



FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE

RCMT váš partner pro výzkum a vývoj

# Data a digitální nástroje pro zdokonalenou podporu procesů obrábění

M. Sulitka, P. Kolář, J. Švéda, M. Mareš, L. Novotný

Strojírenské fórum 2020 | 5. 11. 2020

---

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

- **Inteligentní výroba**

---
- **Data jako zdroj informací**

---
- **Zpracování a využití dat**

---
- **Adaptivní řízení procesů**

---
- **Systemy integrace dat**

---
- **Shrnutí**

# Inteligentní výroba

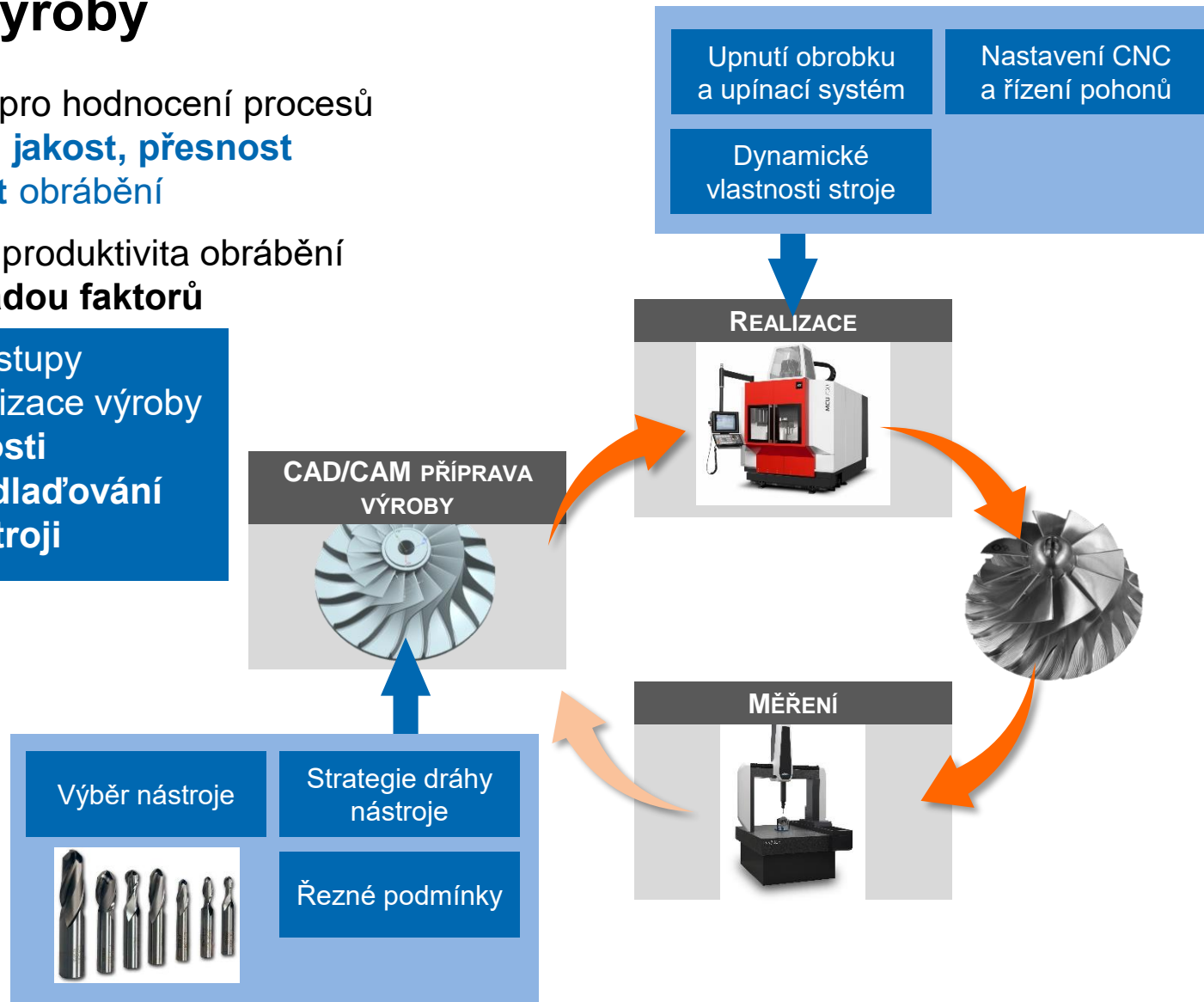
## Inteligentní výroba = výroba, které rozumíme

- Pro schopnost účinného řízení výroby **je nutno znát stav a chování stroje** ve výrobních procesech
- **Odstraněním člověka z procesu řízení stroje** se připravujeme o řadu senzorů a inteligentních rozhodovacích funkcí
- Koncept **inteligentního stroje a výrobních systémů s rozšířenou senzoricou** by měl umožnit realizovat výrobu s vyšší spolehlivostí a produktivitou



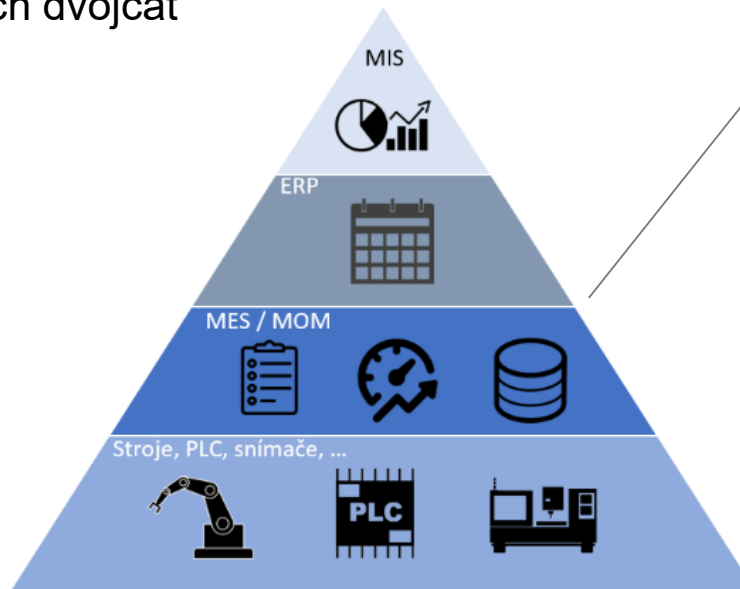
# Realizace výroby

- Hlavní kritéria pro hodnocení procesů obrábění: **čas, jakost, přesnost a spolehlivost** obrábění
- Spolehlivost a produktivita obrábění je ovlivněna **řadou faktorů**
- Standardní postupy přípravy a realizace výroby vedou k **nutnosti testování a odladování postupů na stroji**

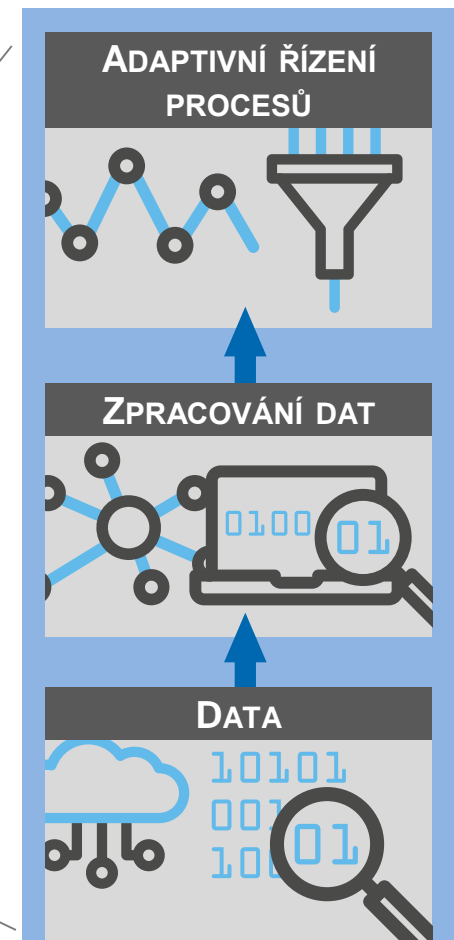


# Data pro podporu realizace inteligentní výroby

- **Data** pro monitorování a zdokonalenou znalost chování strojů a schopnosti jejich využití; propojení s MES systémy
- **Analýza a zpracování dat**, využití modelů a digitálních dvojčat pro hodnocení a predikci chování strojů
- **Automatizované adaptivní řízení procesů** (off-line, on-line) s využitím modelů a digitálních dvojčat



Zdroj: www.mescenter.org

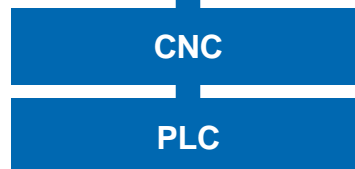


# Digitální modely pro podporu realizace inteligentní výroby

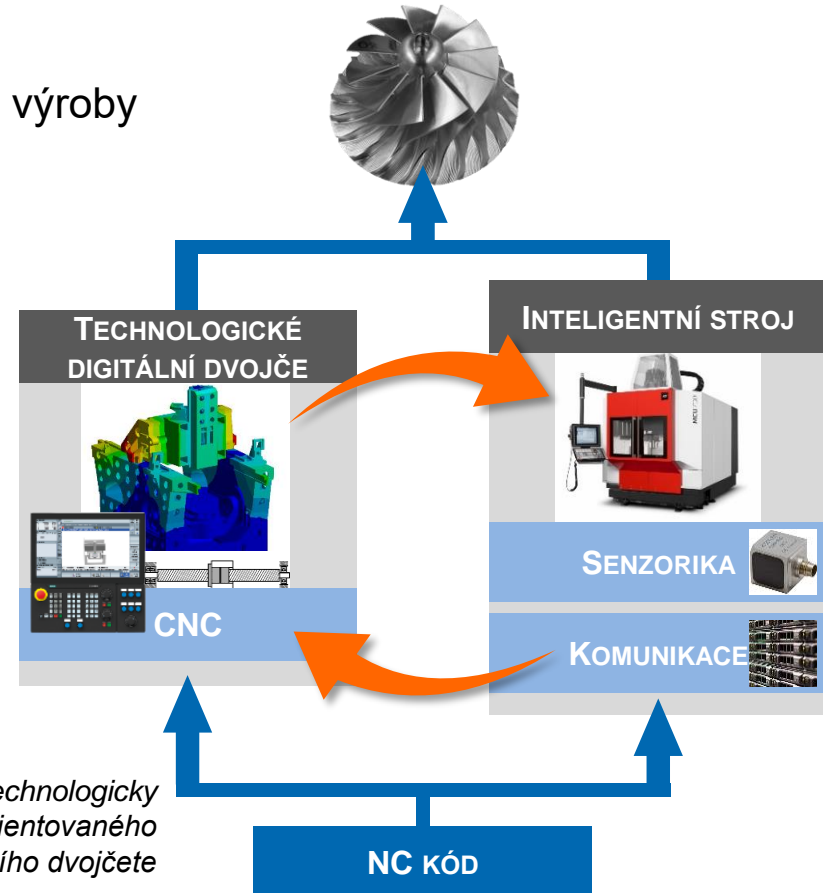
- Různé zaměření digitálních modelů podle jejich uplatnění
- Modely **virtuálního zprovoznění** pro testování kinematické funkčnosti strojů a PLC řízení
- **Digitální dvojčata** pro podporu bezchybové výroby



Ověření a odladění funkčnosti PLC na kinematickém modelu stroje



Koncepce modelu virtuálního zprovoznění

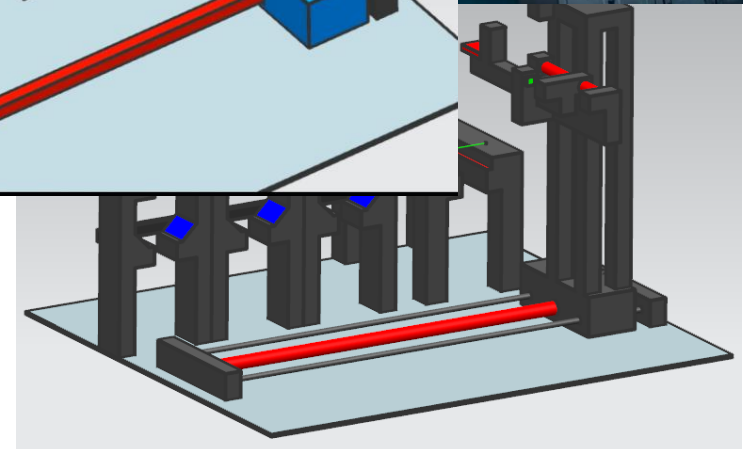
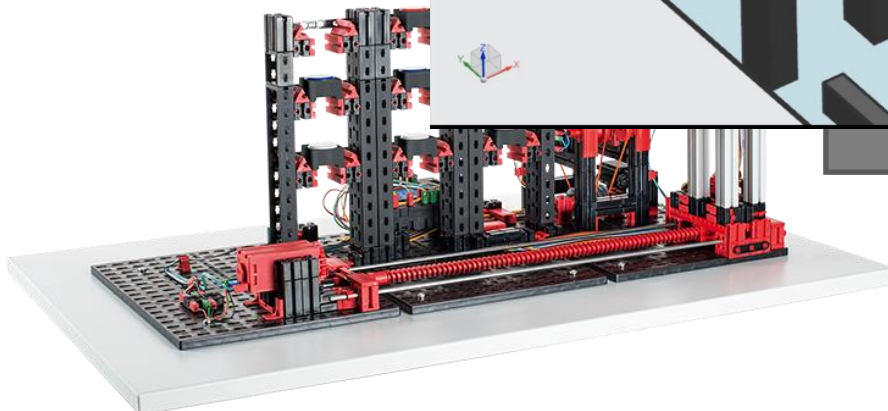
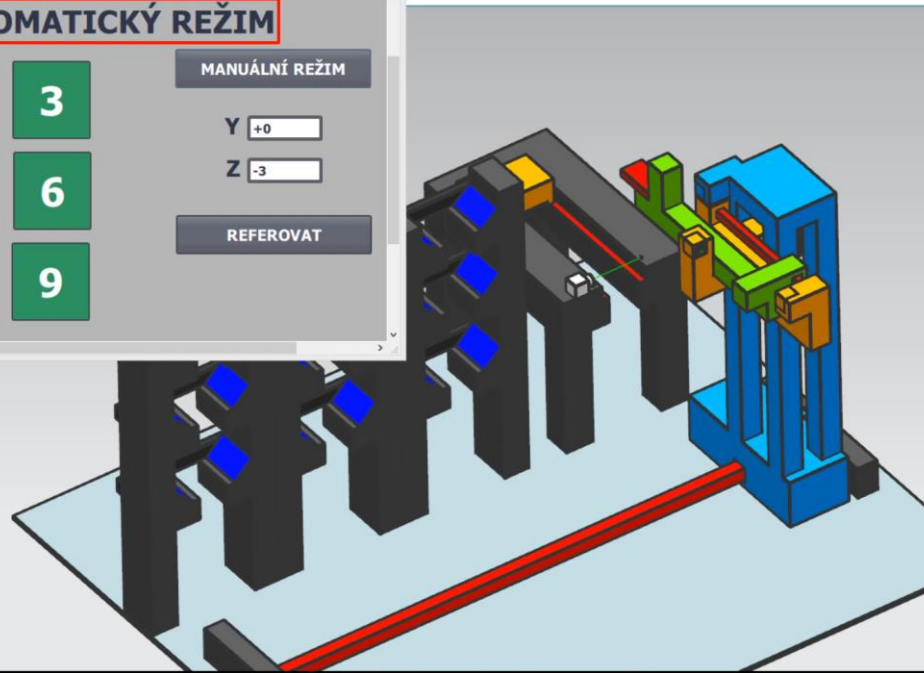
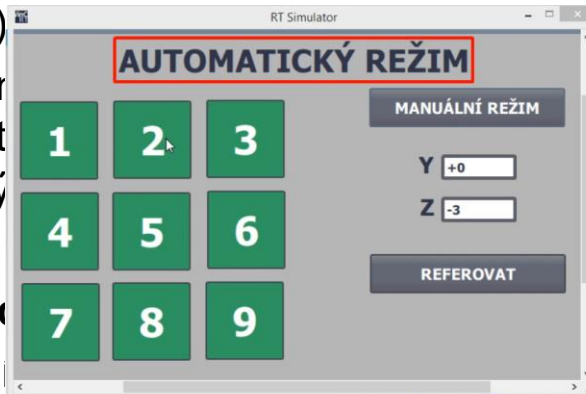


Koncepce technologicky orientovaného digitálního dvojčete



# Virtuální zprovoznění

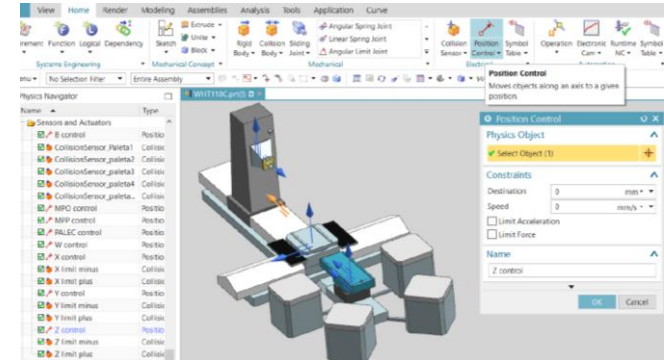
- Nástroj pro tvorbu PLC projektu a odladění jeho funkce (při oživování strojů nebo celých linek)
- Zjednodušené nastavení a doplnění detailů (například pneumatických součástí)
- **PLC Simatic**
  - Virtuální PLC
  - Model v reálném čase



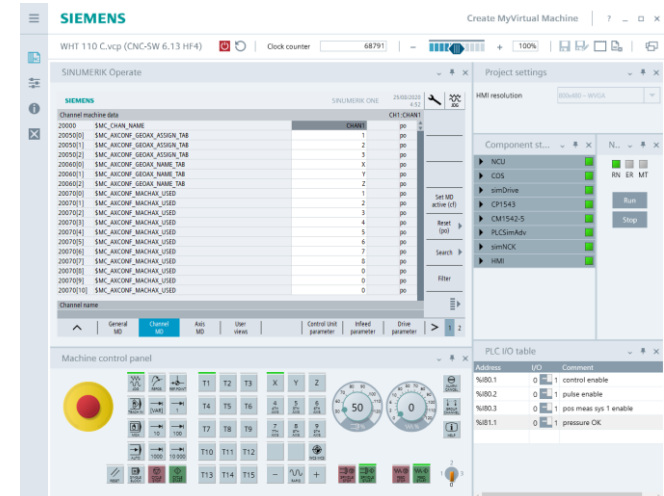
# DIGITÁLNÍ DVOJČATA

## Virtuální zprovoznění

- **Sinumerik ONE (popř. 840D sl)**
  - Virtuální řídicí systém včetně HMI
  - Model stroje v NX Mechatronics Concept Designer
  - Simit pro modelování fyzikálního chování

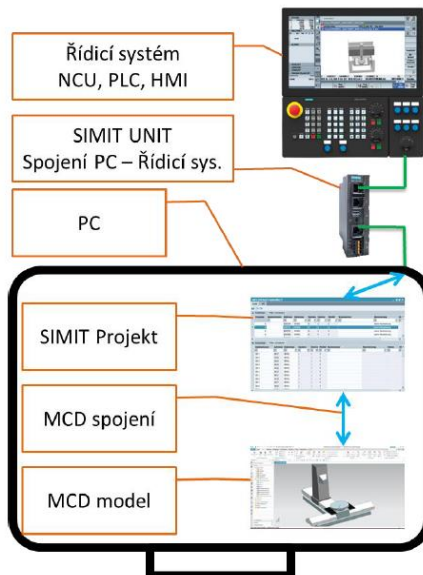


Model stroje v MCD

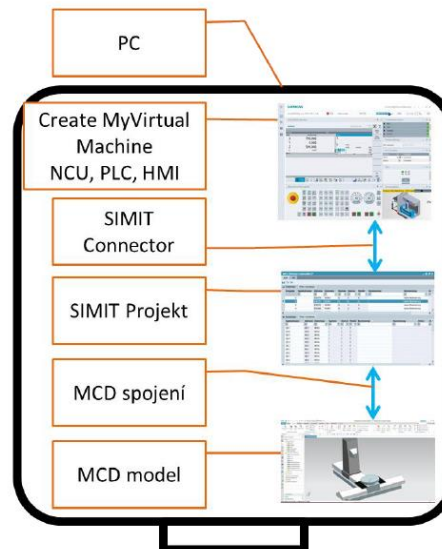


Sinumerik ONE  
Create MyVirtual Machine

SINUMERIK 840D sl



SINUMERIK ONE

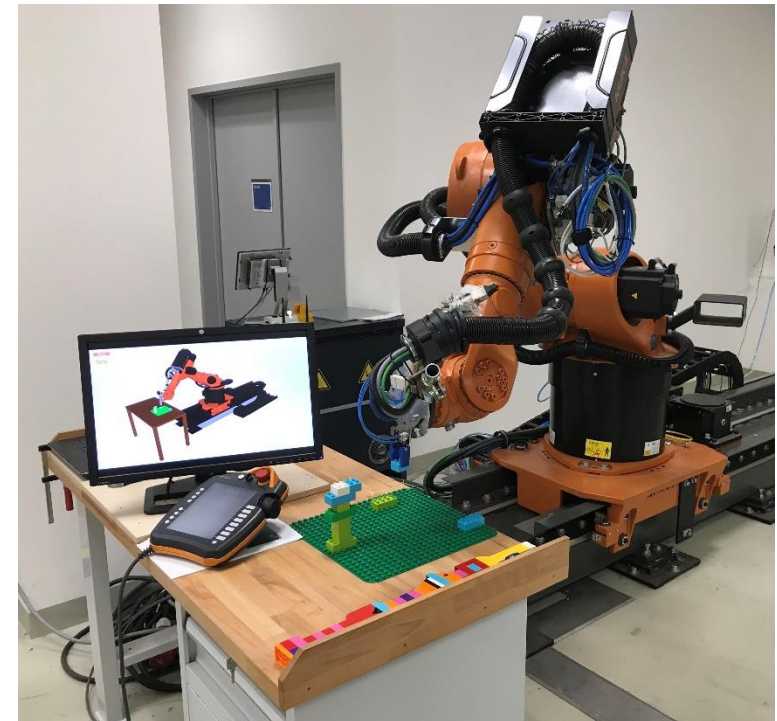
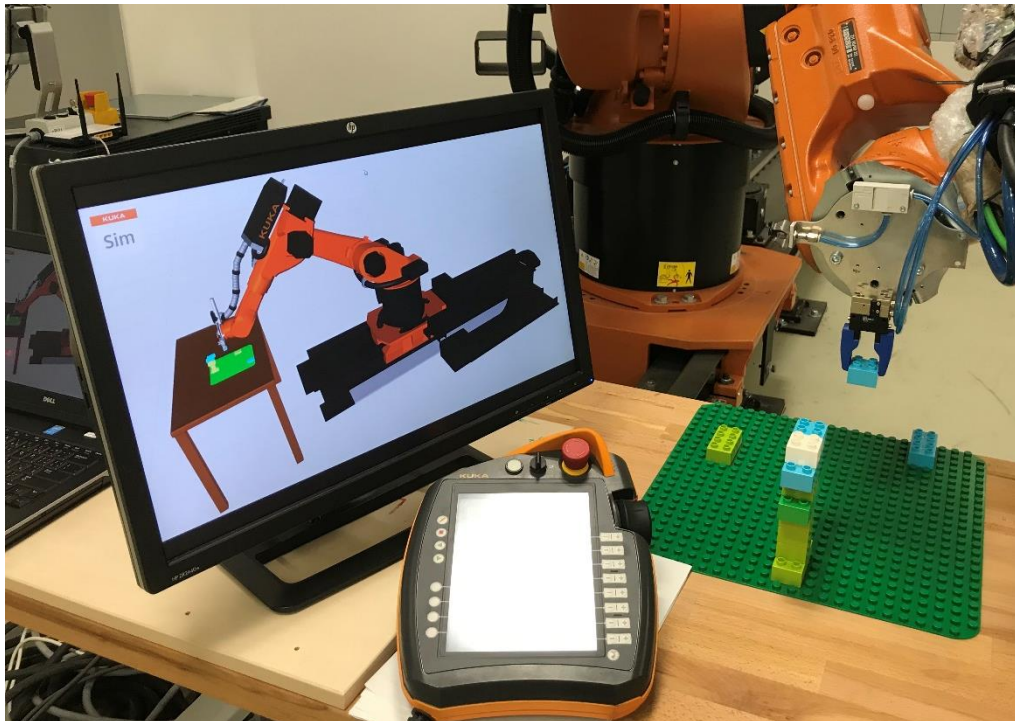


Porovnání virtuálního zprovoznění pro  
Sinumerik 840D sl a Sinumerik ONE



## Virtuální zprovoznění

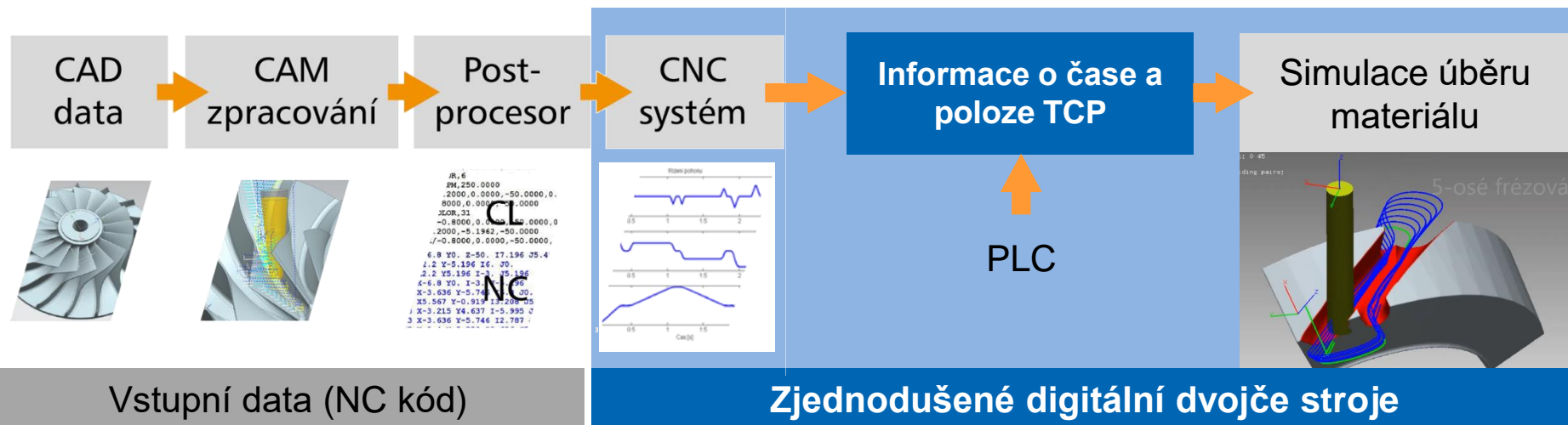
- Průmyslové roboty KUKA
  - Virtuální řídicí systém + smartPad (OfficeLite)
  - Model buňky – robot a technologie (SimPro)
  - Kontrola kolizí a funkčnosti programu



# Technologicky orientované digitální dvojče stroje

## Zjednodušený model:

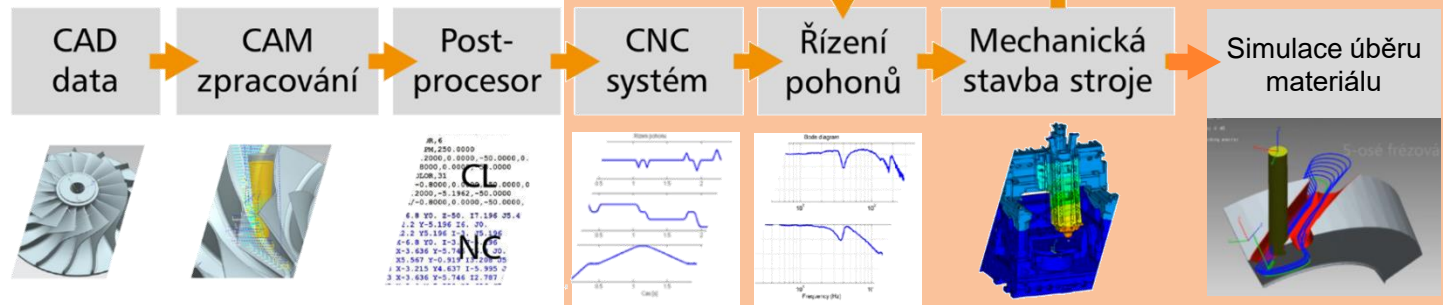
- Obsahuje **interpolátor, reprezentaci CNC řídicího systému a model PLC**
- Tyto virtuální stanice umožňují načíst NC kód a velmi přesně **predikovat čas obrábění** se zahrnutím vlivu reálné dynamiky interpolátoru CNC
- Nelze jej využít pro plnohodnotnou predikci vlastností obrobku, lze pouze posoudit proces nepřímými parametry (generovaný signál polohy pro pohony)



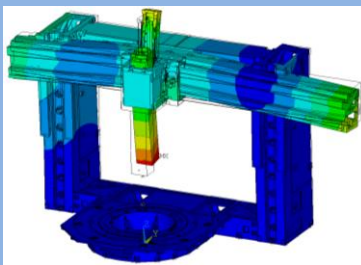
# DIGITÁLNÍ DVOJČATA

## Technologicky orientované digitální dvojče stroje

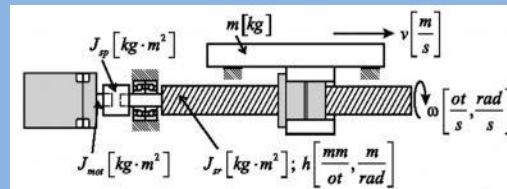
### Plnohodnotný model stroje:



### Plnohodnotné digitální dvojče stroje



Model MKP konstrukce



Propojený model struktury stroje a pohonů včetně řízení



CNC systém

Virtuální obrábění, sdílení dat s jinými systémy

Uložení procesních dat

Paralelní monitoring stroje v provozu

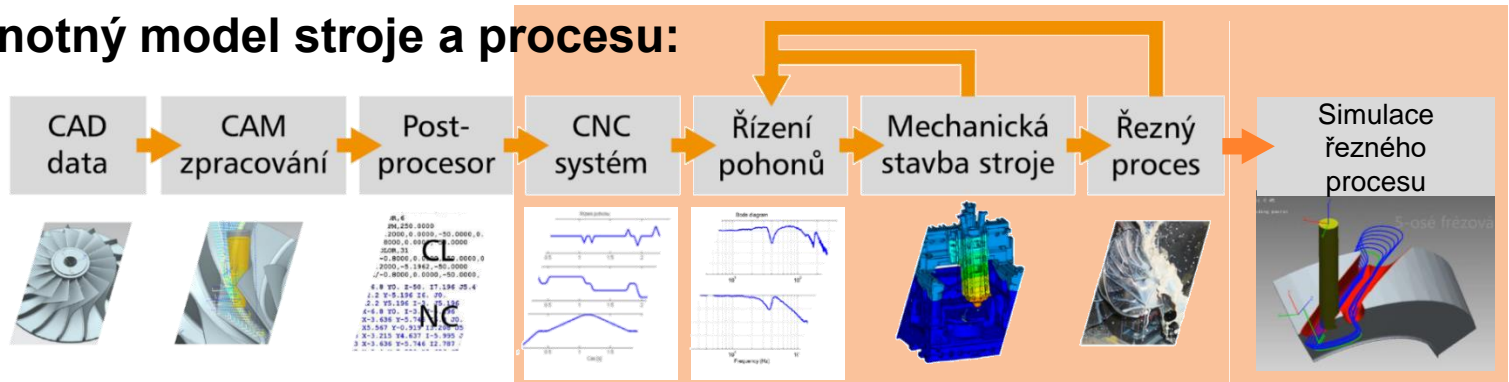
Návrh procesu a virtuální testování

Virtuální testování konstrukce OS

DIGITÁLNÍ DVOJČATA

# Technologicky orientované digitální dvojče stroje

## Plnohodnotný model stroje a procesu:



## Plnohodnotné digitální dvojče stroje a procesu

Model MKP konstrukce

Propojený model struktury stroje a pohonů vč. řízení

CNC systém

04-03-45-02,  $v_c=130$ ,  $f_z=0.025$ ,  $VB_{mean}=37$

Force [N]

Angular position [deg]

Lobe diagram

Virtuální obrábění, sdílení dat s jinými systémy

Uložení procesních dat

Paralelní monitoring stroje v provozu

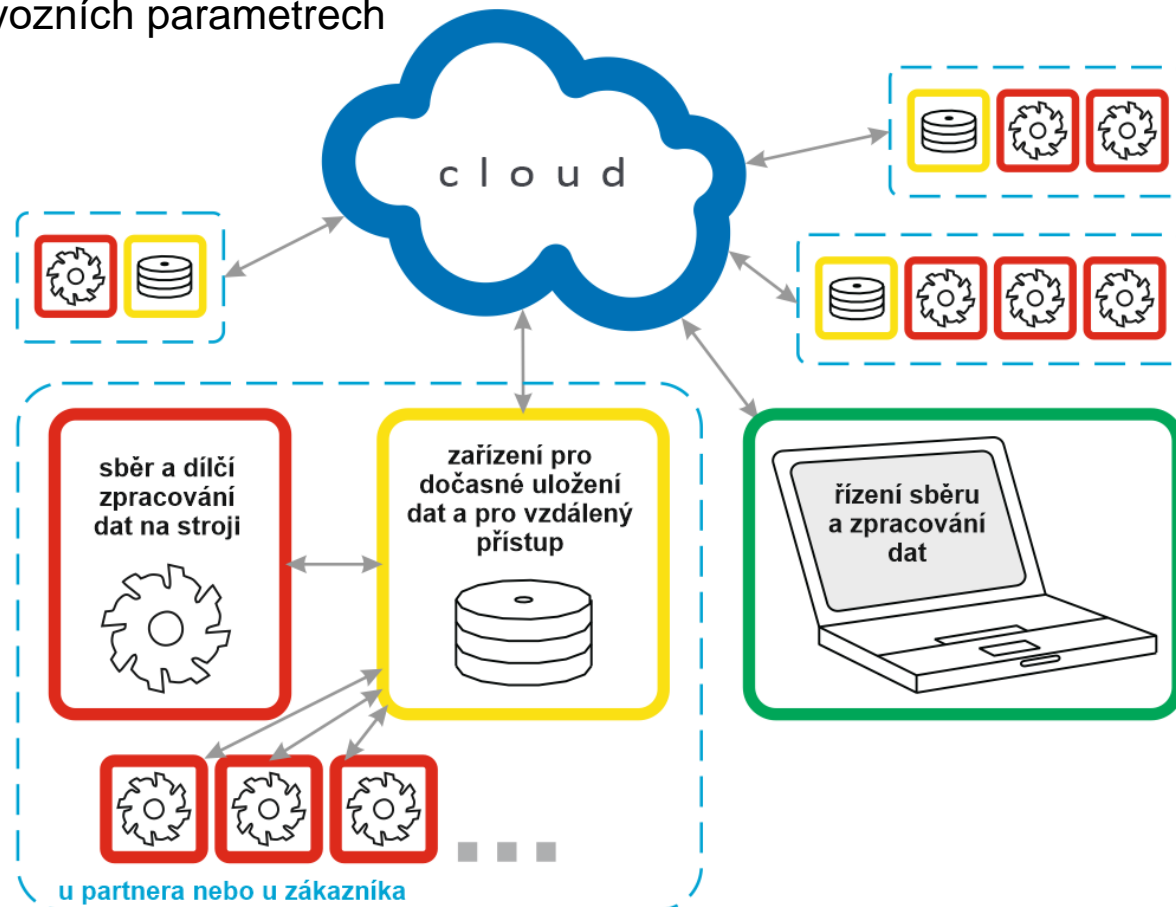
Návrh procesu a virtuální testování

Virtuální testování konstrukce OS

## DATA

# Sběr dat

- Možnost vzdáleného přístupu; možnost centralizovaného sběru dat
- Informace o využití stroje
- Informace o provozních parametrech chování stroje

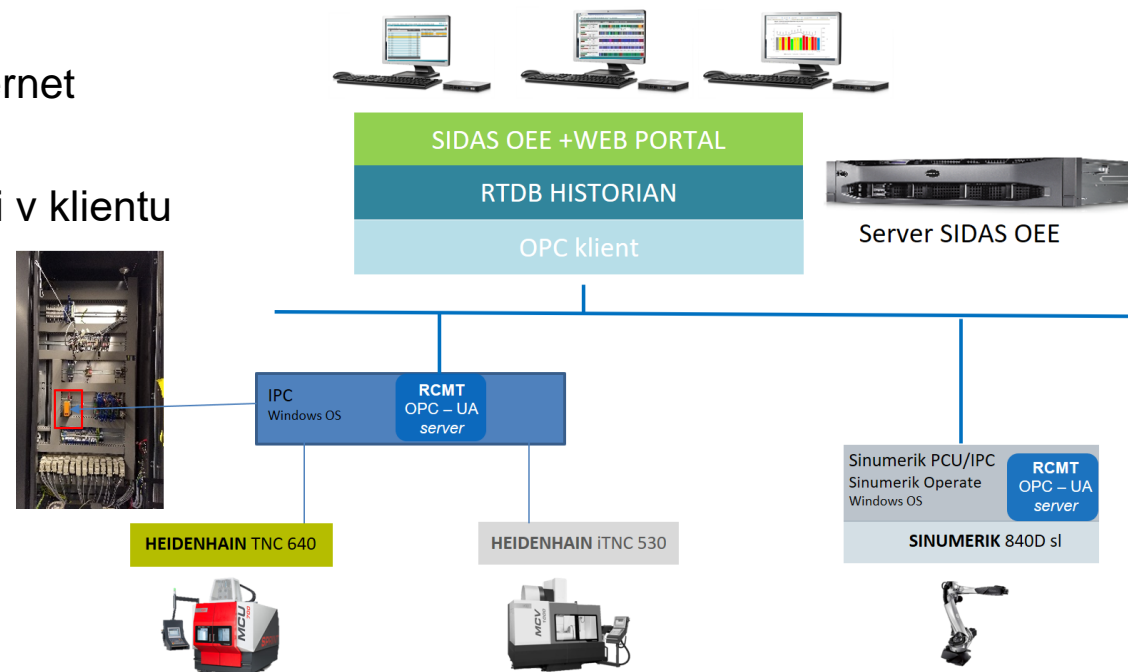




## DATA

# Sběr dat

- Komunikační rozhraní strojů
  - API pro komunikaci s řídicími systémy (Sinumerik, Heidenhain, Fanuc ...)
  - Způsob komunikace i struktura dat jsou rozdílné
- Hlavní skupiny dat
  - Stavové – pomalé, řádově [s]
  - Provozní – rychlé, řádově [ms], nutno zpracovat
- Unifikace pomocí OPC-UA
  - Protokol využívající Ethernet
  - Server na straně stroje
  - Datový model zobrazen i v klientu
- Datové modely,
  - Mohou být různé
  - Snaha o unifikaci základních informací (např. UMATI)





## DATA

# Příklad řešeného projektu

- Vývoj integrační platformy - Cluster 4.0 Integration Platform (C4IP)
  - Komplexní rozbor problematiky (výroba, optimalizace)
  - Interakce mezi výrobními stroji a nadřazenou řídicí platformou
- První výstupy: komunikace výrobních strojů s MES SIDAS (datové propojení a datový komunikační model)



Koordinátor:



Partner:



Průmysloví partneři:



Podporovatelé:



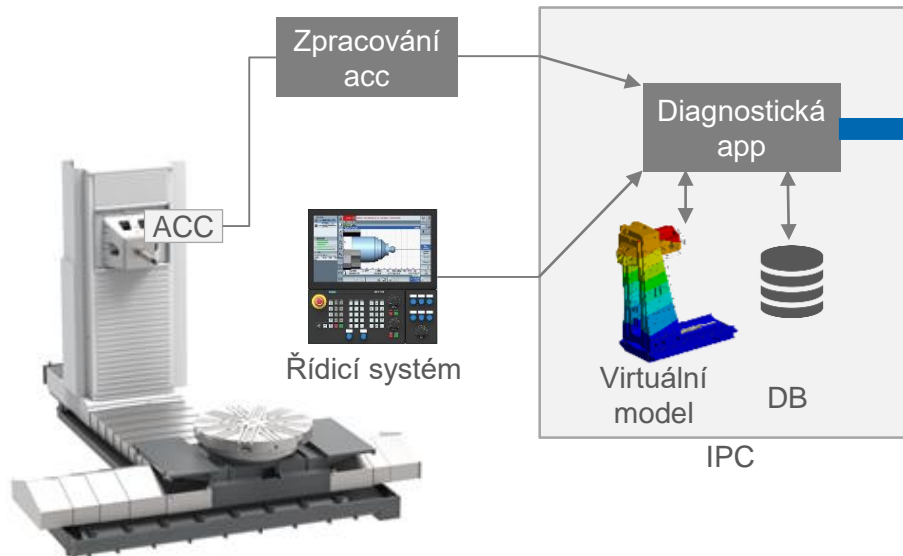
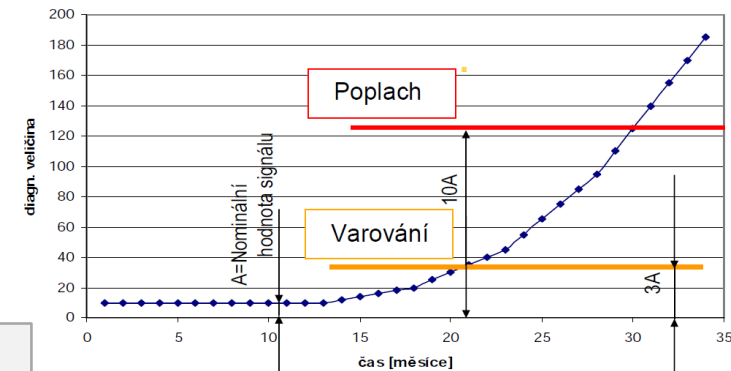
NÁRODNÍ CENTRUM  
PRŮMYSLU 4.0



## ANALÝZA DAT

# Měření a diagnostika vřeten

- Měření vibrací a zátěžných spekter v servisních cyklech
- Propojení s řídicím systémem
  - Vyčítání dat z ŘS a synchronizace s acc
- Vyhodnocení dat a sledování trendů
  - Zpracování dat
  - Porovnání s matematickým modelem
- Prediktivní údržba



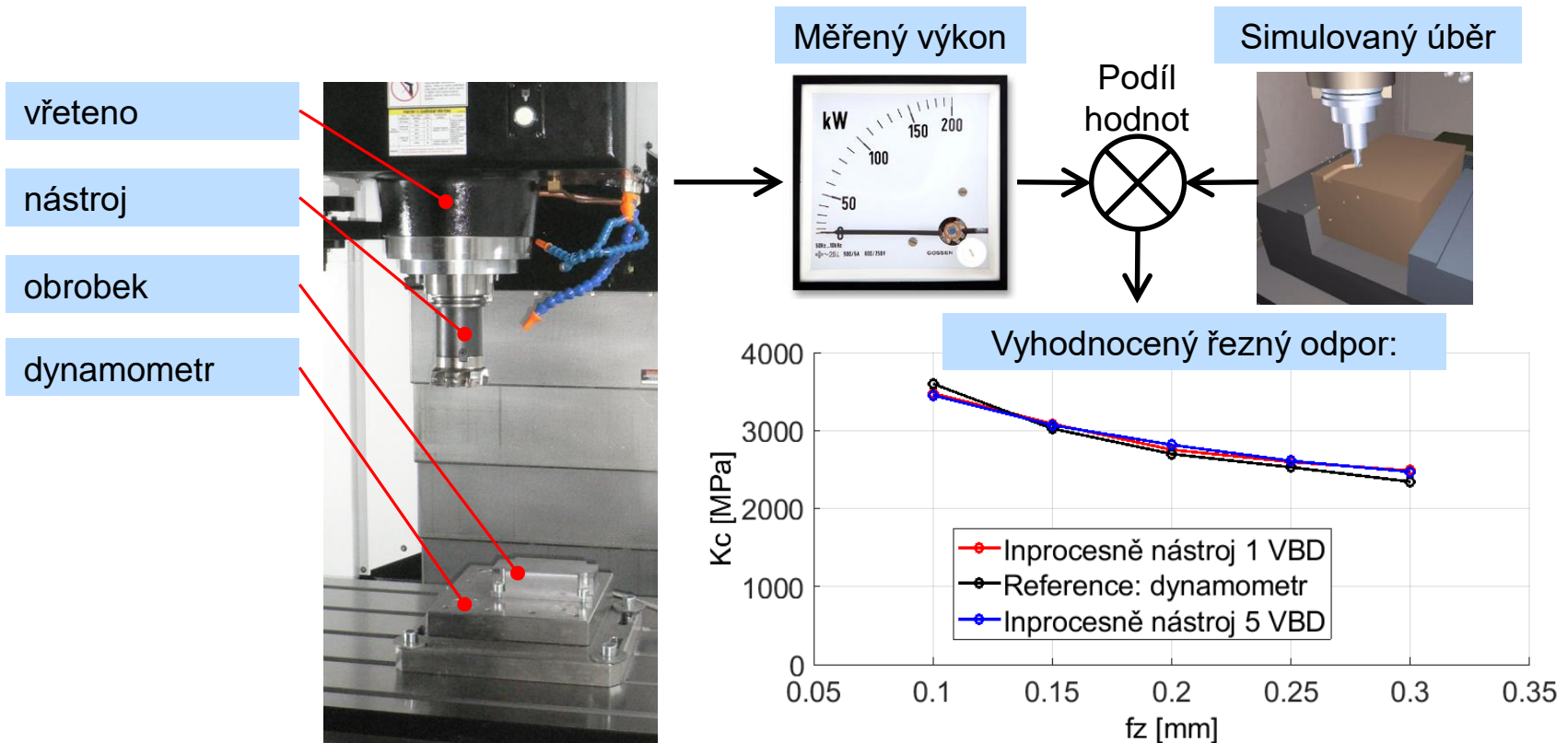
- Sledování trendů
- Aktuální stav vřetene a predikce budoucího stavu

**VARNSDORF**  
**TOS**

## INPROCESNÍ ANALÝZA DAT

# Inprocesní identifikace řezného odporu na stroji

- Specifická řezná síla  $K_c$  charakterizuje silovou interakci mezi břitem (v konkrétním stavu) a materiálem obrobku (v konkrétním stavu) při konkrétních řezných podmínkách.
- $K_c$  lze inprocesně v průběhu obrábění dopočítávat z měřeného výkonu na vřetení (reálná data ze stroje) a ze známého objemu odebraného materiálu (virtuální data)



## Měření obrobku ve stroji

- Zjištění skutečného tvaru dílce, využití ke korekci následného obrábění
- Proč je výhodné měřit obrobek ve stroji
  - Není nutné manipulovat
  - Obrobek zůstává ustavený
  - Nevzniká deformace jiným upnutím
- Integrace obráběcího stroje a CMM
  - Implementace metrologického sw do řídicího systému stroje (TouchDMIS)
  - Dotyková sonda
  - Zvýšení přesnosti během měření
- Zvýšení přesnosti
  - Korekce souřadnice dotyku
  - Integrované přídavné odměřování TCP
  - Nebo externí odměřování (např. laser tracker)

## MEZIOPERAČNÍ ANALÝZA DAT

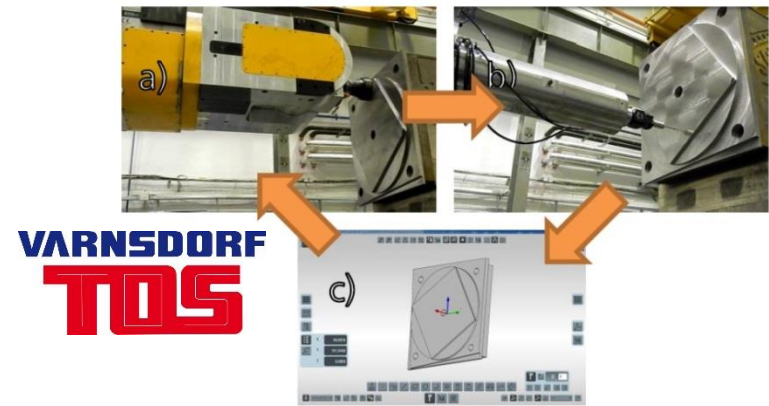


Schéma měření obrobku na stroji s integrovaným metrologickým softwarem

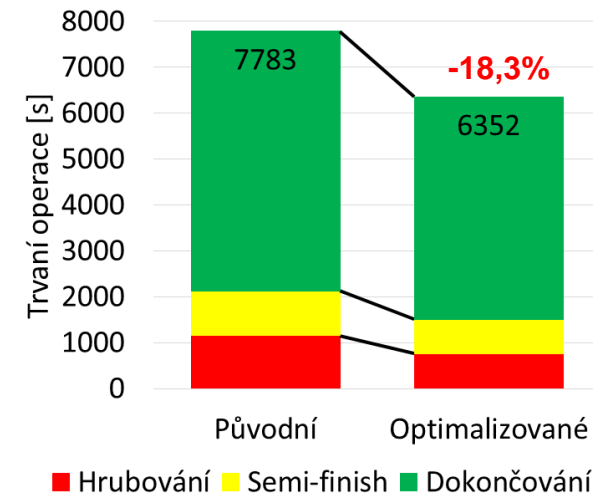
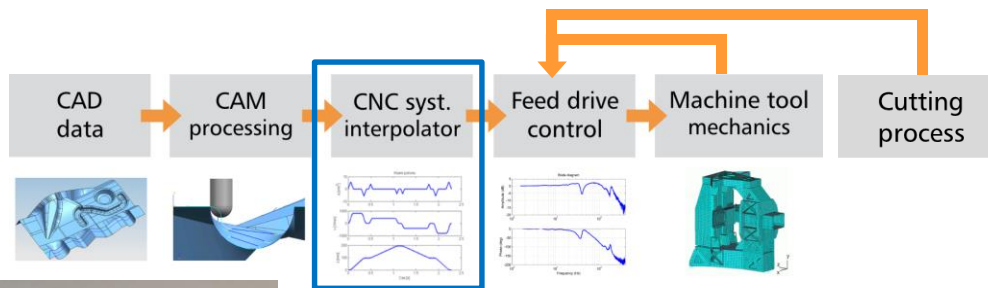


Přídavné odměřování laser trackerem

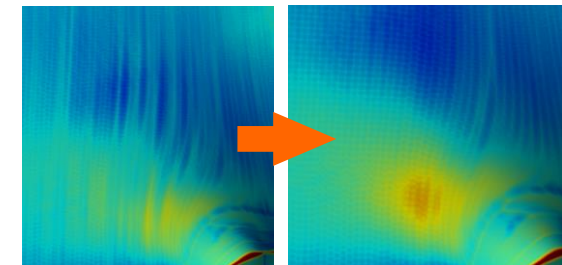
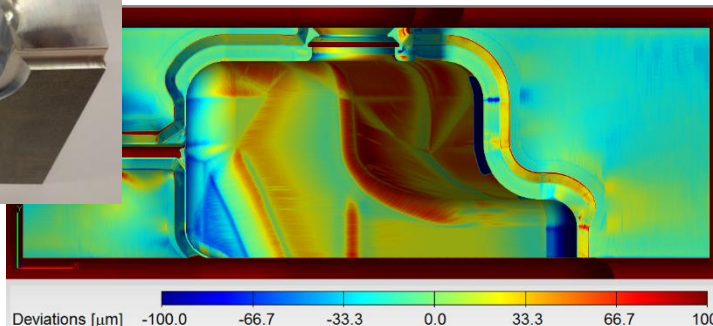
## OPTIMALIZACE PROCESŮ

# Nastavení parametrů CNC systému

- Optimalizace nastavení CNC interpolátoru – zvýšení produktivity při zachování jakosti a přesnosti obrábění
- Pomocí digitálního dvojčete stroje nalezeno nastavení vybraných parametrů (ryv, cut-off frekvence) splňující definovanou přesnost  $\pm 0,1$  mm



**Zkrácení času obrábění o 18 %**



*S úsporou času byla zvýšena i kvalita povrchu*



## OPTIMALIZACE PROCESŮ

# Obrábění tvarově složité poddajné lopatky

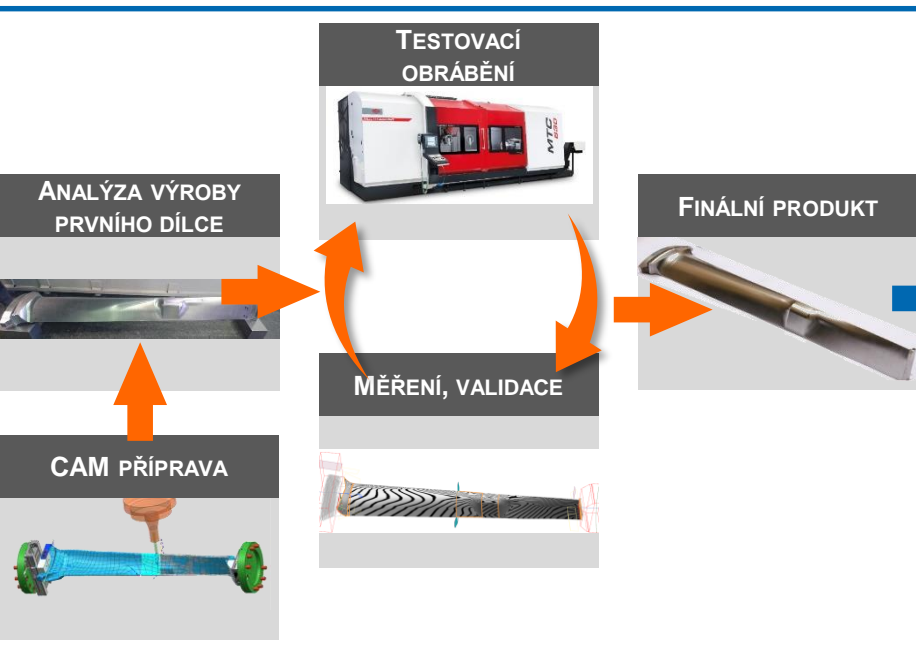
### Cíle úlohy:

- Zvýšit produktivitu u hrubovacích operací
- Zvýšit jakost povrchu u dokončovacího obrábění
- Výroba na multifunkčním obráběcím centru

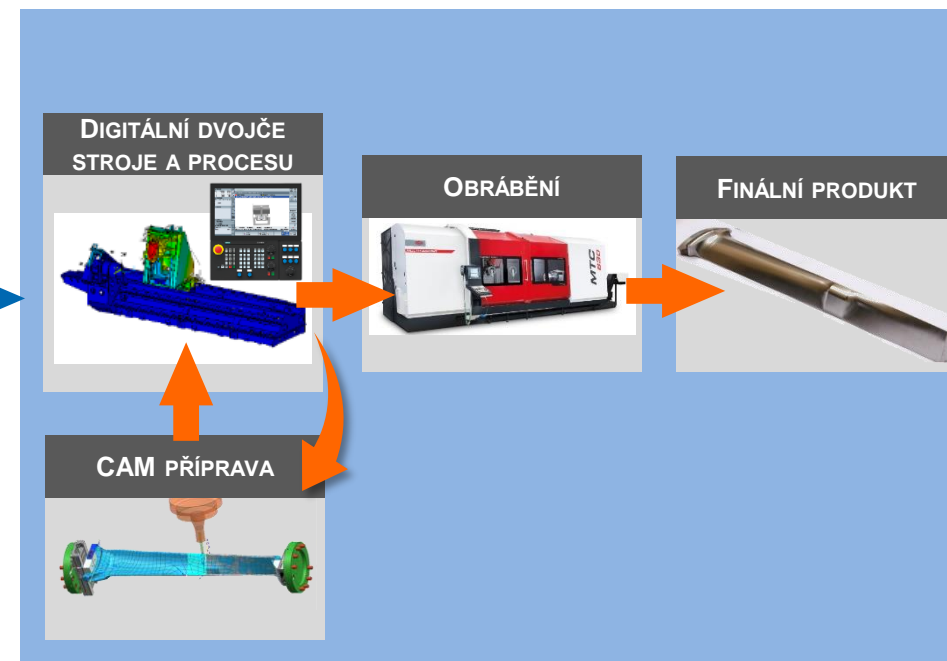


KOVOSVIT MAS

### STANDARDNÍ POSTUP



### OPTIMALIZOVANÝ POSTUP S PODPOROU DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

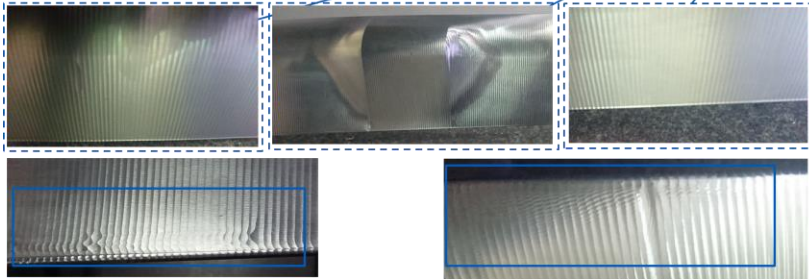
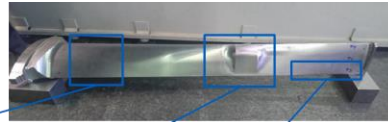




# Obrábění tvarově složité poddajné lopatky

První vyrobený kus

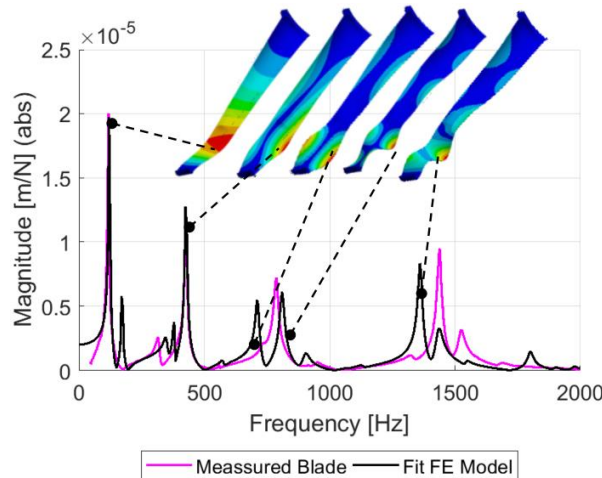
- Souvislý podřez u náběžných hran
- Zhoršená kvalita vlivem vibrací
- Vrypy na povrchu lopatky



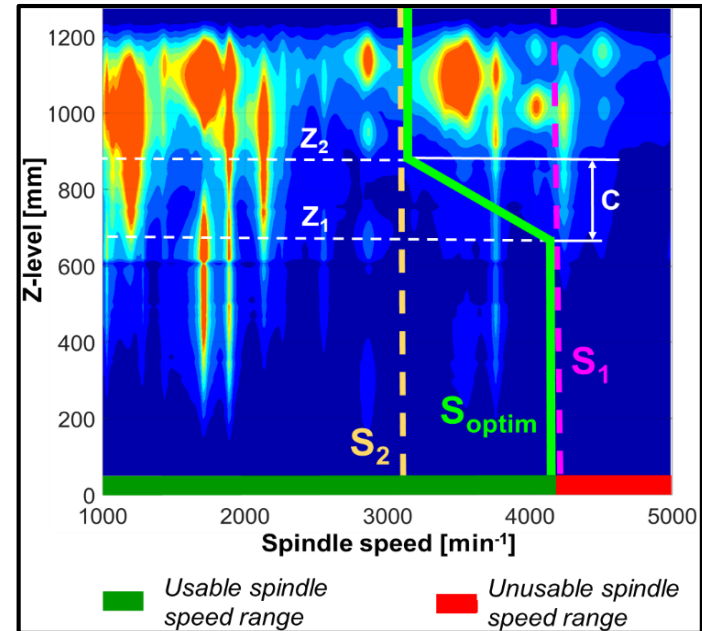
Duplexní ocel - 1.4462  
 L = 1100 mm  
 min/max tl. = 2,5 – 8 mm



KOVOSVIT MAS



## OPTIMALIZACE PROCESŮ



Strategie spojitého řízení otáček

Po optimalizaci

**Zkrácení času obrábění o 40 %**

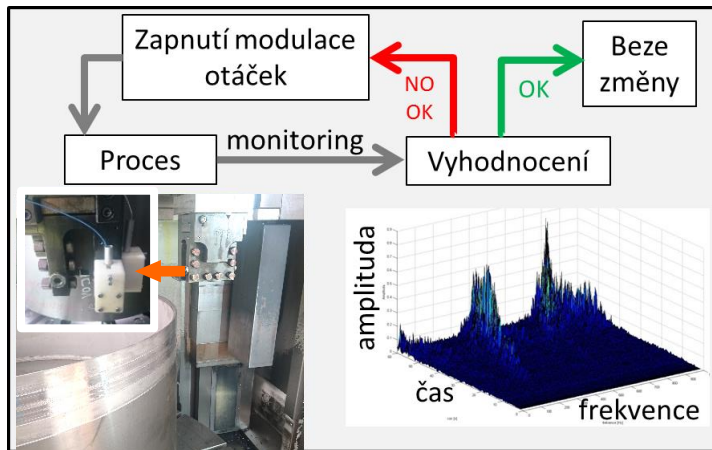


Eliminovány byly všechny chyby obrábění a došlo k významné úspoře času obrábění

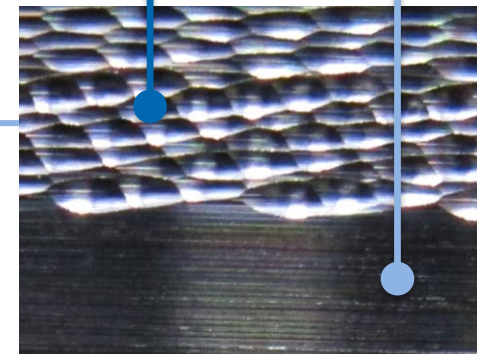
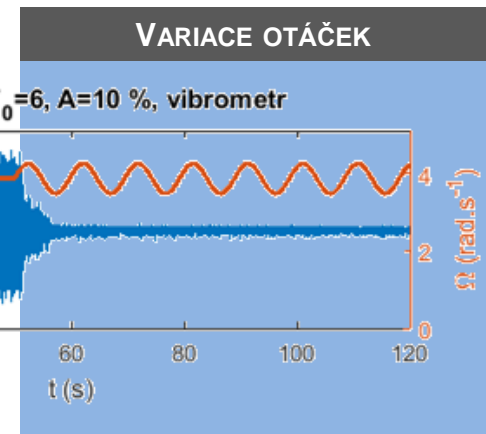
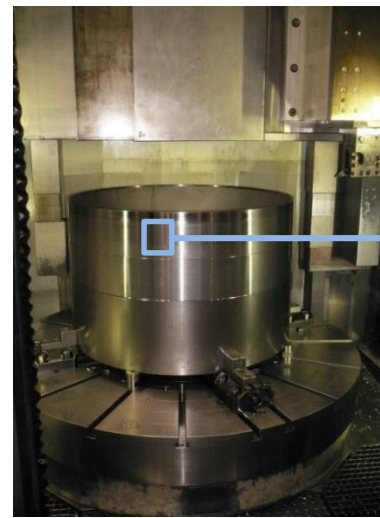
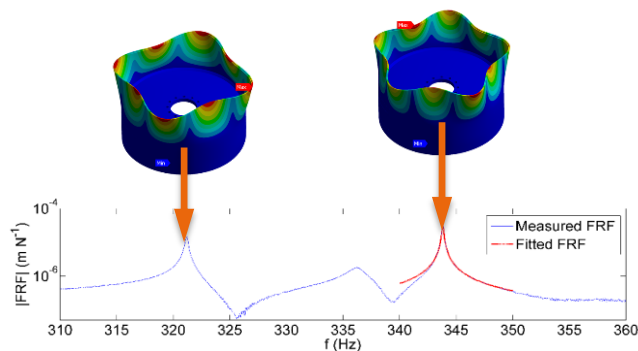
# Řízení dokončovacího obrábění tenkostěnného dílce

## ADAPTIVNÍ ŘÍZENÍ PROCESŮ

- Systém (HW + SW) pro monitoring vibrací stroje při karuselování pro automatické zapínání variace otáček obrobku – potlačení samobuzených vibrací

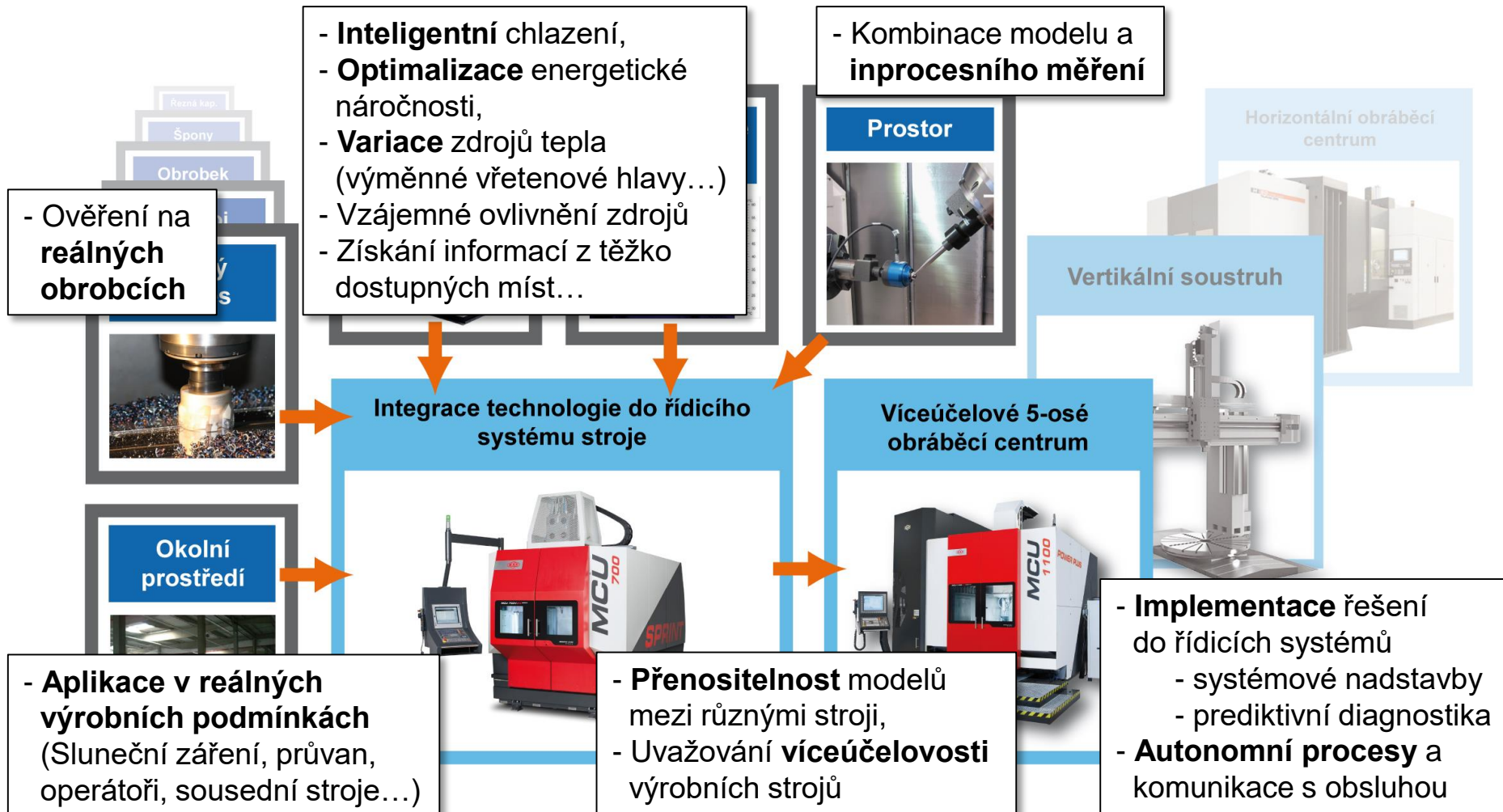


Akcelerometr na smykadle



## ADAPTIVNÍ ŘÍZENÍ PROCESŮ

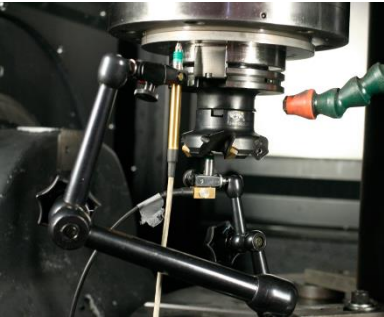
# Kompenzace teplotních chyb



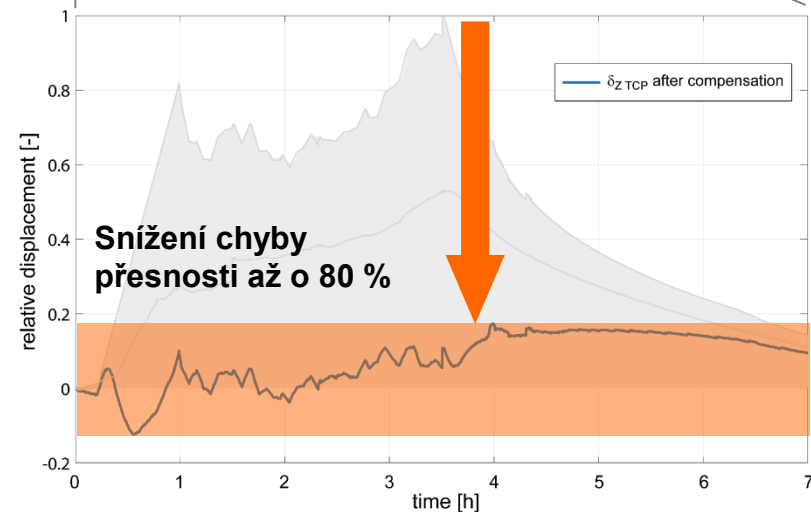
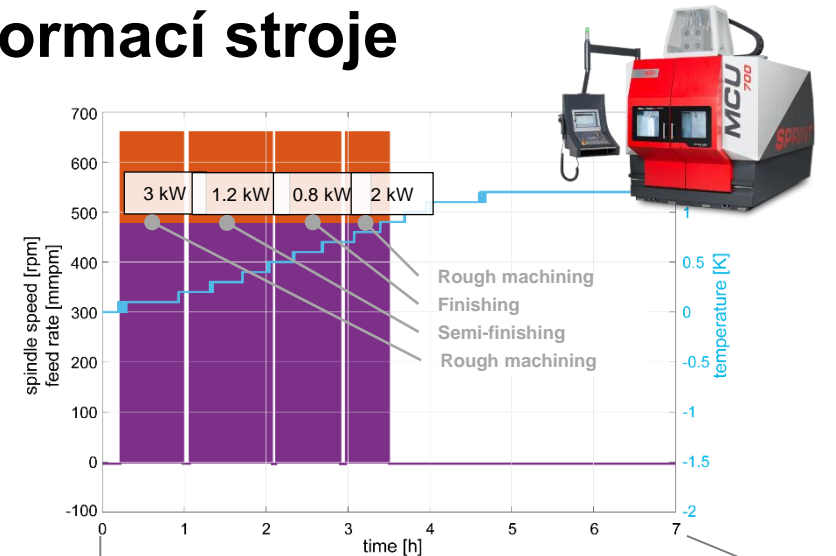
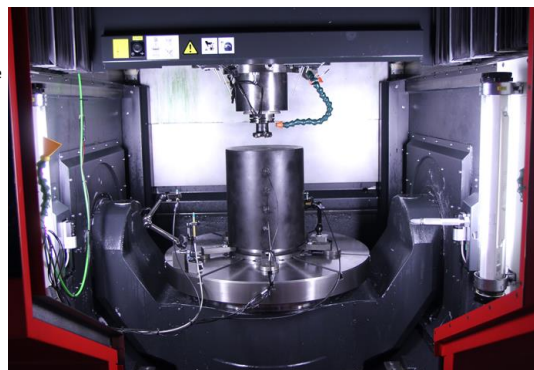
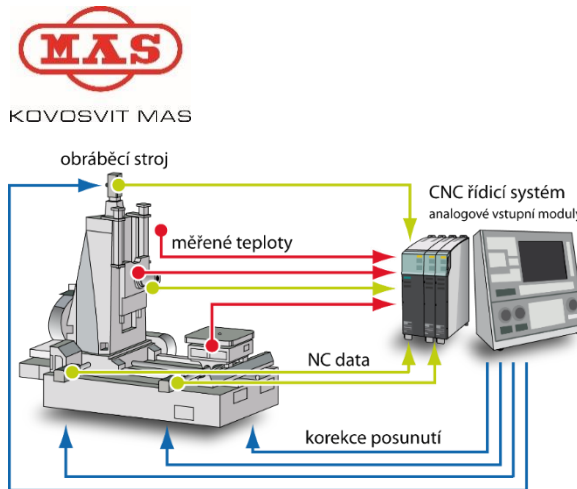
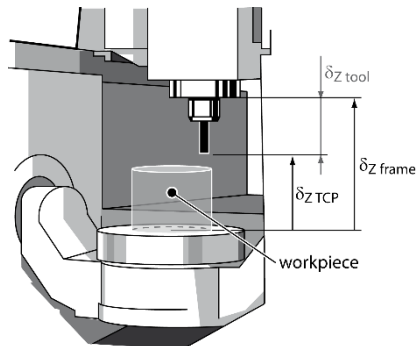
## ADAPTIVNÍ ŘÍZENÍ PROCESŮ

# Vliv řezného procesu na kompenzaci teplotních deformací stroje

- Zpřesnění modelu pokročilé kompenzace teplotních chyb o vliv řezného procesu



IR čidlo pro bezkontaktní měření teploty nástroje







## SYSTEMY INTEGRACE DAT

# Nadstavbové systémy strojů

**TOS Control (TOS Varnsdorf):  
Integrace rozšířených inteligentních funkcí stroje**

- Měření obrobku ve stroji
- Systém kompenzace teplotních deformací stroje



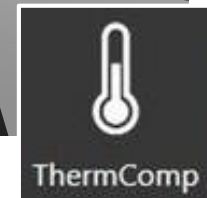
**VARNSDORF  
TOS**

The screenshot displays several key components of the TOS Control software:

- Main Menu:** A grid of four icons labeled 'Measure', 'Compensate', 'Tracking', and 'Settings'.
- 3D Measurement View:** A central window showing a 3D model of a tool tip measuring a pink rectangular workpiece on a coordinate system.
- Volumetric Compensation:** A window on the bottom left showing a 3D grid with a blue mesh and orange data points, representing thermal deformation compensation.
- Entry Info:** A table on the right side of the volumetric compensation window listing parameters like date, time, and coordinates.
- Laser Tracker:** A window on the bottom right showing 'stationary measurement' data for X, Y, and Z axes, both for the machine and the tracker. It also features a 3D image of the AT950 laser tracker.

The screenshot shows the main interface of the TOS CONTROL software, featuring a grid of icons for various functions:

- Measure, CNC, Job, Machine, Programs, Database
- Calendar, Tools list, CAD, Thermal Comp, Maintenance, Settings



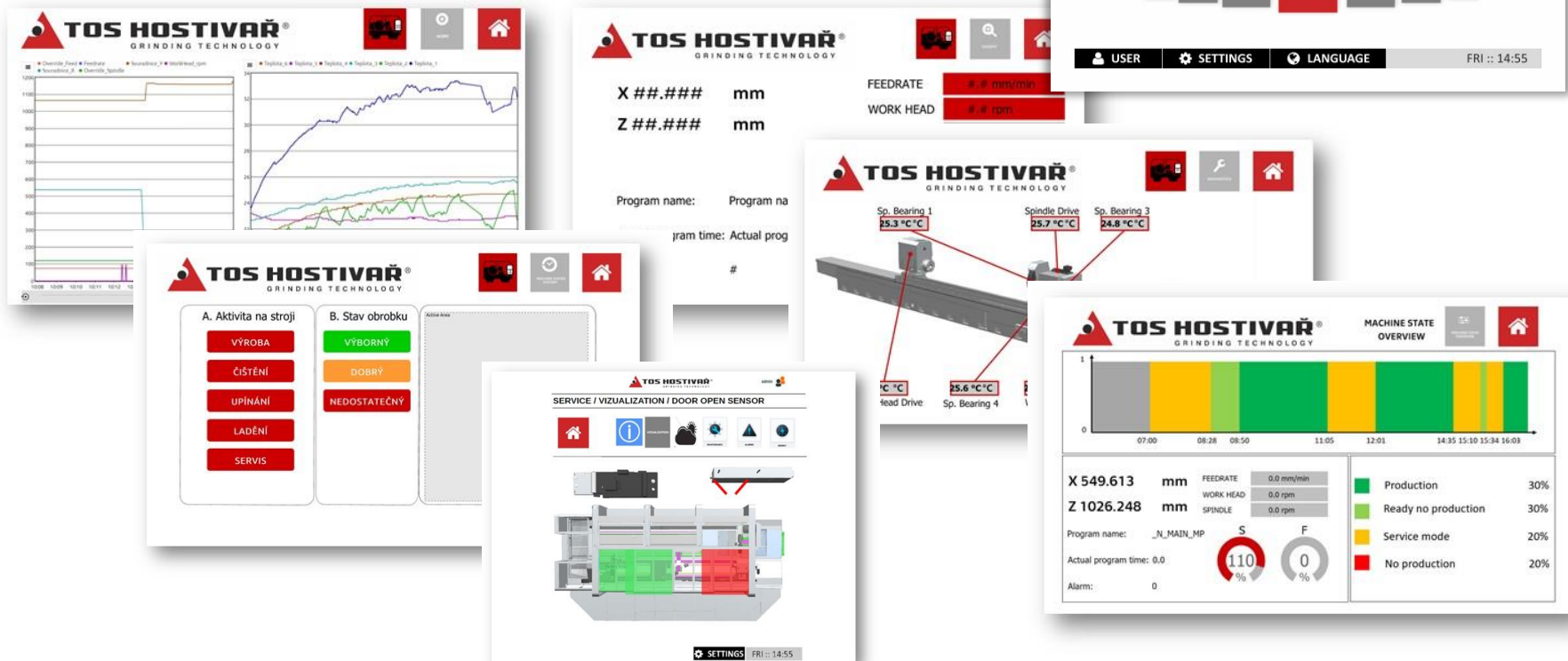


## SYSTEMY INTEGRACE DAT

# Nadstavbové systémy strojů

## SMARTOS – TOS Hostivař

- Nadstavbový systém pro diagnostiku, prediktivní údržbu a teplotní kompenzace



## Shrnutí

- Jak **předejít nežádoucímu chování stroje a procesu** v budoucnu je základní otázkou pro prediktivní úlohy a cíle adaptivního řízení strojů
- Ke slovu přichází **sběr informací o chování systému** (stroj + proces), matematické algoritmy pro zpracování, hledání závislostí a trendů
- V blízké budoucnosti lze očekávat **rozvoj nasazení a využití dat**, především ve vazbě na propojování nadřazených systémů řízení výroby a uplatnění digitálních dvojčat
- Technologicky orientovaná **digitální dvojčata** umožňují zvyšovat **spolehlivost výrobních technologií, zvyšovat přesnost, jakost a produktivitu výrobních procesů a snižovat náklady na výrobu**
  - Digitální dvojčata jsou účinným nástrojem pro monitorování a **optimalizace reálných procesů** obrábění
  - **Propojení dat** z reálných procesů se simulačními daty přináší kvalitativní posun ve schopnosti umět porozumět procesům

# Děkuji za pozornost

**Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.**

**Vedoucí pracoviště**

T: + 420 605 205 927

E: [m.sulitka@rcmt.cvut.cz](mailto:m.sulitka@rcmt.cvut.cz)