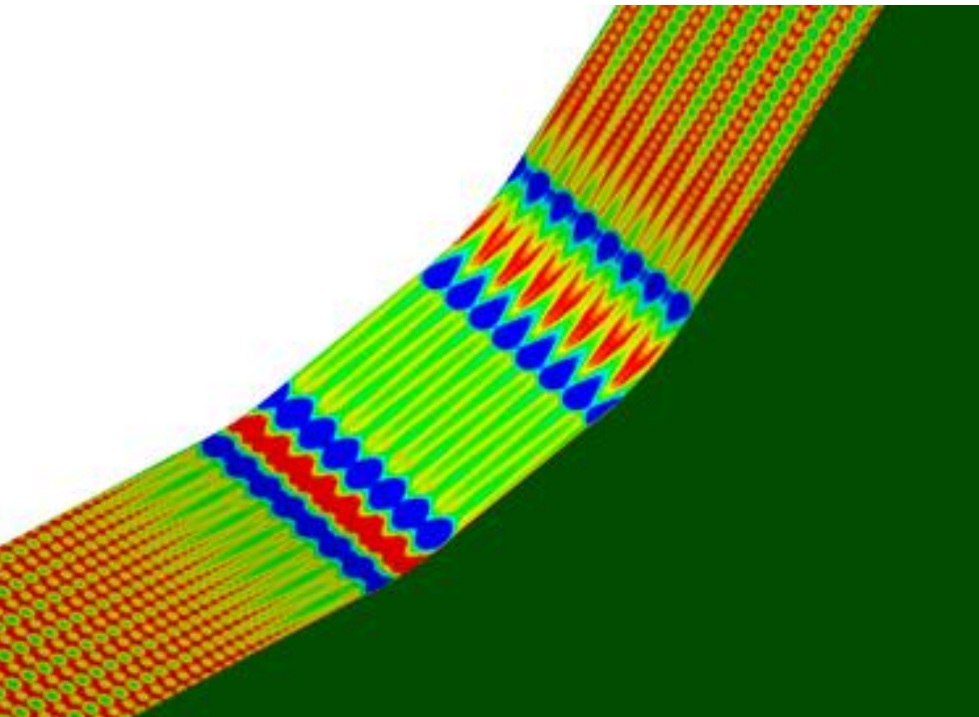
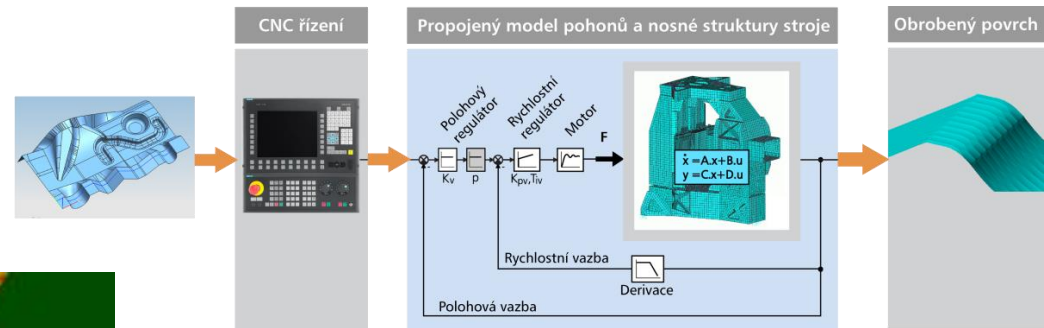
NC data

Deviations [mm]

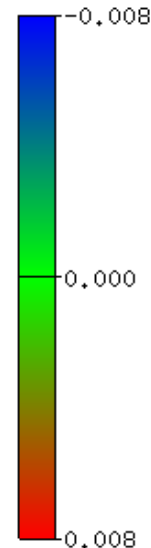


# Kontrola výsledků simulací obrábění

- CNC interpolace
- Model dynamiky stroje
- **Časové studie 1:1**



Deviations [mm]



- Chyby způsobené:
  - Kvalitou NC dat
  - Nastavením interpolátoru CNC
  - Kmitáním systému pohony – mechanika stroje

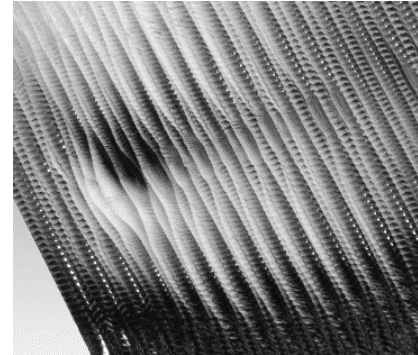
Virtuální simulace

# Virtuální analýza chyb obrobeneého povrchu

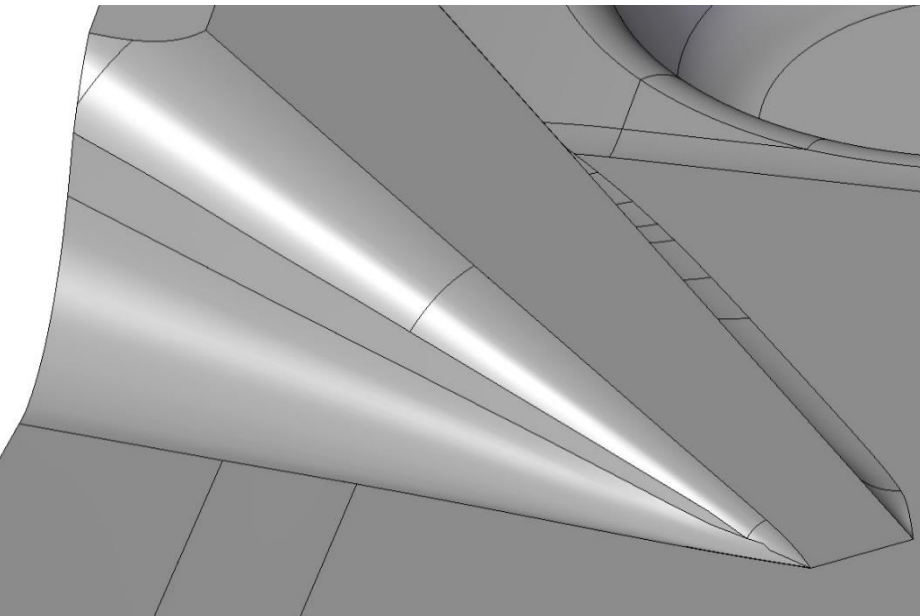
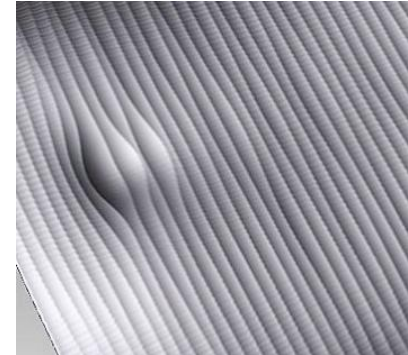
## Dynamické chyby obrbení

- Chyby způsobené:
  - Kvalitou NC dat
  - Nastavením interpolátoru CNC
  - Kmitáním systému pohony – mechanika stroje

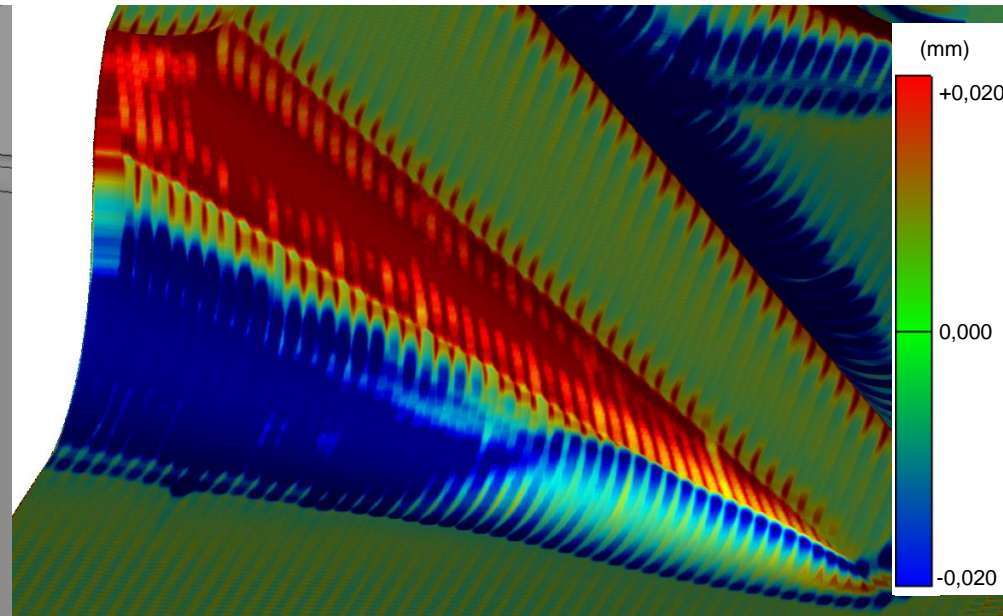
Skutečný obrobek



Virtuální simulace



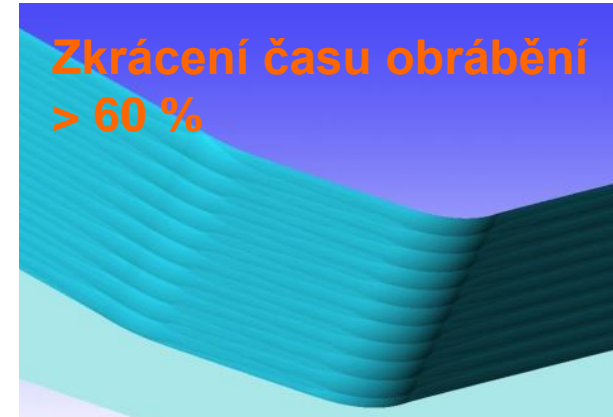
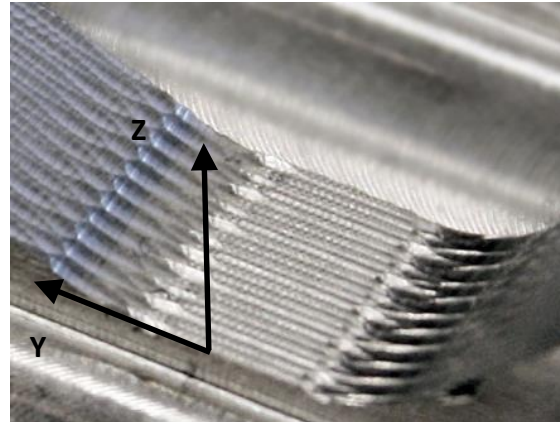
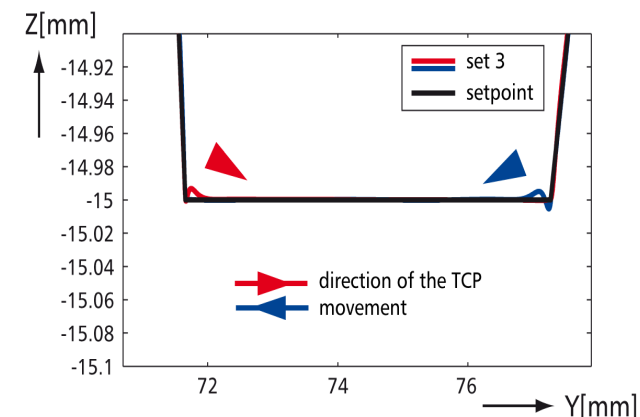
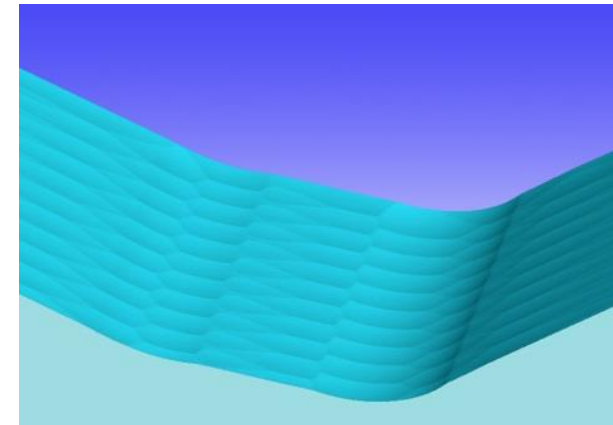
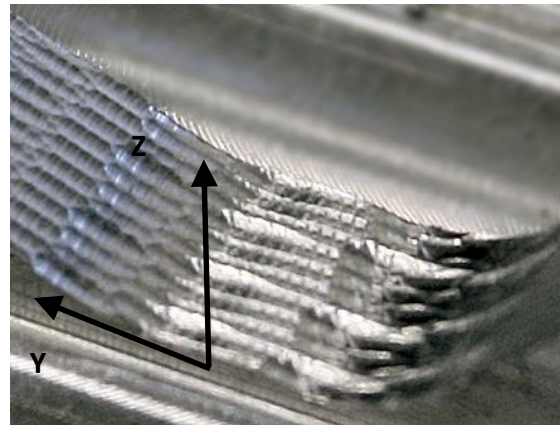
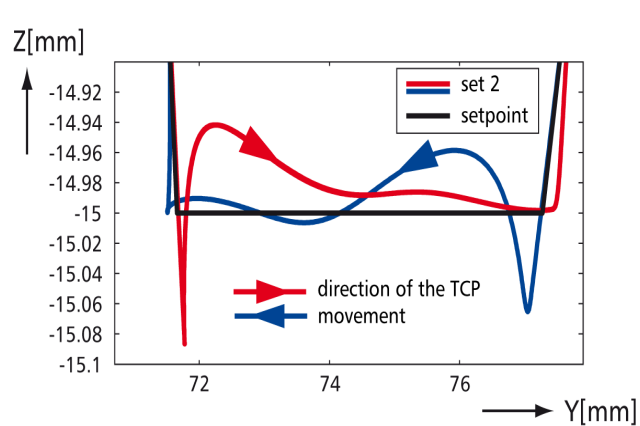
Model CAD



Chyby způsobené CNC interpolací a kmitáním pohonů

# Příklad virtuální optimalizace obrábění

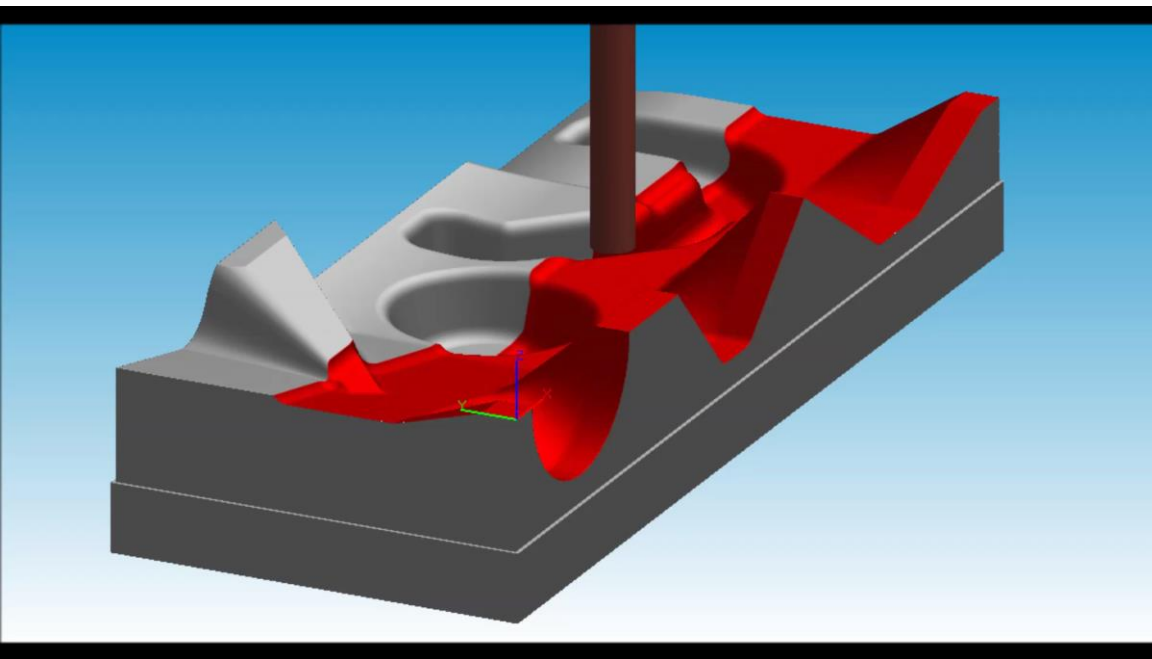
- Analýza vlivu různých nastavení řídicích systémů a CNC funkcí na kvalitu povrchu obrobku
- Díky virtuálnímu modelu možné provádět mimo obráběcí stroj



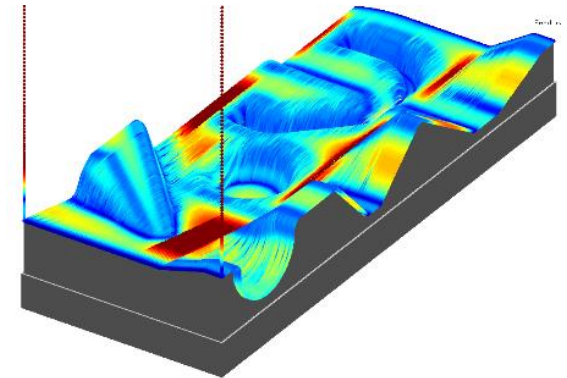
**Zkrácení času obrábění  
> 60 %**

## Příklad virtuální optimalizace obrábění

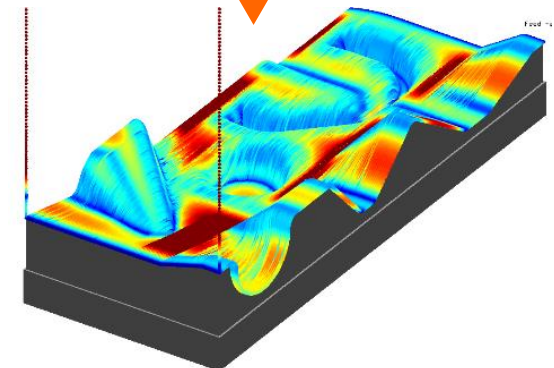
- Analýzy vlivu různých nastavení řídicích systémů a CNC funkcí na čas, kvalitu a přesnost povrchu obrobku



Zkrácení času obrábění > 20 %



Výchozí nastavení: 557 s

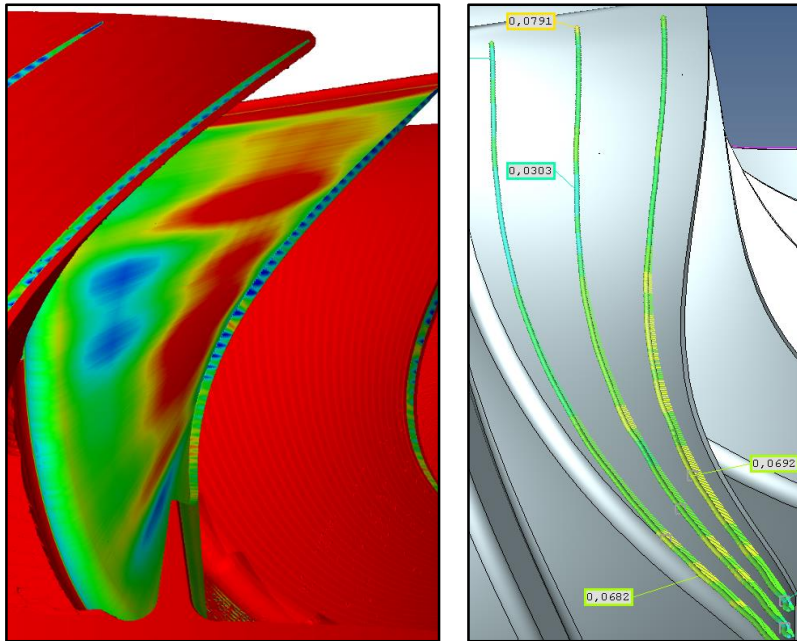


Optimalizované nastavení: 449 s



## Příklad optimalizace kusové výroby

- Obráběcí stroj: Kovosvit MAS MCU 700V – 5X
- Obrobek: oběžné kolo kompresoru Ø 240 x 120 mm, dokončovací obrábění

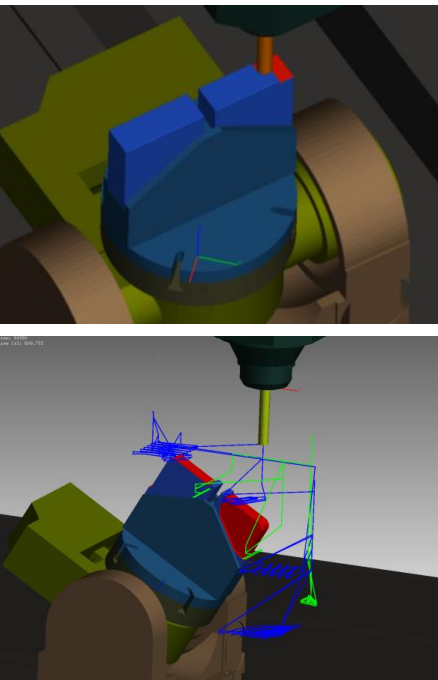


- Původní NC program:
  - doba obrábění 6 min
  - přesnost povrchu 0,04 mm (predikovaná i naměřená)
- Optimalizovaný NC program
  - doba obrábění 2,5 min
  - stejná přesnost povrchu 0,04 mm (predikovaná a naměřená)

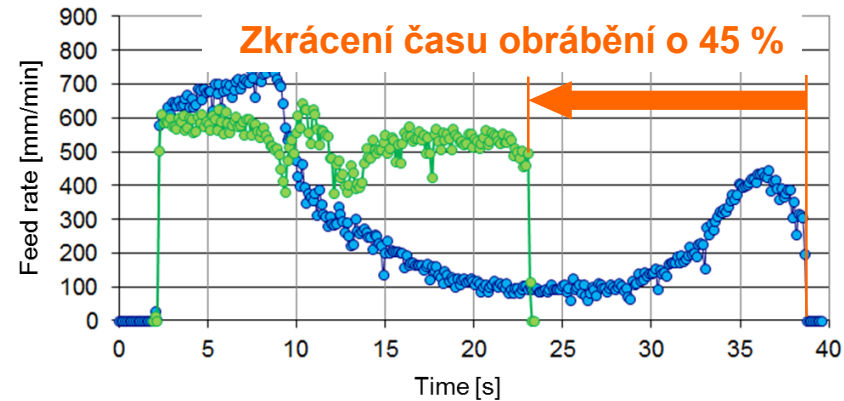
**Zkrácení času obrábění o 58 %**

# Komplexní optimalizace NC programu

- Zkracování časů obrábění pomocí:
  - Optimalizace nastavení CNC systému
  - Optimalizace posuvových rychlostí
  - Přegenerování drah nástroje pro minimalizaci neproduktivních časů obrábění

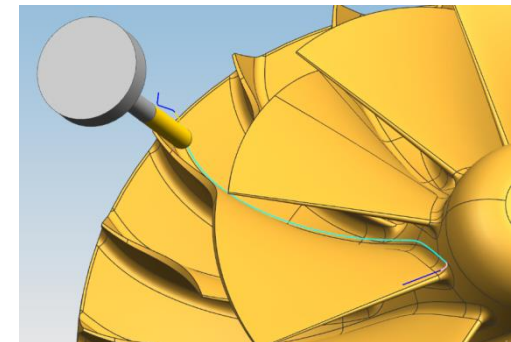
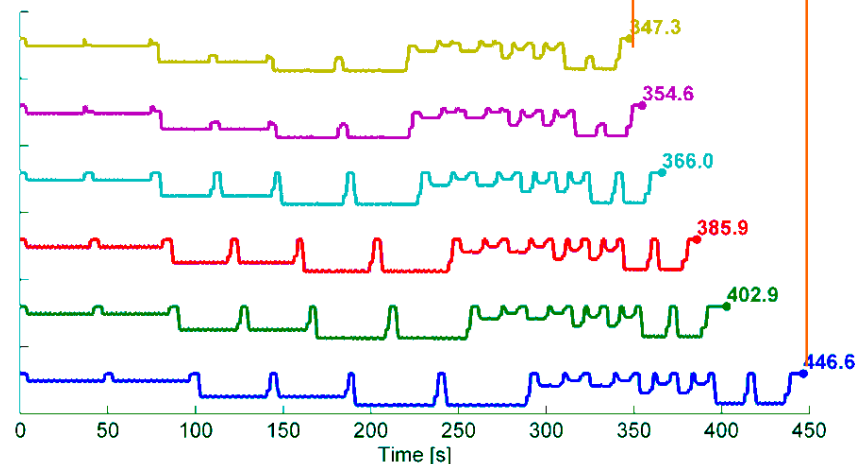


Korekce posuvových rychlostí v 5ax obrábění



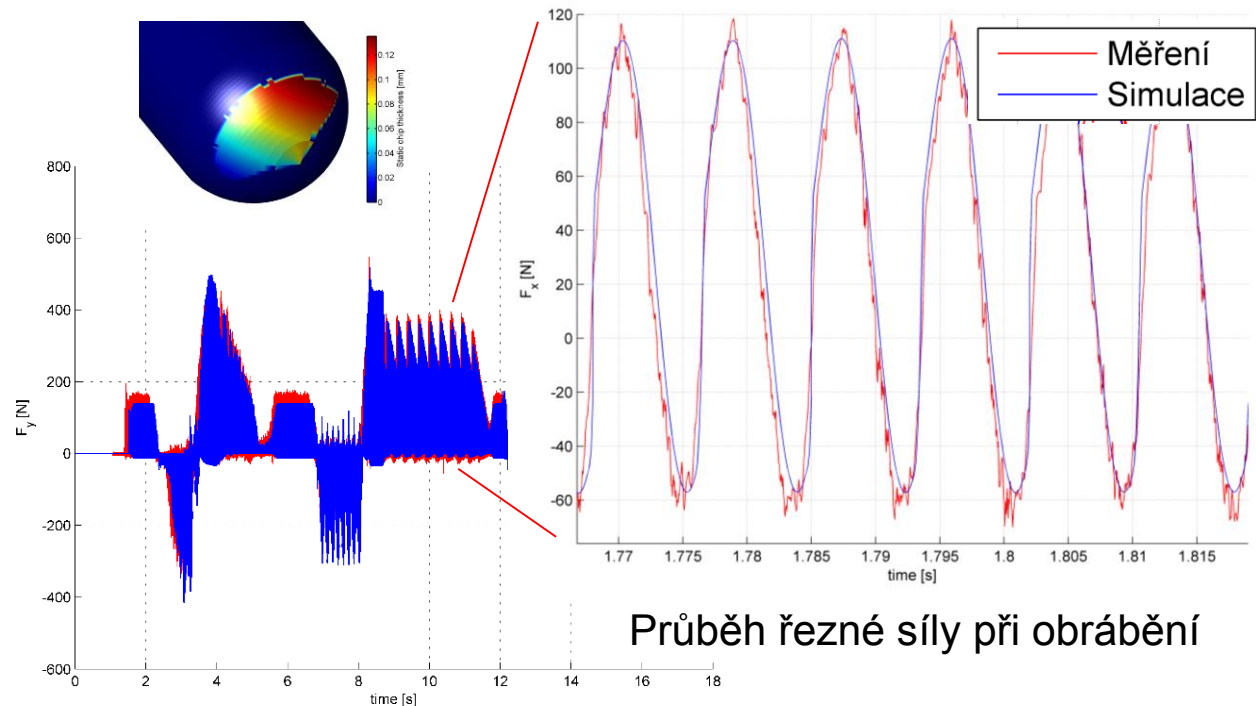
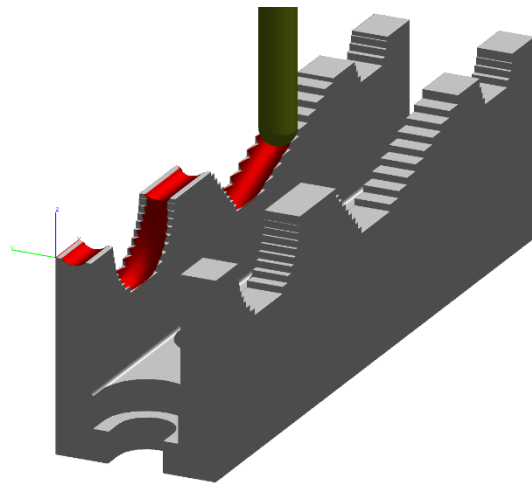
Optimalizace NC programu a nastavení CNC

**Zkrácení času obrábění > 24 %**



# Simulace zatížení nástroje a vřetene

- Real – time simulace řezných sil při obrábění
- Simulace zatížení nástroje a vřetene podél libovolné dráhy nástroje
- Porovnání různých strategií drah nástroje ve vazbě na životnost nástroje



## Shrnutí

- Virtuální model stroje jako účinný nástroj pro simulace a hodnocení výsledků obrábění
  - Analýzy vlivu nastavení CNC interpolátoru
  - Analýzy vlivu dynamických vlastností stroje
- Věrohodné simulace **kvality, přesnosti a času obrábění**
- Optimalizace **technologických parametrů** obrábění
  - Zkracování času obrábění
  - Optimální nastavení posuvů, rezné rychlosti, úhlů vlečení a odklonu apod. podle řady kritérií
    - Přesnost, kvalita, čas, zatížení nástroje, zatížení pohonů, stabilita, ...
- Optimalizace **dráhového řízení**
- Optimalizace **zatížení** pohybových os stroje

# Děkujeme za pozornost

**Ing. Pavel Zeman, Ph.D.**

*Odborný garant pro oblast technologie*

E: P.Zeman@rcmt.cvut.cz

**Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.**

*Odborný garant pro oblast výpočtů a simulací*

*Vedoucí pro projekty spolupráce*

E: M.Sulitka@rcmt.cvut.cz

[www.rcmt.cvut.cz](http://www.rcmt.cvut.cz)