

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

## FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: P2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Stavba strojů a zařízení

### DISERTAČNÍ PRÁCE

Optimalizace využívání CA technologií pro vývoj technického zařízení

Autor: Ing. Petr Janda

Školitel: doc. Ing. Zdeněk Hudec, CSc.

Plzeň, 2021



## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě tézi ke státní doktorské zkoušce, zpracovanou na téma „Optimalizace využívání CA technologií pro vývoj technického produktu“. Práce je koncipována podle požadavků Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni. Obsahuje proto teoretická východiska včetně současného stavu poznání v českých i zahraničních souvislostech, cíle disertační práce a pracovní hypotézy, použité vědecké metody zkoumání, a zejména vlastní výsledky výzkumu včetně původních a uveřejněných výsledků vlastního bádání, shrnutí přínosů disertační práce a doporučení pro případný další postup v bádání.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

## Upozornění

Dle Zákona o právu autorském č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technologických poznatků nebo jakékoli nakládání s nimi, možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora, autorů citovaných prací a fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mně nějakým způsobem pomáhali v průběhu řešení mé disertační práce a především mé rodině, která mi umožnila tuto práci sepsat.



## Anotace

<b>AUTOR</b>	Příjmení (včetně titulů) Janda, Ing.	Jméno Petr
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Stavba strojů a zařízení	
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Hudec, doc, Ing., CSc.	Jméno Zdeněk
<b>PRACOVIŠTĚ VEDOUcíHO</b>	Katedra konstruování strojů	
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>disertační</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Optimalizace využívání CA technologií pro vývoj technického zařízení	

Fakulta: Strojí  
Katedra: Stavba strojů a zařízení  
Rok odevzdání: 2021

### Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

<b>Celkem</b>	098	<b>Textová část</b>	098	<b>Grafická část</b>	000
---------------	-----	---------------------	-----	----------------------	-----

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Disertační práce se zaměřuje na problematiku optimalizace využívání CA technologií pro vývoj technického produktu. Při řešení jsou zohledněna specifika vývoje těžkých obráběcích strojů, pro které je optimalizace řešena. První část práce obsahuje přehled současných CA technologií a aktuální stav techniky. Ve druhé části je popsáno autorem navržené optimalizované řešení založené na komerční PLM a CAx platformě. Toto řešení bylo úspěšně implementováno do výrobního podniku a využito při řešení vývojového projektu. V závěru jsou popsány přínosy disertační práce a je definován možný směr dalšího výzkumu.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	CA technologie, PLM, vývoj, stroje

## Summary

<b>AUTHOR</b>	Surname (including of Degrees) Janda, Ing.	Name Petr
<b>FIELD OF STUDY</b>	Design of Machines and Equipment	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (including of Degrees) Hudec, doc, Ing., CSc.	Name Zdeněk
<b>INSTITUTION</b>	Department of Machine Design	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>dissertation</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Optimization of the use of CA Technologies for technical product development	

Faculty: Mechanical Engineering  
 Department: Design of Machines and Equipment  
 Submitted in: 2021

### Number of pages (A4 a eq. A4)

<b>Totally</b>	098		<b>Text part</b>	098		<b>Graphical part</b>	000
----------------	-----	--	------------------	-----	--	-----------------------	-----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The dissertation focuses on the issue of optimizing the use of CA technologies for technical product development. The solution takes into account the specifics of the development of heavy machine tools, for which the optimization is solved. The first part of the thesis contains an overview of current CA technologies and the current state of art. The second part describes the author's optimized solution based on commercial PLM and CAx platform. This solution was successfully implemented in a manufacturing company and used in solving a development project. In conclusion, the benefits described dissertation and is defined as a possible direction for further research.
<b>KEY WORDS</b>	CA technologies, PLM, Design, Machines

## Obsah

1	Úvod.....	1
1.1	Cíl disertační práce.....	2
2	CA technologie .....	3
2.1	CAD: Nástroje pro tvorbu technické dokumentace .....	5
2.1.1	3D modelování dílů.....	5
2.1.2	Sestavy .....	8
2.1.3	Výkresová dokumentace .....	9
2.1.4	Bez-výkresová dokumentace .....	10
2.1.5	Komerční CAD řešení.....	10
2.2	CAE: Nástroje pro numerickou verifikaci návrhu.....	13
2.2.1	Analýza mechanismů pomocí tuhých těles .....	13
2.2.2	Analýza metodou konečných prvků.....	14
2.2.3	Komerční CAE řešení .....	16
2.3	CAM: Nástroje pro tvorbu NC programů .....	17
2.3.1	Propojení s CAD .....	17
2.3.2	Návrh technologie obrábění .....	17
2.3.3	Tvorba NC programu – postprocessing.....	17
2.3.4	Simulace obrábění .....	18
2.4	Automatizace v CAx.....	18
2.4.1	Vývojové rozhraní (API) .....	18
2.4.2	Vývojové prostředí.....	19
2.5	PLM: Nástroje pro správu životního cyklu výrobku .....	20
2.5.1	Správa CAx souborů.....	20
2.5.2	Správa dokumentů .....	20
2.5.3	Správa kusovníků .....	21
2.5.4	Komerční PLM řešení.....	21
3	Současný stav poznání .....	22
3.1	Digitalizace pomocí CAD technologií.....	22
3.1.1	Problematika přenosu dat mezi různými CAD systémy.....	22
3.2	Automatizace v CAx a PLM .....	23
3.2.1	NXOpen .....	23

---

3.2.2	Teamcenter SOA.....	24
3.3	Numerické simulace s využitím CAE technologií .....	25
3.3.1	Využití optimalizačních algoritmů ve vývoji .....	25
3.3.2	Numerické analýzy celých strojů .....	30
3.4	Tvorba komplexních virtuálních modelů.....	32
3.4.1	Virtuální stroj .....	32
3.4.2	Mechatronic Concept Designer .....	33
3.4.3	Softwarové nástroje pro SiL a HiL.....	37
3.4.4	Software in the Loop (SiL) .....	38
3.4.5	Hardware in the Loop (HiL) .....	39
4	Optimalizace využití CA technologií .....	41
4.1	Vývojový projekt TRIO.....	41
4.1.1	Hlavní výstupy projektu.....	43
4.1.2	Zapojení autora disertační práce do realizace projektu .....	43
4.2	Optimalizace PLM a CAx systému.....	44
4.2.1	Správa konstrukčních dat .....	45
4.2.2	Správa kusovníků .....	47
4.2.3	Tvorba 3D modelů a dokumentace v CAD .....	48
4.2.4	Využití modulu Mechatronic Concept Designer .....	48
4.3	Využití metodických doporučení při řešení konceptu stroje .....	49
4.4	Aplikace metodiky návrhu svařenců .....	51
4.5	Aplikace metodiky konfigurovatelných modelů .....	55
4.6	Aplikace numerických analýz při vývoji frézovací věže .....	60
4.6.1	Postup návrhu nosných struktur TOS.....	60
4.6.2	Numerické analýzy při návrhu nosných dílců.....	61
4.6.3	Kompensace vlivu gravitační síly na geometrickou přesnost.....	67
4.6.4	Ověření finálního návrhu frézovací věže .....	70
4.6.5	Zhodnocení .....	71
4.7	Aplikace metodiky virtuálního oživení .....	72
4.7.1	Virtualizované mechanické prvky stroje.....	73
4.7.2	Strojní osy multifunkčního centra.....	78
4.7.3	Řízení pomocí signálů .....	82
4.7.4	Virtuální oživení .....	84

4.7.5	Zhodnocení .....	94
4.8	Zhodnocení .....	95
4.8.1	Přínosy realizace projektu v optimalizovaném PLM .....	95
4.8.2	Přínosy aplikace metodik .....	95
5	Závěr .....	96
5.1	Shrnutí přínosu disertační práce .....	97
5.2	Podněty pro budoucí výzkum .....	97
6	Citovaná literatura .....	98

## Seznam obrázků

Obr. 1 : Grafické znázornění součástí PLM systému [1] .....	3
Obr. 2 : Přejít od digitalizace k virtualizaci [2] .....	4
Obr. 3 : Fáze vývoje v Industry 4.0 [3] .....	4
Obr. 4 : Ukázka objemového a plošného modelování .....	5
Obr. 5 : Příklad parametrického modelování .....	6
Obr. 6 : Příklad přímého modelování .....	7
Obr. 7 : Pohledy v prostředí výkresové dokumentace .....	9
Obr. 8 : zastoupení CAD uživatelů dle serveru cadenas.in [4] .....	10
Obr. 9 : Návrh technologie frézování drážky v CAM systému .....	17
Obr. 10 : Porovnání programu ve VB.NET a C# .....	19
Obr. 11 : Ukázka C# programu v prostředí Notepad++ a Visual Studio .....	19
Obr. 12 : Moduly PLM platformy [5] .....	20
Obr. 13 : Schéma s NXOPEN API .....	23
Obr. 14 : Automatizace v návrhu tělesa rakety [5] .....	24
Obr. 15 : Architektura PLM řešení Teamcenter [6] .....	24
Obr. 16 : Hybridní model s detailní sítí na stojanu [7] .....	25
Obr. 17 : Parametry stojanu pro optimalizaci [8] .....	26
Obr. 18 - Rám stroje s obdélníkovými a trojúhelníkovými prvky [9] .....	27
Obr. 19 : Parametry pro optimalizaci [10] .....	28
Obr. 20 : Podobnost mezi strukturou listu stromu a strukturou obráběcího stroje [11] .....	28
Obr. 21 : Deformace původního stojanu s inovovaným pomocí bionické struktury [11] .....	28
Obr. 22 : Těleso před a po optimalizaci [12] .....	29
Obr. 23 : Výsledek topologické optimalizace (vlevo) a finální návrh (vpravo) [13] .....	29
Obr. 24 : Postup optimalizace stojanu frézky .....	30
Obr. 25 : Stroj určený k redesignu (a), Struktura stroje (b) [15] .....	30
Obr. 26 - První dva vlastní tvary stroje [15] .....	30
Obr. 27 : Měření geometrické přesnosti (a), Analýza geometrické přesnosti (b) [10] .....	31
Obr. 28 : Zjednodušený model stroje pro dynamickou analýzu [16] .....	31
Obr. 29 : Princip virtuálního oživení [17] .....	32
Obr. 30 : Využití virtuálního stroje .....	33
Obr. 31 : Postup pro virtuální oživení v NX [18] .....	34
Obr. 32 : MCD – Mechanické prvky .....	34
Obr. 33 : Rozšiřující vazby a převody .....	34
Obr. 34 : Příklad zapojení jedno a dvou pístového válce [18] .....	35
Obr. 35 : Senzory v MCD .....	36
Obr. 36 : Signály v MCD .....	36
Obr. 37 : Časově závislé operace v MCD .....	36
Obr. 38 : Schéma propojení při řešení SiL [17] .....	37
Obr. 39 : Schéma propojení při řešení HiL [17] .....	37
Obr. 40 : Možnosti připojení SIMIT [17] .....	38
Obr. 41 : SIMIT při virtuálním oživení obráběcího stroje .....	38

Obr. 42 : Virtuální oživení SiL [17] .....	39
Obr. 43 : Základ pro SiL [17].....	39
Obr. 44 : Virtuální oživení HiL [17].....	40
Obr. 45 : Řešení pro výrobce obráběcích strojů [17].....	40
Obr. 46 : Multifunkční obráběcí centrum .....	42
Obr. 47 : Schéma optimalizace CA technologií .....	44
Obr. 48 : Struktura složek v PLM systému.....	45
Obr. 49 : Rezervace položek v prostředí PLM systému .....	45
Obr. 50 : Vizualizace výkresu a 3D modelu přímo v PLM .....	46
Obr. 51 : Prostředí webového klienta .....	46
Obr. 52 : Zobrazení kusovníku včetně 3D geometrie .....	47
Obr. 53 : Optimalizované uživatelské prostředí.....	48
Obr. 54 : Mechatronický koncept multifunkčního centra .....	49
Obr. 55 : Naklopení nesymetrického koníka vlivem předepínací síly .....	49
Obr. 56 : Symetrická konstrukce soustružnické části .....	50
Obr. 57 : Symetrická aretace posuvu koníka.....	50
Obr. 58 : Klasický způsob opracování svařence .....	51
Obr. 59 : Obrobený svařenec v jednom modelu.....	51
Obr. 60 : Potlačení podsestavy svařence .....	52
Obr. 61 : Opracovaný svařenec (vlevo) a sestava svařence (vpravo) .....	53
Obr. 62 : Kusovník opracování a svařence v prostředí CAD a PLM .....	53
Obr. 63 : Díl ve stromu modelování opracovaného modelu .....	54
Obr. 64 : Propagace dílu z opracovaného modelu do sestavy svařence .....	54
Obr. 65 : Detail dílu svařence na výkrese .....	55
Obr. 66 : Základní modul parametrického modelu lože .....	56
Obr. 67 : Kopie modulu 0,5 m pro dosažení požadované délky .....	56
Obr. 68 : Doplnění krajního modulu a jeho zrcadlení.....	57
Obr. 69 : Parametrický model odlitku s tabulkou variant .....	57
Obr. 70 : Modulární celková sestava TDV 25 s konfigurační tabulkou variant.....	58
Obr. 71 : Podsestava lože otočného stolu.....	58
Obr. 72 : Saně a deska stolu TDV 25.....	59
Obr. 73 : Porovnání časové náročnosti tvorby nových variant .....	59
Obr. 74 : Postup návrhu svařenců a odlitků.....	60
Obr. 75 : Výpočtový model pro výpočet stojanu frézovací věže.....	61
Obr. 76 : Deformace frézovací věže pro zátěžné stavy 1, 2 a 3 .....	62
Obr. 77 : Deformace frézovací věže pro zátěžný stav 4 .....	62
Obr. 78 : Deformace frézování věže pro zátěžné stavy 1, 2 a 3 (průběh optimalizace) .....	63
Obr. 79 : Deformace frézovací věže pro zátěžný stav 4 (průběh optimalizace).....	63
Obr. 80 : Finální návrh svařence stojanu.....	64
Obr. 81 : Opracovaný stojan frézovací věže.....	64
Obr. 82 : Využití materiálu při zatížení ve směru osy Z a soustružení .....	65
Obr. 83 : Finální návrh odlitku vřeteníku.....	65
Obr. 84 : Odlitek vřeteníku frézovací věže .....	66

Obr. 85 : Montáž skupin stojanu věže .....	66
Obr. 86 : Výpočtový model pinoly .....	67
Obr. 87 : Deformace pinoly bez předeptnutí a s předeptnutím .....	67
Obr. 88 : Kompenzace pomocí naklápění vřeteníku .....	68
Obr. 89 : Výpočtový model frézovací věže a okrajové podmínky .....	68
Obr. 90 : Posunutí Z, Y, X při aplikaci předeptnutí do tyčí v pinole a stojanu .....	69
Obr. 91 : Výpočtový model sestavy frézovací věže se soustružnickým zařízením .....	70
Obr. 92 : Celková deformace od řezné síly .....	70
Obr. 93 : Vlastní tvary frézovací věže .....	71
Obr. 94 : Virtuální model HCW4S .....	72
Obr. 95 : Soustružnická část .....	74
Obr. 96 : Sestava rotačních dílů lícni desky .....	75
Obr. 97 : Přenesení informací do mechatronického modelu .....	75
Obr. 98 : Saně opěry a uzavřená opěra .....	76
Obr. 99 : Saně a svršek koníka .....	76
Obr. 100 : Koník s mezikusem .....	76
Obr. 101 : Vyvrtávací zařízení typu BTA .....	77
Obr. 102 : Frézovací část stroje .....	77
Obr. 103 : UFK1000-MT, IFVW44, IFVW103-MT a Soustružnické zařízení LSMT100 .....	78
Obr. 104 : Kinematický řetězec os .....	78
Obr. 105 : Nastavení strojní osy X .....	79
Obr. 106 : Nastavení strojní osy Y .....	79
Obr. 107 : Nastavení strojní osy Z .....	80
Obr. 108 : Nastavení strojní osy A .....	80
Obr. 109 : Nastavení strojní osy A1 .....	81
Obr. 110 : Nastavení strojní osy C1 .....	81
Obr. 111 : Nastavení strojní osy S .....	82
Obr. 112 : Řízení pozice přímo signálem .....	82
Obr. 113 : Řízení signálem přes signál adapter .....	83
Obr. 114 : Definice operace řízené podmínkou .....	83
Obr. 115 : Definice operace řízené časem .....	84
Obr. 116 : SIMIT při virtuálním oživení obráběcího stroje .....	84
Obr. 117 : Compile Cycle ADAS .....	84
Obr. 118 : Příprava konfigurace Sinumerik 840D SL pro ADAS .....	85
Obr. 119 : Nastavení parametrů pro simulační osu .....	85
Obr. 120 : Verze SIMIT ULTIMATE a SIMULATION Unit .....	85
Obr. 121 : Konfigurace SIMIT Unit .....	86
Obr. 122 : Konfigurace hardware pro Sinumerik .....	86
Obr. 123 : Export hardwarové konfigurace .....	87
Obr. 124 : Export tabulky symbolů .....	87
Obr. 125 : Přidání SIMIT Unit a její konfigurace .....	88
Obr. 126 : Import hardwarové konfigurace .....	88
Obr. 127 : Import tabulky symbolů .....	89



Obr. 128 : Vložení bloku ADAS.....	89
Obr. 129 : Definice vstupů a výstupů pro ADAS.....	90
Obr. 130 : Funkční blok ADAS s konfigurací pro řízení strojních os .....	90
Obr. 131 : Přiřazení IP adresy pro SIMIT Unit .....	91
Obr. 132 : Simulace běží a ADAS je správně konfigurován.....	91
Obr. 133 : Komunikace při virtuálním oživení.....	92
Obr. 134 : Mapování signálů v prostředí NX MCD .....	92
Obr. 135 : Princip řízení reálného a virtuálního stroje (tzv. Digital Twin).....	93
Obr. 136 : Virtuální mechatronický model stroje S-MT na EMO Hannover 2019.....	94
Obr. 137 : Sestava reálného stroje před testováním.....	94

## Seznam tabulek

Tab. 1 : Příklad běžných typů vazeb s počtem odebraných stupňů volnosti.....	13
Tab. 2 : Přehled API rozhraní velkých CAx řešení.....	18
Tab. 3 - Porovnání tuhosti struktur tvořených čtvercovými a trojúhelníkovými prvky [9] .....	27
Tab. 4 : Přehled aktuátorů v MCD .....	35
Tab. 5 : Harmonogram projektu TRIO FV10219.....	41
Tab. 6 : Varianty multifunkčního centra a jejich parametry.....	42
Tab. 7 : Zátěžné stavy .....	61

## Seznam zkratk

<b>API</b>	Application Program Interface Rozhraní pro programování aplikací.
<b>CA</b>	Computer Aided Počítačová podpora
<b>CAD</b>	Computer Aided Design. Počítačová podpora konstrukce
<b>CAE</b>	Computer Aided Engineering Počítačová podpora inženýrských činností
<b>CAM</b>	Computer Aided Manufacturing. Počítačová podpora výroby.
<b>HiL</b>	Hardware in the Loop Ověřování funkčnosti programu s využitím reálného hardware.
<b>HW</b>	Hardware
<b>MCD</b>	Mechatronic Concept Designer Nástroj pro tvorbu mechatronického konceptu.
<b>PC</b>	Personal Computer Osobní počítač
<b>PLC</b>	Programmable Logic Controller Programovatelný logický řadič
<b>SiL</b>	Software in the Loop Ověřování funkčnosti programu s využitím softwarových emulací.
<b>STEP</b>	Standard of the Exchange of Product data model Standardizovaný formát pro přenos CAD dat.
<b>SW</b>	Software
<b>VC</b>	Virtual Commissioning Virtuální oživení.

## Glosář

Slovo	význam
<b>CAX</b>	Zkratka CAX označuje moderní systémy počítačové podpory integrující více systémů do jednoho. Zkratka vychází z anglického Computer Aided (počítačová podpora) a zástupného znaku x, představujícího různé integrované systémy (CAD – Computer Aided Design, CAM – Computer Aided Manufacturing)
<b>Digital Twin / digitální dvojče</b>	Pojem digitální dvojče označuje virtuální obraz reálného produktu nebo procesu ve virtuálním světě.

# 1 Úvod

Digitalizace průmyslového odvětví, která v posledních letech zažívá velký rozmach, mění zásadním způsobem přístup k celé řadě činností v průběhu životního cyklu výrobku. Jedním z důležitých nástrojů aplikovaných především ve vývoji technických produktů jsou CA<sup>1</sup> technologie. Pod tento pojem se dá v současné době začlenit mnoho nástrojů počítačové podpory sloužících k digitalizaci a virtualizaci jednotlivých činností např. konstrukce (CAD), obrábění (CAM) nebo numerických simulací (CAE). Všechny tyto nástroje jsou pak sdružovány do komplexních PLM řešení, která si kladou za cíl pokrýt veškeré činnosti realizované v průběhu životního cyklu výrobku. Rozsah integrace PLM systému ve výrobním podniku významným způsobem ovlivňuje kvalitu podnikových procesů a efektivitu vývoje a výroby technických produktů. Hlavní myšlenkou nasazení CA technologií je eliminace případných chyb ve virtuální fázi, tedy dříve, než dojde k výrobě reálného prototypu vyvíjeného produktu, což má za důsledek výrazné snížení nákladů na vývoj. V současné době se společnost zaměřuje na zavádění vyššího stupně digitalizace, tzv. virtualizaci. Nejedná se pouze o virtualizaci procesu vývoje, ale i výroby, testování atd. Cílem je tedy kompletní virtualizace celého vývojového a výrobního procesu, tzv. digitální dvojče, které je popsáno v metodice Průmysl 4.0.

S ohledem na rozmanitost jednotlivých průmyslových odvětví lze však jen obtížně stanovit unifikované PLM řešení a postupy, které by vyhovovali pro všechny produkty. PLM a CA technologie jednotlivých výrobců, tak tvoří především platformu pro realizaci vlastního řešení navrženého na míru pro konkrétní typ společnosti nebo produktu. Realizace takového návrhu vyžaduje nejen detailní znalost virtualizačních nástrojů ale i znalost konkrétního průmyslového odvětví, případně produktu. Průmyslová odvětví integrující v nejvyšší míře nástroje a postupy moderních PLM systémů v souladu s metodikou Průmysl 4.0 jsou letecký a automobilový průmysl. Ty jsou pak v mnoha případech inspirací a vzorem pro ostatní více konzervativní odvětví.

Do oblasti poměrně konzervativních se řadí i průmyslové odvětví výrobců těžkých obráběcích strojů, na které se zaměřuje tato disertační práce. Díky stále se zvyšujícím požadavkům zákazníků na těžké obráběcí stroje je však inovace nevyhnutelná. Stejně jako ostatní produkty se i těžké obráběcí stroje potýkají s protichůdnými požadavky na snižování nákladů ve všech fázích životního cyklu při nutnosti neustálého zvyšování technické úrovně produktu. Z tohoto důvodu je zapotřebí inovovat vývojové a výrobní procesy, čehož lze dosáhnout právě využitím moderních CA technologií.

Hlavní motivací této disertační práce je inovace vývojových a výrobních procesů s využitím moderních CA technologií se zaměřením na vývoj těžkých obráběcích strojů za účelem snižování nákladů a zkrácení dodacích termínů stroje.

---

<sup>1</sup> CA: Computer Aided: komplexní počítačová podpora v odvětvích CAD (Computer Aided Design), CAM (Computer Aided Manufacturing), CAE (Computer Aided Engineering)

## 1.1 Cíl disertační práce

Úkolem definovaným tématem disertační práce je optimalizovat využívání CA technologií pro vývoj technického produktu. Toto téma bylo upřesněno zaměřením na oblast těžkých obráběcích strojů.

Disertační práce si klade za cíl:

- Zmapovat současné moderní trendy v oblasti CA technologií.
- Vybrat vhodné technologie pro v průmyslovém odvětví těžkých obráběcích strojů.
- Sestavit konkrétní řešení optimalizace CAx systému integrovaného do PLM včetně metodik práce v tomto prostředí.
- Ověřit funkčnost navrženého řešení.
- Na základě získaných poznatků definovat podněty pro případné další inovace.

## 2 CA technologie

Zkratka CA pochází z anglického výrazu Computer Aided, což je v překladu počítačová podpora. Pod pojem CA technologie si lze představit celou řadu oblastí počítačové podpory v životním cyklu produktu. Z neznámějších je to CAD<sup>2</sup>, CAM<sup>3</sup> nebo CAE<sup>4</sup>. Existují však i další důležitá uplatnění počítačové podpory jako například v systémech pro správu dat PDM. Jednotlivé technologie počítačové podpory jsou integrovány do robustních PLM<sup>5</sup> systémů, které představují systém komplexní počítačové podpory v celém životním cyklu produktu. Grafické znázornění PLM systému je na obr. 1.



Obr. 1 : Grafické znázornění součástí PLM systému (1)

Počátek využití počítačů pro vývoj technických produktů sahá do druhé poloviny minulého století a jeho největší rozmach nastal ve druhé polovině devadesátých let s nástupem technologie parametrického 3D modelování. Zavádění a využívání CA nástrojů sloužilo v tomto období především k digitalizaci procesu vývoje a výroby technických produktů a přinášelo výrazné zrychlení tohoto procesu. V době, kdy se digitalizace stala již téměř standardem a možnosti inovace se zdají být téměř vyčerpány, přichází nový moderní trend virtualizace. Produktem virtualizace je tzv. digitální dvojče, které představuje digitální obraz reálného produktu a jeho životního cyklu. Pro potřeby virtualizace jsou zapotřebí nové nástroje a jejich vývoj a implementace se stává trendem současné doby. Pro potřeby nejrůznějších simulací jsou virtualizovány nejen vyráběné produkty, ale i samotný výrobní proces a další procesy na něj navázané. Vzniká tak tzv. digitální továrna, která ve virtuálním světě vyrábí virtuální produkty.

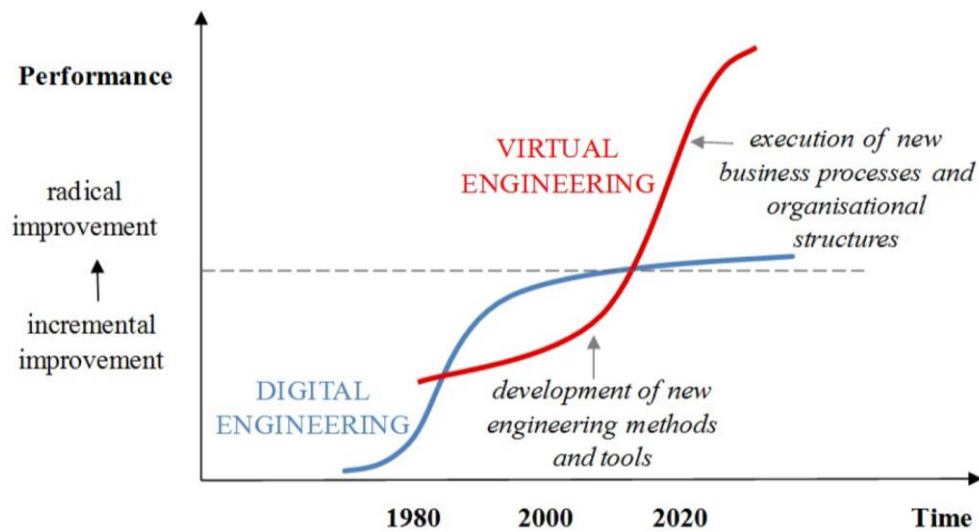
<sup>2</sup> CAD : Computer Aided Design : Počítačová podpora konstruování

<sup>3</sup> CAM : Computer Aided Manufacturing : Počítačová podpora výroby

<sup>4</sup> CAE : Computer Aided Engineering : Počítačová podpora inženýrských činností

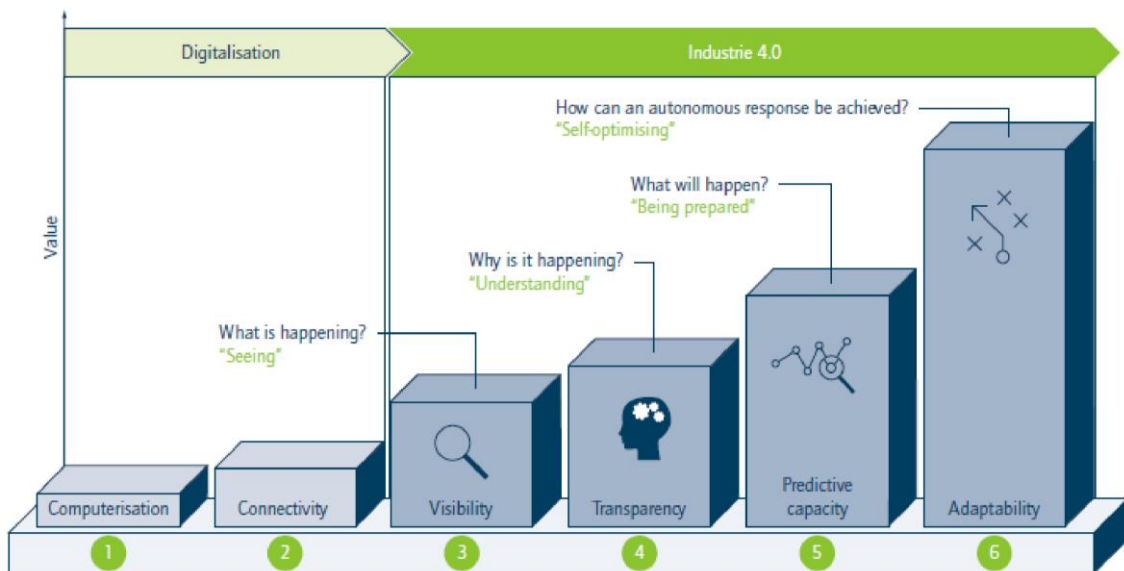
<sup>5</sup> PLM : Product Lifecycle Management : Systém správy životního cyklu produktu

Časový vývoj digitalizace a jeho přechod do procesu virtualizace je znázorněno na obr. 2, ze kterého je patrný historický přínos digitalizace v minulém století, stejně tak jako potenciál inovací v podobě virtualizace v současné době.



Obr. 2 : Přechod od digitalizace k virtualizaci (2)

Virtualizace je jedním ze základních stavebních kamenů nového technologického standardu známého pod pojmem Průmysl 4.0 (Industry 4.0) a zásadním způsobem mění přístup k vývoji technických produktů. Jak je vidět na obr. 3, Průmysl 4.0 dává prostřednictvím virtualizace odpovědi na otázky: co se děje, proč se to děje, co se bude dít a jak vyvolat autonomní odezvu.



Obr. 3 : Fáze vývoje v Industry 4.0 (3)

V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé nejdůležitější podskupiny CA technologií a jejich využití ve vývoji technických zařízení. Vzhledem k obsáhlosti dané oblasti je pozornost soustředěna především na CA technologie využitelné ve vývoji těžkých obráběcích strojů.



## 2.1 CAD: Nástroje pro tvorbu technické dokumentace

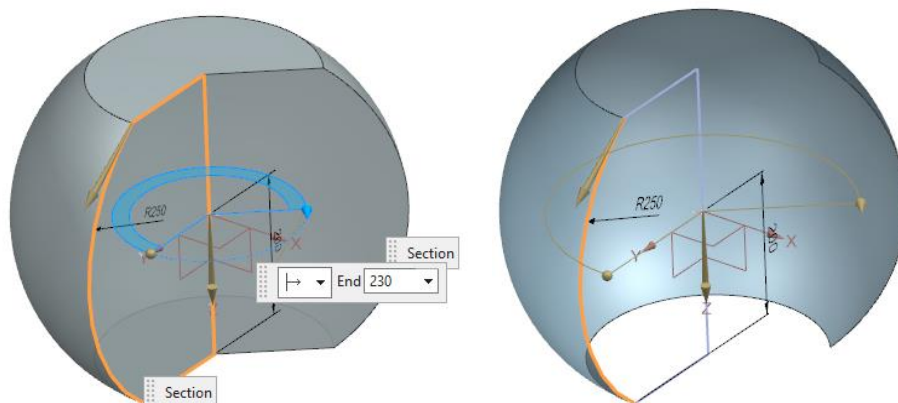
Pro tvorbu konstrukční dokumentace, která je podkladem pro výrobu, se dnes běžně využívají CAD systémy. Základním principem moderních CAD software je modelování v prostoru, tzv. 3D modelování. Objemové 3D modely odpovídají svým tvarem reálným dílům a jsou skládány do víceúrovňových konstrukčních celků tzv. sestav, které ve finální úrovni tvoří kompletní produkt.

Pro potřeby výroby, která vyžaduje většinou standardní papírovou dokumentaci, je historicky zažitá nutnost tvořit 2D výkresy, které umožňují pomocí pohledů, řezů, kót a dalších poznámek předat informace potřebné pro výrobu a montáž. Tyto výkresy jsou pak předávány do výroby v papírové nebo digitální podobě. V době prvních CAD systémů byly výkresy tvořeny přímo kreslením čar v rovině (2D). Mezi velmi oblíbené 2D CAD systémy patří od devadesátých let software AutoCAD, který prakticky vytvořil standard 2D výkresové dokumentace a je stále hojně využíván například ve stavebnictví. V současné době je 2D výkresová dokumentace většinou generována s využitím 3D modelů.

Trendem posledních let je tzv. bez-výkresová dokumentace, která by se dala také nazvat bezpapírovou. Základním principem je maximální využití 3D modelů jako nositelů výrobních informací. Toto lze realizovat pomocí PMI<sup>6</sup> kót, které jsou tvořeny přímo ve 3D prostředí CAD modeláře. Základní myšlenkou je doplňovat pomocí PMI jen takové informace, které nejde z modelu odečíst například měření. V žádném případě tedy objemový model doplněný PMI kótami nemá vypadat jako 2D výkres.

### 2.1.1 3D modelování dílů

Základním stavebním kamenem moderních CAD systémů je 3D model, který reprezentuje skutečný technický systém ve virtuálním světě. 3D modely vznikají v prostředí CAD systému pomocí základních technik modelování, kterými jsou parametrické modelování, přímé modelování a jejich kombinace v podobě hybridního modelování. 3D modely mohou být objemové nebo plošné. Příklad tvorby objemového a plošného tělesa rotací skici je na obr. 4. Pro vývoj technických produktů jsou obecně rozšířenějším typem objemové modely.



Obr. 4 : Ukázka objemového a plošného modelování

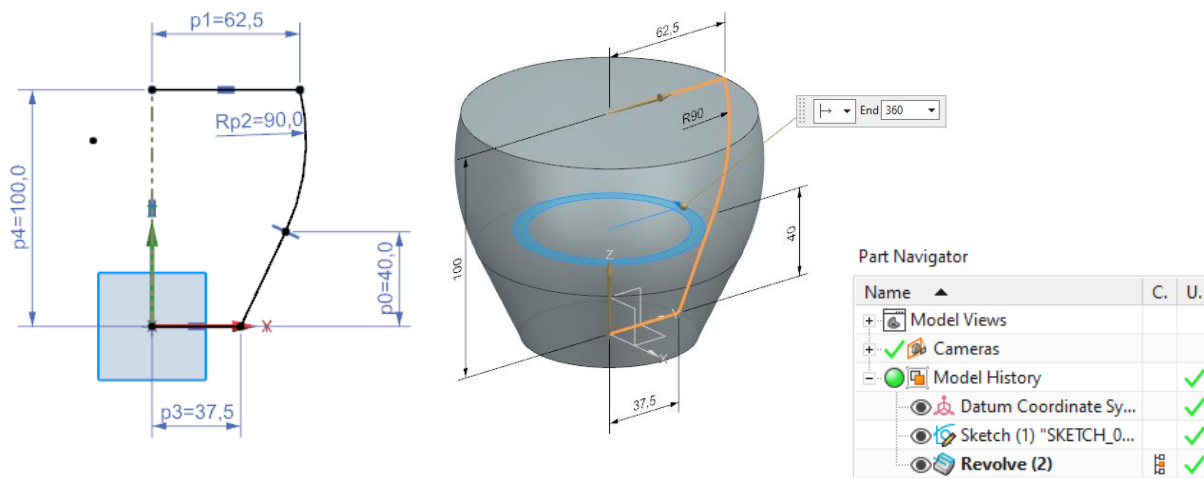
<sup>6</sup> PMI : Product and Manufacturing Information : Informace potřebné pro výrobu vkládané přímo do 3D dat

### 2.1.1.1 Parametrické modelování (založeno na prvcích)

Parametrické modelování je také známé pod pojmem modelování „s historií“. V současné době se jedná o nejrozšířenější způsob tvorby CAD modelů. Tento přístup totiž využívá pro zachycení historie modelování jednotlivých prvků a vazeb mezi nimi. Prvky jsou definovány pomocí proměnných parametrů a jsou řazeny a zobrazovány pomocí takzvaného stromu historie modelování. Každý prvek stromu lze zpětně modifikovat a změnit tak výsledný tvar modelu.

Velkou výhodou je právě výše zmíněná parametrizace celého modelu, která umožňuje jednoduchou změnou parametrů vytvářet například různé varianty CAD modelu. Pro generování variant na základě změny parametrů je využívána tzv. metoda rodiny prvků definovaná tabulkou řídicích parametrů (např. v Excelu). Právě díky rychlému generování prvků pomocí tabulky je parametrické modelování pro mnoho oblastí využití velice efektivní. Parametrické modelování využívají převážně konstruktéři, kteří tvoří tvarové podobné modely nebo využívají možnosti tvořit parametricky propojené modely v sestavách.

Nevýhody parametrického modelování se projeví především u rozsáhlých složitých modelů obsahujících velké množství prvků a parametrů. Časová náročnost aktualizace složitého parametrického modelu se pohybuje v řádu jednotek minut, a u velmi velkých modelů může dosahovat i desítek minut, což je pro uživatele nepříjemná ztráta času. Další problémem mohou být chyby v průběhu aktualizace, vzniklé například překročením předpokládaného rozsahu parametru. Na obr. 5 je zobrazen jednoduchý parametrický model vytvořený rotací skici.



Obr. 5 : Příklad parametrického modelování

#### Základní znaky parametrických CAD systémů:

- Modely jsou řízené parametry.
- Jedná se o strukturované modelování s historií prvků.
- Existuje zde hierarchie závislostí „rodič“ „potomek“.
- Ve skicích se používají vazby.
- Obsahují moduly pro tvorbu modelů, sestav a výkresů.
- V sestavách se používají vazby mezi komponentami.

#### Výhody parametrického modelování:

- Většina CAD systémů pro parametrické modelování obsahuje i funkce základního přímého modelování.
- Existují specializovaná řešení pro různá průmyslová odvětví.
- Jednotlivé modely mohou být snadno znovu použity a modifikovány.
- Z historie modelování je patrný záměr konstruktéra.

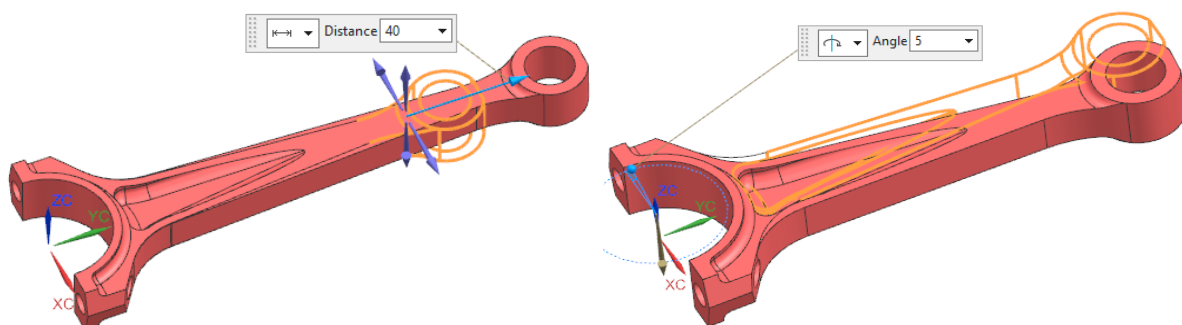
#### Nevýhody parametrického modelování:

- Nutnost tvorby a dodržování metodik modelování pro snadnou editaci modelů.
- Větší nároky na uživatele z pohledu znalostí CAD systému.
- Problematická modifikace modelů importovaných v podobě neparametrického tělesa (modely vytvořené v jiných CAD systémech).
- Pomalá aktualizace složitých modelů z důvodu přepočtu historie modelování.
- Každá změna v modelu vyžaduje od uživatele znalost konkrétní historie modelování.

#### **2.1.1.2 Přímé modelování (modelování bez historie)**

Při použití metody přímého modelování jsou prvky tvořeny jeden na druhém bez jakékoliv závislosti. Pro každou úpravu geometrie je použit další prvek, jehož nastavení použité při tvorbě není uchováno. Není zde tedy žádný strom historie modelování a při modifikaci je možná pouze lokální aktualizace bez nutnosti aktualizovat celý model. Tento proces úprav se vyznačuje nízkou časovou náročností na přepočet modelu a konstruktér se tak může více soustředit na tvůrčí činnost.

Přímé modelování se úspěšně aplikuje při úpravách importované geometrie, která vznikla v jiném CAD systému a nemá tedy uchovanou historii modelování. Z modelů bez historie se tak stávají téměř plnohodnotné modely použitelné pro libovolné modifikace. Na obr. 6 je ukázka modifikace tělesa bez historie pomocí funkcí přímého modelování pro protažení tělesa a pro otočení kolem osy.



Obr. 6 : Příklad přímého modelování

#### Základní znaky přímého modelování:

- Jedná se o flexibilní proces tvorby CAD modelů.

- Není dostupná žádná historie modelování.
- Používá se přímá editace modelů.
- Neexistují žádné závislosti mezi prvky modelu.
- Tvorba dílů a sestav probíhá v jednom modulu.
- V modelu nejsou žádné vazby ani parametry.

#### Výhody přímého modelování:

- Lze vytvořit a editovat jakoukoliv geometrii.
- Bez problémů lze pracovat s importovanou geometrií (tělesa bez historie).
- Konstruktor se může soustředit na kreativní činnost. Není rozptylován soustředěním se na pravidla modelování.
- Přímé modelování vyžaduje kratší dobu pro zaškolení uživatelů.
- Editace geometrie je intuitivnější (není nutné přemýšlet nad historií modelu).
- Soubory s CAD daty jsou menší.

#### Nevýhody přímého modelování:

- Automatizace modelování zde není možná.
- Z modelu nemusí být zřejmý záměr konstruktéra.
- Nelze využít prvky z existujících dat pro tvorbu nových.

#### **2.1.1.3 Synchronní modelování (hybridní přístup)**

Synchronní modelování představuje integraci obou předchozích metod. Spojuje tedy jejich výhody a eliminuje nevýhody. Díky této metodě je možné jednoduše a rychle modifikovat existující složité modely a zároveň využívat možnosti parametrizace a následné automatizace tvorby variant například metodou řízení variant pomocí tabulky. Velkou výhodou je možnost práce s importovanou geometrií včetně její částečné nebo úplné parametrizace. Odbourána je rovněž nutnost znalosti historie modelování pro úpravu stávajícího parametrického modelu. Je však nutno dodržovat jistá pravidla a doporučené postupy zajišťující udržení přehlednosti modelu.

#### Základní znaky synchronního modelování:

- Parametrické i přímé modelování v jednom.
- Synchronní technologie.
- Je dostupná historie modelování.
- Rychlá editace modelů.
- Rychlá editace v prostředí dílů i sestav.
- Jednoduché používání.

#### **2.1.2 Sestavy**

Jednotlivé 3D modely jsou v prostředí CAD systému skládány do sestav, kde jsou mezi nimi tvořeny funkční vazby. Tímto způsobem je tvořen finální výrobek, který představuje přesný odraz reálného produktu ve virtuálním světě. Ve virtuálním prostředí CAD systému lze tento produkt dále analyzovat například z pohledu funkce kinematiky nebo kolizních stavů.

### 2.1.2.1 Kusovník dílů sestavy

Díly sestavy nemusí být tvořeny jen 3D modely, ale mohou obsahovat i ne-geometrické díly, které sice nejsou reprezentovány modelem, ale z pohledu následné tvorby rozpisky materiálu (takzvaného kusovníku) jsou důležitou součástí finálního produktu. Možnost automatického generování kusovníku pro další potřeby výroby produktu je součástí běžných CAD řešení. V řešení integrovaném do prostředí PLM je navíc tento CAD kusovník přímo synchronizován s kusovníkem v PLM systému. Důležitou informací, kterou kusovník obsahuje, je poloha jednotlivých dílů v prostoru, která je dána maticí posunutí jednotlivých dílů od počátku globálního souřadného systému.

### 2.1.2.2 Vazby mezi díly

Jednotlivé díly, které mají v prostoru určenou polohu pomocí matice posunutí, mohou mít mezi sebou v prostředí parametrického CAD systému definovány vazby. Tyto vazby zajišťují automatickou změnu polohy v závislosti na změně parametrů a umožňují tak stejně jako v případě parametrických modelů automatizaci generování variant.

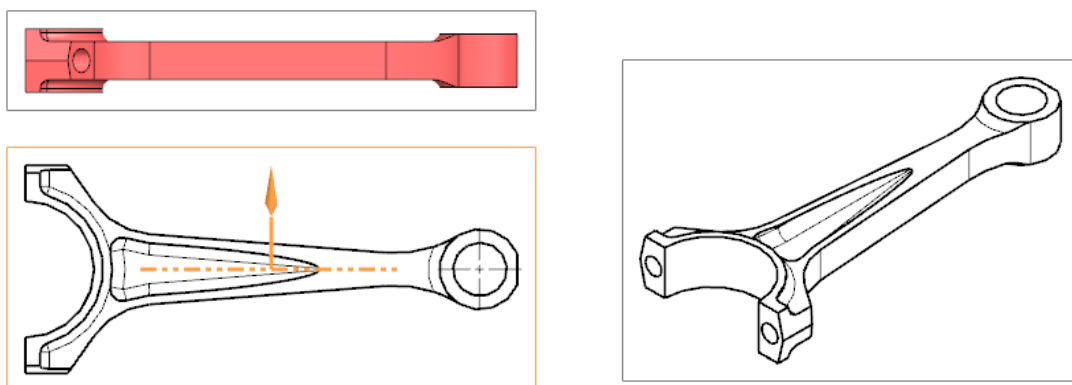
Kromě základních vazeb typu (kontakt, kolmost, vzdálenost, soustřednost atd.) se v moderních inovativních systémech objevují i vazby funkční typu pohybový šroub nebo lineární vedení.

### 2.1.2.3 Analýza kolizí

Objemová tělesa tvořící sestavu mohou být využita pro analýzu průniku materiálu, díky které lze odhalit například chybějící díry pro šrouby. V sestavách s definovanými vazbami je navíc možné definovat stupně volnosti jednotlivých těles a následně vyšetřovat kolizní stavy při pohybu mechanismu.

## 2.1.3 Výkresová dokumentace

Výkresová dokumentace je běžně tvořena v prostředí 2D modulu, který využívá 3D modely pro tvorbu asociativních 2D pohledů. Do prostoru výkresu je rovněž možné vkládat statické 3D pohledy. Na obr. 7 je zobrazeno vkládání pohledu do prostředí modulu pro tvorbu výkresů, včetně vloženého 3D izometrického pohledu.



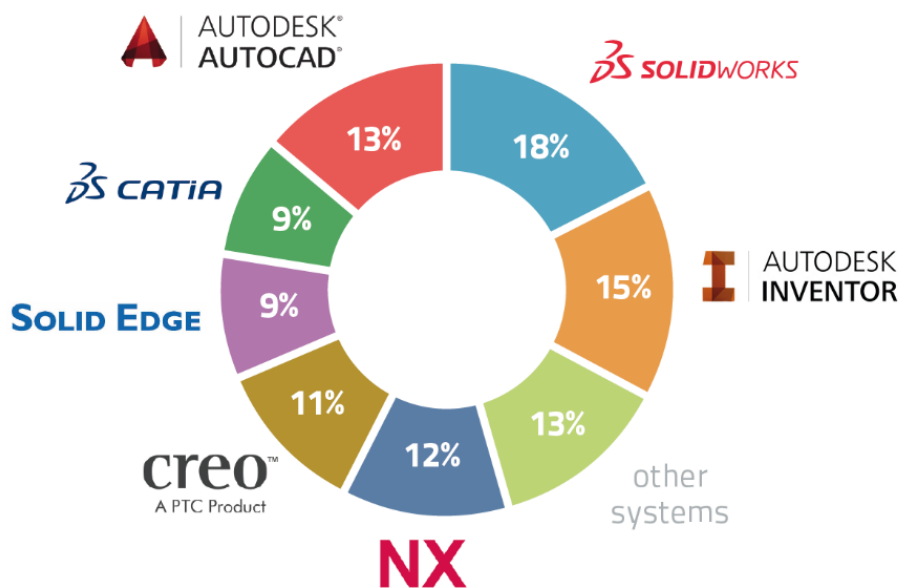
Obr. 7 : Pohledy v prostředí výkresové dokumentace

## 2.1.4 Bez-výkresová dokumentace

Moderním trendem je náhrada standardní papírové dokumentace pomocí digitálních dat, která obsahují veškeré potřebné informace. Nástrojem pro dosažení tohoto cíle jsou tzv. PMI kóty, které umožňují tvorbu kót a popisů přímo ve 3D prostředí. Cílem tohoto nástroje není jen přesunout kótování z prostředí 2D do 3D, ale i zjednodušení celé této činnosti. Hlavní myšlenkou je doplňovat pomocí PMI jen takové informace, které nelze odečíst přímo z modelu. Vkládány jsou tedy například geometrické a rozměrové tolerance. Netolerované rozměry součástí naopak vkládány nejsou. Tento způsob tvorby výrobní dokumentace předpokládá využití takto připravených dat například v CAM modulu, nebo v modulu pro měření.

## 2.1.5 Komerční CAD řešení

V oblasti CAD systémů existuje v dnešní době několik velkých výrobců, kteří dodávají svá řešení v podobě komplexních CAx řešení integrovaných do PLM systému. Zajímavou informací o podílu uživatelů jednotlivých systémů poskytuje jeden z největších serverů pro sdílení CAD modelů komponent cadenas.in. Podíl zastoupení uživatelů jednotlivých řešení na tomto serveru je na obr. 8.



Obr. 8 : zastoupení CAD uživatelů dle serveru cadenas.in (4)

### 2.1.5.1 CATIA

Výrobce: Dassault Systèmes



V roce 1977 francouzská letecká společnost Avions Marcel Dassault zakoupila od firmy Lockheed licenci na zdrojový kód programu CADAM a pod názvem CATIA<sup>7</sup> začala vyvíjet vlastní 3D CAD systém. Popularitu tomuto programu přinesla především exkluzivní možnost být prodáván pod záštitou společnosti IBM a také její nejvýznamnější zákazník, výrobce letadel Boeing Company.

<sup>7</sup> CATIA : Computer Aided Three Dimensional Interactive Application

CATIA je v oblasti velkých firem jeden z nejrozšířenějších a obecně nejznámějších CAD programů se silnou tradicí. V současné době je aktuální verze programu verze V6, nicméně je stále nejvíce rozšířena verze V5. CATIA je v portfoliu výrobce Dassault Systems klíčový produkt, na který je vázáno množství dalších nástrojů jako např. PLM systém Enovia. Nejsilnější stránku programu CATIA představuje práce v plochách. Čím složitější plochy potřebuje zákazník vytvořit, tím větší rozdíl je patrný mezi CATIA a její konkurencí, CATIA je schopná nabídnout téměř ekvivalentní nástroje, kterými disponují pouze čistě designérské programy.

### 2.1.5.2 Siemens NX



Výrobce: Siemens PLM Software

NX je od roku 2001 nástupce systému Unigraphics, který byl uveden na trh společností United Computing v roce 1973. Později tuto společnost získal McDonnell Douglas a v roce 1981 se stal Unigraphics prvním řešením pro 3D modelování. Po přechodu pod dceřinou společnost General Motors firmu EDS se stal Unigraphics v roce 1991 firemním CAD systémem v General Motors. V roce 2001 řešení získala společnost SDRC<sup>8</sup> a Unigraphics byl sloučen se systémem I-DEAS. Přidáním funkcí systému I-DEAS do systému Unigraphics byl položen základ pro produktovou řadu s názvem NX. Současným vlastníkem je společnost Siemens PLM Software, která toto řešení dostala pomocí řady akvizic na přední světovou příčku.

Siemens NX je komplexní CAD/CAM/CAE systém zahrnující podporu širokého spektra činností v konstrukci a výrobě od prvního ideového návrhu přes výpočty, simulace a analýzy, modelování jednotlivých dílů i celých sestav, tvorbu výkresové dokumentace, programování NC obráběcích a měřících strojů a simulaci obrábění až po kontrolu kvality, správu dat a projektů a integraci do podnikového informačního systému.

Jedná se o moderní modulární systém s plnou asociativitou všech spolupracujících modulů, postavený nad jednotnou grafickou a objektově orientovanou databází. To umožňuje souběžnou práci velkých vývojových týmu. V praxi to znamená, že již v určité fázi rozpracovanosti modelu lze současně provádět pevnostní a kinematické výpočty, případně i další analýzy a simulace. Souběžně s projektanty mohou konstruktéři zpracovávat výkresovou dokumentaci, technologové mohou připravovat NC programy. Master Model Koncept zajišťuje jednoznačné provedení změn ve všech těchto navazujících činnostech. Je založen na předpokladu, že model je určujícím prvkem, na němž jsou prováděny všechny modifikace, které se přenášejí do všech rozpracovaných aplikací.

### 2.1.5.3 Creo



Výrobce: Parametric Technology

Uvedení systému ProEngineer společností PTC<sup>9</sup> na trh v roce 1987, znamenal velký průlom ve 3D modelování. Byl to totiž první CAD, který byl od začátku založen na prostorovém modelování. Tento systém byl vyvinut zcela nově a mohl tedy splnit požadavky, které ostatní společnosti nedokázali. Jelikož veškerá konkurence stále pouze dolepovala další moduly na původní 2D CAD

<sup>8</sup> SDRC : Structural Dynamics Research Corporation

<sup>9</sup> PTC : Parametric Technology Corporation



systém, a tak nemohla dosáhnout takové jednoduchosti obsluhy, rychlosti modelování, a tedy efektivnosti. ProEngineer byl navíc již od svého počátku směřován jako konkurence pro ty nejrenomovanější softwary té doby, tedy CATIA, Unigraphics a I-Deas. V roce 2011 bylo řešení přejmenováno na Creo.

#### 2.1.5.4 SolidWorks



Výrobce: Dassault Systèmes

SolidWorks byl poprvé uveden na trh v roce 1995. Byl vytvořen týmem Jona Hirschticka pod křídly firmy Concorde, ale dlouho svou samostatnost neudržel. Již v následujícím roce provedla jeho akvizici firma Dassault Systèmes, čímž také ona s mnohaletým náskokem před firmou Siemens rozšířila své portfolio programů 3D CAD. Jednalo se opět o strategický krok, jelikož SolidWorks znamenal pro mateřskou společnost levnější a dostupnější variantu CAD softwaru, do kterého jsou postupně implementovány vyspělejší prvky ze systému Catia.

SolidWorks je zaměřen především na rychlost při vytváření modelů. Je to systém, který tvoří nižší třídu CAD softwaru v rámci nabídky Dassault Systèmes. Jeho prostředí působí jednoduchým a uživatelsky přívětivým dojmem. Díky příznivé ceně tak má tento software na trhu velký úspěch zejména pokud se jedná o zákazníky, kteří pracují s běžnými technologiemi, a tedy nevyžadují speciální softwarovou výbavu.

#### 2.1.5.5 SolidEdge



Výrobce: Siemens PLM Software

SolidEdge je jeden z nejmladších CAD softwarů. Poprvé byl na trh uveden v roce 1995 jako verze V1, firmou UGS Corp. Tehdy to byl pouze 3D modelář. V roce 1998 přibyl modul pro tvorbu plechových dílů a v následujících letech byl celý systém velkou měrou rozšiřován a doplňován dalšími moduly tak, aby odpovídal nabídce konkurence. V roce 2007 došlo k akvizici UGS Corp. firmou Siemens AG. Tento nový majitel již v následujícím roce do systému SolidEdge implementoval tzv. synchronní technologii, kterou využívá i systém NX. Výrobce uvádí, že tato technologie dovoluje modelování až 100krát rychleji.

Pro firmu Siemens byl nákup UGS Corp. strategickým krokem, kdy díky softwaru SolidEdge dokáže pokrýt větší část trhu. Obecně lze říct, že systém Siemens NX je cílen na bohatší zákazníky, zatímco SolidEdge spíše na zákazníky, kteří nevyžadují tak pokročilé nástroje a prostředí. Samotná firma Siemens zařazuje SolidEdge do kategorie Velocity Series, čemuž lze rozumět jako nástroj pro rychlé navrhování. SolidEdge je 3D CAD systém primárně určený pro návrh strojírenských konstrukcí.

#### 2.1.5.6 Inventor



Výrobce: Autodesk

CAD systém Inventor vydaný na konci roku 1999 je výsledkem snahy společnosti Autodesk o vytvoření jednoduše ovladatelného nástroje pro parametrické 3D modelování, které je obzvláště blízké uživatelům, kteří již dříve nějaký produkt od společnosti Autodesk využívali. V současné době se jedná o rychle se rozvíjející software, schopný nabídnout v dostupnější



cenové relaci obdobné komponenty jako konkurence. Jako jeho hlavního konkurenta na trhu dnes lze označit např. SolidWorks nebo SolidEdge.

## 2.2 CAE: Nástroje pro numerickou verifikaci návrhu

V dnešní době existuje široké spektrum nejrůznějších CAE nástrojů od obecných analytických a numerických analýz až po nejrůznější specializované nástroje. Z důvodu zaměření disertační práce do oblasti návrhu těžkých obráběcích strojů je tato kapitola zaměřena především na nástroje s možným využitím právě v této oblasti.

### 2.2.1 Analýza mechanismů pomocí tuhých těles

Analýza mechanismů pomocí soustavy tuhých těles a vazeb mezi nimi představuje velmi užitečný nástroj, který lze aplikovat hned v počátcích realizace koncepčního návrhu. Tuto možnost dnes nabízejí všechny velké CAx systémy, většinou formou rozšiřujícího modulu.

#### 2.2.1.1 Základní princip

Podstata této úlohy spočívá v náhradě jednotlivých těles pomocí tuhých prvků, které mají definovány základní vlastnosti pro řešení úloh kinematiky nebo dynamiky. Každé těleso má v prostoru definováno šest stupňů volnosti. Jednotlivá tělesa jsou vzájemně propojena pomocí vazeb, přičemž každá vazba odebírá systému určitý počet stupňů volnosti, který je daný typem vazby. Stupně volnosti jsou běžně označovány zkratkou DOF<sup>10</sup>.

Počet stupňů soustavy je tedy rovný počtu těles krát 6° volnosti po odečtení stupňů volnosti, které odebírají vazby. Mechanismem je pak nazývána soustava, která má ve výsledku jeden stupeň volnosti.

Tab. 1 : Příklad běžných typů vazeb s počtem odebraných stupňů volnosti

Typ vazby	Odebírá stupňů volnosti	Volné stupně
Pevná vazba	6°	Žádný
Rotační vazba	5°	Jeden rotační
Posuvná vazba	5°	Jeden posuvný
Kloubová vazba	3°	Tři rotační

Postup řešení úlohy tuhých těles je následující:

1. Definice tuhých těles a jejich vlastností.
2. Definice vazeb mezi tělesy a rámem a mezi tělesy navzájem.
3. Definice vnějšího zatížení.
4. Definice typu úlohy (kinematika, dynamika) a jejích parametrů.
5. Výpočet
6. Zobrazení výsledků a tvorba výstupů.

<sup>10</sup> DOF : Degrees Of Freedom

### **2.2.1.2 Rozšiřující možnosti**

Klasickou analýzu pomocí tuhých těles lze rozšířit například o integraci poddajných prvků v podobě od jednoduchých analytických rovnic až po složité matice tuhosti získávané v jednotlivých iteracích využitím metody konečných prvků.

## **2.2.2 Analýza metodou konečných prvků**

CAE systémy využívající metodu konečných prvků vznikali původně jako oddělené prostředí pro realizaci numerických simulací. Mezi klasické CAE systémy se řadí například ANSYS nebo MARC. Základním principem práce v CAE systému byla tvorba sítě s využitím geometrie importované pomocí univerzálního formátu a následná definice okrajových podmínek a zátěžných stavů. Po provedení výpočtu lze zobrazit výsledky pro potřeby vyhodnocení. Hlavní nevýhodou původních samostatných CAE systémů byla nutnost opakovat celý proces při změně modelu.

Moderní CAE systémy integrované v prostředí CAx se vyznačují plně asociativním spojením s geometrií CAD modelu. V případě úpravy modelu je možné jednoduše aktualizovat síť a spustit výpočet nové varianty. Díky tomu je možné automatizovat proces přípravy výpočtového modelu a ve stejném čase tak výrazně zvýšit počet analyzovaných variant.

### **2.2.2.1 Základní princip**

Princip metody spočívá v rozdělení konstrukce na konečný počet malých prvků definovaných pomocí bodů umístěných v prostoru, definici okrajových podmínek a zatížení ve vybraných bodech a následném řešení soustavy rovnic dle typu úlohy.

Postup realizace numerické analýzy se tedy skládá z těchto kroků:

1. Příprava geometrie (idealizace geometrie).
2. Tvorba sítě tvořené konečným počtem prvků.
3. Definice okrajových podmínek, zatížení a parametrů konkrétní úlohy.
4. Řešení úlohy.
5. Zobrazení výsledků a vyhodnocení.

### **2.2.2.2 Geometrie**

Vstupem pro realizaci analýzy pomocí metody konečných prvků je v dnešní době nejčastěji 3D model vytvořený konstruktérem. Tento model je tvořen jako virtuální obraz reálného dílu a obsahuje tedy veškeré detaily. Pro potřeby výpočtu je však nutné model upravovat, tak aby vyhovoval požadavkům na tvorbu kvalitní výpočtové sítě.

Zjednodušení modelu má několik úrovní idealizace:

- Idealizace geometrie pro analýzu pomocí 3D prvků.
- Idealizace geometrie pomocí střednic na plošný model řešený 2D sítí.
- Idealizace geometrie pomocí křivek na model řešený pomocí 1D sítí.

Jednotlivé způsoby idealizace lze samozřejmě v jednom výpočtovém modelu kombinovat, přičemž je však nutné řešit napojení na rozhraní jednotlivých nekompatibilních typů sítí.

### 2.2.2.3 Sít

Geometrie modelu slouží pro automatizovanou definici konečno prvkové sítě, přičemž každá taková síť se skládá z uzlů a elementů. Jednotlivé uzly sítě jsou ve výpočtovém modelu definovány číslem a polohou v prostoru. Elementy jsou pak definovány pomocí čísel uzlů, které je tvoří. Díky sdílení uzlů sousedícími elementy je celá síť náležící jednomu objemu propojena v jeden celek.

Z pohledu výpočtového modelu jsou běžně využívány tyto typy prvků:

- Objemové prvky (označovány jako 3D)
- Plošné prvky (označovány jako 2D)
- Nosníkové prvky (označovány jako 1D)
- Speciální prvky (označovány jako 0D)

### 2.2.2.4 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky definují pro konkrétní numerickou úlohu způsob uchycení tělesa v prostoru, případně způsob spojení více těles mezi sebou a vnější zatížení, přičemž mohou být časově nezávislé nebo závislé. V moderních CAE systémech jsou při tvorbě výpočtového modelu okrajové podmínky definovány pomocí geometrie, nicméně pro potřeby samotného výpočtu jsou vždy převedeny na jednotlivé uzly.

Mezi běžně používané okrajové podmínky patří:

- Omezení pohybu v určitém stupni volnosti uzlu.
- Spojení dvou a více uzlů pomocí vazby s definovanou rovnicí závislosti pohybů.
- Definice lineárních a nelineárních kontaktních párů.
- Definice zatížení silou v uzlu.
- Definice zatížení gravitačním zrychlením.

### 2.2.2.5 Lineární úlohy

Nejjednodušším typem úloh řešených pomocí metody konečných prvků jsou úlohy lineární statiky. Základní předpoklady úlohy lineární statiky jsou:

- Izotropní homogenní vlastnosti materiálu.
- Průběh napětí v závislosti na poměrné deformaci je lineární (oblast platnosti Hookova zákona).
- Deformace a posunutí jsou malá.
- Okrajové podmínky a zatížení se v průběhu času nemění.
- Geometrie tělesa se v průběhu úlohy nemění.

Mezi složitější typy lineárních úloh patří např. modální analýzy nebo stacionární teplotní úlohy.

### 2.2.2.6 Nelineární úlohy

Pro nelineární úlohy není splněna nejméně jedna z podmínek linearity. Řešení probíhá v krocích, přičemž je pro každý krok znovu sestavována matice tuhosti a vektor zatížení. Mezi základní typy nelineárních úloh patří:

- Kontaktní úlohy.
- Úlohy materiálové a geometrické nelinearity.
- Dynamické úlohy.
- Nestacionární teplotní úlohy.

### 2.2.2.7 *Optimalizační nástroje*

Optimalizace konstrukce vede v konečném důsledku k materiálovým úsporám i ke zlepšení provozních vlastností dílů. Princip optimalizace spočívá v použití iteračního přístupu k nalezení vyhovujícího tvaru dílu. Výsledkem optimalizace ve většině případů je zmenšení hmotnosti dílu a sestav při zachování pevnostních vlastností, použití různých materiálů dílů nebo různých dílů v jedné sestavě nebo například zmenšení hmotnosti dílů a sestav při zachování teplotních nebo provozních frekvencí.

## 2.2.3 Komerční CAE řešení

### 2.2.3.1 ANSYS

Výrobce: ANSYS, Inc.



Společnost ANSYS vyvíjí a prodává svůj stejnojmenný produkt s využitím v celém životním cyklu výrobku od roku 1971, kdy byla vydána první komerční verze ANSYS 2.0. Až do roku 1980 byl tento software ve formě textové příkazové řádky. S vydáním Apple II pak ANSYS přešel na grafické uživatelské prostředí. V roce 1996 uvedla společnost na trh produkt LS-DYNA pro simulace rychlých dějů a Ansys Computational Fluid Dynamics (CDF) pro simulaci proudění.

### 2.2.3.2 SIMULIA Abaqus

Výrobce: Dassault Systemes



Vývoj softwarového nástroje Abaqus zahájila v roce 1978 společnost Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, která v devadesátých letech změnila svůj název na ABAQUS Inc. V roce 2005 přešla tato společnost v rámci akvizice pod Dassault Systèmes a Abaqus se stal součástí simulačního prostředí SIMULIA.

### 2.2.3.3 Nastran

Výrobce: MSC Software, Autodesk, Siemens Digital Industries Software



Nastran byl původně vyvinut v roce 1968 pro potřeby vesmírného výzkumu NASA pod záštitou americké vlády. Jednou ze společností podílejících se na tomto původním vývoji byla společnost The MacNeal-Schwendler Corporation (MSC), která působí na trhu dodnes a dodává svůj produkt pod názvem MSC NASTRAN. Zdrojový kód původního Nastranu, který byl uvolněn v roce 1971, je však také součástí řešení jiných společností. Například NEi Nastran byl v roce 2015 zařazen do portfolia společnosti Autodesk a NX Nastran je od roku 2007 součástí CAx řešení společnosti Siemens Digital Industry Software.



## 2.3 CAM: Nástroje pro tvorbu NC programů

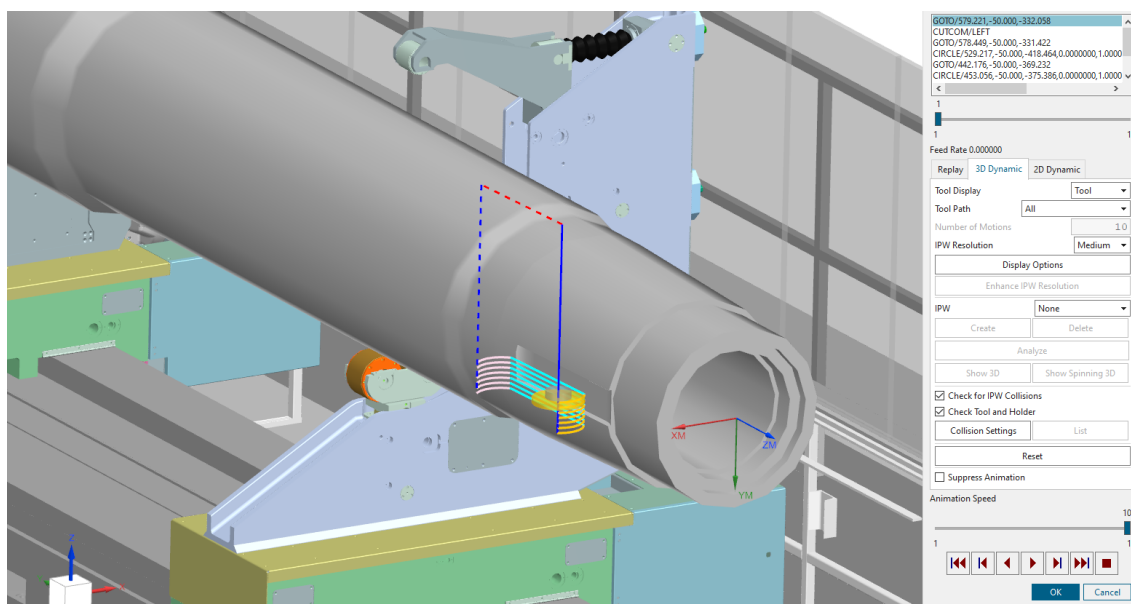
CAM nástroje představují nástroj, který stojí na rozhraní virtuální světa 3D modelů a reálného světa fyzického prototypu. Prostřednictvím CAM software je totiž tvořen NC program sloužící jako vstup pro reálné obrábění fyzických dílců na reálném stroji. Vlivem postupující kompletní virtualizace výrobních procesů jsou však dnes tyto nástroje používány také jako nástroje pro simulaci obrábění, tedy k výrobě virtuálních dílců na virtuálních strojích.

### 2.3.1 Propojení s CAD

Moderní CAM software se neobejde bez běžně používaných CAD funkcí. Většina CAM řešení, tedy alespoň v minimální podobě, integruje základní funkcionalitu CAD, nebo je dodávána jako modul do velkého komplexního CAX systému. Integrace do komplexních CAX systémů přináší zásadní výhodu v podobě možnosti rychlé aktualizace na základě asociativního propojení geometrie v CAD a CAM.

### 2.3.2 Návrh technologie obrábění

V prostředí CAM systému slouží plochy 3D geometrie pro definici dráhy, po které se pohybuje obráběcí nástroj. Generování drah probíhá pomocí speciálních funkcí určených pro konkrétní typ obrábění. Ukázka technologie frézování drážky je na obr. 9.



Obr. 9 : Návrh technologie frézování drážky v CAM systému

Každou dráhu lze rozdělit na určitý počet bodů, přičemž v každém bodě je jasně definována poloha bodu nástroje v prostoru včetně úhlů natočení. Základním výstupem je soubor tzv. CL dat obsahující právě tyto obecné informace (polohu bodů a úhly natočení).

### 2.3.3 Tvorba NC programu – postprocessing

Výrobní stroje obrábí podle NC programů napsaných v jazyce určeném pro konkrétní řídicí systém stroje. Použitelným výstupem CAM systému musí být tedy skutečný NC program

vytvořený pro konkrétní stroj. Z tohoto důvodu umožňují CAM systémy uživatelskou tvorbu tzv. postprocesorů, které zajišťují překlad informací o dráhách a natočení obsažených v CL datech do reálného NC programu.

### 2.3.4 Simulace obrábění

Vzhledem k vysoké ceně strojního času reálných výrobních strojů se velmi rozšířila možnost simulace obrábění, která umožňuje odladění NC programu ve virtuální fázi bez nutnosti odstávky reálného stroje z výrobního procesu.

V současné době existuje několik úrovní simulace obrábění v CAM:

- Simulace obrábění podle drah bez kinematiky stroje.
- Simulace obrábění podle drah s kinematikou stroje.
- Simulace NC programu pomocí virtuálního stroje.

## 2.4 Automatizace v CAX

Automatizace práce v CAX systémech představuje významnou úsporu času uživatele. Moderní CAX systémy umožňují i běžným uživatelům tvořit jednoduché programy, které mohou automatizovat opakované rutinní činnosti.

### 2.4.1 Vývojové rozhraní (API)

Velká CAX řešení zmíněná v předchozích kapitolách poskytují API<sup>11</sup> pro programování vlastních funkcí s využitím rozsáhlých knihoven funkcí. Ve většině případů tato API podporují většinu běžně používaných programovacích jazyků, mezi které patří i jazyky VB.NET<sup>12</sup> a C#<sup>13</sup>, které jsou využívány v dále navržených řešeních. Následující tabulka obsahuje jednotlivá API dodávaná k produktům jednotlivých výrobců včetně přehledu podporovaných programovacích jazyků.

Tab. 2 : Přehled API rozhraní velkých CAX řešení

Výrobce	Produkt	API rozhraní	API podpora
Autodesk	Inventor	Inventor API	VB.NET, C#, C++
Dassault Systèmes	Catia	Catia API	VB.NET, C#, C++
Dassault Systèmes	SolidWorks	SolidWorks API	VB.NET, C#, C++
PTC	Creo	PTC Creo Toolkit	VB.NET, C#, C++
Siemens PLM Software	NX	NXOpen	VB.NET, C#, C/C++, Java, Python
Siemens PLM Software	SolidEdge	SolidEdge API	VB.NET, C#

<sup>11</sup> API – Application Programming Interface (rozhraní pro tvorbu aplikací)

<sup>12</sup> VB.NET - Visual Basic .NET je objektově orientovaný programovací jazyk využívající vývojovou platformu .NET

<sup>13</sup> C# – objektově orientovaný programovací jazyk vyvíjený zároveň s vývojovou platformou .NET

Z pohledu běžného uživatele CAD se jako nejužitečnější jeví využití programovacího jazyka VB.NET, který sice není mezi programátory nejoblíbenější, ale je rozhodně nejlépe pochopitelným jazykem pro začátečníky. Z obr. 10 je patrná jednoduchá čitelnost programu psaného ve VB.NET. Předpokladem je samozřejmě alespoň základní znalost anglického jazyka.

VB.NET Sample	C# Sample
<pre>Dim i As Integer For i = 0 To 100     If i = 7 Then         MessageBox.Show(i)     End If Next</pre>	<pre>For (Int i=0; i&lt;=100; i++) {     If (i == 7) {         MessageBox.Show(i);     } }</pre>

Obr. 10 : Porovnání programu ve VB.NET a C#

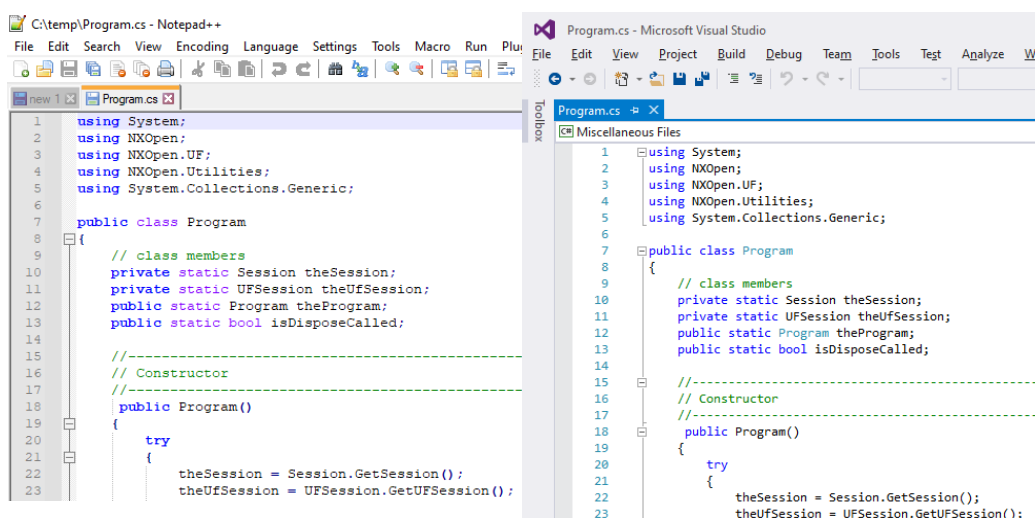
## 2.4.2 Vývojové prostředí

Pro vývoj aplikací mohou být používány různé softwarové nástroje od nejjednodušších textových editorů až po sofistikovaná vývojová prostředí. Podle úrovně nástroje je dostupná následující běžně používaná funkcionality:

- Zvýraznění syntaxe programovacího jazyka.
- Automatické dokončování.
- Ladění programu.

Pro rychlou editaci programů je vhodným řešením například univerzální editor Notepad++, který umožňuje zvýraznění syntaxe různých programovacích jazyků i textových struktur. Velkou nevýhodou tohoto řešení je absence kontroly syntaxe, kterou lze do jisté míry doplnit pomocí rozšiřujících modulů.

V případě vývoje aplikací s využitím vývojové platformy .NET je vhodnou volbou vývojového prostředí Visual Studio, které je ve verzi Community dostupné pro malé vývojové týmy zdarma. Výhodou tohoto prostředí je automatické doplňování kódu, práce s knihovny, kontrola syntaxe a možnost ladění programu. Ukázky zobrazení programu v prostředí univerzálního textového editoru a vývojového prostředí jsou na následujícím obrázku.



Obr. 11 : Ukázka C# programu v prostředí Notepad++ a Visual Studio

## 2.5 PLM: Nástroje pro správu životního cyklu výrobku

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách moderní CAx softwarové řešení se v dnešní době neobejde bez pokrytí oblastí CAD, CAE, CAM a PLM. Přičemž především poslední jmenovaná oblast (PLM) je zásadní pro efektivní využití všech předchozích. Pojem PLM (Product Lifecycle Management = Řízení životního cyklu výrobku) pod sebou skrývá rozsáhlou a stále se rozšiřující skupinu modulů a integrací, jejíž cílem je skutečné pokrytí všech částí životního cyklu výrobku.

Jak je vidět na obr. 12, mezi základní moduly PLM systému patří správa CAD souborů, dokumentů, kusovníků a procesů. Systém lze pak dále rozšiřovat například o moduly pro správu požadavků, výrobu nebo servis.



Obr. 12 : Moduly PLM platformy [5]

### 2.5.1 Správa CAx souborů

Správa CAx souborů v prostředí PLM systému je zajišťována integrací konkrétního systému. Mezi CAx a PLM systémem jsou kromě fyzických souborů synchronizovány i další metadata např. informace o použitém materiálu, hmotnosti, autorovi apod. Velkou výhodou správy souborů v prostředí PLM systému je možnost pracovat s vazbami mezi jednotlivými objekty a následné využití těchto informací pro rychlejší vyhledávání. Běžně jsou spravovány a řízeny tyto typy CAx souborů:

- CAD soubory zahrnující především 3D modely a 2D výkresovou dokumentaci.
- CAE soubory zahrnující data pre i post-procesingu.
- CAM soubory včetně NC programů.

### 2.5.2 Správa dokumentů

V průběhu životního cyklu výrobku vzniká kromě CAx dat i celá řada dalších dokumentů, které jsou s produktem přímo či nepřímo provázány. Moderní PLM systémy umožňují spravovat téměř všechny typy dokumentů běžně používaných v operačním systému. Velmi oblíbené jsou kromě dokumentů kancelářského balíku MS Office i dokumenty PDF, nebo různé druhy obrázků (TIF, JPEG, PNG apod.)

PLM systémy nabízí kompletní řešení přístupových práv k jednotlivým objektům a v případě editace dokumentu zajišťují i ochranu proti zápisu dalších osob.



### 2.5.3 Správa kusovníků

Kusovník neboli rozpiska materiálu (zkráceně BOM z anglického Bill Of Material) hraje v životním cyklu produktu významnou roli. Kusovník by měl obsahovat veškeré položky, které daný produkt obsahuje. V prostředí PLM systému rozeznáváme několik druhů kusovníků.

- CAD kusovník, který je přesným obrazem kusovníku obsaženého v CAD systému a je synchronizován prostřednictvím integrace CAD systému. Tento kusovník je strukturován tak, jak je to výhodné pro tvorbu sestav v CAD systému.
- Konstrukční kusovník (eBom z anglického Engineering Bill Of Material), který představuje rozšíření CAD kusovníku o použité materiály potřebné k výrobě dílů. Kusovník je strukturován tak, jak je to výhodné z pohledu konstrukce. Obsahuje tedy jednotlivé konstrukční celky.
- Technologický kusovník, který obsahuje veškeré díly konstrukčního kusovníku přeskupené do struktury podle technologie výroby produktu. Konstrukční celky se mnohdy rozpadají do struktur odpovídajících výrobě a montáži.

### 2.5.4 Komerční PLM řešení

#### 2.5.4.1 Enovia

Výrobce: Dassault Systèmes



PLM systém ENOVIA byl uveden na trh v roce 1998 jako systém pro správu dat.

#### 2.5.4.2 Teamcenter

Výrobce: Siemens PLM Software



PLM systém Teamcenter byl uveden na trh společností UGS a v roce 2007 přešel pod společnost Siemens PLM. Díky akvizici společnosti TESIS PLMware GmbH v roce 2013 byla výrazně posílena pozice tohoto řešení v oblasti integrace s ERP systémy, jako jsou například SAP nebo Oracle.

#### 2.5.4.3 Windchill

Výrobce: PTC



Windchill byl původně vyvíjen společností Windchill Technology. Uveden na trh byl v roce 1998. Společnost PTC získala tento PLM systém akvizicí v roce 2004, přičemž se spoluzakladatel Windchill Technology Jim Heppelmann stal postupem času ředitelem společnosti PTC.

#### 2.5.4.4 Autodesk Fusion Lifecycle

Výrobce: Autodesk



## 3 Současný stav poznání

Analýza současného stavu poznání v oblasti CA technologií je členěna do podkapitol dle jednotlivých typů využívaných technologií. Postupně se tedy zaměřuje na problematiku CAD technologií a jejich využití v digitalizaci, numerické analýzy s využitím CAE technologií, PLM systémy a tvorbu komplexních mechatronických modelů.

### 3.1 Digitalizace pomocí CAD technologií

Nástup digitalizace s využitím CAD technologií započal v 70. letech minulého století se zvyšující se intenzitou vývoje těchto systémů. Velký rozmach CAD systémů přišel v devadesátých letech s nástupem osobních počítačů s operačním systémem Windows.

#### 3.1.1 Problematika přenosu dat mezi různými CAD systémy

Žádný ze současných velkých CAD systémů není založen na formátu dat, který by umožňoval jejich plnohodnotný přenos do systému jiného výrobce. Tato skutečnost výrazně komplikuje společně nejen přechod z jednoho CAD řešení na jiné, ale i spolupráci s dodavateli, kteří nepoužívají stejný systém.

Pro přenos dat mezi jednotlivými systémy slouží v současné době nejčastěji univerzální formáty STEP a IGES, které však často způsobují problémy v podobě rozpadlé geometrie 3D modelů nebo chybějících částí modelů a sestav. Vhodnějším formátem je Parasolid, na jehož jádru je postavena řada současných CAD řešení. Z pohledu množství a kvality přenesených informací je asi nejkvalitnější formát JT, který vyvíjí společnost Siemens PLM Software. Tento formát má předpoklady stát se standardem pro přenos dat, nicméně se mu to zatím nepodařilo.

##### 3.1.1.1 STEP

Jedná se o datový formát specifikovaný normou ISO 10303. Název STEP je zkratkou anglického Standard for the Exchange of Product Data. Pomocí tohoto formátu lze přenášet mezi jednotlivými CAX systémy informace nejen o geometrii, ale i o kusovnicích, materiálech atd.

##### 3.1.1.2 IGES

Představuje datový formát vhodný pro přenos 2D a 3D geometrie mezi různými CAX systémy. Pomocí tohoto formátu se přenáší pouze geometrie součástí, nelze tedy přenést negrafické informace. Název IGES je zkratkou anglického Graphics Exchange Specification.

##### 3.1.1.3 JT

(Jupiter Technology) je datový formát vyvinutý firmou Siemens PLM Software. Je využíván pro přenos dat mezi CAX systémy a vizualizaci těles. JT formát je také využíván v PLM programech jako je např. Teamcenter nebo PTC Windchill.

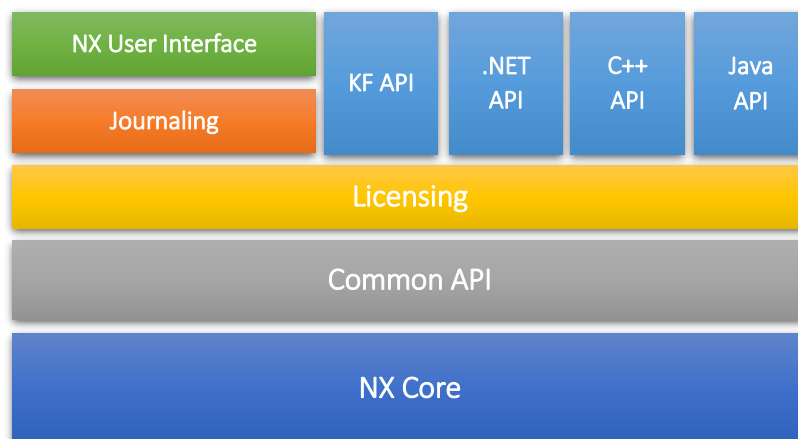
## 3.2 Automatizace v CAx a PLM

Vzhledem ke specializaci autora na programy NX a Teamcenter od společnosti Siemens je pozornost soustředěna na vývojové nástroje dostupné právě v těchto produktech. Jedná se o vývojové rozhraní NXOpen pro tvorbu aplikací v prostředí CAx systému NX a prostředí TC SOA pro Teamcenter. Podobná vývojová prostředí však nabízejí všechna velká CAx řešení.

### 3.2.1 NXOpen

Vývojové rozhraní NXOpen obsahuje sadu knihoven s otevřenou architekturou pro vytváření vlastních aplikací. Jedná se v podstatě o stejné nástroje, které využívají vývojáři tohoto software.

Jednotné API je po ověření licence k danému modulu zpřístupněno prostřednictvím různých programovacích jazyků a nástrojů. Pro potřeby této práce je využita možnost záznamu činnosti prostřednictvím modulu Journaling a následné programování vlastních aplikací pomocí .NET API. Schéma NXOpen API je zobrazeno na obr. 13.



Obr. 13 : Schéma s NXOPEN API

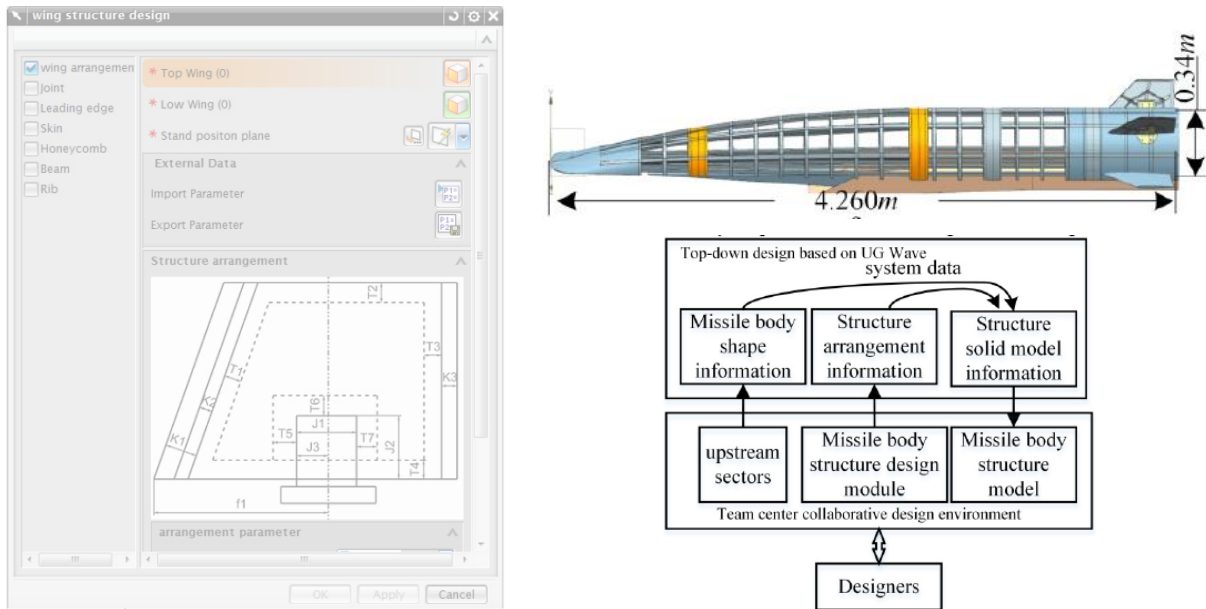
**Journaling** : V prostředí NX jsou jednotlivé funkce spouštěné pomocí ikon zaznamenávány do souboru, který tvoří nový program. Spuštěním takto zaznamenaného programu jsou zopakovány použité funkce. Jednoduchou úpravou lze program například spustit v několika opakováních pro různé soubory.

**.NET API** : Knihovny .NET API obsahují, téměř všechny funkce systému. Využitím těchto knihoven lze sestavit zcela nový program, který se po umístění ikony do prostředí NX chová jako jakákoliv jiná funkce. Kromě knihoven funkcí jsou dostupné i jednotlivé bloky dialogových oken NX, které zapadají do designu celého systému.

Velkou výhodou využití řešení NXOpen je možnost spuštění jednotlivých programů přímo z příkazové řádky, bez nutnosti spouštět grafické prostředí. Úspora času při běhu takového programu je při práci se složitou geometrií obrovská.

V akademické sféře není téma automatizace činností v prostředí CA systémů neznámé. Vývojové prostředí NXOpen například využívají ve svém řešení rychlého návrhu rakety pomocí

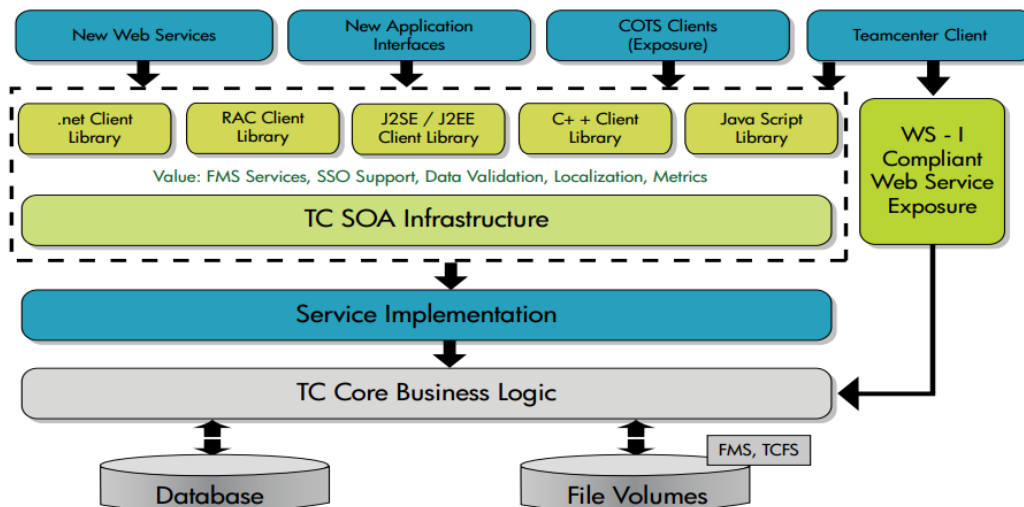
automatického generování geometrie těla rakety čínští autoři (5). S využitím NXOpen je řešena logika automatického generování a uživatelské prostředí dialogových oken. Jednotlivé části modelu jsou vzájemně asociativně propojeny pomocí technologie UG Wave umožňující sdílet geometrii napříč celou sestavou. Ukázka navrženého dialogového okna pro zadání vstupních parametrů a schématu parametrizace je na obr. 14.



Obr. 14 : Automatizace v návrhu tělesa rakety (5)

### 3.2.2 Teamcenter SOA

Také PLM systém Teamcenter obsahuje řešení umožňující tvorbu vlastních aplikací. Kromě možnosti tvořit aplikace na úrovni jádra systému pomocí ITK funkcí (Integration Tool Kit), jsou zde SOA (Service Oriented Architecture) knihovny, které lze využít pro tvorbu vlastních rozšíření. Tyto knihovny jsou využívány například při řešení integrace CAD systému do PLM. Schéma architektury PLM řešení Teamcenter je na obr. 15.



Obr. 15 : Architektura PLM řešení Teamcenter (6)

### 3.3 Numerické simulace s využitím CAE technologií

V kapitole je zmapováno současné využití CA technologií v oblasti těžkých obráběcích strojů. Dále jsou zde rešeršně zpracovány publikované články na dané téma, které jsou rozděleny do tematických skupin dle využití CA technologií. Z rešerše je patrná aktuálnost daného tématu jak na úrovni vědy a výzkumu tak v průmyslové sféře.

#### 3.3.1 Využití optimalizačních algoritmů ve vývoji

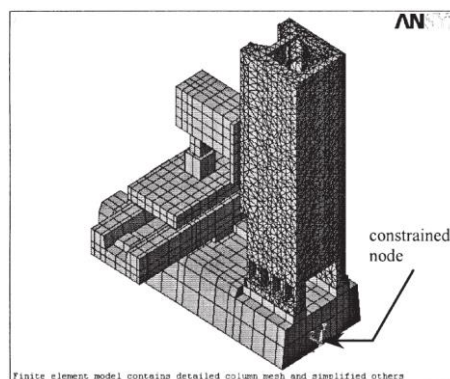
Důležitou oblastí, kde se v konstrukci a vývoji běžně používají CA technologie, jsou pevnostní výpočty a optimalizace strojních částí. U těžkých obráběcích strojů je z pohledu optimalizace nejvýhodnější zaměřit se na velké nosné díly, kde lze snížit především náklady na materiál.

##### 3.3.1.1 Optimalizace nosných struktur

Z pohledu CA technologií řešíme při optimalizaci především úroveň automatizace tohoto procesu. Větší míra automatizace nám umožňuje vyzkoušet velké množství variant, nicméně je vždy ovlivněna počátečním nastavením optimalizačního procesu. Plně automatizovaný proces parametrické optimalizace nedokáže na rozdíl od optimalizace řízené člověkem eliminovat ze souboru výsledků takové, které nejsou například obtížně technologicky realizovatelné.

##### Porovnání Single Module Method“ (SMM) a „Hybrid Modeling Method“ (HMM)

Obecným problémem všech MKP úloh je stanovení okrajových podmínek pro jednotlivé díly, které chceme optimalizovat, obzvláště pokud chceme počítat pouze díl bez navazujícího okolí. Tuto problematiku řeší ve své práci vědci z Tchaj-wanu Huang a Lee (7). Zaměřují se na porovnání metod výpočtu pouze jednoho izolovaného dílu s nově vyvinutou hybridní modelovací metodou určenou pro analýzu tuhosti obráběcích strojů.



Obr. 16 : Hybridní model s detailní sítí na stojanu (7)

Metoda se zaměřuje vždy na jednu část stroje, která má definované reálné materiálové vlastnosti. Další části stroje jsou definovány hrubší sítí, které je přiřazen modul pružnosti několikanásobně vyšší. Celková poddajnost soustavy pak odpovídá poddajnosti dílu, na který se zaměřujeme. V metodě „Single Module Method“ (SMM) je uvažována vždy pouze jedna část stroje, na kterou jsou aplikovány přepočítané okrajové podmínky. V metodě „Hybrid Modelling Method“ (HMM), která se podrobně zabývá pouze jednou částí stroje, jsou uvažovány i ostatní

části se zjednodušenou sítí. V tomto případě je stroj korektně ukotven a síly jsou aplikovány mezi nástroje a obrobek.

Hlavní výhodou tvorby hybridního modelu je úspora výpočetního času. V článku je porovnán rozdíl ve výsledné tuhosti jednotlivých dílů při použití těchto dvou metod, který je v rozsahu od 6 % do 14 %.

#### Modifikovaná optimalizační metoda založená na hierarchickém rozkladu

Další zajímavou metodiku výpočtu publikuje trojice autorů Wu, Young a Huang (8). Jedná se o modifikovanou optimalizační metodu založenou na hierarchickém rozkladu. Metoda umožňuje konstruktérovi vybrat nejlepší kombinaci jednotlivých dílů stroje díky návrhu jednotlivých dílů na principu „lego bloků“, které lze zvětšovat a zmenšovat.

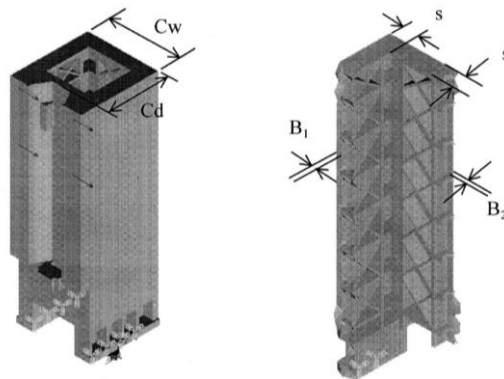
První stupeň optimalizace zjistí nejnižší možnou hmotnost jednotlivých dílů. Na základě aproximačních funkcí odvozených z prvního stupně optimalizace upraví vyšší stupeň optimalizace rozměry, tak aby minimalizoval celkovou hmotu stroje. Takto modifikovaný dvoustupňový přístup zajistí dostatečnou tuhost a minimální hmotnost stroje ve fázi návrhu konceptu. Článek obsahuje příklady dokazující funkčnost tohoto přístupu.

Příklad aproximační funkce:

$$\text{vřeteník: } Wh = A_0 + A_1 \cdot Px + A_2 \cdot Hy + A_3 \cdot Px \cdot Hy + A_4 \cdot Px^2 + A_5 \cdot Hy^2$$

$$\text{stojan: } Wc = A_0 + A_1 \cdot Cw + A_2 \cdot Cd + A_3 \cdot Cw \cdot Cd + A_4 \cdot Cw^2 + A_5 \cdot Cd^2$$

$$\text{Min. Obj} = C_1 \cdot Wh + C_2 \cdot Wc$$



Obr. 17 : Parametry stojanu pro optimalizaci (8)

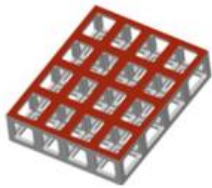
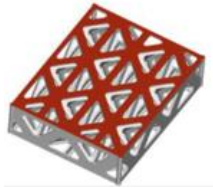
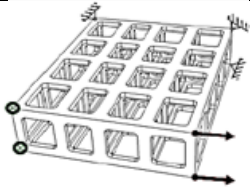
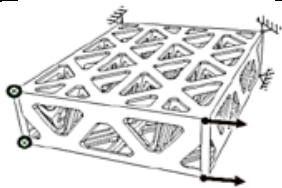
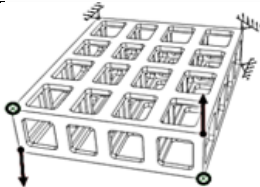
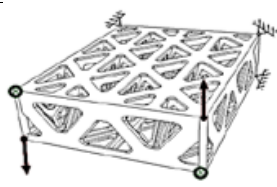
#### Implementace inženýrských zkušeností do optimalizace

Němečtí autoři Kehl, Blank a Hoger-Riedel (9) se obecně zaměřují na využití analýz pomocí metody konečných prvků (FEA). Jasně konstatují, že dnes je FEA již nezbytná při vývoji nových obráběcích center a výrobních strojů, protože umožňuje rozsáhlou statickou, dynamickou a tepelnou simulaci virtuálních prototypů obráběcích strojů ještě před spuštěním výroby. Zajímavým přínosem tohoto článku je diskuze nad aktuálními otázkami z oblasti vývoje obráběcích strojů s využitím CA technologií se zaměřením na přizpůsobení simulačních metod podstatným požadavkům.

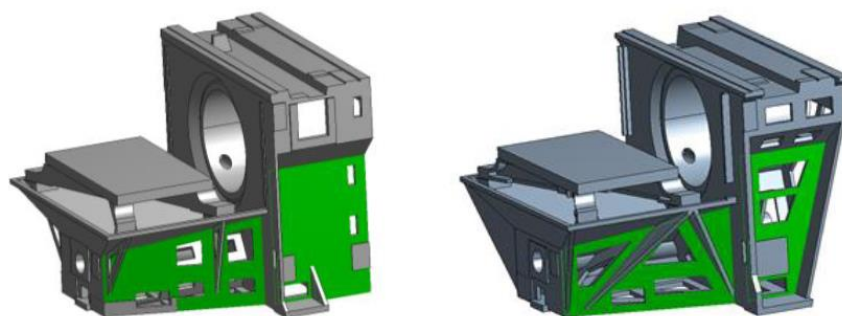
Na příkladu numerické analýzy obráběcího centra (Deckel-Maho-Gildemeister DMG 635 V eco) je prezentováno, že při návrhu stroje s využitím FEA je zároveň nutné využít dlouhodobé zkušenosti vývojářů z průmyslové praxe. Dále je pak nutné si uvědomit, že obráběcí stroje jsou dnes mechatronické systémy, které navíc k mechanickým konstrukcím obsahují značný počet servopohonů, snímačů a regulátorů. Pouze při dodržení těchto dvou bodů je možné zdokonalit návrh, šetřit náklady a zvýšit produktivitu a kvalitu obráběných obrobků.

Zajímavým obsahem práce je rovněž porovnání trojúhelníkové a obdélníkové struktury pro návrh nosných dílů obráběcích strojů. V tab. 3 je porovnání tuhosti při použití struktury tvořené pomocí čtvercových a trojúhelníkových prvků.

Tab. 3 - Porovnání tuhosti struktur tvořených čtvercovými a trojúhelníkovými prvky (9)

	Zvýšení tuhosti tuhost B / tuhost A	A	B
Ohyb nahoru	1,53		
Ohyb do boku	2,24		
Krut	3,95		

Aplikace trojúhelníkové struktury v praxi je vidět na příkladu konstrukčního řešení rámu stroje Deckel-Maho na obr. 18.

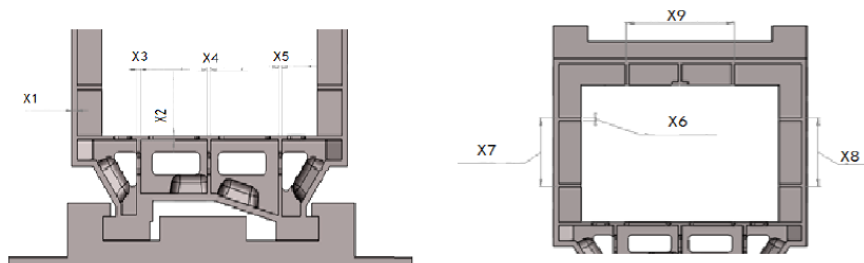


Obr. 18 - Rám stroje s obdélníkovými a trojúhelníkovými prvky (9)



### Parametrická optimalizace

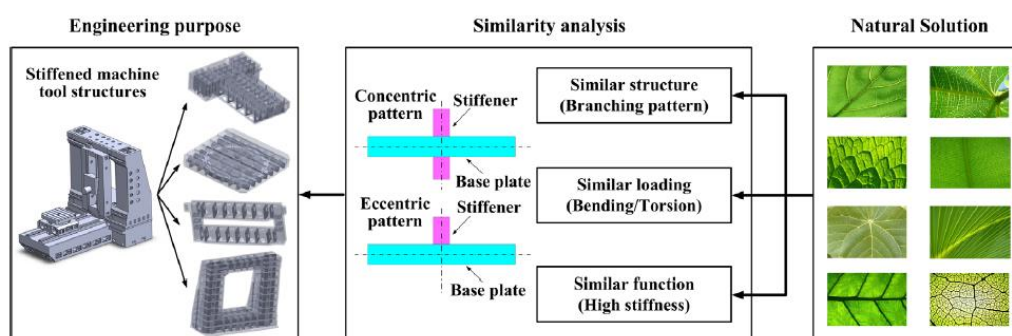
Parametrickou optimalizací stojanu horizontky se ve své práci zabývá kolektiv čínských autorů z univerzity v Šanghaji (10). Kromě tloušťky žebér optimalizují i jejich umístění. Dále popisují přínosy využití topologické optimalizace. Výsledkem je snížení hmotnosti o cca 7 % při zachování tuhosti.



Obr. 19 : Parametry pro optimalizaci (10)

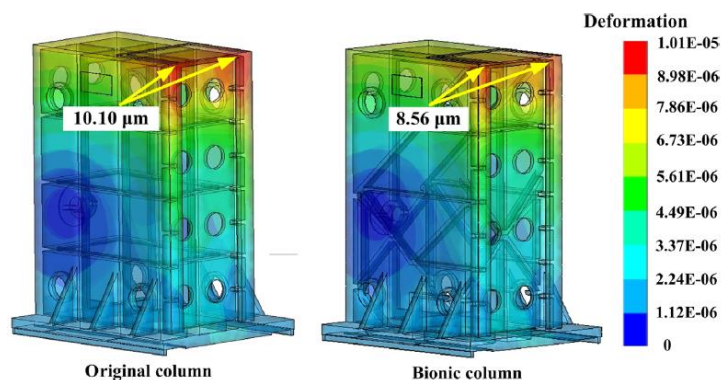
### Optimalizace s využitím bionické struktury

Zajímavý přístup k optimalizaci nosných struktur zaujala skupina čínských vědců (11), kteří aplikují struktury známé z přírody do stojanu obráběcího stroje. Inspirují se strukturou listů stromů, kterou podrobily MKP analýze.



Obr. 20 : Podobnost mezi strukturou listu stromu a strukturou obráběcího stroje (11)

Na základě této podobnosti navrhl stojan s novým žebrováním, díky kterému dosahuje při stejné hmotnosti menší deformace (vyšší tuhosti). Autoři se ve své práci dále zaměřují na analýzu a verifikaci vlastních frekvencí původního a nově navrženého stojanu. U nového návrhu dosahují zlepšení první vlastní frekvence o více než 18 %.



Obr. 21 : Deformace původního stojanu s inovovaným pomocí bionické struktury (11)



### 3.3.1.2 Topologická optimalizace

Topologická optimalizace je metoda, která se hojně využívá ke snižování hmotnosti dílů v leteckém a automobilovém průmyslu. Proces odebere na základě stanovených kritérií z maximálního zástavného prostoru materiál, který není potřebný, a ukáže tak možný vzhled finálního výrobku. Konstruktor se tak může inspirovat a vytvořit mnohem lehčí díl.

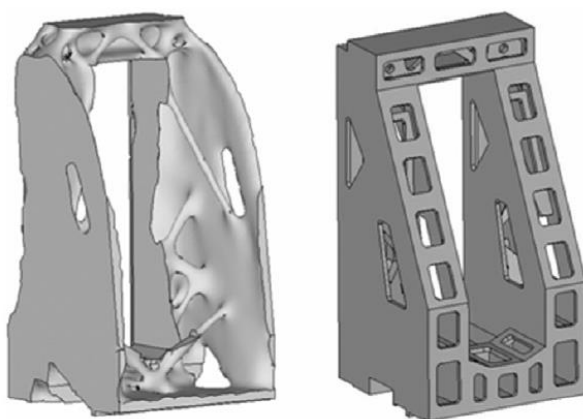
Problematika nasazení topologické optimalizace v těžkých obráběcích strojích spočívá především v technologii výroby optimalizovaných dílů. Velké nosné díly jsou totiž většinou odlitky, nebo svařence, což vnáší celou řadu omezení, které samotný automatický proces optimalizace nedokáže podchytit.

Na obr. 22 je počáteční tvar výrobku před optimalizací a výsledný tvar po optimalizaci, u kterého je při zachování stejné tuhosti snížena hmotnost o 50 %.



Obr. 22 : Těleso před a po optimalizaci (12)

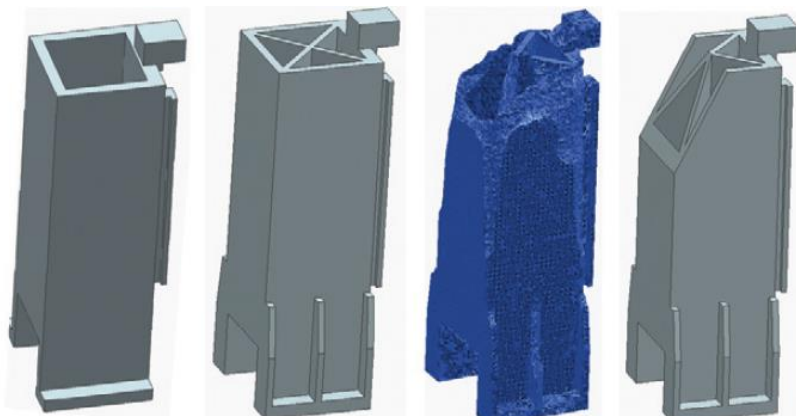
Návrhem co nejlehčích nosných dílů obráběcích strojů s využitím topologické optimalizace se zabývají ve své práci kolektivy německých autorů (13). Na obr. 23 vlevo je zobrazeno těleso, které je výsledkem topologické optimalizace a které slouží jako vzor pro finální konstrukční návrh (vpravo), který již zohledňuje veškeré technologické a funkční požadavky. Je patrné, že výsledek topologické optimalizace a finální návrh se mohou výrazně lišit.



Obr. 23 : Výsledek topologické optimalizace (vlevo) a finální návrh (vpravo) (13)

Topologickou optimalizaci využívají pro návrh stojanu frézky vědci z University of British Columbia (14). Na obr. 24 je vidět původní návrh, který byl na základě zkušeností konstruktéra vyztužen křížovým žebrem a následně optimalizován pomocí topologické optimalizace.

Z výsledného tvaru, kde došlo k odříznutí nevyužitého materiálu v horní části stojanu, je patrný velmi malý přínos topologické optimalizace pro tento díl.

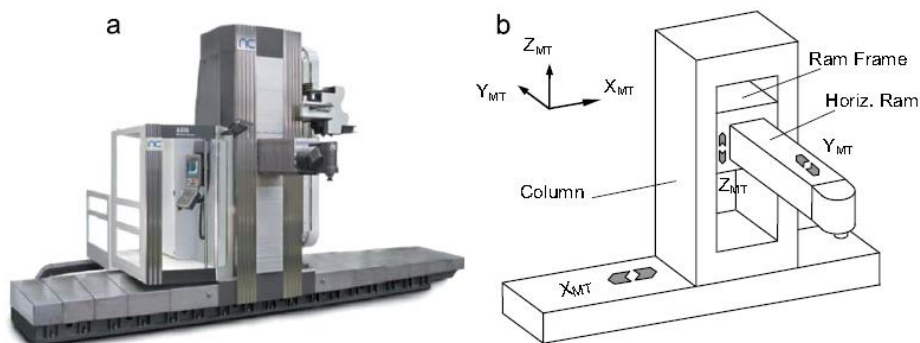


Obr. 24 : Postup optimalizace stojanu frézky

(a) Původní stojan (b) vyztužený stojan (c) výsledek topologické optimalizace (d) nový stojan

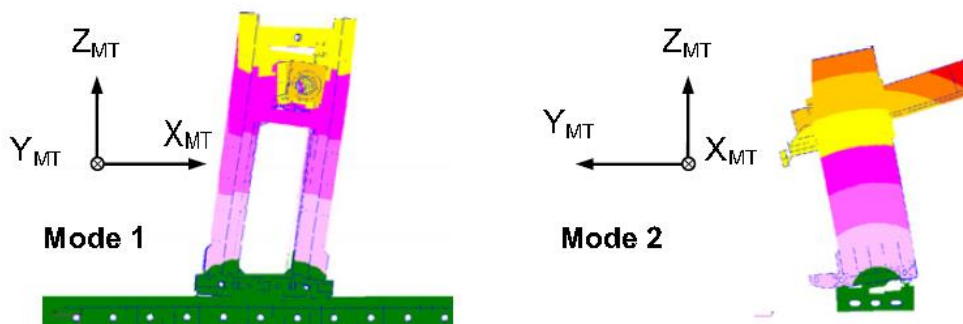
### 3.3.2 Numerické analýzy celých strojů

Modální analýzu velkého obráběcího stroje jako celku řeší ve svém příspěvku Španěl Zúlika, Campa a Lopez de Lacalle (15). Konkrétně popisují řešení re-designu horizontálního frézovacího stroje se symetrickým stojanem (obr. 25).



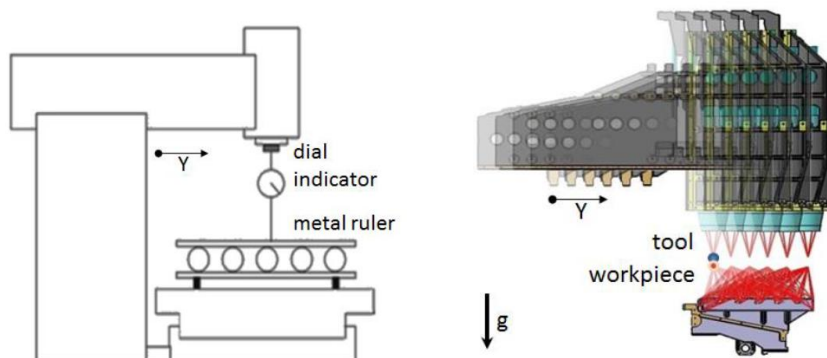
Obr. 25 : Stroj určený k redesignu (a), Struktura stroje (b) (15)

Ve své práci se zaměřují i na dynamické vlastnosti stroje, které analyzují pomocí modální analýzy. Na obr. 26 jsou první dva vlastní tvary stroje, které odhalují směry, ve kterých je konstrukce nejpoddajnější.



Obr. 26 - První dva vlastní tvary stroje (15)

Numerickou analýzou celého stroje se zaměřením na geometrickou přesnost diskutují ve svém příspěvku i Kong a kolektiv (10). Ve své práci uvažují vliv gravitace a posouvajících hmot na geometrickou přesnost stroje. Konkrétně se zabývají přímostí lineárních vedení, kterou zjišťují experimentálně i numericky (obr. 27). Jedná se o aplikaci v oblasti menších obráběcích center.

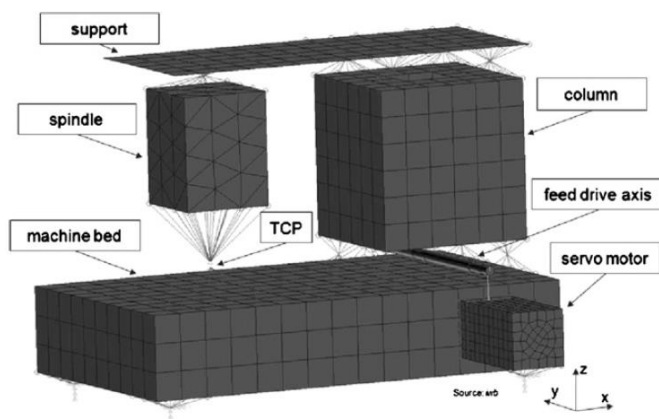


Obr. 27 : Měření geometrické přesnosti (a), Analýza geometrické přesnosti (b) (10)

Práce dvojice německých vědců (16) se soustřeďuje na redukcí velkých FE modelů vznikajících při simulaci obráběcích strojů. Hlavním cílem této práce je zhodnocení, zda jsou tyto metody vhodné pro konkrétní typ aplikace.

Numerické simulace chování obráběcích strojů jsou obvykle založeny na diskretizaci jejich mechanické struktury pomocí konečných prvků (FE). Po linearizaci získáme systém druhého řádu obyčejných diferenciálních rovnic. Za účelem zachycení všech potřebných detailů je systém, který nevyhnutelně vzniká, příliš složitý, aby splňoval požadavky na účelnost simulace a její kontroly v reálném čase. V komerčních řešeních pro FA analýzy se často využívá modální redukce k získání modelu nižšího řádu, který umožňuje rychlejší simulaci. Obzvláště v posledních letech se objevily nové metody redukce velkých dynamických systémů.

Výpočtovým modelem je zjednodušená struktura obráběcího stroje vytvořená pomocí systému Nastran. Jedná se o porovnání různých metod pro výpočet modální analýzy. Příklad zjednodušeného modelu pro realizaci dynamické analýzy s popisem základních částí stroje je na obr. 28.



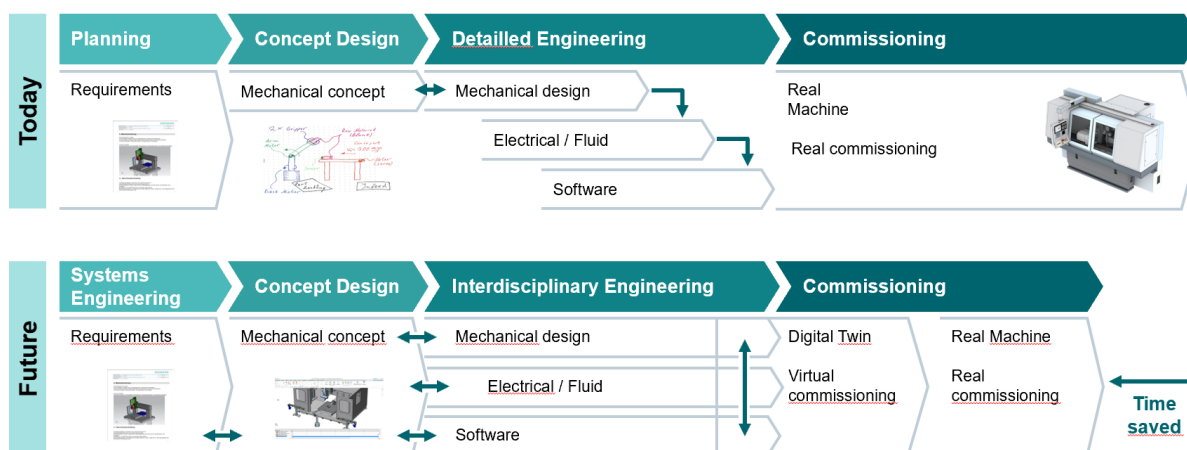
Obr. 28 : Zjednodušený model stroje pro dynamickou analýzu (16)

### 3.4 Tvorba komplexních virtuálních modelů

S přihlédnutím ke stále se zvyšující složitosti navrhovaných strojů a zařízení je dnes téměř nutností maximalizovat využití virtuálních modelů pro jejich testování. Následné odstraňování chyb ve virtuální fázi je nepoměrně levnější než ve fázi fyzického prototypu. Stejně jako se fyzický prototyp neskládá pouze z mechanických částí, tak ani virtuální model nemůže reprezentovat pouze mechanické prvky. Jsou tedy tvořeny komplexní virtuální modely, které si kladou za cíl být co nejpřesnějším virtuálním obrazem reálného fyzického prototypu, zahrnujícího kromě mechanických částí například i elektro, hydraulické nebo pneumatické prvky, to vše včetně řízení.

#### 3.4.1 Virtuální stroj

Virtuální stroj je pak nazýván „Digitální dvojče“. Je ho možné řídit stejným řídicím systémem jako reálný stroj a realizovat tzv. „virtuální oživení“, tj. oživení virtuálního stroje programem, který je následně možné přenést na stroj reálný. Porovnání současného postupu a postupu využívajícího virtuální oživení je na obr. 29.



Obr. 29 : Princip virtuálního oživení (17)

Zásadním rozdílem je změna celkového přístupu ke konstrukci, kdy je díky mechatronickému modelu umožněna mezioborová spolupráce jednotlivých oddělení, čímž dochází ke zkrácení času vývoje. Dále je pak mechatronický model využit pro virtuální oživení, které výrazně snižuje náklady na odstranění chyb v prototypové fázi.

Pro simulaci chování stroje v prvotní fázi návrhu slouží modul NX Mechatronic Concept Designer (MCD). Pro realizaci virtuálního oživení je pak možné použít plně softwarovou variantu (SiL<sup>14</sup>) nebo variantu s využitím reálného hardware (HiL<sup>15</sup>).

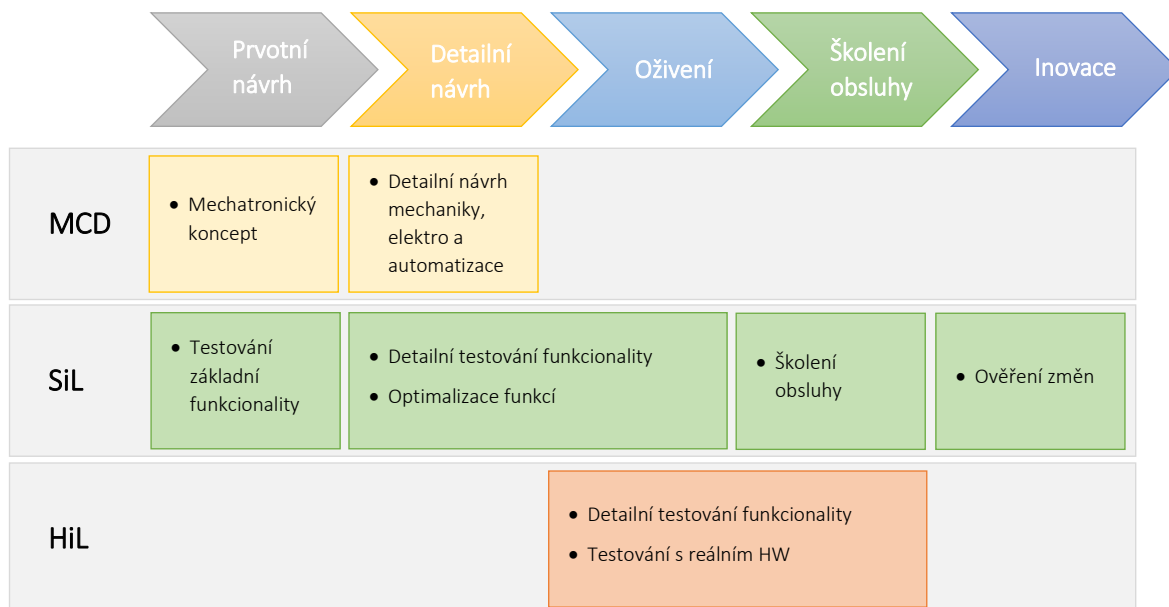
Využití jednotlivých úrovní virtuálních modelů stroje v životním cyklu produktu je zobrazeno na obr. 30. Simulace v prostředí MCD je určena především pro fázi prvotního návrhu, kdy je řešen koncepční návrh a pro fázi detailního návrhu, kdy jsou přidávány prvky automatizace.

<sup>14</sup> SiL : Software in the Loop (softwarová metoda testování, kdy je veškerý hardware virtualizován)

<sup>15</sup> HiL : Hardware in the Loop (softwarová metoda testování s využitím reálného hardware)

Metodu SiL je možné použít v celém průběhu životního cyklu produktu. V prvotní fázi je to testování funkcionality jednotlivých komponent. Následuje detailní ověření funkcionality a analyzování systému. SiL najde své uplatnění například i pro školení obsluhy nebo při ověřování změn před jejich realizací.

Metoda HiL je určena především pro realizaci virtuálního oživení a případné školení obsluhy s využitím reálných hardwarových ovládacích prvků.



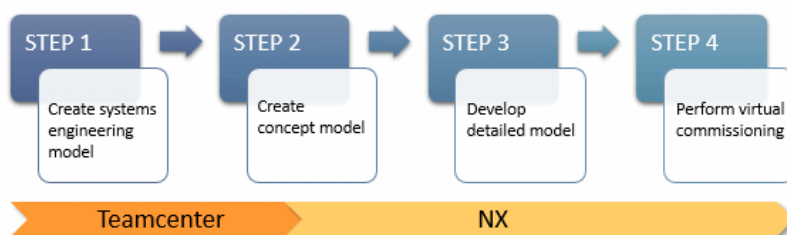
Obr. 30 : Využití virtuálního stroje

### 3.4.2 Mechatronic Concept Designer

Mechatronic Concept Designer (MCD) je funkční modul CAx systému Siemens NX. Tento modul umožňuje ověření funkcí ve virtuální fázi vývoje produktu a odstraňování nedostatků ještě před výrobou fyzického prototypu. Samostatně pokrývá vývojové fáze prvotního koncepčního návrhu i detailního návrhu a následně umožňuje plynulý přechod do fáze virtuálního oživení. Virtuální model sestavovaný v MCD se skládá z mechanických, elektrických a automatizačních prvků, které jsou ve výsledku řízeny signály.

Schéma činností realizovatelných v MCD je znázorněno na obr. 31. Mezioborová spolupráce probíhá následujícím způsobem:

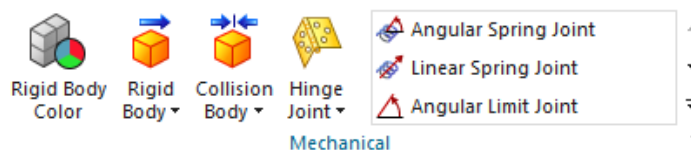
- Na začátku je tvořen model zpravující požadavky na nový systém, který usnadňuje mezioborovou komunikaci.
- Konstrukteři mechaniky tvoří koncept založený na 3D křivkách a definují kinematiku.
- Ve fázi tvorby detailního modelu mohou elektroinženýři volit a umisťovat senzory a aktuátory, a programátoři tvoří základní logiku chování stroje založenou nejprve na časové závislosti a pak i na logických podmínkách.
- Ještě před výrobou reálného stroje lze realizovat tzv. virtuální oživení, jehož cílem je ověřit funkčnost navrženého řešení.



Obr. 31 : Postup pro virtuální oživení v NX (18)

### 3.4.2.1 Mechanické prvky

Základem virtuálního modelu jsou mechanické prvky, které tvoří kromě standardních tuhých těles ještě kolizní tělesa, vazby a další speciální prvky.



Obr. 32 : MCD – Mechanické prvky

#### Tuhé prvky

Každý virtuální stroj v MCD obsahuje tuhá tělesa, která jsou z pohledu simulace reprezentována polohou těžiště, hmotností a momenty setrvačnosti. Definice těchto parametrů může probíhat automaticky výpočtem z vybraného objemového tělesa nebo ručním zadáním hodnot. Pokud je komponenta sestavy označena jako tuhé těleso tak na ní automaticky působí gravitační zrychlení ve směru -Z.

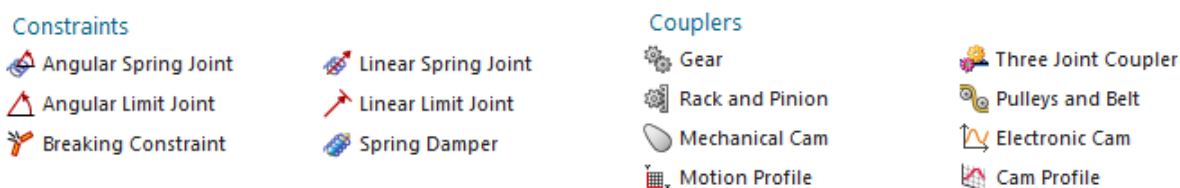
#### Kolizní tělesa

Některá tělesa lze nastavit jako kolizní a zamezit tak jejich vzájemnému pronikání. Ostatní tělesa, pro které tato vlastnost není nastavena, skrz sebe navzájem procházejí a nijak se neovlivňují. Použitím kolizního prvku dochází ke zvýšení náročnosti simulace na výpočetní výkon a je proto vhodné dobře promyslet a zvolit vhodné nastavení.

#### Vazby mezi tělesy

Základní vazby v prostředí MCD jsou definovány pomocí těles, která spojují. Pokud je vybráno jen jedno těleso, tak se vazba vztahuje k pevnému rámu. Základní vazby typu rotace nebo posuv jsou definovány jako absolutně tuhé. Existují zde i vazby s definovanou poddajností představující různé pružiny a tlumiče.

Dále je zde možné definovat různé typy převodů, jako jsou například převod ozubenými koly, převod pastorku a hřebenu nebo elektrický a mechanický převod vačkou.



Obr. 33 : Rozšiřující vazby a převody

### 3.4.2.2 Elektrické prvky

Mezi elektrické prvky patří prvky pro řízení pohybu tzv. aktuátory a prvky pro kontrolu dosažení polohy (senzory).

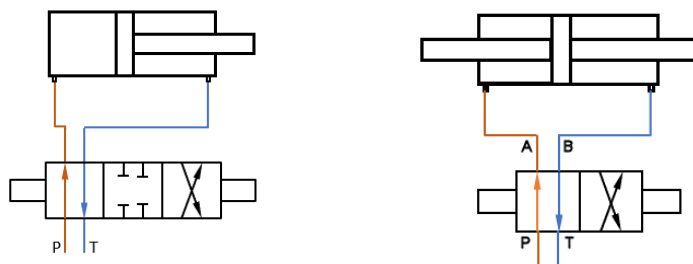
#### Aktuátory

V modulu MCD je dostupných celkem pět různých typů aktuátorů, jejichž přehled je v tab. 4. Běžně používaným typem aktuátoru v obráběcích strojích je řízení jednotlivých os polohou.

Tab. 4 : Přehled aktuátorů v MCD

Řízení rychlosti		Řídicím parametrem pohybu tuhého tělesa je rychlost. Například rotace hřídele vačky.
Řízení polohy		Řídicím parametrem pohybu tuhého tělesa je pozice vazby nebo poloha v souřadném systému.
Hydraulický		Řídicím parametrem pohybu jsou signály hydraulických prvků.
Pneumatický		Řídicím parametrem pohybu jsou signály pneumatických prvků.
Inverzní kinematika		Řídicím parametrem pohybu je poloha koncového bodu.

V případě řízení hydraulickým nebo pneumatickým aktuátorem je dostupná konfigurace jedno pístového válce nebo dvou pístového válce s třípolohovým čtyřcestným nebo dvoupolohovým čtyřcestným ventilem.

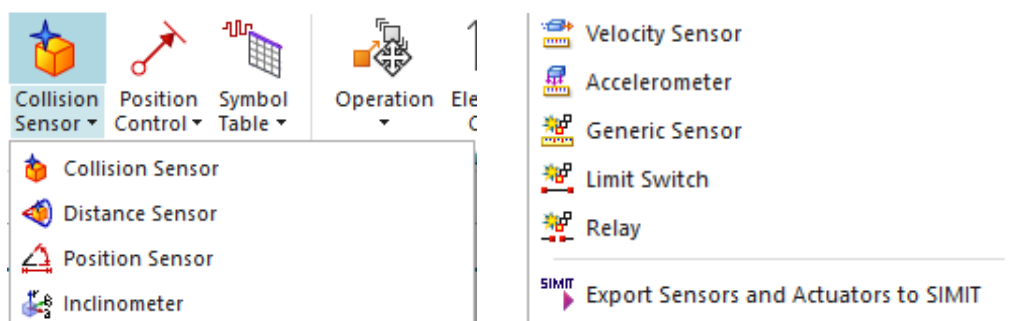


Obr. 34 : Příklad zapojení jedno a dvou pístového válce (18)



## Senzory

Pomocí senzoru lze získat zpětnou vazbu o poloze, rychlosti nebo zrychlení těles. Dostupné senzory jsou na následujícím obrázku.

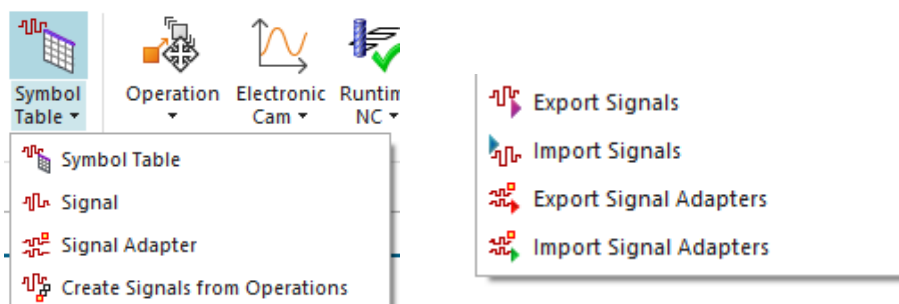


Obr. 35 : Senzory v MCD

Běžně používané jsou kontaktní a bezkontaktní senzory polohy umísťované do prostoru stroje, které po sepnutí vrací signál o dosažení polohy.

## Signály

Signály, které slouží k řízení aktuátorů, je možné sdružovat do adaptérů. V adaptéru signálů je možné řešit logické funkce a podmínky.



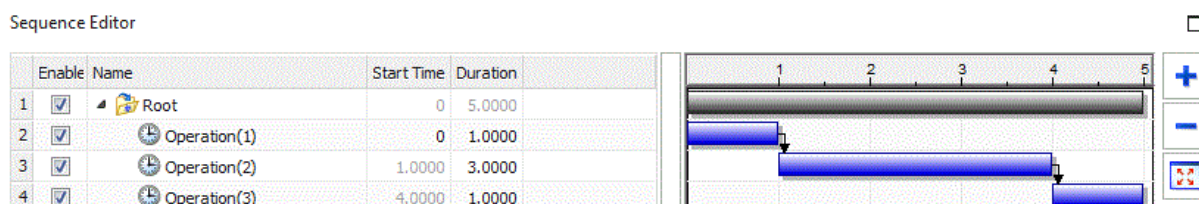
Obr. 36 : Signály v MCD

### 3.4.2.3 Prvky automatizace

#### Operace

Pomocí operací lze měnit hodnoty parametrů v závislosti na čase nebo při splnění definované podmínky. Operace lze následně konvertovat do sekvenční logiky použitelné pro PLC program.

V prostředí MCD existují časově závislé operace a operace závislé na události. Ukázka definice časově závislých operací je na obr. 37.



Obr. 37 : Časově závislé operace v MCD

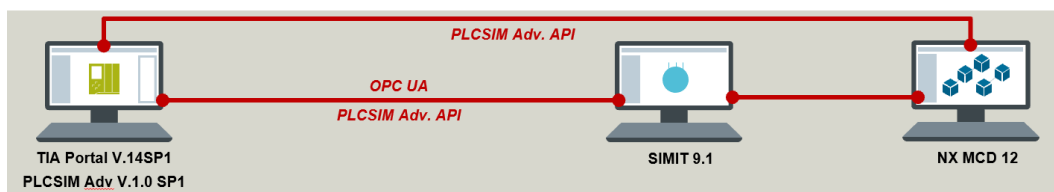


## Runtime NC

Funkce Runtime NC umožňuje simulovat chování stroje pomocí emulovaného řídicího systému. Lze tedy kombinovat řízení pomocí NC programu s dalšími logickými funkcemi mechatronického modelu.

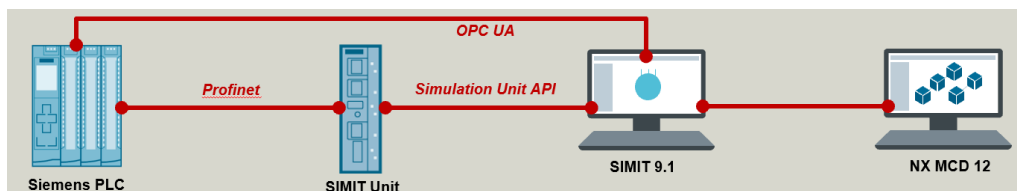
### 3.4.2.4 Využití MCD pro virtuální oživení

Ve fázi detailního modelu umožňuje MCD prostřednictvím propojení s dalšími aplikacemi detailní ověřování PLC funkcí a realizaci virtuálního oživení. Propojením s TIA portálem prostřednictvím PLCSIM Adv. API je možné realizovat metodu SiL, kterou lze dále rozšířit o software SIMIT umožňující podrobnou simulaci chování automatizačních prvků. Schéma řešení Software In the Loop je na obr. 38.



Obr. 38 : Schéma propojení při řešení SiL (17)

V případě propojení s reálným hardwarem je pro simulaci obráběcího stroje nutné využít k propojení se softwarem SIMIT ještě simulační jednotku SIMIT Unit, která je propojena s reálným hardwarem pomocí ProfiNET a se softwarem SIMIT prostřednictvím Simulation Unit API. Schéma řešení Hardware In the Loop je na obr. 39.



Obr. 39 : Schéma propojení při řešení HiL (17)

## 3.4.3 Softwarové nástroje pro SiL a HiL

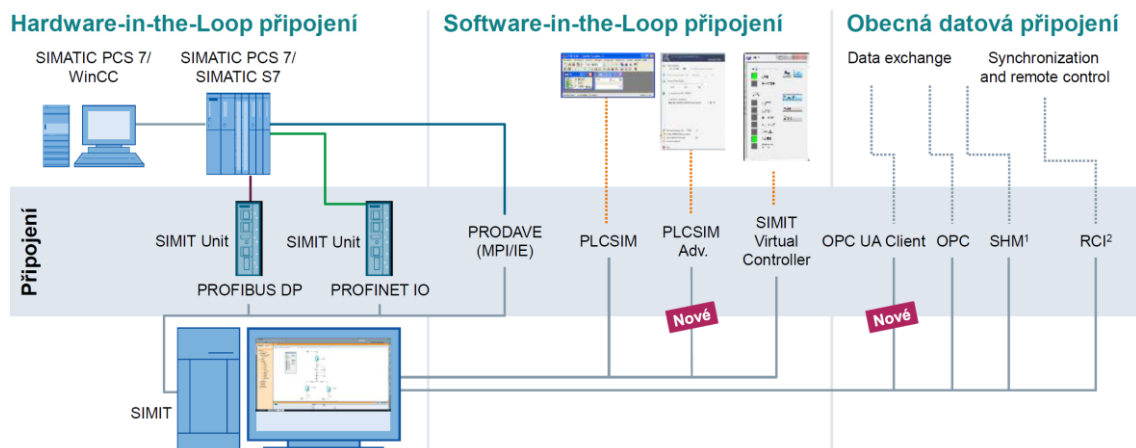
Volba softwarových nástrojů pro tvorbu modelů virtuálních strojů a jejich virtuální oživení je závislá na řídicím systému, který do svých strojů výrobce používá. Vzhledem k zaměření disertační práce do oblasti těžkých obráběcích strojů jsou zvoleny nástroje společnosti Siemens umožňující pracovat se řídicím systémem Sinumerik 840D, který je v těžkých obráběcích strojích dle informací výrobce zákazníky preferován.

### 3.4.3.1 TIA Portal

V řešení SiL je TIA portál přímo součástí simulačního modelu stroje, který pro simulaci využívá jeho modul PLCSIM Advanced. Pro HiL je prostřednictvím TIA portálu programováno PLC, které je pak součástí simulačního modelu.

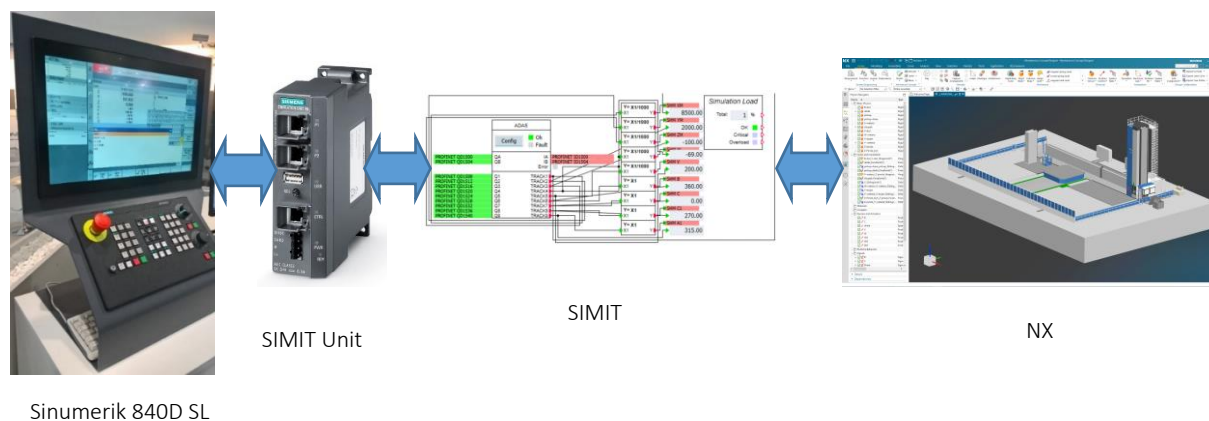
### 3.4.3.2 SIMIT

Softwarový nástroj SIMIT slouží pro detailní simulaci chování jednotlivých elektronických prvků a prvků automatizace. Lze jej propojit s dalšími nástroji pomocí různých typů spojení. Možnosti komunikace software SIMIT s dalšími nástroji HiL a SiL je na obr. 40.



Obr. 40 : Možnosti připojení SIMIT (17)

SIMIT je v případě virtuálního oživení obráběcího stroje nutnou součástí mechatronického modelu. Tento softwarový nástroj slouží k propojení reálného hardware (zkušební stand s řídicím systémem Sinumerik 840D SL) a virtuálního modelu v prostředí Mechatronic Concept Designer. Na obr. 41 je zobrazena pozice software SIMIT, který je prostřednictvím SHM napojen na virtuální model v NX a přes hardwarový box SIMIT Unit komunikuje s reálným hardwarem Sinumerik 840D SL.

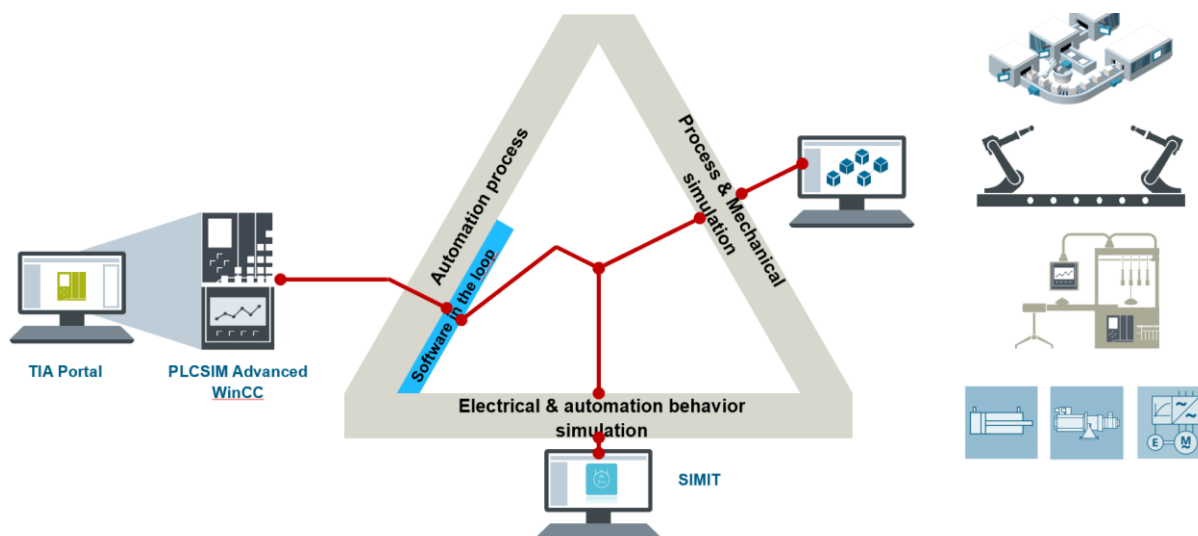


Obr. 41 : SIMIT při virtuálním oživení obráběcího stroje

### 3.4.4 Software in the Loop (SiL)

Tvorba modelu s využitím řešení SiL umožňuje kompletní nahrazení hardwarových prvků pomocí softwarových emulací. Realizace na softwarové platformě Siemens propojuje prostřednictvím PLCSIM Adv. API realizaci automatizace v TIA portálu s virtuálním modelem vytvořeným v modulu NX Mechatronic Concept Designer. Pro simulaci detailního chování

jednotlivých automatizačních prvků systému je možné využít software SIMIT jako další integrovaný nástroj. Schéma propojení nástrojů při řešení SiL je vidět na obr. 42.



Obr. 42 : Virtuální oživení SiL (17)

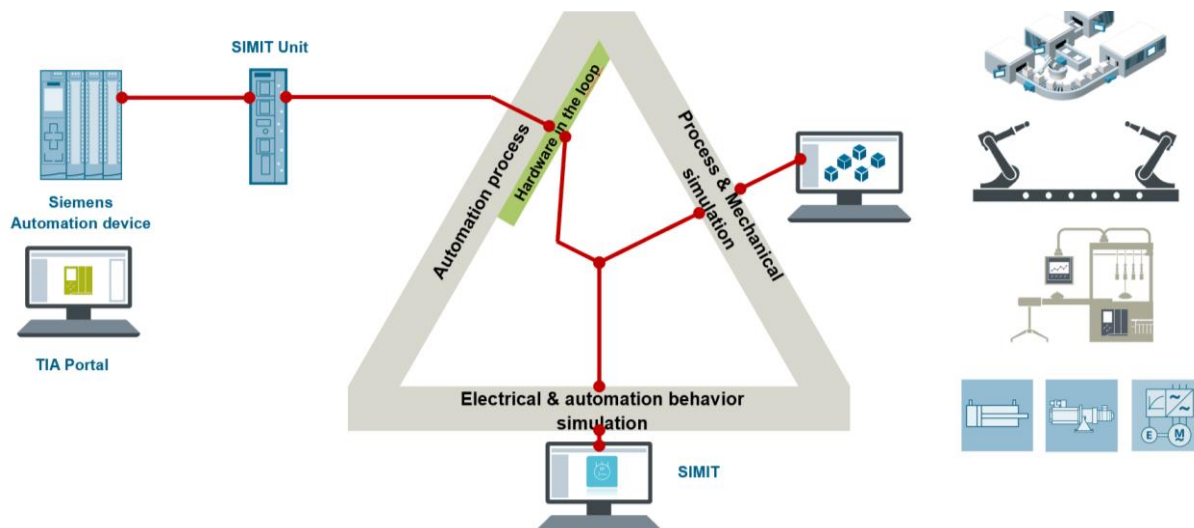
Schéma s přehledem prvků potřebných pro oživení stroje v reálném světě a jejich virtuálních emulací ve virtuálním světě je na obr. 43.



Obr. 43 : Základ pro SiL (17)

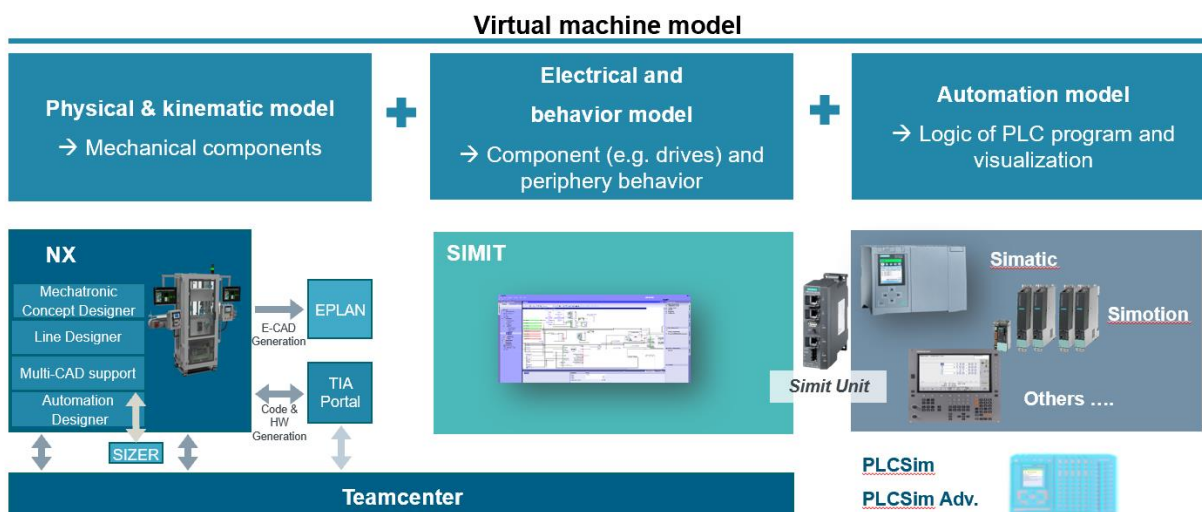
### 3.4.5 Hardware in the Loop (HiL)

Simulace s použitím reálného hardware umožňuje realizaci virtuálního oživení s následným přenesením PLC programu do reálného stroje. Reálný hardware je propojen se software prostřednictvím simulační jednotky SIMIT Unit, která zajišťuje zpřístupnění signálů z prostředí ProfiNET do software SIMIT a jejich následné propojení s virtuálním strojem v prostředí NX Mechatronic Concept Designer. Schéma propojení nástrojů při řešení HiL je na Obr. 44.



Obr. 44 : Virtuální oživení HiL (17)

Metoda HiL je doporučena pro virtuální oživení realizované výrobcem obráběcích strojů. Celé řešení je možné integrovat do PLM systému Teamcenter. Schéma kompletního řešení pro výrobce obráběcích strojů je na obr. 45.



Obr. 45 : Řešení pro výrobce obráběcích strojů (17)

## 4 Optimalizace využití CA technologií

Problematika optimalizace využití CA technologií pro vývoj technického produktu byla zasazena do kontextu realizovaného vývojového projektu TRIO FV10219 „Víceúčelové soustružnické centrum pro obrábění rozměrných a tvarově složitých součástí rotačního charakteru, určených pro energetiku a obnovitelné zdroje“. Projekt byl realizován řešitelským týmem složeným z pracovníků společnosti Škoda Machine Tool, a.s., zodpovídajících za vývojovou konstrukční činnost a výrobu fyzického prototypu, a pracovníků Západočeské univerzity v Plzni zodpovídajících za realizaci numerických simulací a optimalizací ve virtuální fázi.

Jednotlivé části projektu jsou v disertační práci uvedeny za účelem popisu aplikace optimalizace využití CA technologií. Z oblasti numerických simulací jsou zde popsány pouze části projektu, které autor samostatně realizoval. Obsah disertační práce, tedy návrh optimalizace využití CA technologií pro vývoj technického produktu, není součástí řešení žádného dotačního projektu.

### 4.1 Vývojový projekt TRIO

Projekt, jehož hlavním výsledkem je prototyp frézovací věže multifunkčního centra včetně funkčního vzorku příslušenství, byl řešen v letech 2016–2019 dle harmonogramu uvedeného v tab. 5.

Tab. 5 : Harmonogram projektu TRIO FV10219

Etapa	Činnost	Orientační termín ukončení (dle smlouvy)
<b>1.</b>	<b>Ideový návrh a koncepce multifunkčního soustružnického centra</b>	<b>12/2016</b>
1.1	Rozpracování výsledků úvodní marketingové studie podobných pracovišť, představitelů obrobků.	10/2016
1.2	Návrh technologie obrábění.	11/2016
1.3	Návrh koncepce pracoviště.	12/2016
1.4	Volba hlavních parametrů na základě technologických studií představitelů obrobků.	12/2016
<b>2.</b>	<b>Vývoj a konstrukce prototypu stroje</b>	<b>06/2018</b>
2.1	Virtuální model stroje včetně simulace obráběcího procesu.	06/2018
2.2	Konstrukční návrh stroje včetně výpočtů. Vytvoření 3D modelů řídicích dílů, optimalizace jejich struktur.	06/2018
2.3	Finální 3D modely hlavních skupin stroje. Příprava výkresové dokumentace prototypu. Úpravy simulací podle finálního provedení.	06/2018
<b>3.</b>	<b>Výroba a stavba prototypu stroje</b>	<b>06/2019</b>
3.1	Zajištění subdodávek, vlastní výroba určených částí prototypu stroje.	06/2019

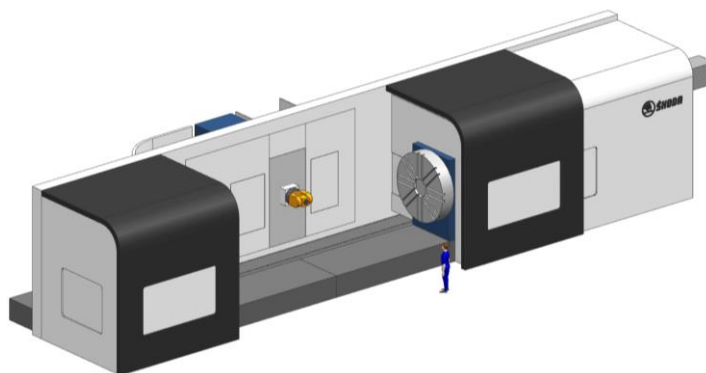
Na základě analýzy trhu a požadavků potenciálních zákazníků vznikl návrh obsahující čtyři rozměrové řady multifunkčního stroje. Jednotlivé rozměrové řady a jejich parametr jsou popsány v tab. 6.

Tab. 6 : Varianty multifunkčního centra a jejich parametry

Parametr		S 150 MT	S 200 MT	S 320 MT	S 500 MT
Max. hmotnost obrobku	kg	32 000	70 000	160 000	250 000
Max. oběžný průměr	mm	1500	2000	3200	5000
Max. délka obrobku	mm	4 000 - 10 000	4 000 - 10 000	5 000 - 15 000	5 000 - 15 000
<b>Soustružnická část</b>					
Max. otáčky	1/min	700	400	300	200
Max. výkon	kW	71	95	190	190
Max. moment	kNm	50 - 85	85 - 140	140 - 250	250
<b>Frézovací část</b>					
Max. otáčky	1/min	3 500	3 500	3 000	3 000
Max. výkon	kW	64	64	81	81
Max. moment	Nm	4 500	4 500	4 500	4 500
Průřez pinoly	mm	480 x 480	480 x 480	600 x 600	600 x 600
Výsuv pinoly	mm	1 200	1 500	2 000	2 500
Upínání nástrojů		ISO 50	ISO 50	ISO 50	ISO 50
		CAPTO C8	CAPTO C8	CAPTO C10	CAPTO C10
Posuvové rychlosti	mm/min	20 000	20 000	20 000	20 000
Chlazení osou 3MPa, 25l/min		ano	ano	ano	ano
Chlazení vnější 0,5MPa, 40 l/min		ano	ano	ano	ano
Automatické upínání hlav		ano	ano	ano	ano
ATC		ano	ano	ano	ano

Při návrhu jednotlivých rozměrových řad byla snaha o maximální možné využití dílů ze stávajícího portfolia strojů. Z tohoto důvodu je frézovací část stroje umístěna na modulární koncept loží běžně využívaných u řady HCW. Pro pohon vřetena frézovací věže je pak použit modifikovaný koncept pohonu HCW2000.

Podrobně rozpracována je řada S150MT, ke které vznikl i funkční digitální model stroje tzv. „Digitální dvojče“. Další řady byly řešeny do fáze koncepčního návrhu. Koncepční návrh stroje včetně designu zakrytí je na obr. 46.



Obr. 46 : Multifunkční obráběcí centrum

#### 4.1.1 Hlavní výstupy projektu

- Konstrukční návrh řady S150MT a koncepční návrhy dalších rozměrových řad stroje.
- Digitální dvojče navrženého stroje.
- Reálný fyzický prototyp frézovací věže.

#### 4.1.2 Zapojení autora disertační práce do realizace projektu

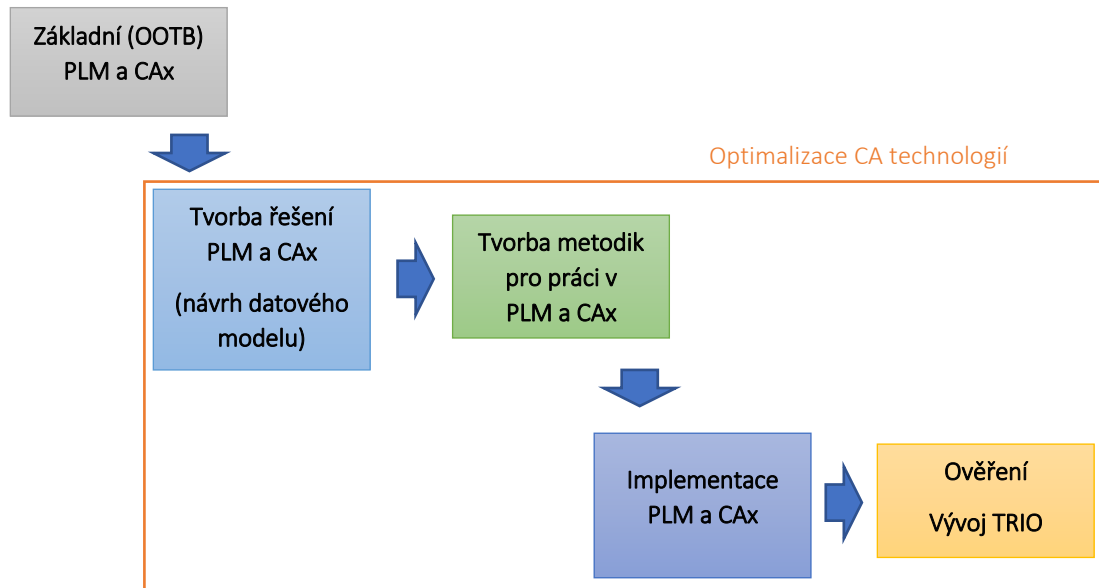
- Aktivní účast při návrhu koncepčního řešení stroje.
- Spolupráce s elektro-konstrukcí při realizaci virtuálního oživení. Realizace části v prostředí NX Mechatronic Concept Designer.
- Spolupráce s konstrukcí mechaniky při návrhu tělesa frézovací věže a tělesa vřeteníku.
- Realizace numerických simulací za účelem optimalizace těchto těles.
- Metodická podpora konstrukce při aplikaci navržených metodik práce v CAD a PLM.

## 4.2 Optimalizace PLM a CAx systému

PLM systémy jsou dodávány se základním datovým modelem obsahujícím takzvanou OOTB<sup>16</sup> funkcionalitu, což představuje obecný funkční základ vhodný k další optimalizaci a rozšiřování na základě požadavků jednotlivých průmyslových odvětví nebo konkrétních podniků. Realizovaná optimalizace PLM systému využívá standardních možností rozšiřování datového modelu a konfigurace uživatelského prostředí.

Celý projekt byl, od prvotních koncepčních návrhů, až po vydání výkresové dokumentace do výroby, řešen v prostředí PLM systému s integrovaným CAx řešením, který byl kompletně implementován autorem disertační práce. Kromě samotné implementace realizoval autor disertační práce zároveň i optimalizaci nastavení prostředí jednotlivých využívaných modulů PLM a CAx a doplnil toto řešení o další rozšiřující funkcionalitu.

Z pohledu PLM systému bylo pro řešení projektu využito modulů pro správu konstrukčních dat a správu kusovníků, jejichž nastavení bylo přizpůsobeno a optimalizováno požadavkům uživatelů. V CAx byl pak využíván CAD modul pro tvorbu 3D modelů a sestav, modul pro tvorbu výkresů a modul pro tvorbu mechatronického modelu. Nastavení jednotlivých modulů bylo optimalizováno na základě poznatků získávaných při řešení projektu i v jeho průběhu. Díky tomuto přístupu docházelo nejen k aktivnímu odstraňování nedostatků systému, ale i k jeho vylepšování pomocí implementace rozšiřujících funkcí. Schéma optimalizace CA technologií je na obr. 47.



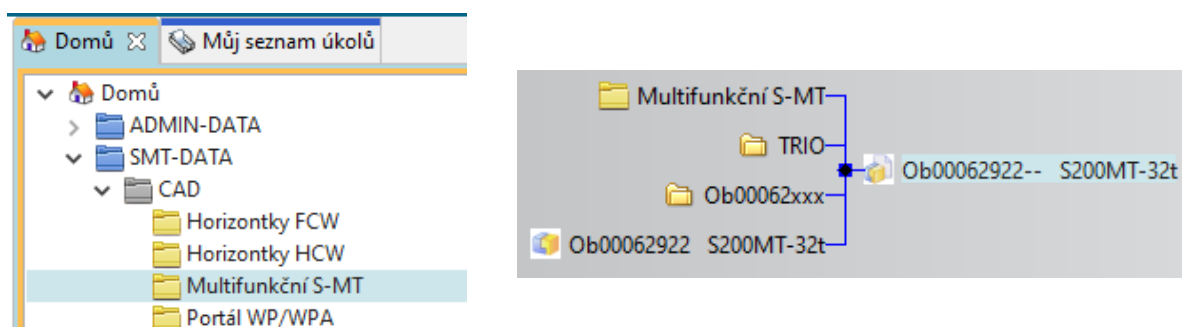
Obr. 47 : Schéma optimalizace CA technologií

<sup>16</sup> OOTB : Out of the Box : výraz pro software, který funguje okamžitě



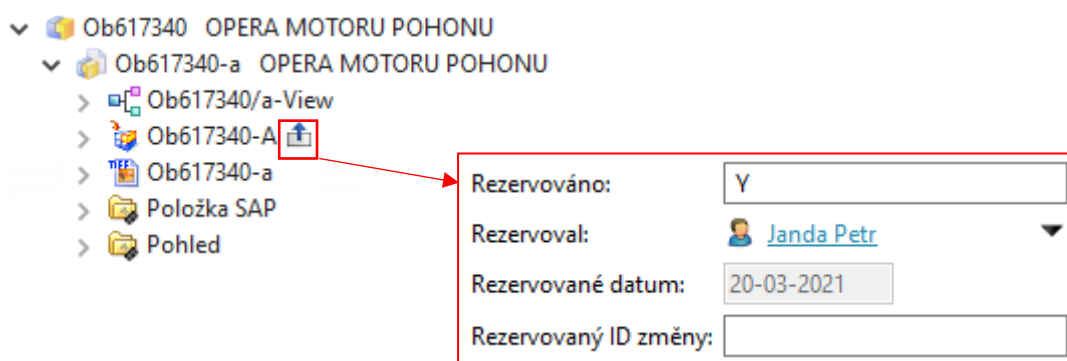
### 4.2.1 Správa konstrukčních dat

Konstrukční data vznikající v CAx systému jsou díky integraci ukládány přímo do PLM systému, kde je vytvořena struktura složek pro jednotlivé typy produktů. Do složek jsou pomocí odkazů připojovány jednotlivé položky sestav a dílců, jejichž umístění ve složkách lze zpětně dohledat pomocí vyhledávání odkazovaných objektů. Důležitou vlastností systému je základní koncept databázového systému s referenčními odkazy na soubory uložené na fyzickém úložišti. Složky zobrazované pomocí klienta PLM systému, tedy nepředstavují fyzické umístění souborů. Díky tomu je možné bez problémů přesouvat jejich obsah. Složková struktura pro CAD data je zobrazena na obr. 48 vlevo. Vpravo je zobrazen výsledek vyhledávání referencí dané položky, díky kterému lze například dohledat všechny složky, do kterých je daná položka vložena.



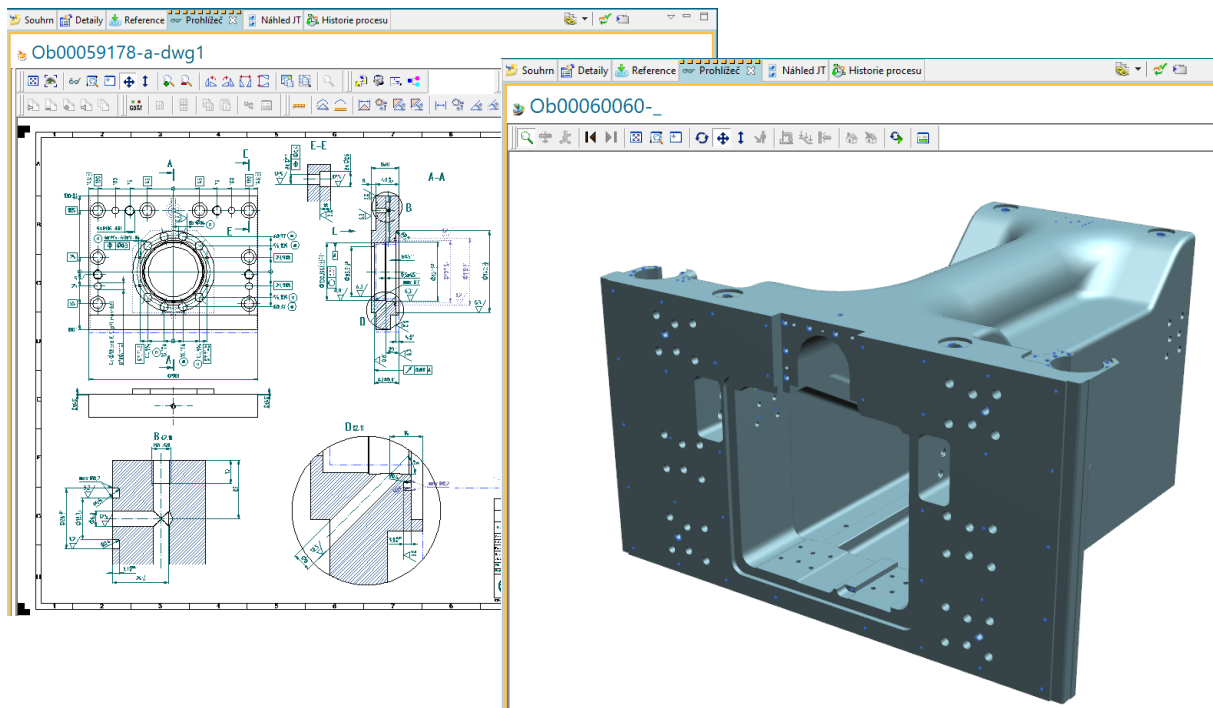
Obr. 48 : Struktura složek v PLM systému

PLM systém pomáhá v průběhu řešení celého projektu udržovat pořádek v datech a zároveň umožňuje spolupráci více uživatelů v rámci sestavy. Pomocí nastavení rezervací upravovaných dílů je zabráněno nechtěnému přepsání rozpracovaných dat jiným uživatelem. Tato funkcionality představuje oproti standartnímu ukládání souborů do sdílených složek zásadní přínos. Ukázka rezervovaného objektu je na obr. 49.



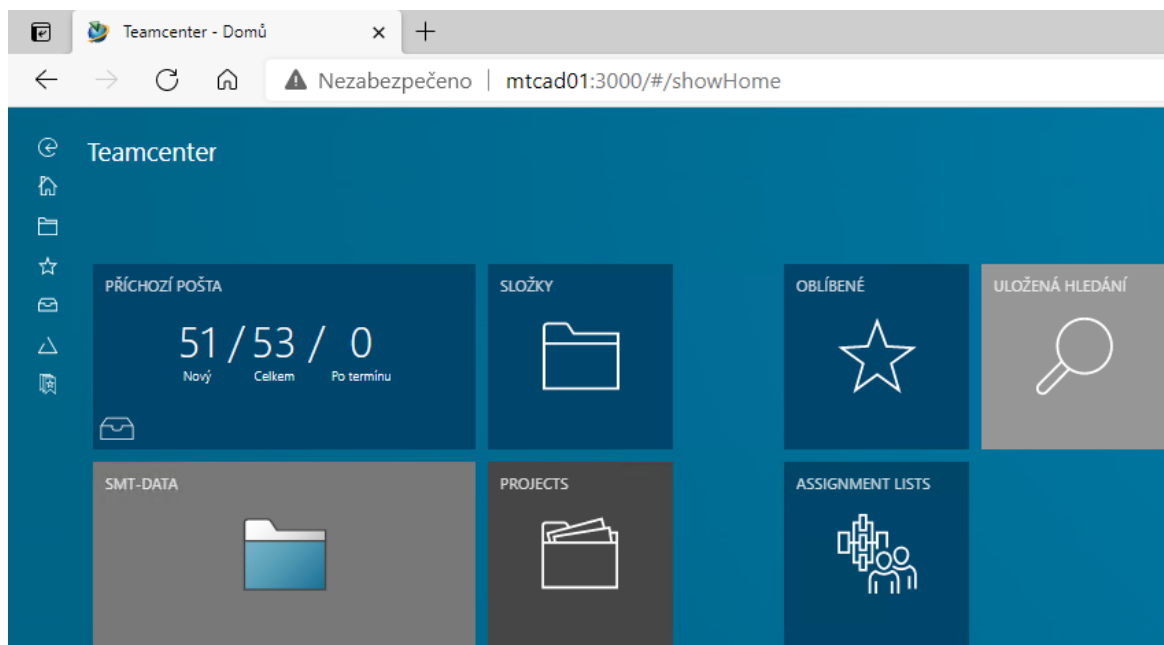
Obr. 49 : Rezervace položek v prostředí PLM systému

Díky vizualizaci 2D a 3D dat přímo v prostředí PLM systému bez nutnosti CAD je umožněna snadná spolupráce mezi odděleními společnosti. V oddělení technologie nebo nákupu je tak možné získat vždy aktuální informace. Vizualizace výkresu a 3D modelu je na obr. 50.



Obr. 50 : Vizualizace výkresu a 3D modelu přímo v PLM

Na základně požadavku uživatelů mimo technický úsek bylo řešení rozšířeno o možnost využívat webové prostředí pro zobrazování informací z PLM. Výhodou webového prostředí je okamžitá možnost použití bez nutnosti instalace a intuitivní ovládání webové aplikace. Úvodní obrazovka webového klienta je na obr. 51.



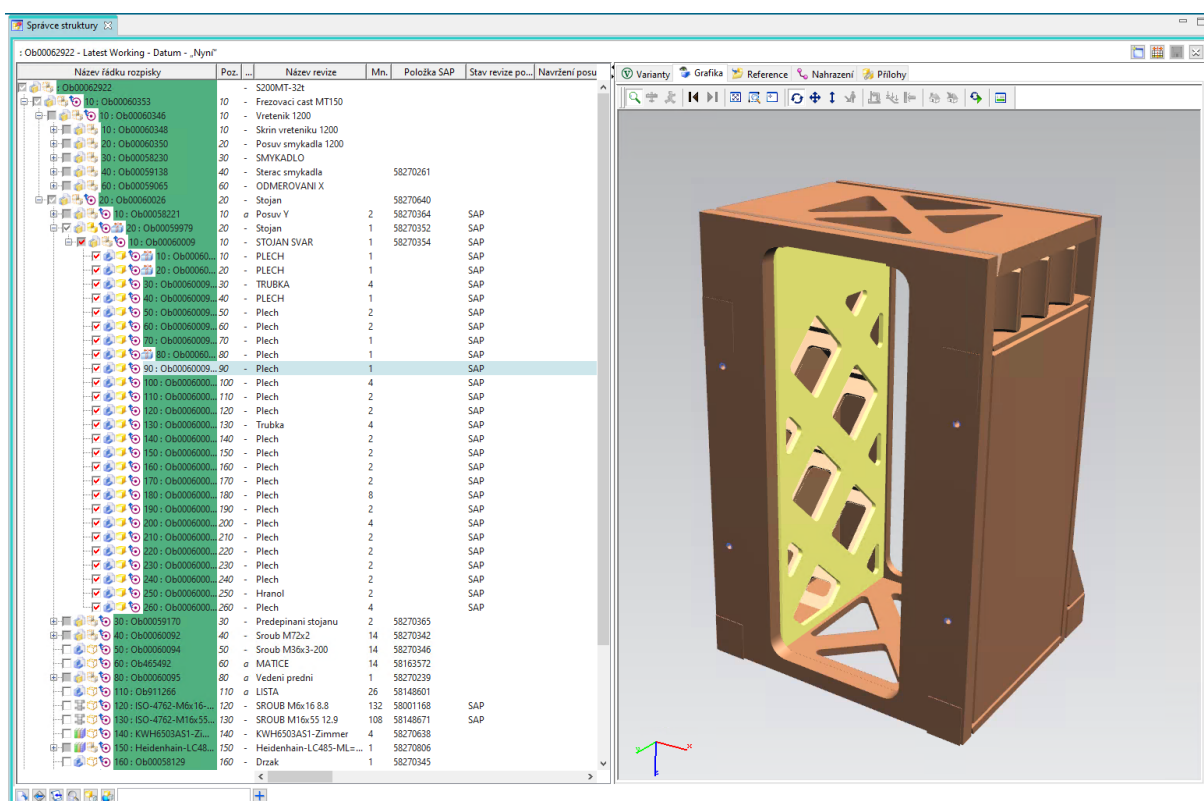
Obr. 51 : Prostředí webového klienta

#### 4.2.1.1 Co bylo optimalizováno?

- Datový model byl v prostředí BMIDE přizpůsoben požadavkům společnosti vyrábějící těžké obráběcí stroje. Byly definovány položky pro CAD model a realizováno jejich propojení na položky ERP systému SAP.
- Prostředí klienta PLM systému bylo optimalizováno na základě požadavků uživatelů pro instalovanou i webovou variantu klienta.
- Byla navržena a implementována funkcionalita indexování obsahu za účelem zrychlení vyhledávání.

#### 4.2.2 Správa kusovníků

Kusovník tvořený v prostředí CAX systému je automaticky synchronizován s CAD kusovníkem v PLM systému. Stejně jako u jednotlivých dílů lze i u kusovníků pracovat s 3D geometrií přímo v prostředí PLM systému. Systém tak umožňuje všem uživatelům snadnou orientaci ve struktuře produktu. Přímou v okně s vizualizací geometrie lze vybírat jednotlivá tělesa a získat tak potřebné informace ke konkrétním dílům s minimální znalostí produktu. Na obr. 52 je zobrazen kusovník s vizualizací frézovací věže multifunkčního centra.



Obr. 52 : Zobrazení kusovníku včetně 3D geometrie

Velkou výhodou práce v modulu správce struktury je možnost modifikace atributů jednotlivých položek kusovníku bez nutnosti načítání CAD dat v prostředí CAX systému. Konstruktor tedy může například změnit číslo pozice nebo název položky přímo v prostředí PLM. Hodnoty atributů se synchronizují mezi PLM a CAX na základě realizovaných úprav nastavení systému.

Využití správce kusovníků umožnilo i další úsporu času v podobě rychlých úprav ve struktuře kusovníku bez nutnosti načítání CAD dat. Funkcionalita tohoto modulu umožňuje kromě manuální náhrady položky kusovníků jinou i hromadné náhrady položek přes vybrané kusovníky nebo kompletní tvorbu CAD kusovníku v prostředí PLM. To vše je následně synchronizováno s CAx systémem.

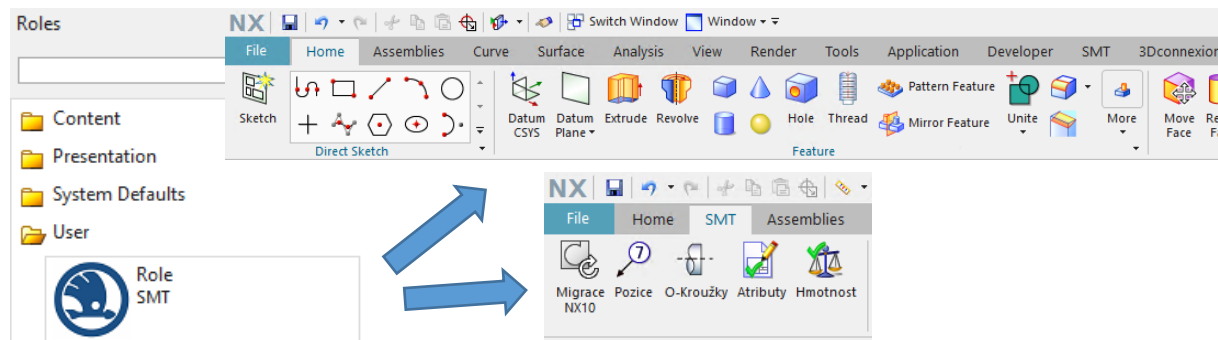
Dle navržené metodiky práce s kusovníky byla použita forma takzvaného přesného kusovníku (anglicky Precise BOM), která umožňuje uživateli plně řídit použití jednotlivých revizí v konkrétním kusovníku. Je tedy vždy známá přesná struktura kusovníku včetně informace o použité revizi.

#### 4.2.2.1 Co bylo optimalizováno?

- Byla sestavena metodika práce s kusovníky v prostředí PLM systému s návazností na CAx systém.
- Bylo optimalizováno nastavení datového modelu pro kusovníky v prostředí BMIDE.
- Bylo optimalizováno uživatelské prostředí správce kusovníků v instalovaném i webovém klientovi.

#### 4.2.3 Tvorba 3D modelů a dokumentace v CAD

3D modely a výkresová dokumentace jsou tvořeny v optimalizovaném prostředí CAx systému, který je integrován do PLM. Bylo navrženo optimalizované nastavení uživatelského prostředí, díky kterému mají uživatelé snadno dostupné důležité funkce, a naopak nejsou rozptylovány funkcemi, které nepotřebují. Byly vytvořeny i rozšiřující funkce vyvinuté v prostředí NXOpen. Konfiguraci lze načíst přes uživatelskou roli (obr. 53).

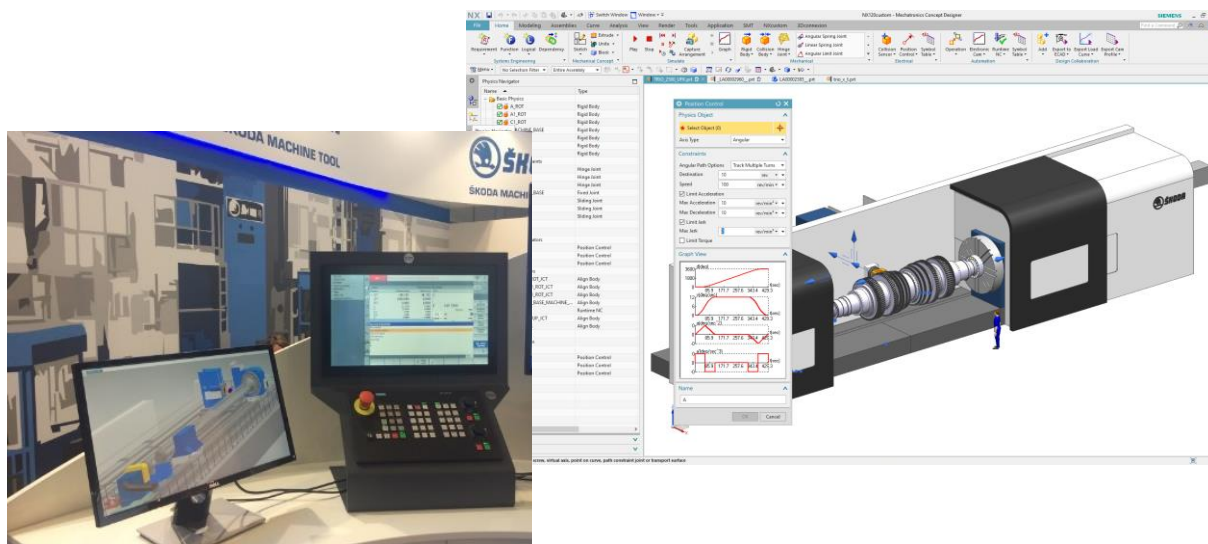


Obr. 53 : Optimalizované uživatelské prostředí

Při tvorbě modelů i výkresové dokumentace bylo využito navržených metodik pro práci s CAD systémem. Konkrétní příklady aplikace metodik jsou popsány dále.

#### 4.2.4 Využití modulu Mechatronic Concept Designer

Velkou inovací při řešení projektu byla aplikace metodiky virtuálního oživení, díky které bylo možné prezentovat funkčnost stroje ve virtuální podobě ještě před skutečnou výrobou jednotlivých částí a montáží.

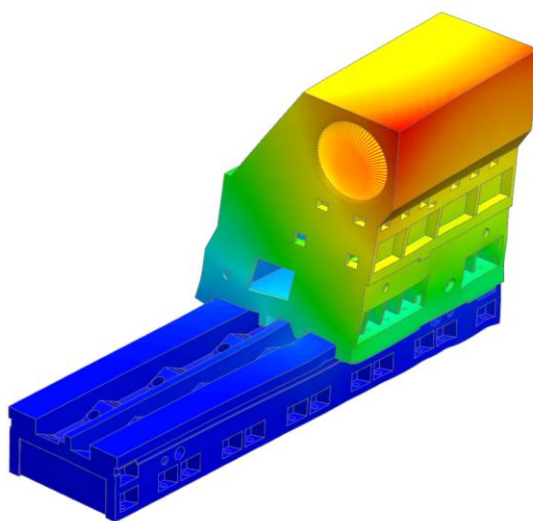


Obr. 54 : Mechatronický koncept multifunkčního centra

Při tvorbě mechatronického modelu a realizaci virtuálního oživení bylo využito znalostí z předchozích projektů, které jsou shrnuty v metodice aplikované i v tomto projektu. Konkrétní popis aplikace metodiky je obsahem následující kapitoly. Realizace mechatronického konceptu byla kompletně řešena v prostředí integrace do PLM systému.

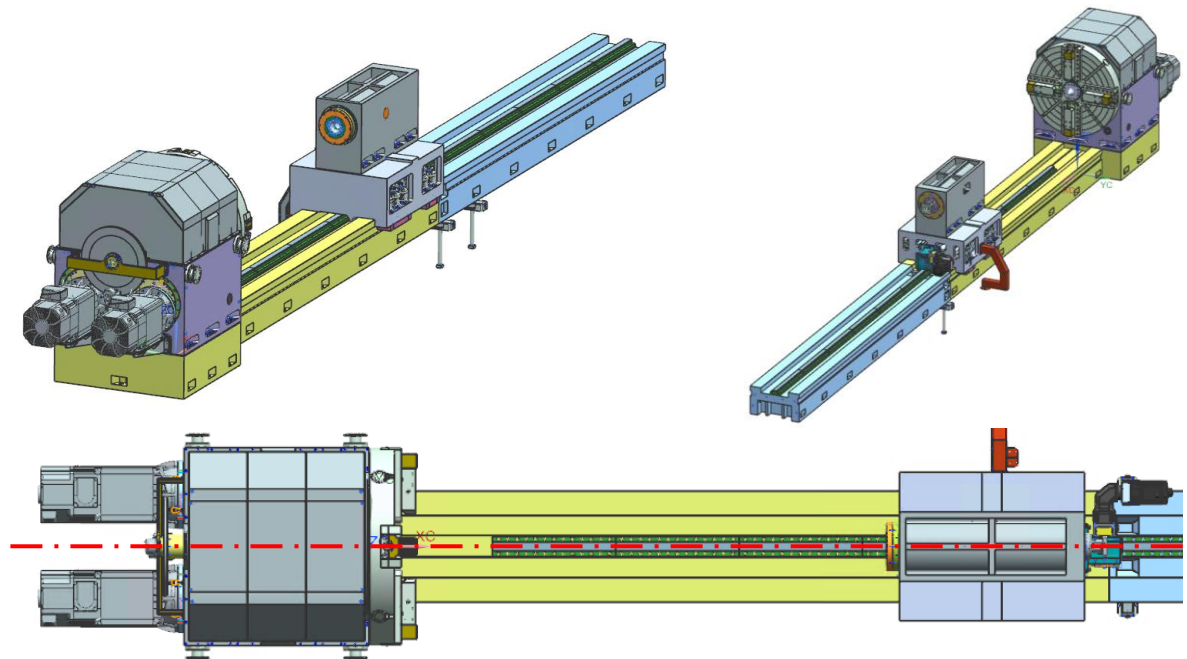
### 4.3 Využití metodických doporučení při řešení konceptu stroje

Při řešení koncepčním návrhu soustružnické části stroje bylo využito poznatků z případových studií autora disertační práce zabývajících se problematikou deformací sestavy koníka při předepnutí obrobku mezi hroty koníka a lícní desky. Symetrickou konstrukcí celé sestavy soustružnické části byl eliminován vliv naklonění koníka na geometrickou přesnost stroje. Příklad takového chování je na obr. 55, kde je zobrazeno výsledné posunutí sestavy koníka soustruhu SR4.



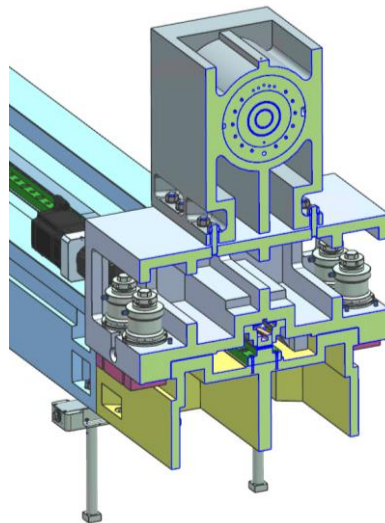
Obr. 55 : Naklonění nesymetrického koníka vlivem předepínací síly

Symetrická konstrukce soustružnické části multifunkčního stroje SMT při jejímž vývoji byly aplikovány poznatky z inženýrské praxe je na obr. 56.



*Obr. 56 : Symetrická konstrukce soustružnické části*

Koník je symetrický včetně posuvového mechanismu a aretace. Toho je dosaženo změnou umístění ozubeného hřebene, který je oproti klasickému řešení otočen (viz. obr. 57).



*Obr. 57 : Symetrická aretace posuvu konika*

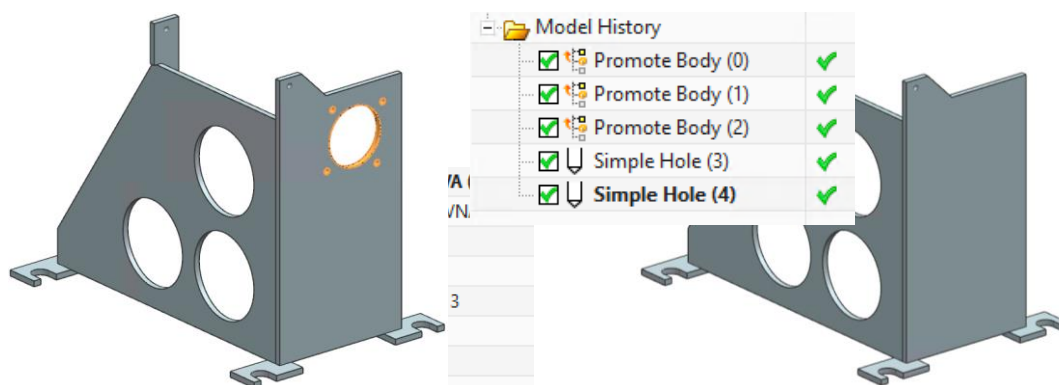
Tento příklad demonstruje aplikaci integrace inženýrských znalostí do procesu optimalizace využití CA technologií. V procesu tvorby konceptu zde využito jednoduché myšlenky odstranění negativních vlivů pomocí symetrie a na základě tohoto předpokladu vznikl soubor okrajových podmínek pro další optimalizace.



## 4.4 Aplikace metodiky návrhu svařenců

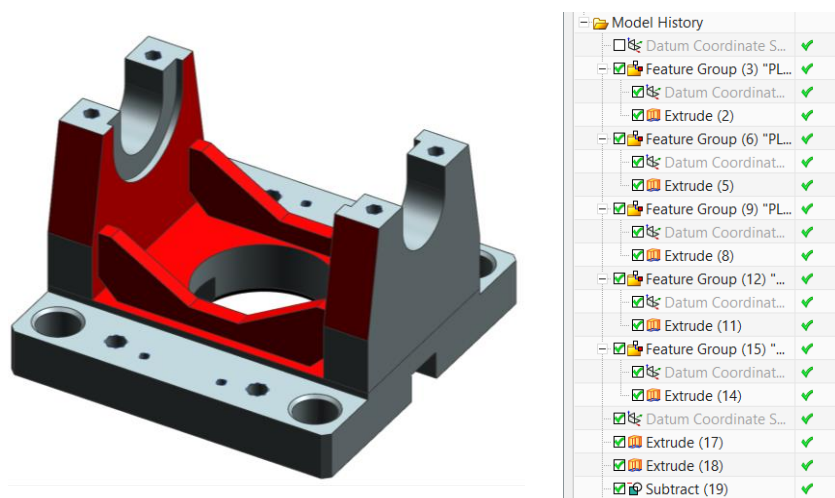
Metodika tvorby svařenců je založena na poznatcích z autorem realizovaných případových studií, které jsou implementovány do prostředí PLM systému, tak aby vše fungovalo v souladu s nastavením datového modelu. Hlavní důraz byl kladen na správnou funkci kusovníků, které jsou z PLM následně přenášeny do ERP systému SAP a mají tedy vliv na plánování výroby.

Základní myšlenkou je změna běžného postupu tvorby svařenců v CAD, který předpokládá model sestavy svařence, která je následně propagována do nadřazené sestavy obrobeneho svařence, kde jsou aplikovány operace odebrání materiálu. Běžný postup tvorby svařence je zobrazen na obr. 58. Díly sestavy svařence jsou propagovány do sestavy s úpravou, kde jsou dodělány díry.



Obr. 58 : Klasický způsob zpracování svařence

Nově navržená metodika využívá možnosti CAD systému tvořit více nezávislých těles přímo v jednom modelu. Každé těleso svařence má svůj vlastní souřadný systém, který není závislý na ostatní geometrii. Závislosti lze později doplnit pro potřeby plné parametrizace. Tvoření závislostí jednotlivých těles ve fázi návrhu působí komplikace při aplikaci rozsáhlých změn geometrie nebo mazání celých těles, které se v návrhu běžně realizují. Pro přehlednost jsou prvky jednotlivých těles sdružovány do skupin. Příklad tělesa tvořeného podle nové metodiky je na obr. 59.



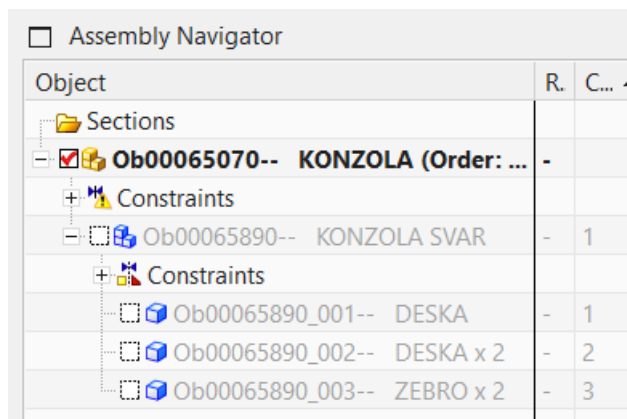
Obr. 59 : Obrobeneý svařenec v jednom modelu

Opracování svařence se realizuje ve stejném modelu pomocí prvků následujících za skupinami prvků tvořícího neopracovaný svařenec. Prvky opracování nejsou tvořeny nezávisle na prvcích svařence. Závislost vzniká až při operacích odečtení geometrie. Tento způsob modelování umožní bezproblémové změny původního svařence, včetně mazání jednotlivých těles. Detailní prvky jako například díry nebo drobná sražení jsou modelovány až na konci stromu.

V průběhu návrhové fáze je celý model udržován v jednom souboru, který je však z pohledu PLM systému klasifikován předem jako sestava. Po dokončení návrhové fáze je do modelu vložena podsestava reprezentující sestavu svařence a na její jednotlivé pozice jsou pomocí asociativního propojení propagovány jednotlivá základní tělesa (tělesa ze začátku stromu historie modelování). V případě, že jsou v sestavě obsažena stejná tělesa, je nalinkováno vždy jen první těleso a další jsou v rámci sestavy znovu vloženy a umístěny na správné místo.

Tímto postupem vzniká kompletní podsestava obsahující neopracovaný svařenec, která slouží k tvorbě výkresové dokumentace sestavy svařence i jednotlivých detailů. Případné opracování jednotlivých dílů před svařením je velmi snadno realizovatelné přidáním prvků opracování do konkrétní skupiny tělesa.

V tomto okamžiku je v prostředí CAD systému vytvořena sestava svařence a jeho nadřazená sestava s opracováním. Tyto sestavy se však vizuálně i objemově překrývají, což způsobuje problém s výpočtem hmotnosti sestavy opracovaného svařence v CAD systému, která je tímto více než dvojnásobná. Problémy vizualizace a výpočtu hmotnosti jsou vyřešeny nastavením podsestavy svařence jako potlačené komponenty. Kusovník s potlačenou podsestavou je zobrazen na obr. 60.



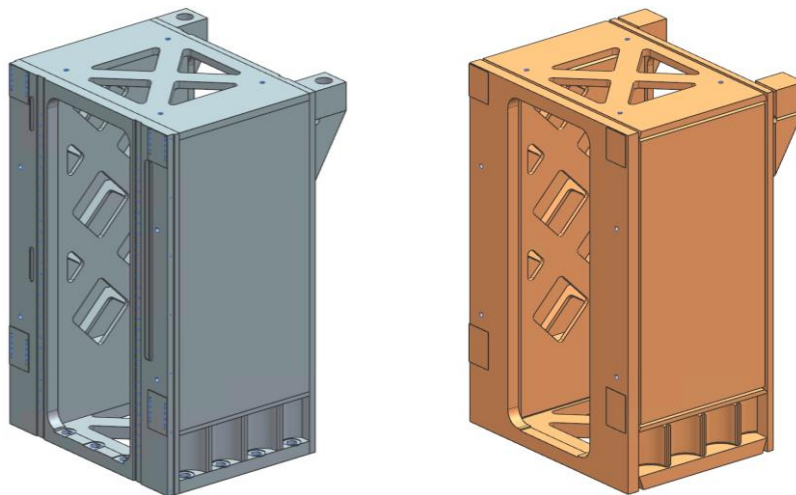
Obr. 60 : Potlačení podsestavy svařence

Metodika návrhu svařenců v prostředí CAD systému byla v rámci projektu aplikována na tělese stojanu frézovací věže. Autor disertační práce se aktivně podílel na realizaci návrhu svařence, který optimalizoval s ohledem na tuhost při zachování snadné vyrobitelnosti.

Aplikovaná metodika umožnila tvorbu snadno modifikovatelného modelu opracovaného svařence, který byl následně využit pro tvorbu sestavy neopracovaného svařence. Jedná se tedy o opačný způsob, než je klasický přístup k řešení svařenců v CAD systémech, kdy modelování předpokládá zahájení práce na úrovni sestavy svařence a její následné obrobění v nadřazené



sestavě. Na obr. 61 vlevo je model opracovaného svařence, který sloužil jako předloha pro tvorbu sestavy svařence vpravo. Velkou výhodou je možnost upravovat ve vývojové fázi přímo model opracovaného svařence na základě návaznosti na okolní dílce a tvorba sestavy svařence až ve chvíli, kdy je znám finální tvar.



Obr. 61 : Opracovaný svařenec (vlevo) a sestava svařence (vpravo)

Z pohledu integrace do PLM systému, kdy jsou synchronizovány kusovníky mezi CAD a PLM systémem, nebyla žádným způsobem narušena finální kusovníková struktura. Ve správci struktury v PLM systému je kusovník zobrazen stejně jako při použití klasické metody tvorby opracování na svařenci v prostředí CAD. Struktura kusovníku svařence frézovací věže a jeho opracování v PLM systému je na obr. 62 vlevo. Stejný kusovník v CAD systému je zobrazen vpravo, přičemž je z důvodu správné vizualizace na úrovni opracování potlačena sestava svařence a jeho komponent.

Správce struktury

: Ob00060026 - Latest Working - Datum - „Nyní“

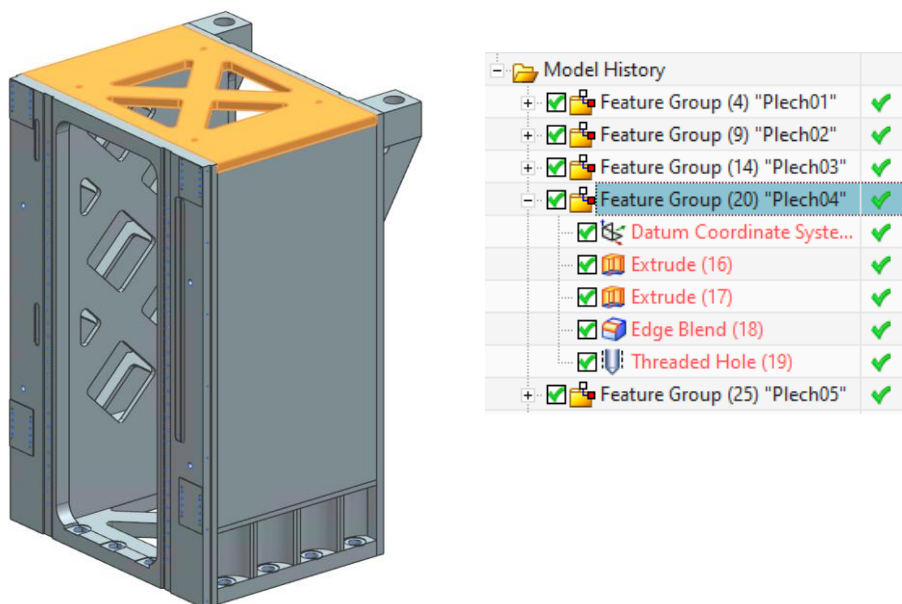
Název řádku rozpisky	Poz. ...	Název revize	Mn.	Položka ...
Ob00060026	-	Stojan		58270640
10 : Ob00058221	10	a Posuv Y	2	58270364
20 : Ob00059979	20			
10 : Ob00060009	10			
10 : Ob00060009_001	10			
20 : Ob00060009_002	20			
30 : Ob00060009_003	30			
40 : Ob00060009_004	40			
50 : Ob00060009_005	50			
60 : Ob00060009_006	60			
70 : Ob00060009_007	70			
80 : Ob00060009_008	80			

Object	Name	Description	M	M	Weight (kg)
Ob00059979--	Stojan (Order: C...	Stojan	Ob000599...	⊘	7728.3137
Ob00060009--	STOJAN SVAR	STOJAN SV...	Ob00060009	⊘	7802.2609
Ob00060009_001--	PLECH	PLECH	Ob0006000...	⊘	1574.3566
Ob00060009_002--	PLECH	PLECH	Ob0006000...	⊘	874.4771
Ob00060009_003--	TRUBKA	TRUBKA	Ob0006000...	⊘	27.1004
Ob00060009_004--	PLECH	PLECH	Ob0006000...	⊘	1049.4183
Ob00060009_005--	Plech ...	Plech	Ob0006000...	⊘	5.7510
Ob00060009_006--	Plech ...	Plech	Ob0006000...	⊘	4.8629
Ob00060009_007--	Plech	Plech	Ob0006000...	⊘	440.5825
Ob00060009_008--	Plech	Plech	Ob0006000...	⊘	535.6725

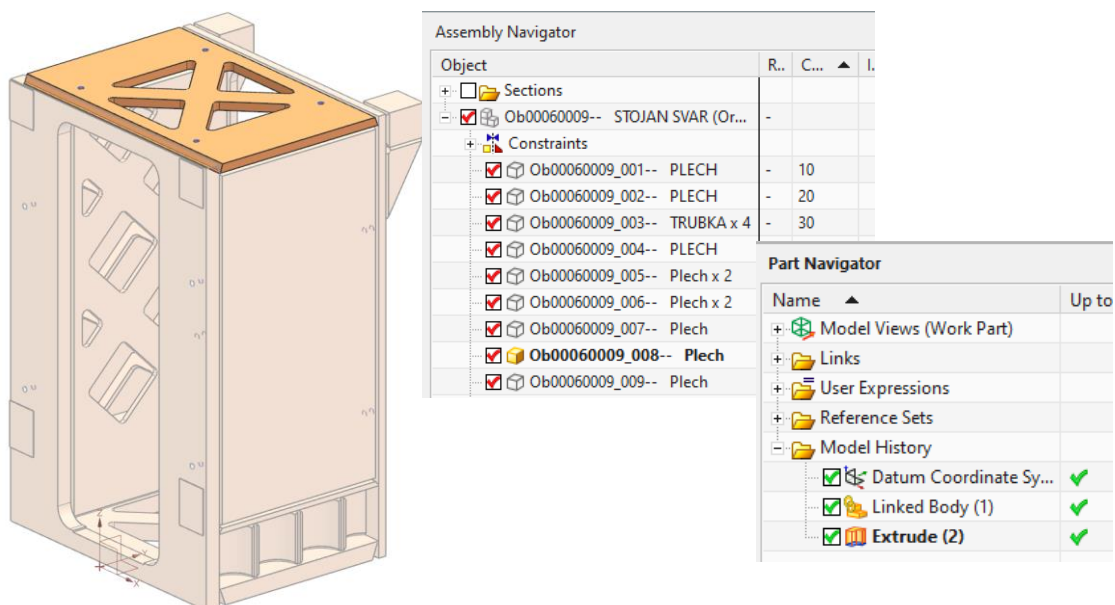
Obr. 62 : Kusovník opracování a svařence v prostředí CAD a PLM

Díky použité metodice, která definuje jednotlivé části opracovaného svařence v rámci jednoho modelu jako samostatné skupiny prvků bez závislosti na okolí (obr. 63), bylo dosaženo snadné spolupráce mezi konstruktérem a výpočtářem.



Obr. 63 : Díl ve stromu modelování opracovaného modelu

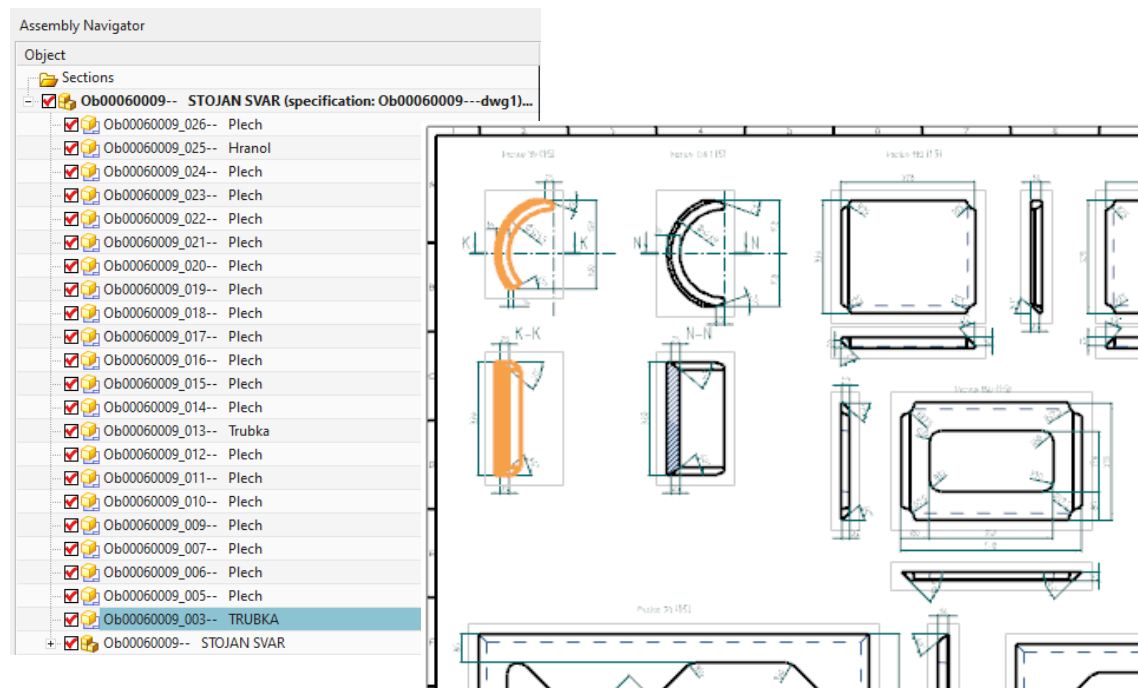
Finální návrh svařence byl realizován až po dokončení modelu opracování. Pod modelem opracování byla vytvořena sestava svařence, do které jsou vkládány jednotlivé díly s asociativní vazbou na konkrétní těleso. Na obr. 64 je vidět příklad vložení součásti, do které je nalinkován horní plech, na kterém je následně provedena úprava sražení hrany před svařením.



Obr. 64 : Propagace dílu z opracovaného modelu do sestavy svařence

Následná tvorba výkresové dokumentace pro svařence je realizována pod jedním číslem výkresu. Jednotlivé detaily jsou vkládány přímo do výkresového listu a označeny číslem pozice.

Tento přístup výrazně redukuje počet výkresů potřebných pro výrobu a zjednodušuje tak schvalování a další procesy ve firmě.



Obr. 65 : Detail dílu svařence na výkrese

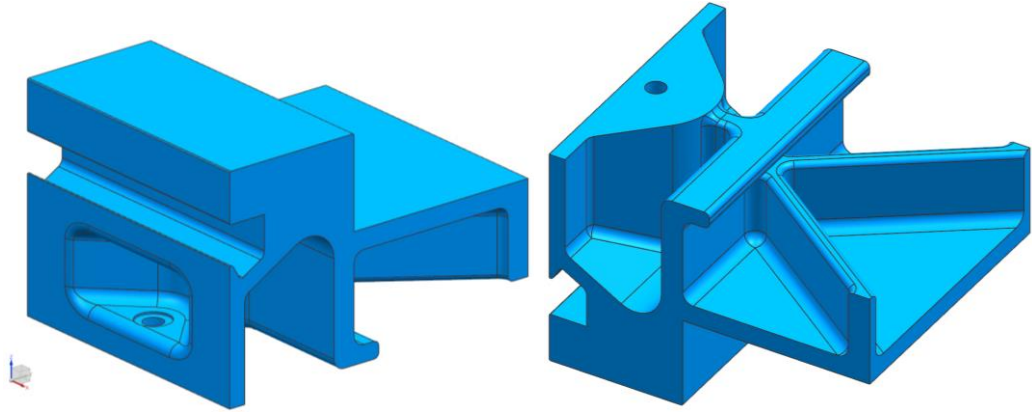
## 4.5 Aplikace metodiky konfigurovatelných modelů

Navržené řešení je realizováno v CAD systému NX integrovaného do PLM systému Teamcenter. Pro tvorbu konfigurovatelných sestav je využito funkce tzv. „rodiny součástí“, která umožňuje generovat díly a sestavy na základě tabulky hodnot pro jednotlivé parametry.

Metodika tvorby je navržena následovně:

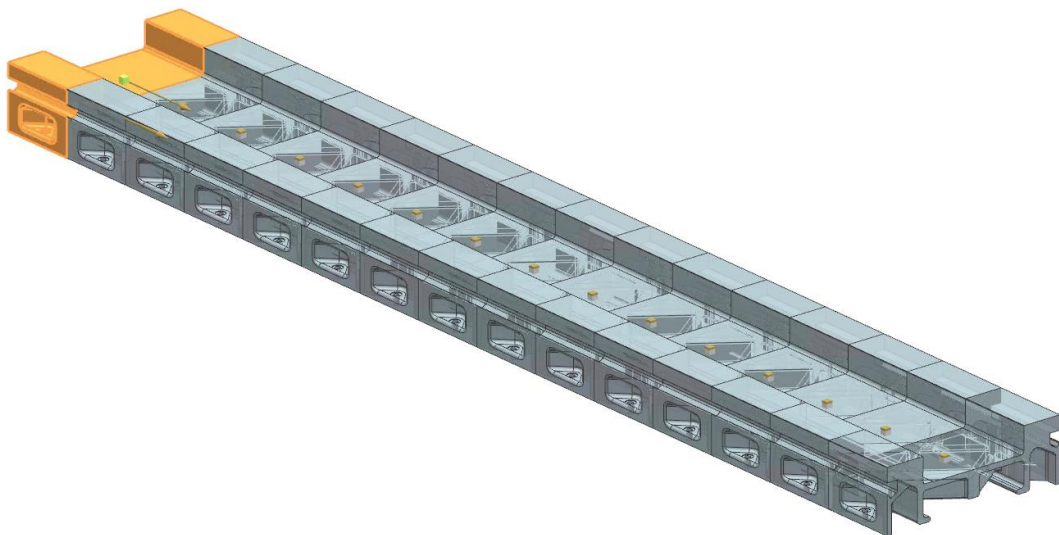
- Na základě tabulky jednotlivých variant kompletního stroje jsou sestavy rozděleny na:
  - Podsestavy konfigurovatelné podle konkrétního parametru (sestava lože, která se řídí parametrem délky a všechny navazující komponenty jsou tímto parametrem ovlivněny)
  - Podsestavy konfigurovatelné využitím jiného modelu (dvě varianty desky stolu, které využívají každá jiné modely a nelze je jednoduše parametrizovat)
  - Podsestavy shodné pro všechny varianty (saně stolu)
- Parametrizace začíná základním dílcem rozměrové řady, kterým je v tomto případě opracovaný odlitek lože s variabilní délkou po modulu 0,5 metru v rozsahu pojezdů 2 až 6 metru.
  - 3D Model je nutné vytvořit tak aby byl funkční pro všechny potřebné délky a zároveň zachovával ve všech variantách, pokud možno stejné základná hrany potřebné pro definici kót ve 2D výkresové dokumentaci.

- Základním prvkem parametrického modelu je opakovatelný modul, jehož zrcadlením a kopírováním lze dosáhnout požadované délky. Modul je koncipován jako finální tvar opracovaného odlitku modelovaný s kompletně zaoblenými hranami bez drobných funkčních detailů. Na obr. 66 je základní modul odlitku lože, jehož zrcadlením vzniká 0,5 m modul.



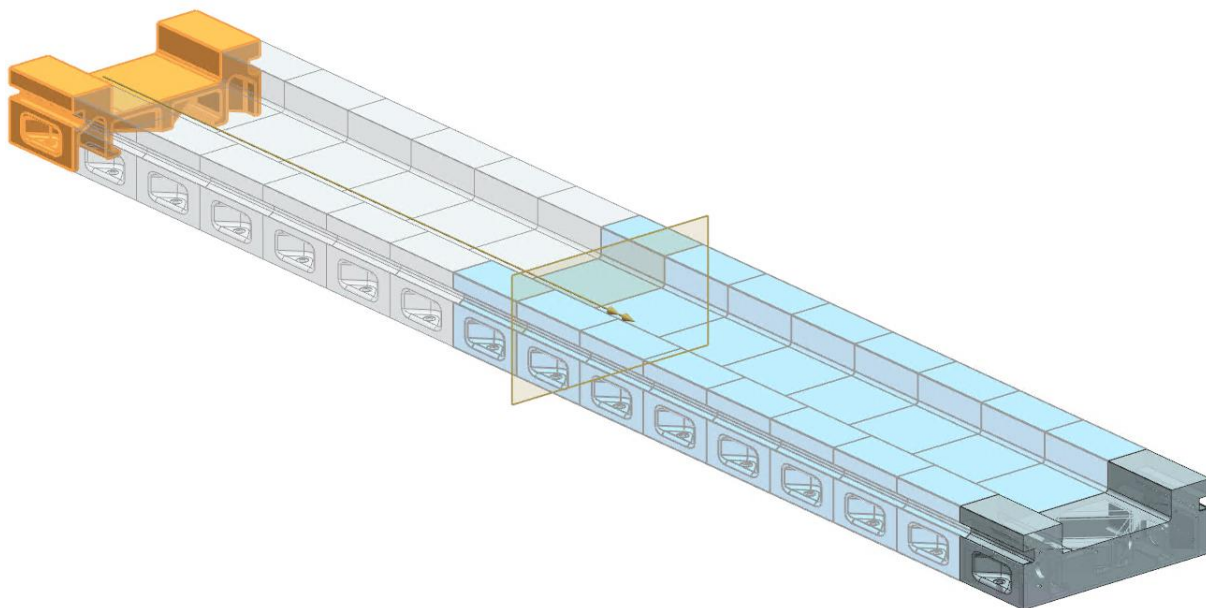
Obr. 66 : Základní modul parametrického modelu lože

- Kopírováním 0,5 metrového modulu vzniká požadovaná délka lože. Pro dosažení maximálního pojezdu 6 metrů (lože délky 8 metrů) je použito 14-ti vnitřních modulů a dvou krajních. Skladba modulů pro 8 metrové lože je na obr. 67.



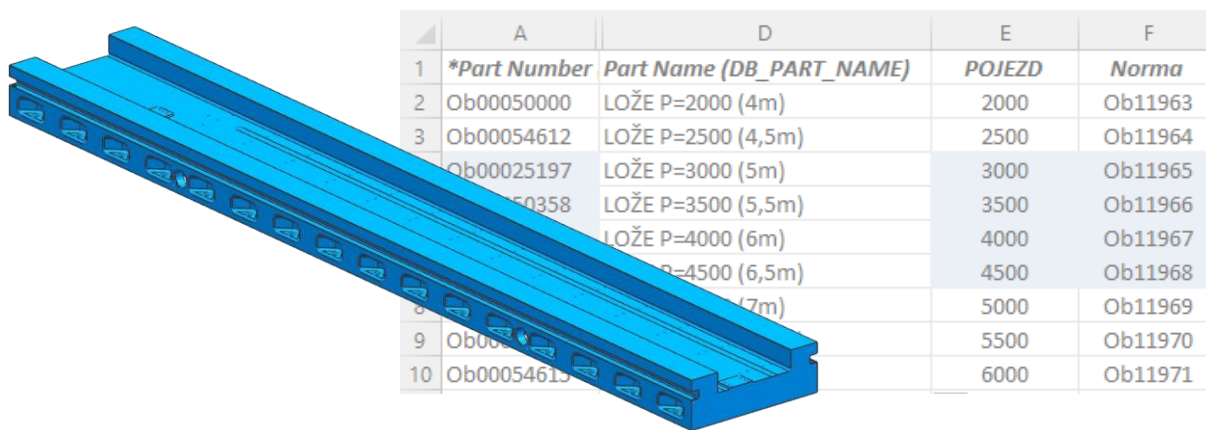
Obr. 67 : Kopie modulu 0,5 m pro dosažení požadované délky

- Krajní modul se od ostatních liší vnější stěnou, která tvoří čelo modelu lože. Hraný krajních modulů jsou využity pro celkovou kótu ve 2D výkresu a musí být pro všechny varianty stejné. Z toho důvodu je krajní modul zrcadlen do požadované polohy podle středové roviny. Zrcadlení krajního modulu podél středové roviny je vidět na obr. 68.



Obr. 68 : Doplnění krajního modulu a jeho zrcadlení

- Na tento základní parametrický model jsou doplněny detaily, jako jsou například díry a plochy pro upevnění navazujících součástí
- Parametrický model obsahuje řídicí parametry, které jsou použity pro řízení rodiny součástí pomocí tabulky. Tabulka obsahuje kromě řídicích parametrů ještě identifikační číslo modelu (číslo výkresu).

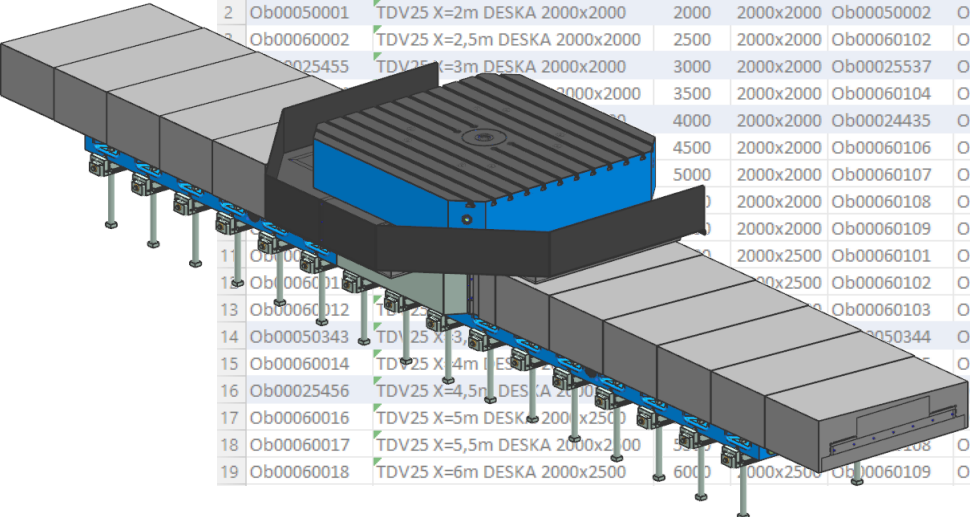


Obr. 69 : Parametrický model odlitku s tabulkou variant

- Z modelu dílu jsou dle tabulky generovány jednotlivé varianty, které se automaticky ukládají do PLM systému.
- Celkové sestavy variant stroje jsou rovněž řízeny tabulkou. Komponenty použité v jednotlivých variantách jsou definovány pomocí identifikačního čísla. Na obr. 70 je



výběr komponenty ve sloupcích G, H a I. Ve sloupcích E a F jsou řídicí parametry (délka pojezdu a rozměr desky).

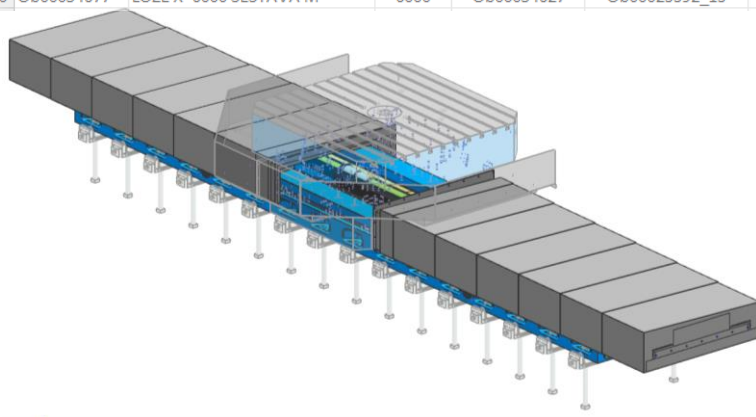


	A	C	E	F	G	H	I
1	*Part Number	Part Name (DB_PART_NAME)	POJEZD	DESKA	LOZE	DESKA	FIXATORY
2	Ob00050001	TDV25 X=2m DESKA 2000x2000	2000	2000x2000	Ob00050002	Ob00050003	Ob00052250
3	Ob00060002	TDV25 X=2,5m DESKA 2000x2000	2500	2000x2000	Ob00060102	Ob00052240	Ob00052251
4	Ob00060003	TDV25 X=3m DESKA 2000x2000	3000	2000x2000	Ob00025537	Ob00052240	Ob00052252
5	Ob00060004	TDV25 X=3,5m DESKA 2000x2000	3500	2000x2000	Ob00060104	Ob00052240	Ob00052253
6	Ob00060005	TDV25 X=4m DESKA 2000x2000	4000	2000x2000	Ob00024435	Ob00052240	Ob00052254
7	Ob00060006	TDV25 X=4,5m DESKA 2000x2000	4500	2000x2000	Ob00060106	Ob00052240	Ob00052255
8	Ob00060007	TDV25 X=5m DESKA 2000x2500	5000	2000x2000	Ob00060107	Ob00052240	Ob00052256
9	Ob00060008	TDV25 X=5,5m DESKA 2000x2500	5500	2000x2000	Ob00060108	Ob00052240	Ob00052257
10	Ob00060009	TDV25 X=6m DESKA 2000x2500	6000	2000x2000	Ob00060109	Ob00052240	Ob00052258
11	Ob00060101	TDV25 X=2m DESKA 2000x2500	2000	2000x2500	Ob00060101	Ob00052241	Ob00052250
12	Ob00060102	TDV25 X=2,5m DESKA 2000x2500	2500	2000x2500	Ob00060102	Ob00052241	Ob00052251
13	Ob00060103	TDV25 X=3m DESKA 2000x2500	3000	2000x2500	Ob00060103	Ob00052241	Ob00052252
14	Ob00050343	TDV25 X=3,5m DESKA 2000x2500	3500	2000x2500	Ob00050344	Ob00052241	Ob00052253
15	Ob00060014	TDV25 X=4m DESKA 2000x2500	4000	2000x2500	Ob00060104	Ob00052241	Ob00052254
16	Ob00025456	TDV25 X=4,5m DESKA 2000x2500	4500	2000x2500	Ob00025457	Ob00052514	Ob00052255
17	Ob00060016	TDV25 X=5m DESKA 2000x2500	5000	2000x2500	Ob00060106	Ob00052241	Ob00052256
18	Ob00060017	TDV25 X=5,5m DESKA 2000x2500	5500	2000x2500	Ob00060107	Ob00052241	Ob00052257
19	Ob00060018	TDV25 X=6m DESKA 2000x2500	6000	2000x2500	Ob00060108	Ob00052241	Ob00052258

Obr. 70 : Modulární celková sestava TDV 25 s konfigurační tabulkou variant

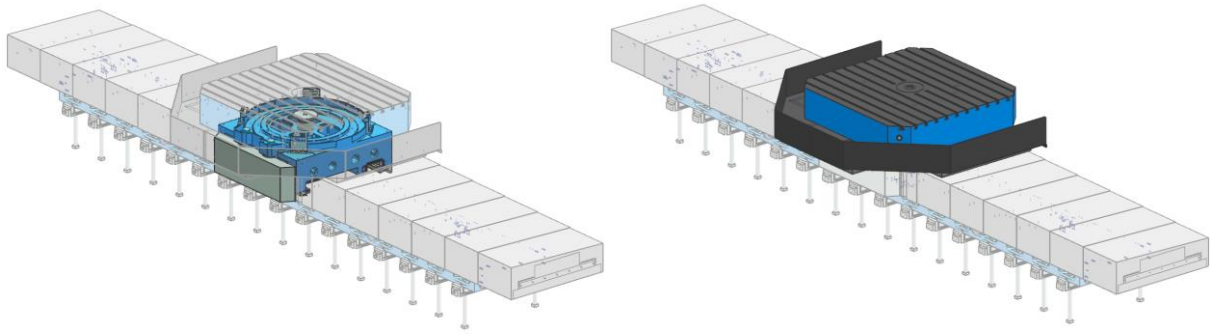
- Stejným způsobem jsou tabulkou řízeny i jednotlivé podsestavy finálního produktu. Příklad konfigurace pomocí tabulky pro podsestavu lože je na obr. 71.

	A	D	E	F	G	H	I	J	K
1	*Part Number	Part Name (DB_PART_NAME)	POJEZD	LOZE	KULICKOVY SROUB	ODMEROVANI	NOSIC	KRYTI	RETEZ
2	Ob00050002	LOZE X=2000 SESTAVA M	2000	Ob00050042	Ob00023392_06	Ob00025493	Ob00050044	Ob00050043	Ob00052220
3	Ob00054672	LOZE X=2500 SESTAVA M	2500	Ob00054622	Ob00023392_10	Ob00054662	Ob00054642	Ob00054652	Ob00052221
4	Ob00025537	LOZE X=3000 SESTAVA M	3000	Ob00025538	Ob00023392_04	Ob00025540	Ob00025541	Ob00025375	Ob00052222
5	Ob00050344	LOZE X=3500 SESTAVA M	3500	Ob00050371	Ob00023392_08	Ob00050374	Ob00050372	Ob00050369	Ob00052223
6	Ob00024435	LOZE X=4000 SESTAVA M	4000	Ob00025156	Ob00023392_01	Ob00024454	Ob00025183	Ob00025194	Ob00052224
7	Ob00025572	LOZE X=4500 SESTAVA M	4500	Ob00025573	Ob00023392_05	Ob00025574	Ob00025575	Ob00025376	Ob00052225
8	Ob00054675	LOZE X=5000 SESTAVA M	5000	Ob00054625	Ob00023392_11	Ob00054665	Ob00054645	Ob00054655	Ob00052226
9	Ob00054676	LOZE X=5500 SESTAVA M	5500	Ob00054626	Ob00023392_12	Ob00054666	Ob00054646	Ob00054656	Ob00052227
10	Ob00054677	LOZE X=6000 SESTAVA M	6000	Ob00054627	Ob00023392_13	Ob00054667	Ob00054647	Ob00054657	Ob00052228



Obr. 71 : Podsestava lože otočného stolu

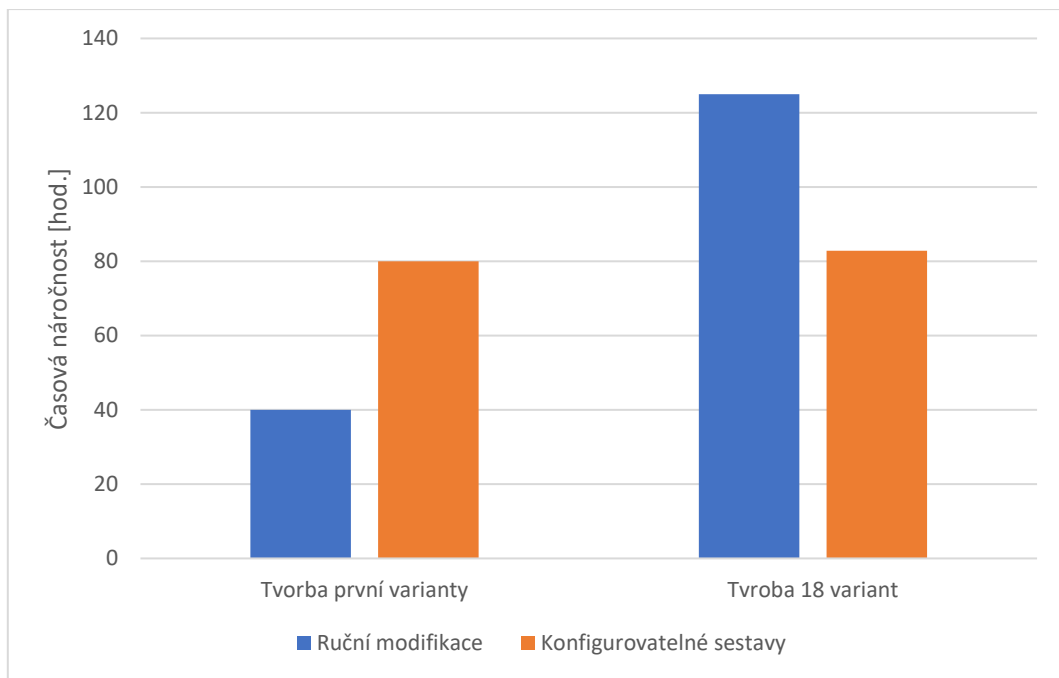
- V konfiguraci stolu jsou i sestavy, které nejsou řízeny tabulkou, ale mají vytvořenu jen jednu nebo dvě varianty. Na obr. 72 vlevo je skupina saní, která je pouze v jedné variantě a vpravo skupina otočné desky, která má dvě tvarové varianty (obdélníkovou a čtvercovou).



Obr. 72 : Saně a deska stolu TDV 25

#### 4.5.1.1 Zhodnocení

Použitím konfigurovatelných sestav se podařilo zkrátit dobu potřebnou pro vytvoření jedné varianty. V případové studii bylo celkem tímto způsobem generováno 18 variant vrcholové sestavy otočného stolu. Časová náročnost na přípravu takto konfigurovatelné sestavy byla cca dvojnásobná. V celkovém počtu variant je však úspora tohoto postupu cca 30 %. Porovnání časové náročnosti tvorby prvního modelu a tvorby 18 variant při použití ruční modifikace a konfigurovatelných sestav je na obr. 73.



Obr. 73 : Porovnání časové náročnosti tvorby nových variant

## 4.6 Aplikace numerických analýz při vývoji frézovací věže

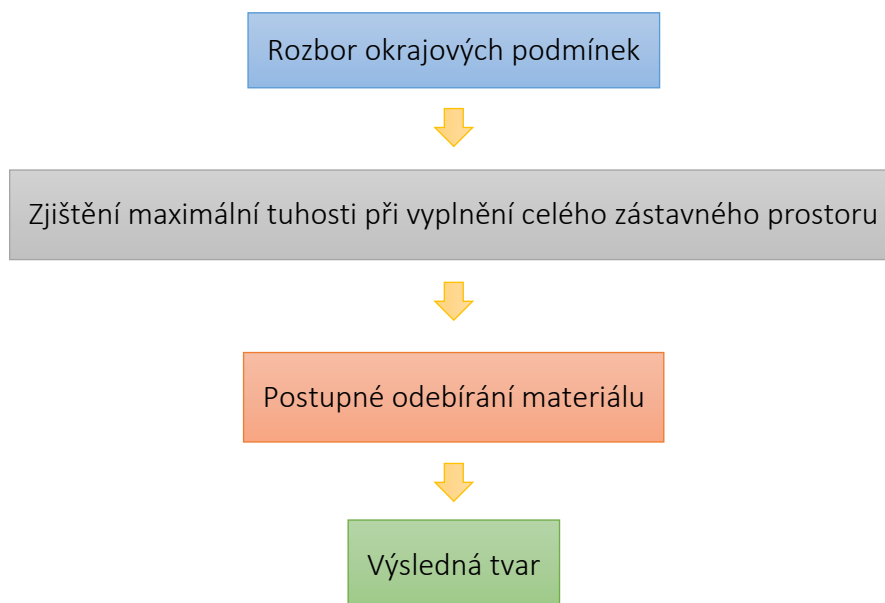
Autor disertační práce byl v řešitelském týmu součástí skupiny realizující numerické analýzy a simulace na úrovni virtuálního modelu. Dále jsou uvedeny jednotlivé numerické analýzy, které v rámci projektu samostatně řešil. Při realizaci optimalizací jsou dodržována metodická doporučení sumarizovaná na základě zkušeností autora.

### 4.6.1 Postup návrhu nosných struktur TOS

Na základě zkušeností s řešením celé řady projektů optimalizace jednotlivých částí nosných struktur těžkých obráběcích strojů lze konstatovat, že je vždy vhodné důsledně konfrontovat nově navrhované řešení s existujícím funkčním řešením. Při vývoji těžkých obráběcích strojů je i první vyráběný kus určený pro komerční zakázku a v podstatě neexistuje zkušební prototyp, tak jak ho známe například z automobilového průmyslu. Náklady na řešení problémů vzniklých neuváženou inovací (optimalizací) mohou velmi často převýšit i její teoretický přínos.

Metodická doporučení při návrhu a optimalizaci nosných struktur jsou:

- Provést pečlivý rozbor zátěžných stavů a dalších okrajových podmínek především s ohledem na skutečné využití dílce.
- Stanovit maximální tuhost na základě analýzy s kompletně vyplněným zástavným prostorem.
- Postupným odebíráním málo využitého materiálu tvořit nové varianty, které jsou porovnávány vůči plně vyplněnému tělesu.
- Při odebírání materiálu zohledňovat technologii výroby a funkční plochy pro připojení okolních dílů.



Obr. 74 : Postup návrhu svařenců a odlitků



## 4.6.2 Numerické analýzy při návrhu nosných dílců

### 4.6.2.1 Návrh svařence stojanu

Návrh svařence stojanu byl realizován ve spolupráci s konstrukcí mechaniky společnosti Škoda Machine Tool. Autor disertační práce zde řešil numerické analýzy optimalizace rozmístění materiálu tak, aby bylo dosaženo vysoké tuhosti stojanu při zachování snadné výroby. Právě z důvodu snadné vyrobitelnosti nebylo využito výsledků topologických optimalizací, ale postupným manuálním zlepšováním byl navržen svařenec složený z opakovatelných žebér stejných rozměrů.

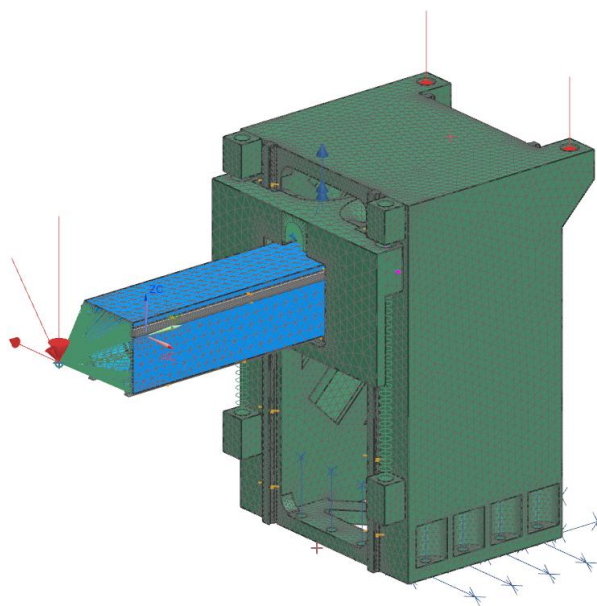
#### Výpočtový model

Pro samotnou numerickou analýzu stojanu byl vytvořen výpočtový model složený kromě stojanu ještě ze zjednodušeného vřeteníku a pinoly. Do bodu na konci pinoly bylo aplikováno několik zátěžných stavů odpovídajících charakteru realizovatelných obráběcích operací. Zátěžné stavy jsou v tab. 7.

Tab. 7 : Zátěžné stavy

Zátěžný stav	F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>
1 (frézování)	55 kN	0	0
2 (frézování)	0	55 kN	0
3 (frézování)	0	0	55 kN
4 (soustružení)	0,4 * F <sub>z</sub>	0,25 * F <sub>z</sub>	-54 kN

Ukázka výpočtového modelu pro prvotní fázi návrhu, bez uvažování poddajnosti spodku stojanu a lože je na obr. 75.

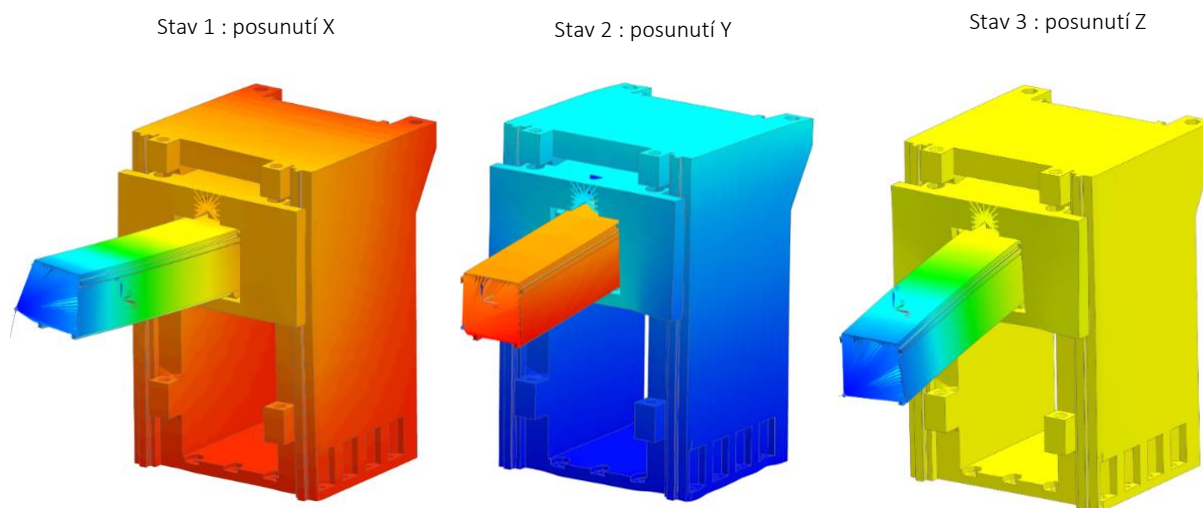


Obr. 75 : Výpočtový model pro výpočet stojanu frézovací věže

### Výpočet maximální tuhosti

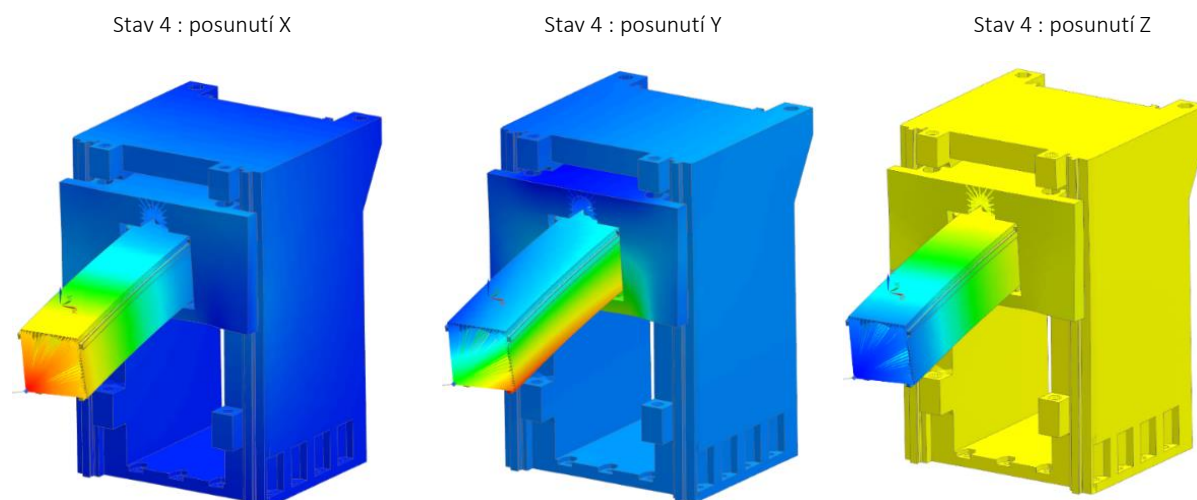
Jako první byla zjištěna tuhost při použití stojanu, který má celý objem vyplněn materiálem. Tato tuhost pak byla brána jako nejvyšší možná a všechny ostatní výsledky jsou k ní vztahovány. Výchozí tuhost byla zjišťována pro všechny čtyři zátěžné stavy. V průběhu řešení analýz bylo rozhodnuto o realizaci stojanu formou svařence.

Ukázka výsledků numerických analýz s plným objemem pro jednotlivé zátěžné stavy při obrábění frézováním je na obr. 76.



*Obr. 76 : Deformace frézovací věže pro zátěžné stavy 1, 2 a 3*

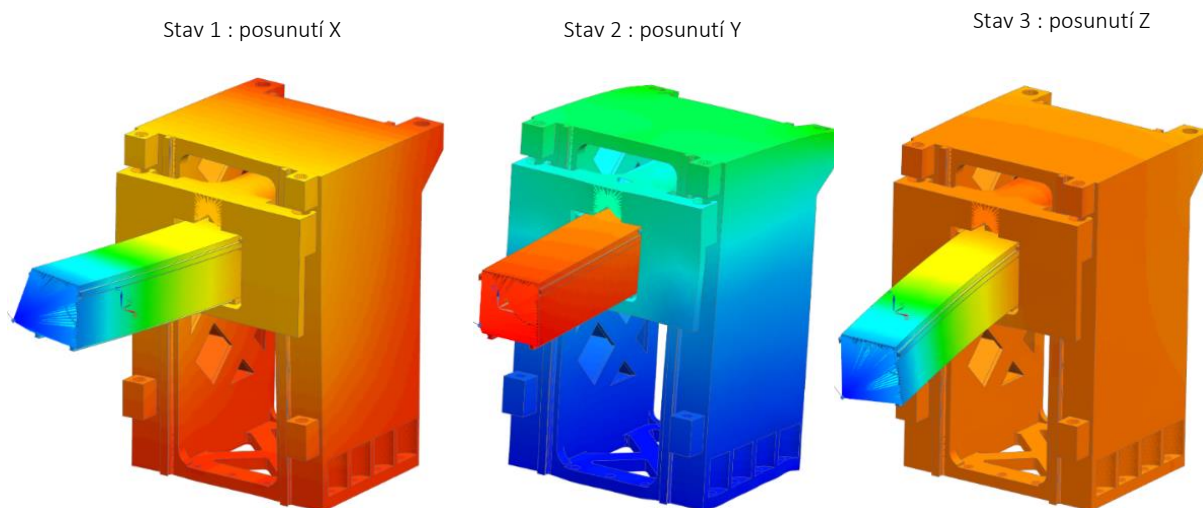
Ukázka výsledků numerických analýz s rozkladem do jednotlivých směrů pro obrábění soustružením je na obr. 77.



*Obr. 77 : Deformace frézovací věže pro zátěžný stav 4*

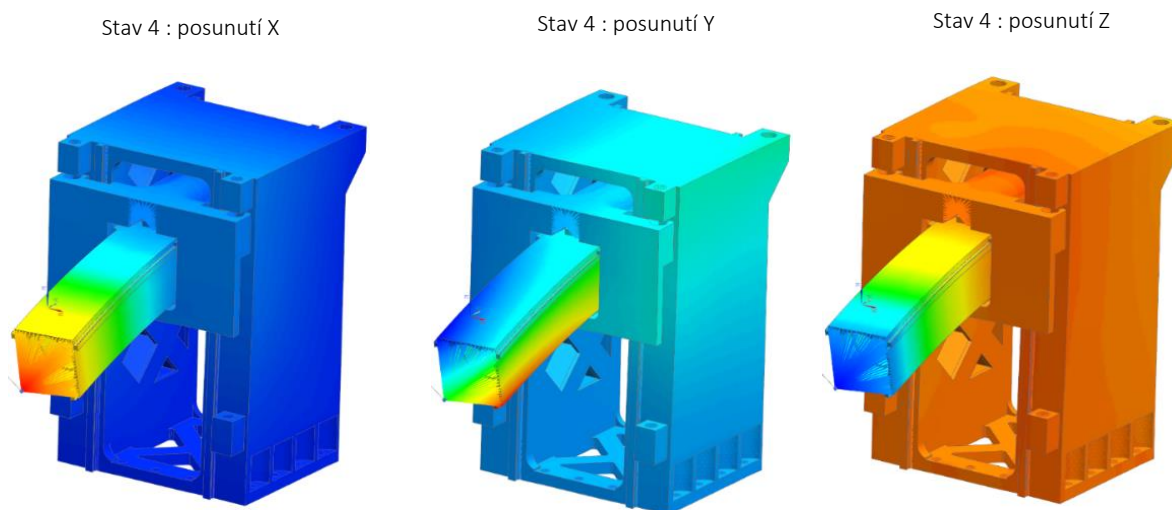
### Optimalizace svařence

V průběhu optimalizace vzniklo postupnými úpravami několik desítek variant, které vedli k finální podobě svařence. Při úpravách byl kladen důraz na snadnou vyrobiteľnost svařence. Ukázka mezivýsledků z průběhu optimalizace pro jednotlivé zátěžné stavy při obrábění frézováním je na obr. 78



*Obr. 78 : Deformace frézování věže pro zátěžné stavy 1, 2 a 3 (průběh optimalizace)*

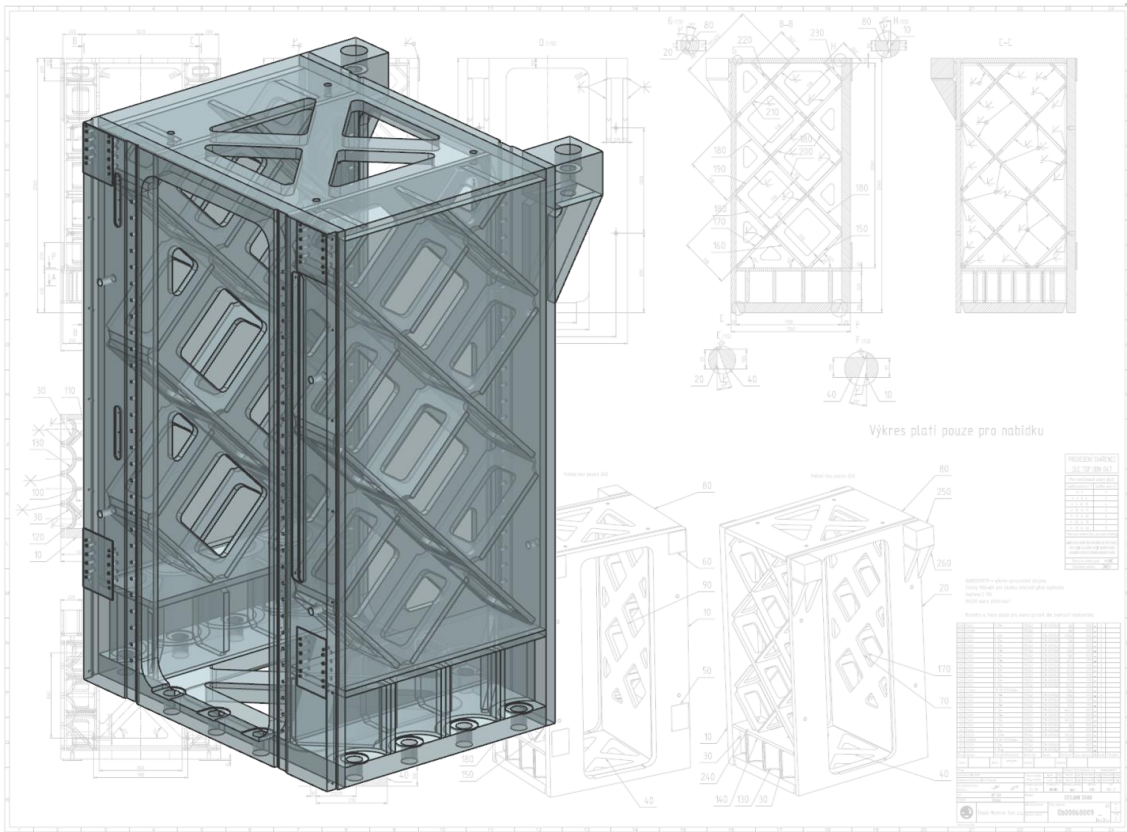
Ukázka mezivýsledků z průběhu optimalizace s rozkladem do jednotlivých směrů obrábění soustružením je na obr. 79.



*Obr. 79 : Deformace frézovací věže pro zátěžný stav 4 (průběh optimalizace)*

### Vyhodnocení

Výsledkem optimalizace je svařené těleso stojanu frézovací věže, které má žebrování pod úhlem 45°. Jednotlivá žebra jsou tvořena stejnými výpalky pro usnadnění přípravy výroby. Finální svařenec stojanu frézovací věže je na obr. 80.



Obr. 80 : Finální návrh svařence stojanu

Díky jednoduchému návrhu proběhla výroba svařence bez komplikací. Fotografie reálného opracovaného svařence stojanu frézovací věže je na obr. 81.



Obr. 81 : Opracovaný stojan frézovací věže



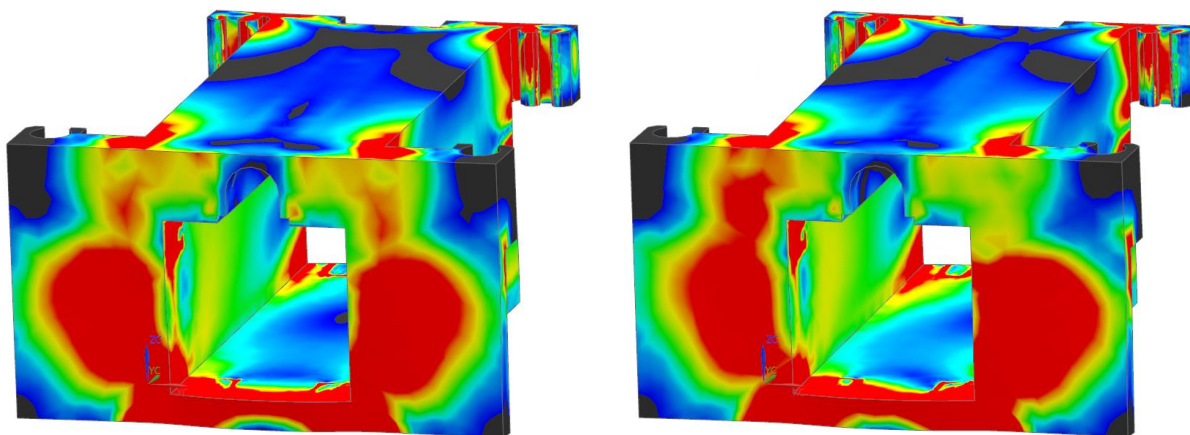
#### 4.6.2.2 Návrh tělesa vřeteníku

##### Výpočtový model

Při optimalizaci tělesa vřeteníku byl použit stejný výpočtový model jako pro optimalizaci tělesa stojanu. Rovněž byly použity stejné zátěžné stavy. Těleso stojanu, které sloužilo pro tento výpočet pouze jako okolí, bylo plně vyplněno materiálem.

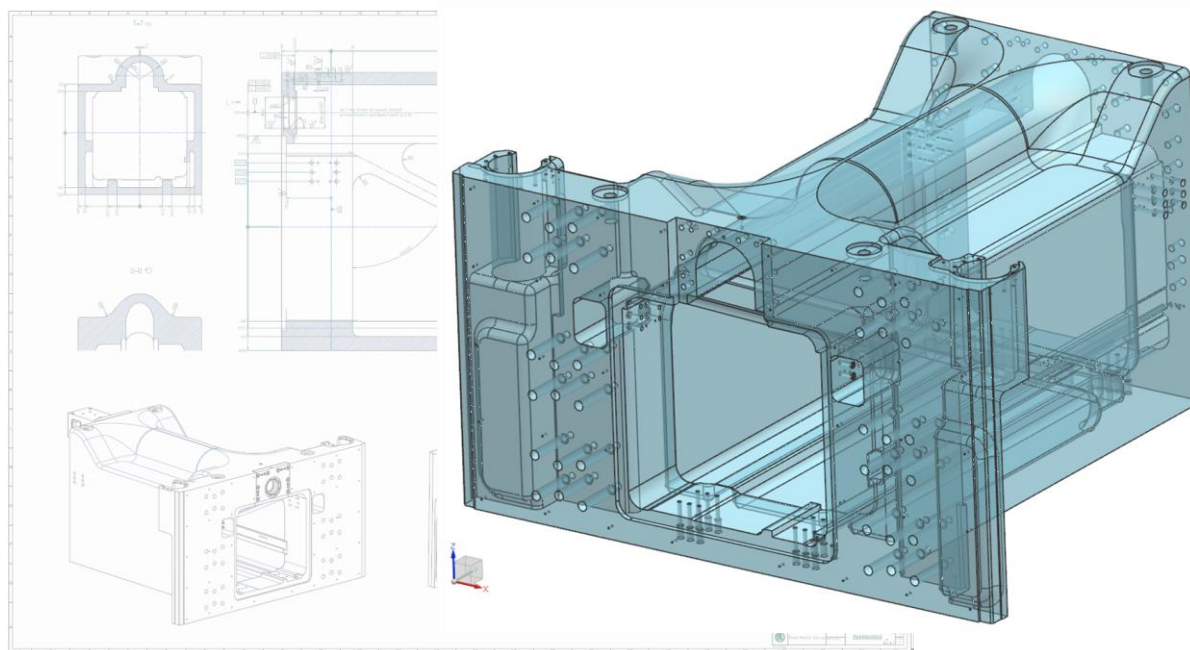
##### Analýza využití materiálu

Těleso vřeteníku je navrhované jako odlitek. Numerické analýzy byly využity již v prvotním návrhu. Postupným odebráním málo využitého materiálu došlo k tvarování finálního odlitku. Analýza využití materiálu ve fázi návrhu je na obr. 82.



Obr. 82 : Využití materiálu při zatížení ve směru osy Z a soustružení

Na základě výpočtů dle okrajových podmínek popsanych v předchozí kapitole byl proveden konstrukční návrh odlitku skříně. Výchozí tvar a tloušťky stěn byly optimalizovány s ohledem na hmotnost a tuhost celého stroje. Výsledný tvar je znázorněn na obr. 83.



Obr. 83 : Finální návrh odlitku vřeteníku

Na základě finálního virtuálního návrhu byl vyroben fyzický odlitek. Odlitek skutečného tělesa vřeteníku před finálním opracováním je na obr. 84.



*Obr. 84 : Odlitek vřeteníku frézovací věže*

Celková montáž stojanu frézovací věže ve fyzické podobě je na obr. 85.



*Obr. 85 : Montáž skupin stojanu věže*

### 4.6.3 Kompenzace vlivu gravitační síly na geometrickou přesnost

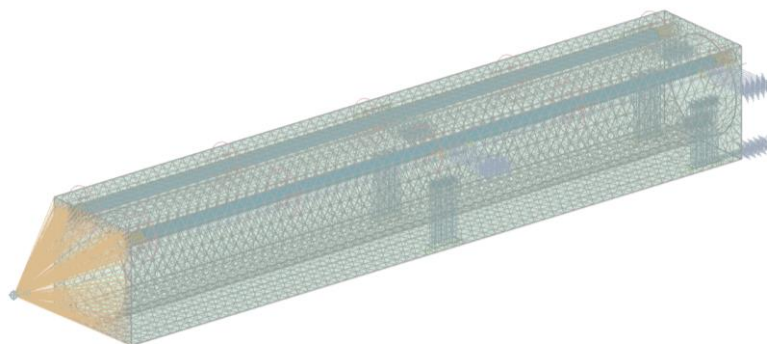
Gravitační síla má na geometrickou přesnost stroje negativní vliv, který je možný kompenzovat výrobně, úpravou vodících ploch nebo pomocí přídavných předepínacích elementů, řízených v závislosti na poloze strojních os.

#### 4.6.3.1 Kompenzace vlivu padání pinoly

Cílem prvotního výpočtu bylo zjistit, zda je možné pomocí předepínací síly kompletně eliminovat vliv padání pinoly.

##### Výpočtový model

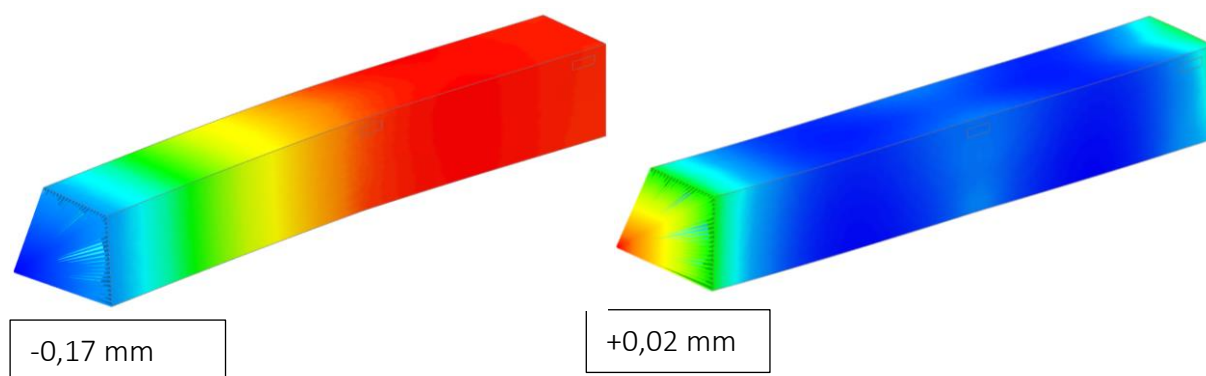
Na pinolu je připevněna kolejnice lineárního vedení, která je vedena v tancích. Pro potřeby výpočtu byla pinola upevněna v místě tanků při maximálním výsuvu. Na konec pinoly je umístěn hmotný bod o hmotnosti 1000 kg, simulující frézovací hlavu. V horní části pinoly jsou umístěny předepínací tyče, které mají za úkol udržet pomocí předepínací síly referenční bod na konci pinoly v nule (kompenzovat průhyb vzniklý vlivem vlastní tíhy soustavy). Výpočtový model pinoly je na obr. 86.



Obr. 86 : Výpočtový model pinoly

##### Výsledky

Byl stanoven průhyb bez použití předepínacích tyčí a následně byla stanovena předepínací síla pro vyrovnání pinoly. Padání pinoly bez předepnutí a s předepnutím pomocí dvou předepínacích tyčí je na obr. 87.

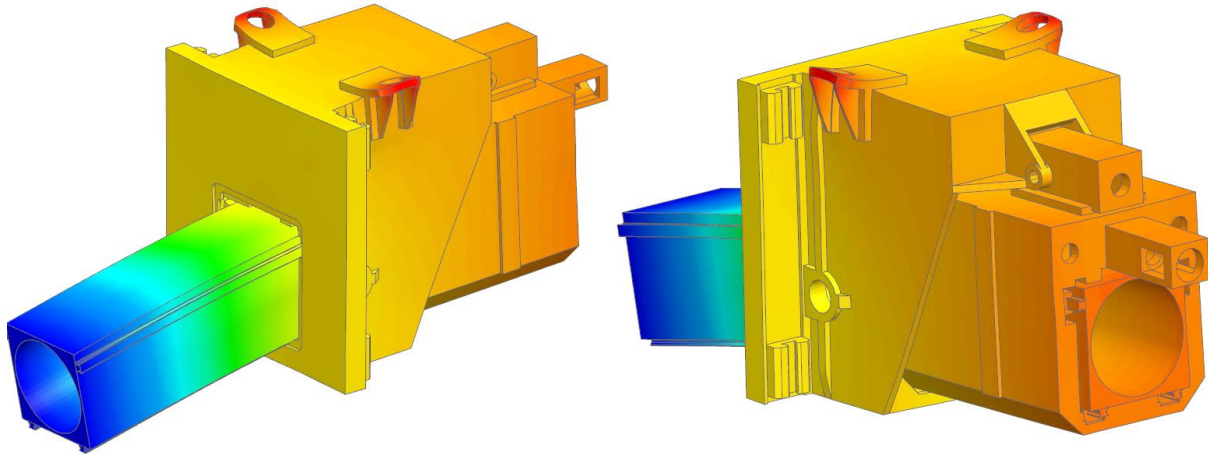


Obr. 87 : Deformace pinoly bez předepnutí a s předepnutím



### Vyhodnocení

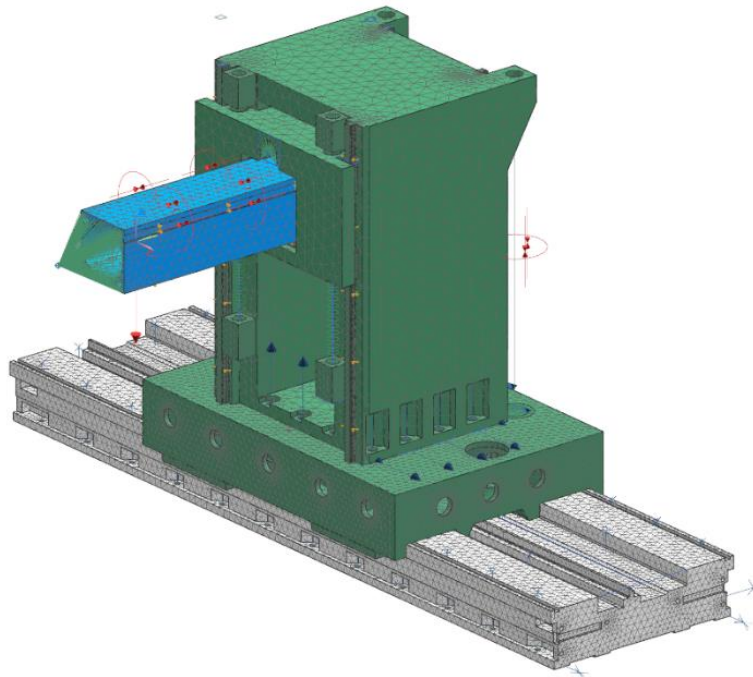
Předepínací síla v jedné tyči byla stanovena na 65 kN. Této síly je možné bez problémů dosáhnout, a proto bylo řešení prohlášeno za použitelné a bylo dále detailně rozpracováno. Toto řešení nahradilo konstrukčně podstatně složitější variantu naklápění vřeteníku pomocí klínů (ukázka výpočtu je na obr. 88).



Obr. 88 : Kompenzace pomocí naklápění vřeteníku

#### **4.6.3.2 Kompenzace padání pinoly a naklopení vřeteníku**

Pro potřeby ověření koncepčního návrhu jsou použity zjednodušené modely odlitků. Hlavním cílem výpočtů bylo zajistit geometrickou přesnost stroje při výsuvu pinoly, tzn. kompenzovat padání vřeteníku vlivem přesunu těžiště a průhyb pinoly. Do modelu je pomocí hmotného bodu přidána teoretická hmotnost frézovací hlavy připevněné k pinole (1000 kg).



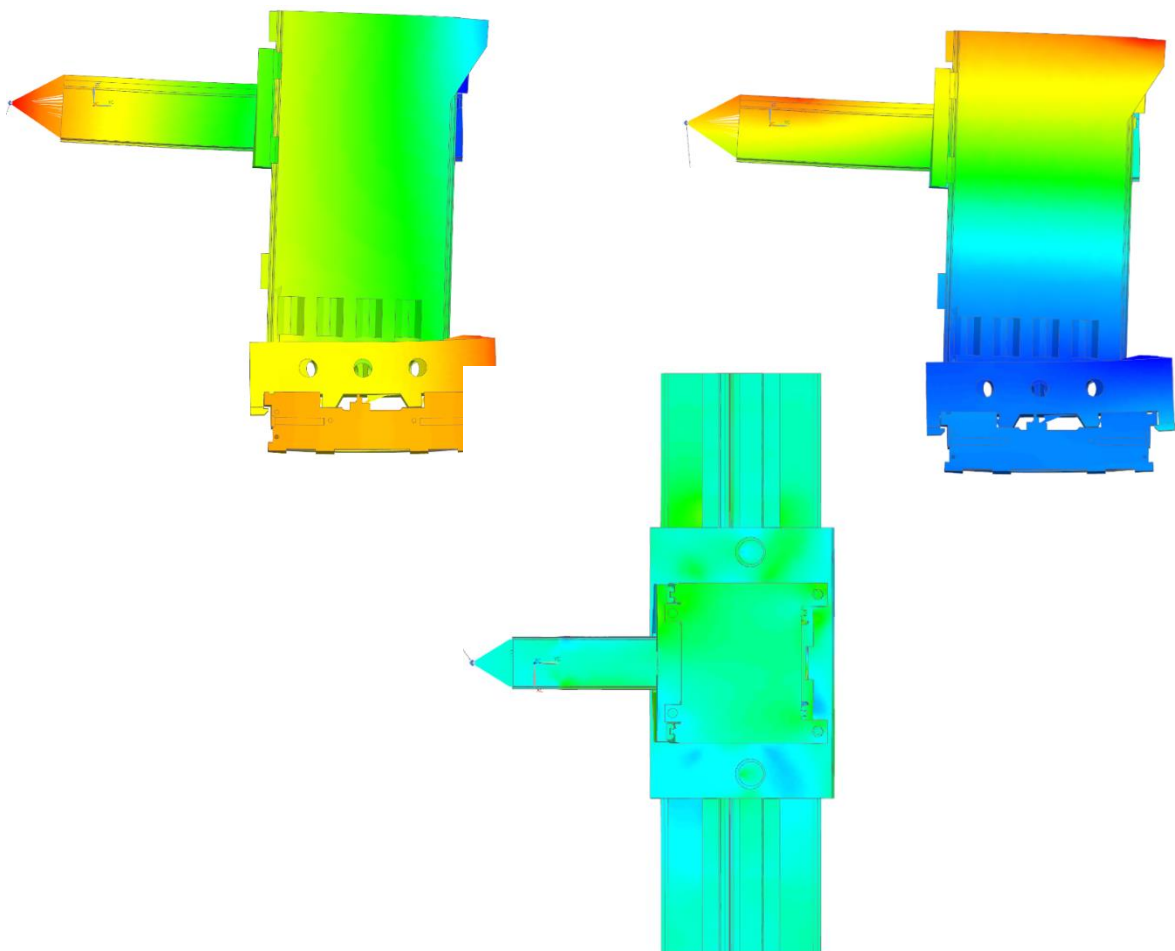
Obr. 89 : Výpočtový model frézovací věže a okrajové podmínky



Při výpočtu je uvažována pouze vlastní tíha stroje, která je kompenzována pomocí dvojice předepínacích sil aplikovaných do předepínacích tyčí umístěných do pinoly a na stojanu frézovací věže. Velikost těchto sil se mění v průběhu výsuvu pinoly. Pro potřebu zjištění maximální síly předepnutí je řešena poloha s maximálním výsuvem pinoly. Síla zadaná pro předepnutí je 60 kN. Je uvažován nejtěžší systém s kompletně vyplněným objemem.

#### Výsledky analýzy

Při aplikaci předepínací síly do tyčí je posunutí v referenčním místě na čele pinoly ve směru osy Z +0,01 mm. Padání pinoly a naklopení vřeteníku je tedy eliminováno. Vlivem kompenzace dochází k zaklonění věže a posuvu referenčního bodu ve směru Y o hodnotu 0,03 mm. Vzhledem k symetrickému řešení celé frézovací věže nedochází ve směru osy X k žádnému významnému posunutí referenčního bodu.



*Obr. 90 : Posunutí Z, Y, X při aplikaci předepnutí do tyčí v pinole a stojanu*

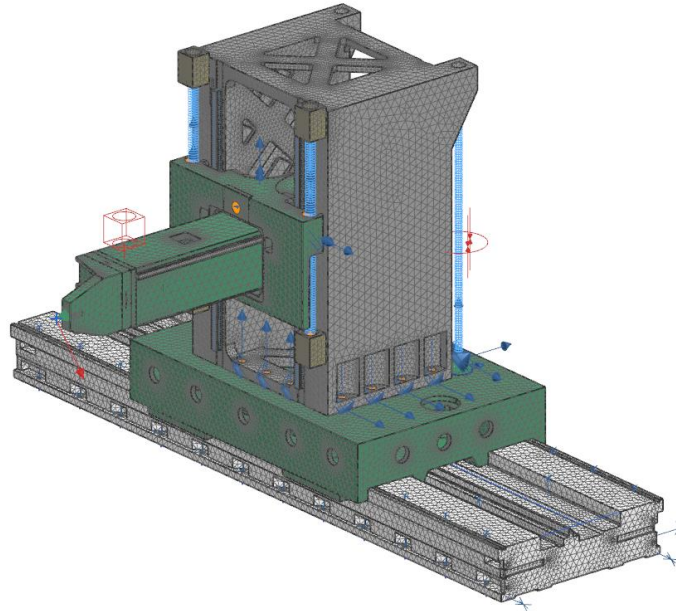
#### Vyhodnocení

Při aplikaci předepínací síly 60 kN je i při použití plného odlitku stojanu a vřeteníku možné kompenzovat padání pinoly. Přesná síla potřebná k vyrovnávání padání a naklopení v průběhu vysouvání pinoly bude navržena pro finální návrhy odlitků.

#### 4.6.4 Ověření finálního návrhu frézovací věže

##### Výpočtový model

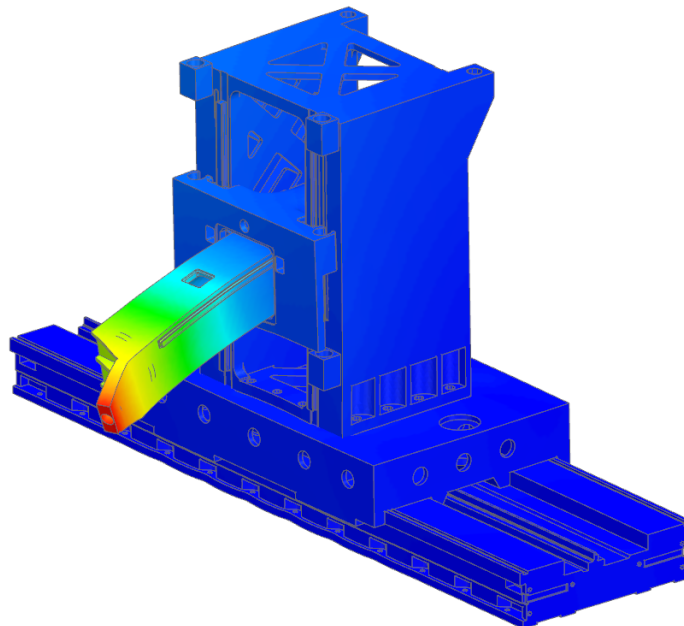
Finální návrh frézovací věže byl ověřen pomocí kompletního výpočtového modelu sestavy frézovací věže včetně přídatného příslušenství. Výpočtový model sestavy frézovací věže se soustružnickým zařízením je na obr. 91.



*Obr. 91 : Výpočtový model sestavy frézovací věže se soustružnickým zařízením*

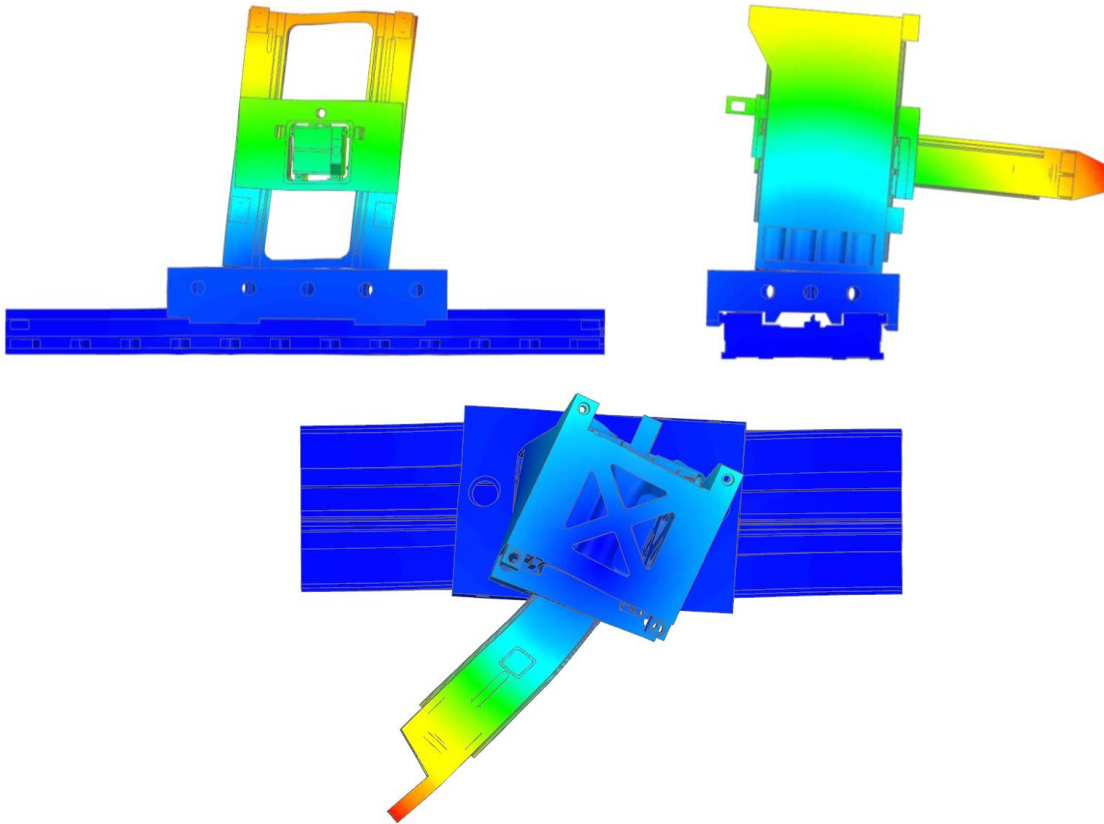
##### Výsledky

Ukázka výsledků celkové deformace frézovací věže při teoretickém zátěžném stavu, kdy je soustruženo s maximálním výsuvem a maximální řeznou silou, je na obr. 92.



*Obr. 92 : Celková deformace od řezné síly*

Konstrukce byla podrobena celé řadě numerických analýz. Ukázka modální analýzy sestavy frézovací věže bez krytí je na obr. 93.



*Obr. 93 : Vlastní tvary frézovací věže*

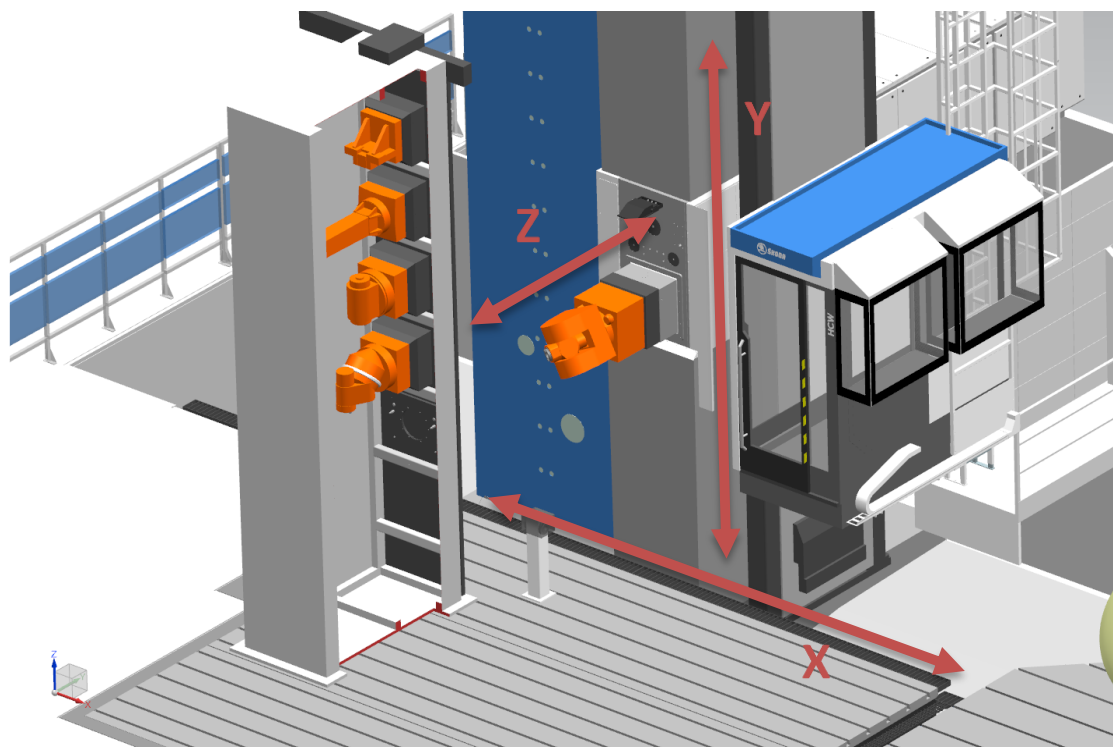
#### 4.6.5 Zhodnocení

Využitím numerických analýz v prvotní fázi návrhu nebylo v oblasti těžkých obráběcích strojů standardem. Zavedení tohoto postupu bylo ověřeno na vývojovém projektu, kde výrazně napomohlo úspěšnému řešení tak složitého problému, jakým byl vývoj multifunkčního soustružnického centra řady SMT.

## 4.7 Aplikace metodiky virtuálního oživení

Do vývojového procesu těžkých obráběcích strojů byla implementována metodika mechatronického konceptu s využitím software Siemens NX Mechatronic Concept Designer a virtuální oživení stroje pomocí metody Hardware in the Loop. Vzhledem k většinovým požadavkům zákazníků na řídicí systém Sinumerik 840D SL je využita platforma Siemens. Technicky je však možné využít i jiný řídicí systém.

Základní koncept metodiky implementace mechatronického konceptu a metodiky virtuálního oživení byl specifikován na základě poznatků z řešení projektu virtuálního oživení realizovaného na stroji HCW4S. Jednalo se o pilotní projekt, na kterém spolupracovala Západočeská univerzita s firmami Škoda Machine Tool a Siemens. Autor disertační práce řešil tvorbu virtuálního modelu v prostředí NX MCD a jeho následné propojení s reálným hardwarem. Virtuální model stroje HCW4S v prostředí NX MCD je na obr. 94.



Obr. 94 : Virtuální model HCW4S

V rámci projektu TRIO byla řešena problematika virtuálního oživení, při kterém je využit autorem navržený metodický postup. Nový stroj je řízen pomocí systému Sinumerik 840D SL. Aplikace metodiky virtuálního oživení umožňuje tvorbu programů na úrovni PLC a řešení problematiky nastavení řízení stroje v předvýrobní etapě. Pro vývoj digitálního dvojčete byli využity softwarové nástroje NX Mechatronic Concept Designer a SIMIT ve spojení s reálným hardwarem v provedení Hardware in the Loop (HiL). Z důvodu aplikace virtuálního oživení v následné reálné zakázce byl původní virtuální model řešený v projektu TRIO rozšířen o technologii hlubokého vrtání a další přídavné technologie.

### 4.7.1 Virtualizované mechanické prvky stroje

Dle navržené metodiky byli ve fázi vývoje mechatronického modelu mechanické prvky stroje reprezentovány velmi zjednodušenými tělesy, která mají ručně dodefinované základní informace o hmotnosti a momentech setrvačnosti. Jednotlivá tělesa jsou spojována do skupin, které představují jednotlivé funkční části stroje. Jedná se o pohybující se celky řízené jednotlivými osami stroje.

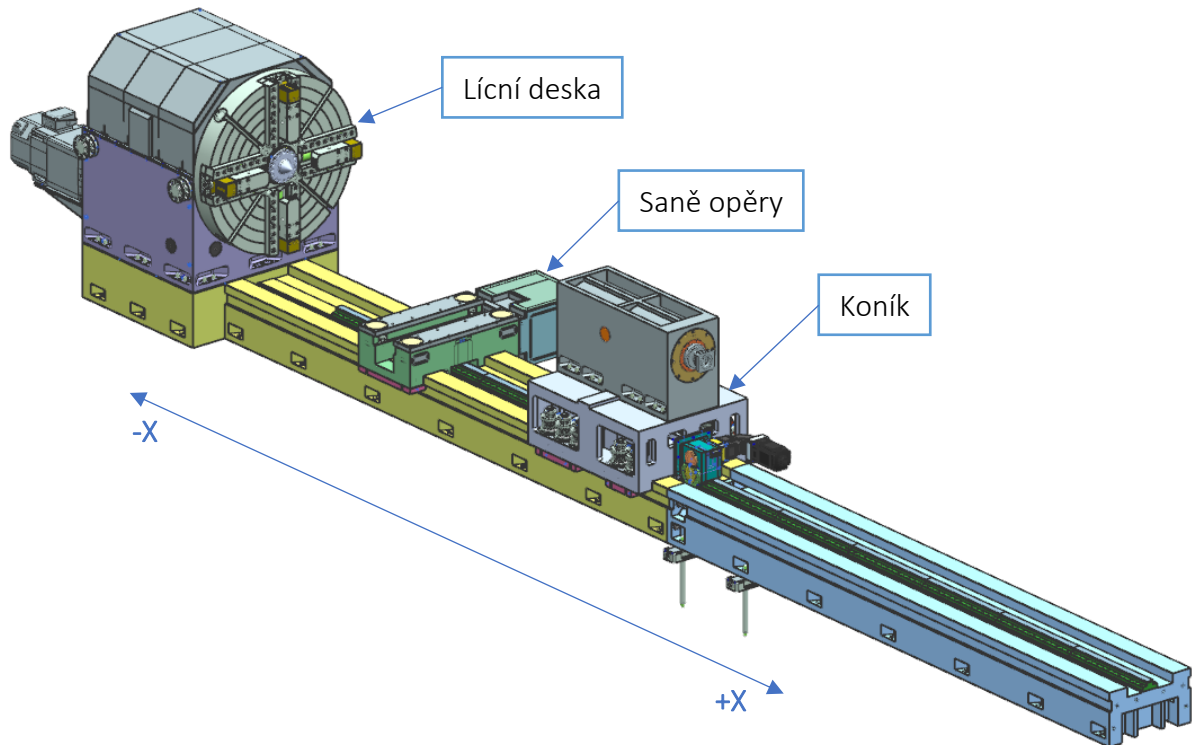
S postupujícím detailním rozpracováním konceptu byly jednotlivé celky zpřesňovány a detailovány a tyto změny byly postupně implementovány do mechatronického modelu v prostředí modulu Mechatronic Concept Designer. Při implementaci detailů jednotlivých konstrukčních uzlů byla brána v úvahu potřeba jednotlivých prvků pro simulaci. Na základě poznatků popsanych v metodice bylo pro potřeby simulace vždy nutné upravit tělesa, tak aby jejich grafická reprezentace příliš nezatěžovala simulaci.

#### 4.7.1.1 Soustružnická část

Většina podskupin soustružnické části stroje je statická a z pohledu mechatronického modelu je součástí rámu. Pro potřeby simulace není nutné zahrnovat součásti rámu do mechatronického modelu. Podrobný rozbor těchto součástí není tedy pro potřeby simulace nutný. Dále je pozornost soustředěna na pohyblivé součásti.

- Lícni deska koná rotační pohyb kolem osy X. Jedná se o strojní osu, která je dále v systému označena písmenem A.
- Saně podpěr konají posuvný pohyb ve směru osy X. Nejedná se o strojní osy, ale v systému jsou i tyto osy řízené.
- Sestava koníka koná posuvný pohyb ve směru osy X. Opět se jedná o pomocnou osu, která je řízena systémem.
- Pinola koníka konající posuvný pohyb ve směru osy X. Pohyb slouží k upnutí a předepnutí obrobku.

Soustružnická část multifunkčního stroje zobrazená na obr. 95, byla v rámci projektu TRIO řešena pouze virtuálně. Reálný fyzický prototyp vznikl pouze pro frézovací věž a příslušenství v podobě frézovacího a soustružnického zařízení.

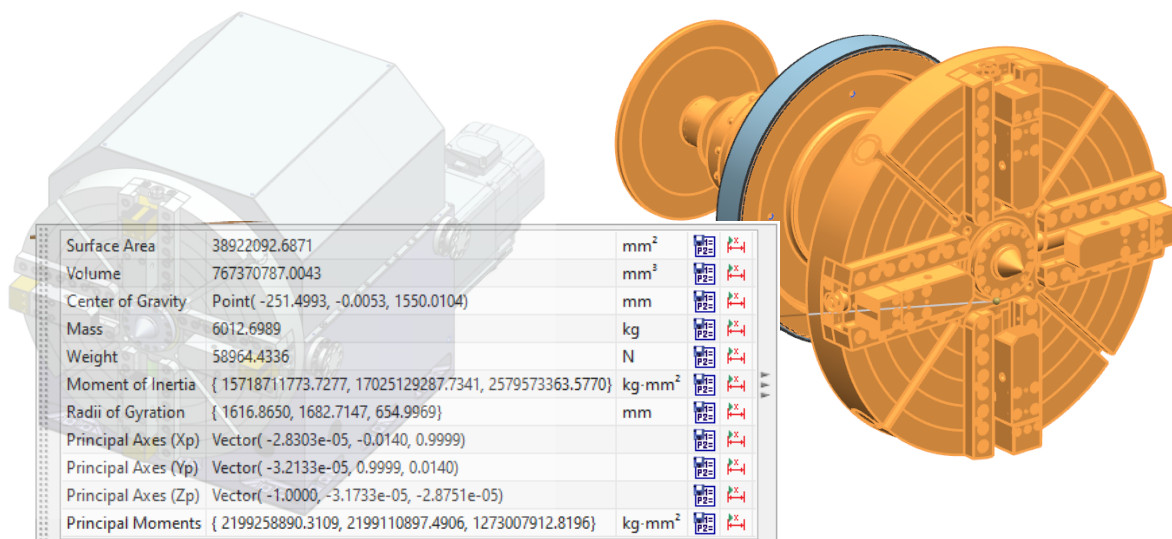


Obr. 95 : Soustružnická část

Soustružnická část virtuálního řešení z projektu TRIO však přešla v rámci následného reálného komerčního projektu do fyzické podoby. Modifikací mechatronického konceptu vzniklo digitální dvojče i k tomuto reálnému stroji, který byl navíc osazen novými technologiemi hlubokého vrtání, broušení a válečkování. Velkou aplikací virtuálního oživení na této zakázce byla možnost realizovat přechod z virtuálního prototypu do fyzické realizace.

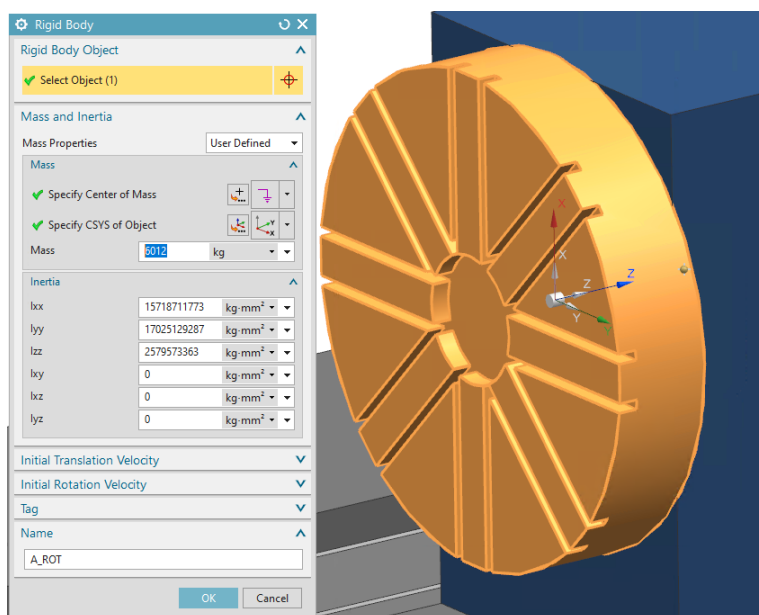
#### Rotační díly lící desky

Na obr. 96 je zobrazena sestava dílů, které tvoří s lící deskou rotační celek. Analýzou těles zobrazené sestavy jsou získány hodnoty hmotnosti, polohy těžiště a momentů setrvačnosti. Tyto hodnoty slouží k následné aktualizaci informací ve virtuálním modelu a jeho zpřesnění. Jednotlivé hodnoty doplňované do virtuálního modelu byly zaokrouhlovány dle doporučení vycházejících z navržené metodiky. Zadání informací získaných analýzou skutečné konstrukční sestavy do mechatronického modelu je zobrazeno na obr. 97.



Obr. 96 : Sestava rotačních dílů lícní desky

Přesné modely jsou pro potřeby simulace zjednodušeny. Virtuální model navíc neobsahuje všechny díly sestavy. Na obr. 97 je zjednodušený model lícní desky z prvotní fáze realizace mechatronického konceptu.

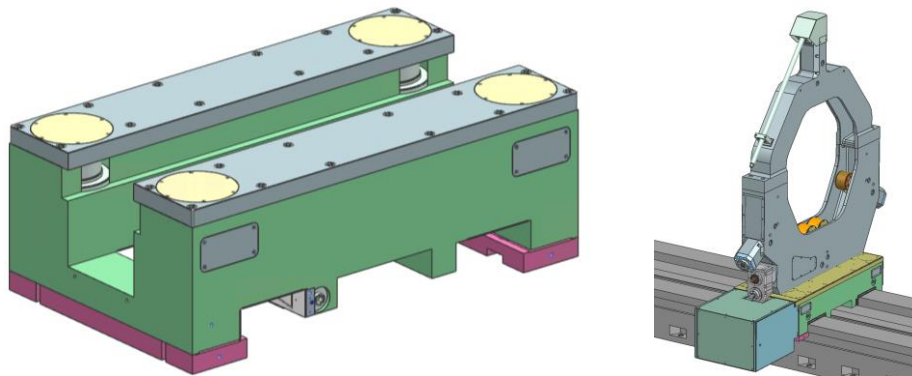


Obr. 97 : Přenesení informací do mechatronického modelu

### Saně opěry

Opěry multifunkčního zařízení jsou přídavným příslušenstvím, které se používají v případě upnutí dlouhých obrobků i ve větším počtu. Na saně je možné připevnit opěry různé konstrukce. V prvotním mechatronickém konceptu nebyla varianta s opěrami řešena, ale při následné aplikaci soustružnické části stroje v reálné zakázce s délkou obráběného kusu přes 16 metrů jsou opěry v mechatronickém konceptu použity. Saně opěry a uzavřená opěra jsou na obr. 98.

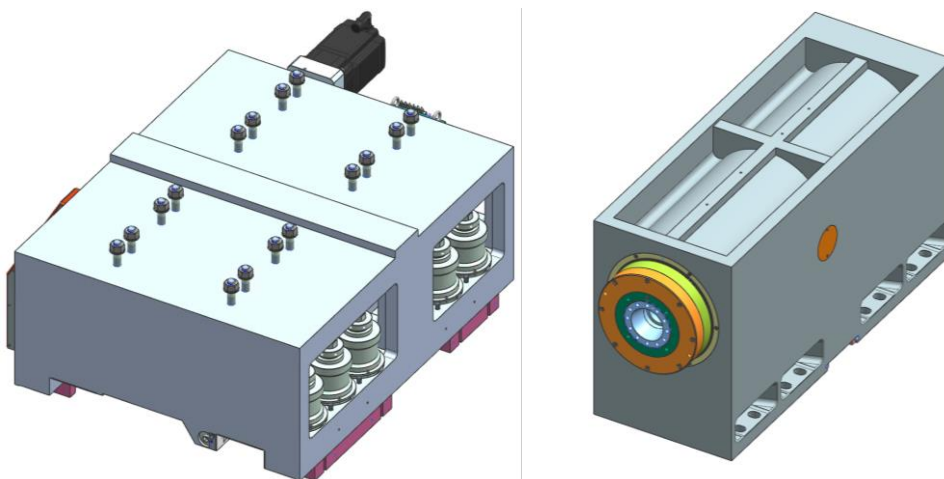




Obr. 98 : Saně opěry a uzavřená opěra

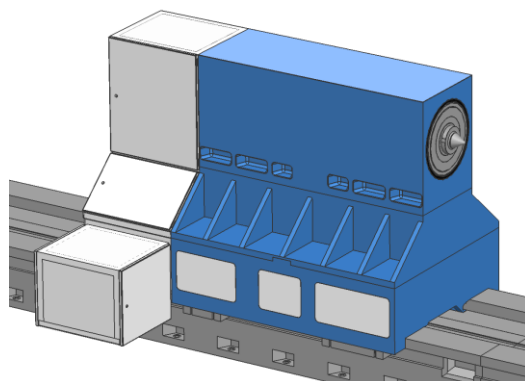
### Sestava koníka

Sestava koníka je tvořena saněmi a svrškem koníka. V základním koncepčním návrhu nebyl řešen tzv. mezikus umožňující zvětšení otočného průměru, nicméně koncepce oddělených dílů nijak nebránilo jeho doplnění, které bylo realizováno v rámci dalšího projektu. Díly sestavy koníka jsou na obr. 99.



Obr. 99 : Saně a svršek koníka

Doplnění mezikusu pro zvýšení otočného průměru je na obr. 100.

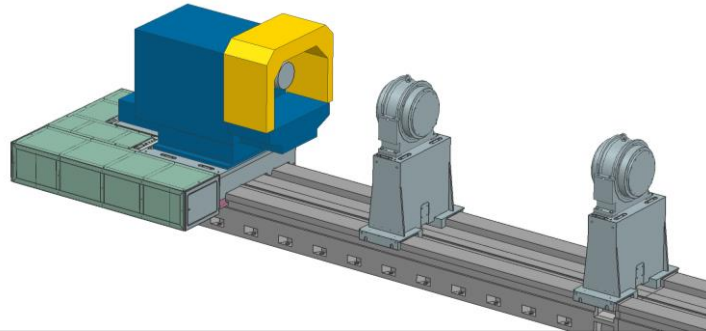


Obr. 100 : Koník s mezikusem



### Vyvrťovací zařízení

Dalším doplňujícím příslušenstvím, které bylo přidáno v rámci řešení komerčního projektu, je vyvrťovací zařízení typu BTA, které umožňuje vrtat díry až do hloubky 8000 mm o maximálním průměru 500 mm. Sestava tohoto zařízení se skládá z tlačného vřeteníku, tlakové hlavice, nosiče tlakové hlavice, hydraulického pohonu hlavice, opěry a příslušných agregátů. Sestava zařízení pro hluboké vrtání je na obr. 101.

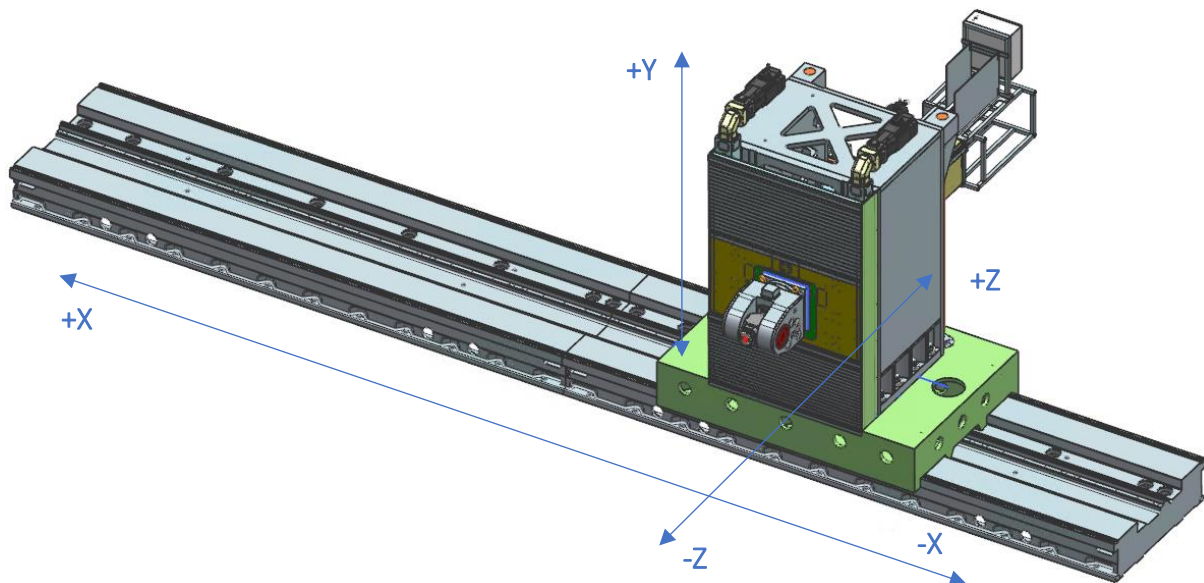


Obr. 101 : Vyvrťovací zařízení typu BTA

#### 4.7.1.2 Frézovací část

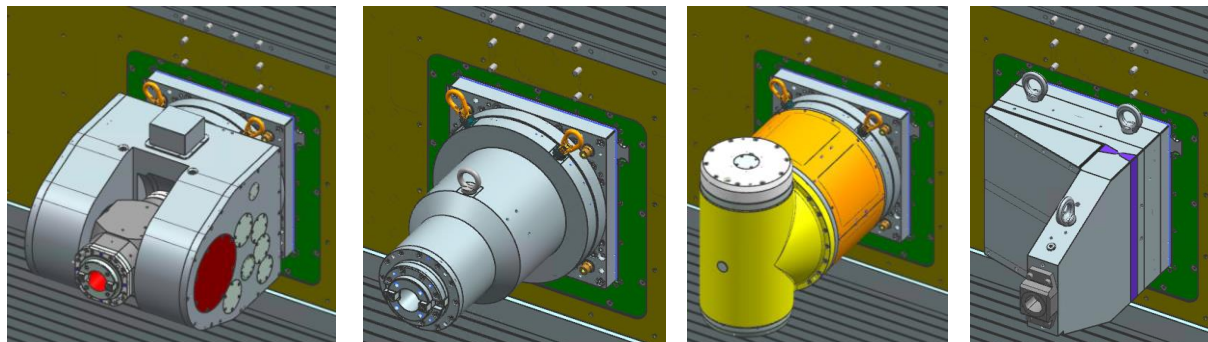
Frézovací část multifunkčního centra je na obr. 102. Lože je součástí rámu a není ho třeba do simulace zahrnovat. Pohyblivé skupiny jsou:

- Saně frézovací věže konají posuvný pohyb ve směru osy X. Jedná se o řízenou strojní osu podélného posuvu.
- Vřeteník koná posuvný pohyb ve směru osy Y. Jedná se o řízenou strojní osu ve svislém směru, která je při soustružnických operacích zpevněna.
- Pinola koná posuvný pohyb ve směru osy Z. Jedná se o řízenou strojní osu ve směru přířuvu.



Obr. 102 : Frézovací část stroje

Dále je součástí řešení příslušenství pro frézovací a soustružnické operace, které přidává další strojní osy a je na obr. 103.



Obr. 103 : UFK1000-MT, IFVW44, IFVW103-MT a Soustružnické zařízení LSMT100

Příslušenství přidává následující pohyby:

- Frézovací hlava UFK1000-MT koná rotační pohyb kolem os C a A. Používá se pro frézovací operace v pěti řízených osách.
- Nástavek IFVW44 slouží jako frézovací zařízení bez přídavných os. Umožňuje provádění základních frézovacích operací ve třech osách.
- Hlava IFVW103-MT koná rotační pohyb kolem osy C. Používá se pro frézovací operace čtyřech osách.
- Soustružnické zařízení LCMT100 bez přídavných os. Slouží k upnutí nástroje pro soustružnické operace.

#### 4.7.2 Strojní osy multifunkčního centra

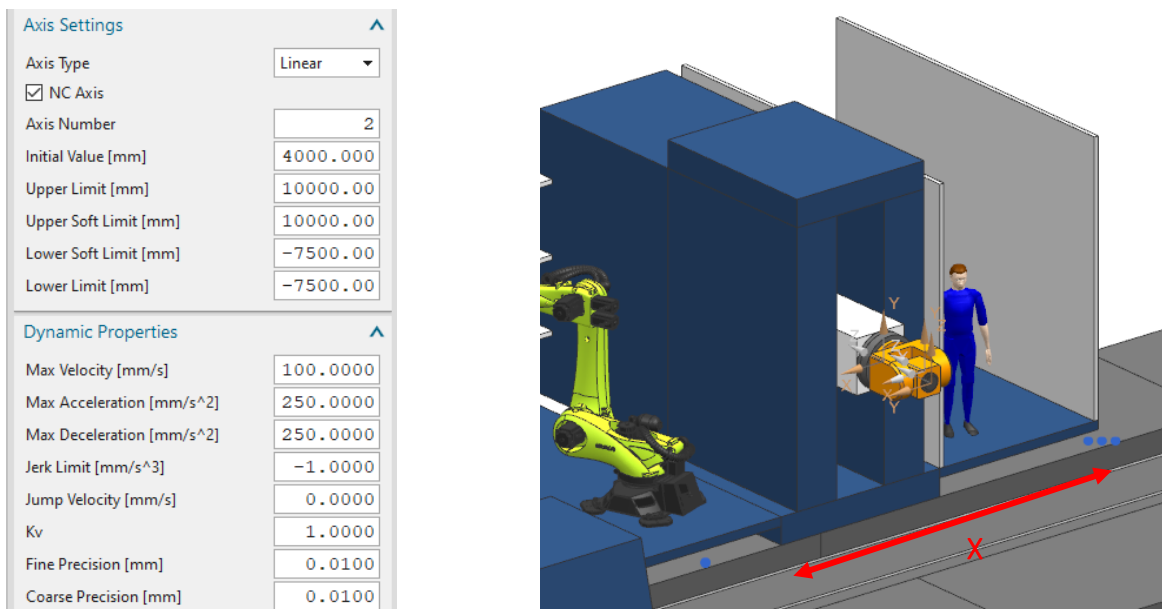
Pohyby jednotlivých strojních os jsou vzájemně svázány do kinematického řetězce a navzájem se ovlivňují. Kinematický řetězec os multifunkčního centra je na obr. 104.

TRIO_R2500-V1		
[-] MACHINE_BASE	MACHINE_BASE	MACHINE_ZERO_JUNCTI
[-] X_SLIDE		
[-] Y_SLIDE		
[-] Z_SLIDE		
[-] C1_ROT		C1_ROT_JCT
[-] A1_ROT		A1_ROT_JCT
[-] SPINDLE	_DEVICE	S*
POCK...	_DYNAMIC HOLDER	T1
POCK...	_DYNAMIC HOLDER	T2
POCK...	_DYNAMIC HOLDER	T3
POCK...	_DYNAMIC HOLDER	T4
POCK...	_DYNAMIC HOLDER	T5
[-] A_ROT	_LATHE_SPINDLE	A_ROT_JCT
[-] SETUP	_SETUP_ELEMENT	SETUP_JCT
PART	_PART_SETUP_ELEMENT	
WORKPIECE	_WORKPIECE_SETUP_EL...	
FIXTURE	_SETUP_ELEMENT	

Obr. 104 : Kinematický řetězec os

#### 4.7.2.1 Posuvná strojní osa X

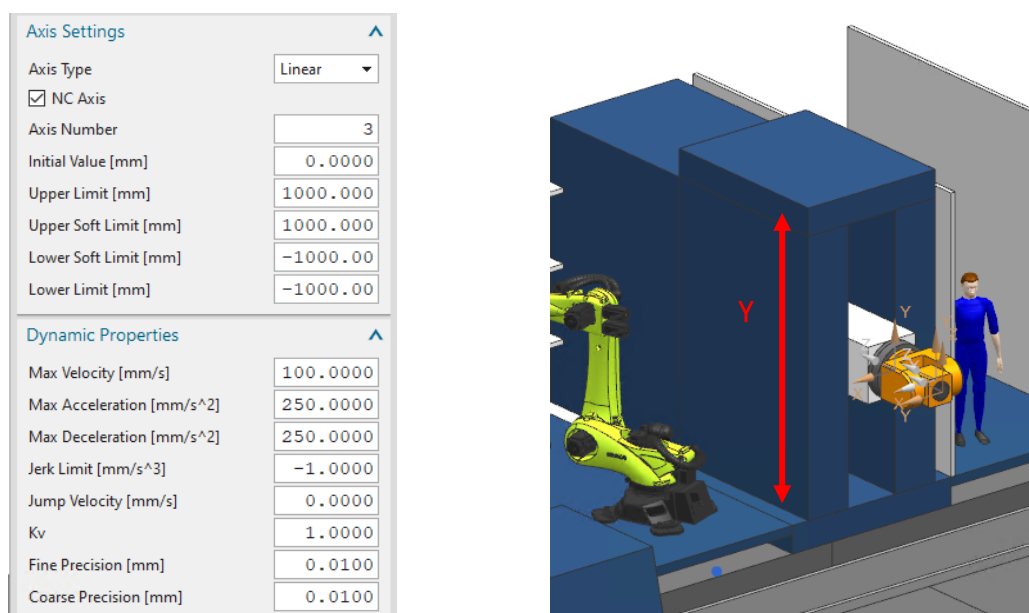
Posuvná strojní osa X umožňuje pojezd celé frézovací věže po loži frézovací části stroje. Nastavení parametrů osy X v prvotní fázi mechatronického konceptu je na obr. 105. Celkový rozsah pojezdu osy X je 17 500 mm včetně přejezdu pro výměnu příslušenství. Pracovní posuv je 16 000 mm.



Obr. 105 : Nastavení strojní osy X

#### 4.7.2.2 Posuvná strojní osa Y

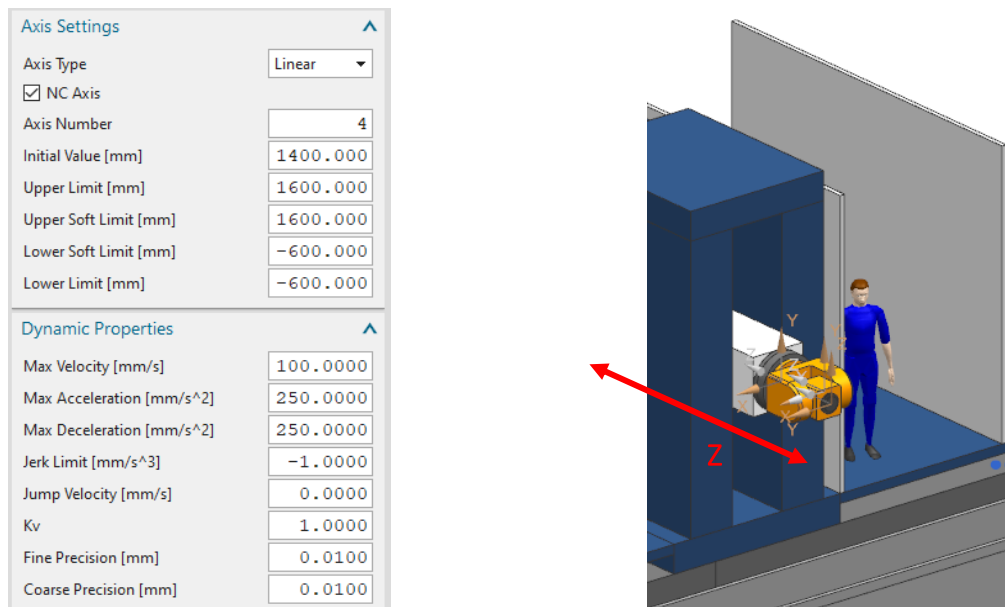
Posuvná strojní osa Y umožňuje pojezd vřeteníku ve stojanu frézovací věže. Nastavení osy Y v prvotní fázi mechatronického konceptu je na Obr. 106. Rozsah pojezdu osy Y je 2 000 mm.



Obr. 106 : Nastavení strojní osy Y

#### 4.7.2.3 Posuvná strojní osa Z

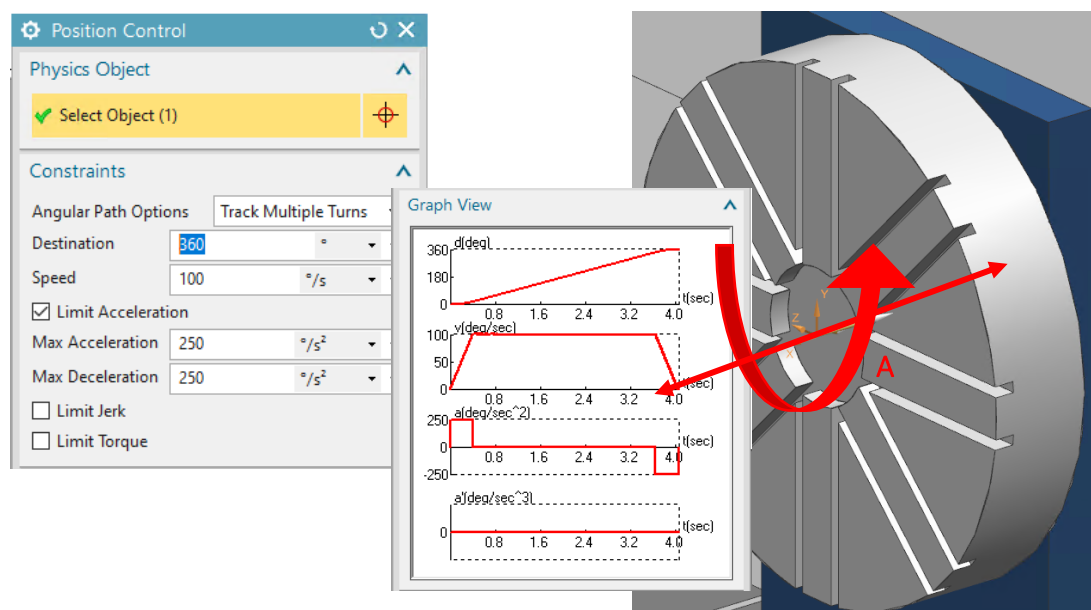
Posuvná strojní osa Z umožňuje výsuv pinoly z vřeteníku. Nastavení osy Z v prvotní fázi mechatronického konceptu je na obr. 107. Rozsah pojezdu osy Z je 2 200 mm.



Obr. 107 : Nastavení strojní osy Z

#### 4.7.2.4 Rotační strojní osa A

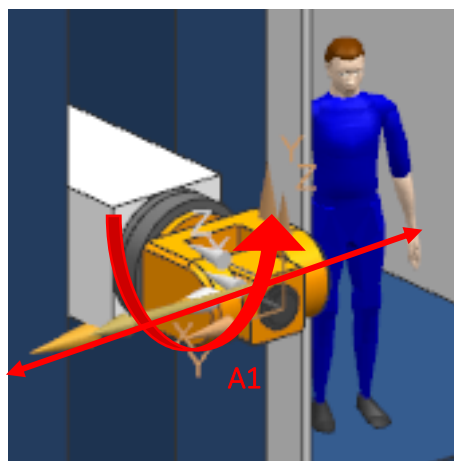
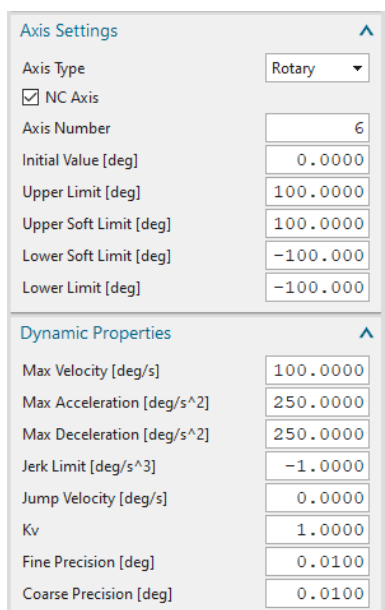
Rotační strojní osa umožňuje rotační pohyb lící desky soustružnické části. Nastavení osy A v prvotní fázi mechatronického konceptu je na obr. 108. Způsob řízení osy se mění v závislosti na konfiguraci stroje pro soustružení nebo frézování.



Obr. 108 : Nastavení strojní osy A

#### 4.7.2.5 Rotační strojní osa A1

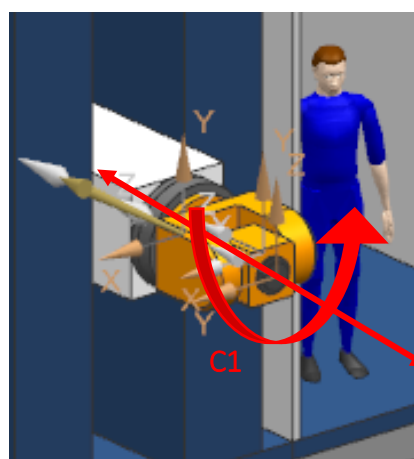
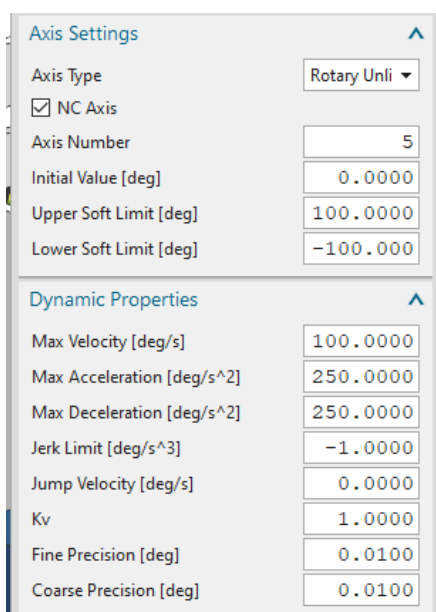
Rotační strojní osa A1 umožňuje naklápění frézovací hlavy. Nastavení osy A1 v prvotní fázi mechatronického konceptu je na obr. 109. Rozsah osy je  $\pm 100^\circ$  od počáteční polohy.



Obr. 109 : Nastavení strojní osy A1

#### 4.7.2.6 Rotační osa C1

Rotační strojní osa C1 umožňuje naklápění frézovací hlavy. Nastavení osy C1 v prvotní fázi mechatronického konceptu je na obr. 110. Osa se může plynule otáčet v celém rozsahu  $360^\circ$  bez limitů.



Obr. 110 : Nastavení strojní osy C1

#### 4.7.2.7 Rotační osa pracovního vřetena S

Nastavení rotační osy vřetena S je na obr. 111.

Axis Settings	
Axis Type	Spindle
<input type="checkbox"/> NC Axis	
Axis Number	7
Initial Value [deg]	0.0000
Upper Soft Limit [deg]	100.0000
Lower Soft Limit [deg]	-100.0000
Dynamic Properties	
Max Velocity [deg/s]	100.0000
Max Acceleration [deg/s <sup>2</sup> ]	250.0000
Max Deceleration [deg/s <sup>2</sup> ]	250.0000
Jerk Limit [deg/s <sup>3</sup> ]	-1.0000
Jump Velocity [deg/s]	0.0000
Kv	1.0000
Fine Precision [deg]	0.0100
Coarse Precision [deg]	0.0100

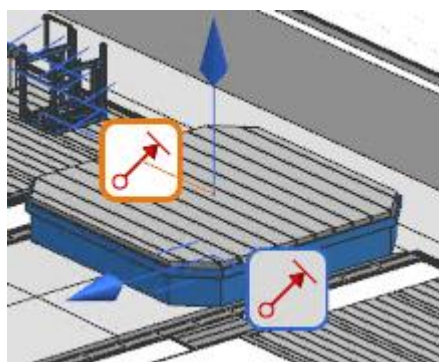


Obr. 111 : Nastavení strojní osy S

#### 4.7.3 Řízení pomocí signálů

V prostředí NX MCD jsou definovány vstupní a výstupní signály typů bool, int, nebo double, které lze použít přímo k řízení parametrů objektů simulace. Řízení polohy desky otočného stolu přímo signálem je na obr. 112.

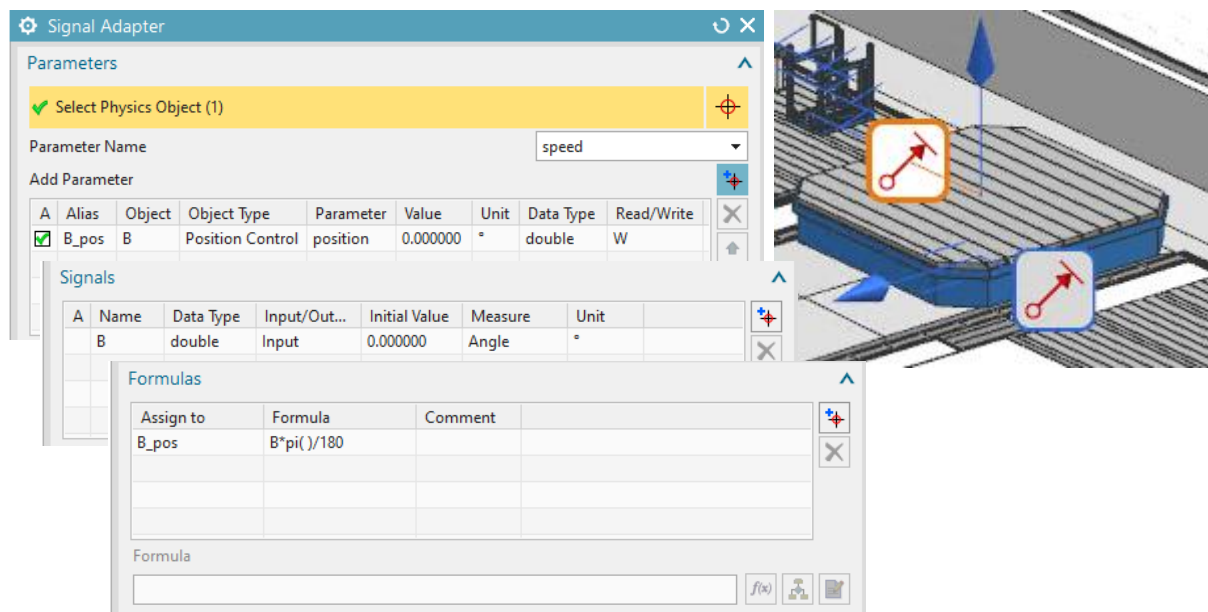
Signal	
Settings	
<input checked="" type="checkbox"/> Connect with Runtime Parameter	
<input checked="" type="checkbox"/> Select Physics Object (1)	
Parameter Name	position
IO Type	Output
Data Type	double
Measure	Angle
Initial Value	0.0000 °
Name	
OK Apply Cancel	



Obr. 112 : Řízení pozice přímo signálem

Na základě předchozích zkušeností je však doporučeno používat jako mezičlánek adaptér signálu, který umožňuje rozsáhlejší nastavení. Řízení přes signál adapter je na obr. 113.

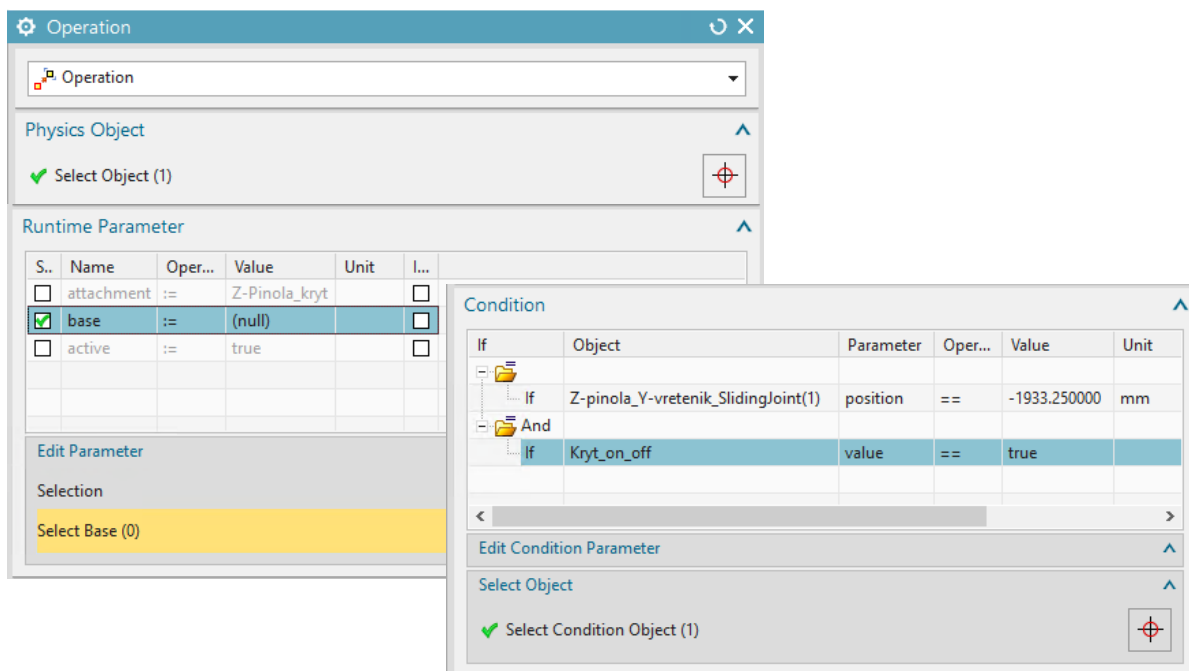




Obr. 113 : Řízení signálem přes signál adapter

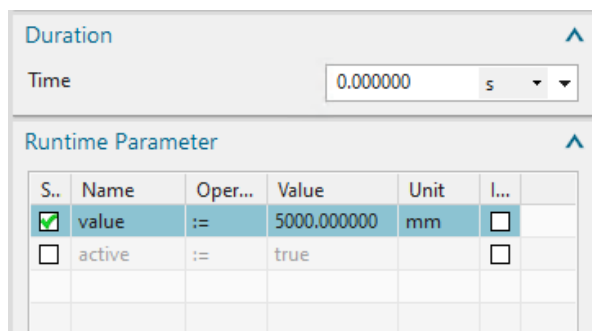
#### 4.7.3.1 Definice logiky v MCD

Ve fázi tvorby mechatronického konceptu není MCD napojeno na externí signály a veškeré pohyby a logika je realizována přímo v MCD. Vše je realizováno pomocí operací aktivovaných časem nebo podmínkou. Definice operace řízené podmínkou je na obr. 114. Pokud je dosaženo polohy v pickupu pro sejmutí krytu pinoly a byl je nastavena hodnota parametru Kryt\_on\_off pro sejmutí na true je rozpojena vazba držící kryt na pinole.



Obr. 114 : Definice operace řízené podmínkou

Pokud není definována podmínka, je operace řízena časem. Ukázka operace řízené časem, kdy je v čase 0 zahájen pohyb osy na polohu 5000, je na obr. 115.

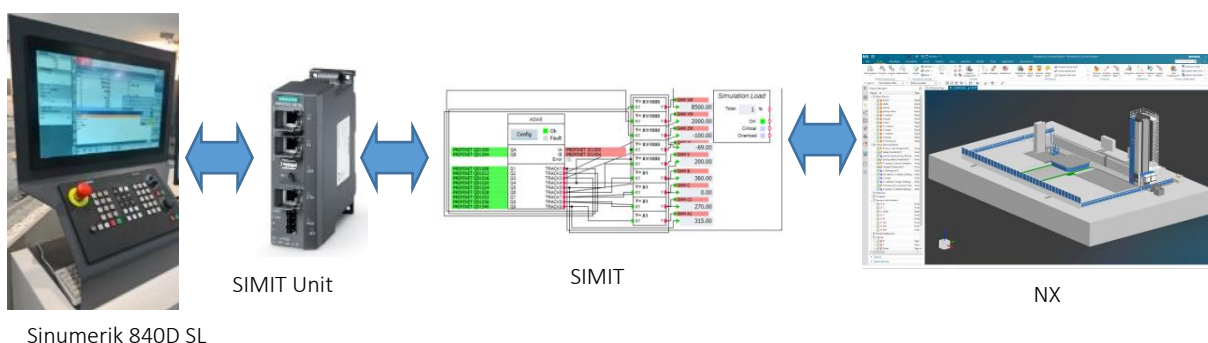


Obr. 115 : Definice operace řízené časem

Ve fázi virtuálního oživení je řízení operacemi nahrazeno řízením pomocí externích signálů. Veškerá logika je pak řešena pomocí reálného PLC.

#### 4.7.4 Virtuální oživení

Pro realizaci virtuálního oživení jsou do mechatronického modelu na straně NX MCD mapovány signály přicházející ze skutečného hardware přes prostředí aplikace SIMIT se simulační jednotkou SIMIT Unit PN.



Obr. 116 : SIMIT při virtuálním oživení obráběcího stroje

##### 4.7.4.1 Konfigurace hardware

Na straně Sinumerik je nutné implementovat Compile Cycle ADAS, který zajišťuje správnou interpolaci jednotlivých strojních os. Na obr. 117 je umístění modulu ADAS a potřebné nastavení v prostředí Sinumerik.



Obr. 117 : Compile Cycle ADAS



V systémových proměnných Sinumerik je dále nutné nastavit rozšiřující parametry pro Compile Cycle ADAS. Nastavení vstupní a výstupní adresy je na obr. 118. Hodnoty v Sinumerik musí odpovídat hodnotám v SIMATIC Manageru.

60974[0]	\$MN_CC_ACTIVE_IN_CHAN_ADAS		1H	po
60974[1]	\$MN_CC_ACTIVE_IN_CHAN_ADAS		0H	po
60974[2]	\$MN_CC_ACTIVE_IN_CHAN_ADAS		0H	po
61700	\$MN_CC_ADAS_LOGIC_ADDRESS_IN		1500	po
61701	\$MN_CC_ADAS_LOGIC_ADDRESS_OUT		1500	po

S...	Module	Order number	I Address	Q Address	Diagno	Comment
0	IM151-3PN-1-ADAS	6ES7 151-3A410-0AB0		1500...1507	1635*	
1	PM-E DC24.48V	6ES7 138-4CA50-0AB0			16358*	
2	4AI 12WIRE ST	6ES7 134-4GD00-0AB0	1500...1507			Rückmeldungs-Schnittstelle SIMIT-ADAS-Komponente
3	2AO U ST	6ES7 135-4FB01-0AB0		1500...1503		Kommandoschnittstelle 1 zu SIMIT-ADAS-Komponente
4	2AO U ST	6ES7 135-4FB01-0AB0		1504...1507		Kommandoschnittstelle 2 zu SIMIT-ADAS-Komponente
5	2AO U ST	6ES7 135-4FB01-0AB0		1508...1511		Platzhalter Achse 1

Obr. 118 : Příprava konfigurace Sinumerik 840D SL pro ADAS

Pro potřeby virtuálního oživení musí být všechny strojní osy nastaveny jako simulační. Změna parametrů v Sinumerik je na obr. 119.

10396	\$MN_PLCIO_NUM_BYTES_OUT	0	po
10397	\$MN_PLCIO_LOGIC_ADDRESS_OUT	0	po

30130[0]	\$MA_CTRLOUT_TYPE	0	po
----------	-------------------	---	----

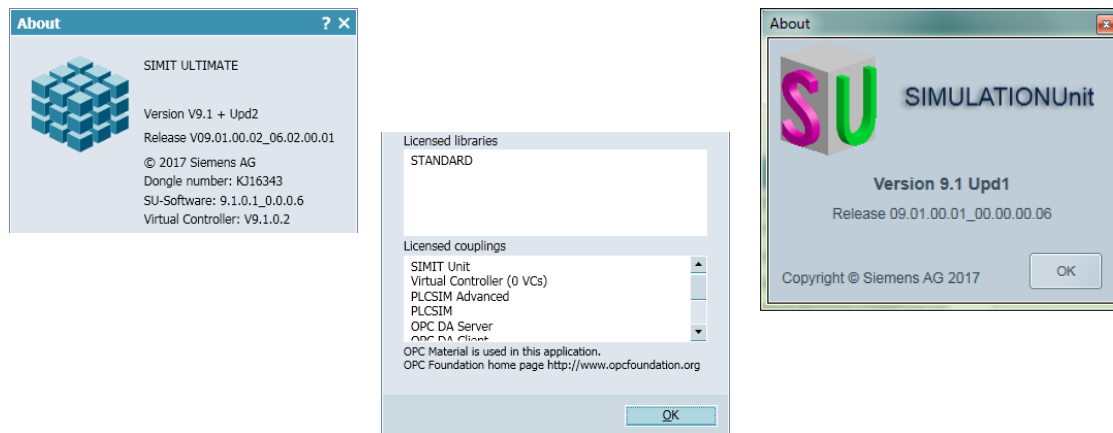
  

30240[0]	\$MA_ENC_TYPE	0	po
30240[1]	\$MA_ENC_TYPE	0	po

Obr. 119 : Nastavení parametrů pro simulační osu

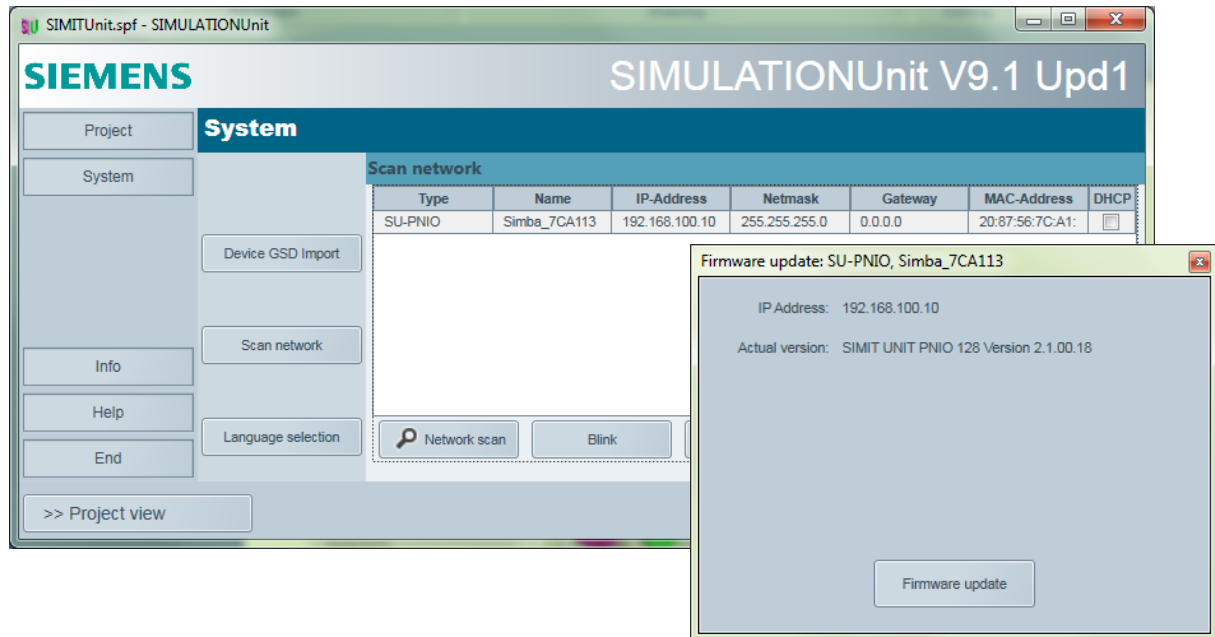
### Konfigurace síťových prvků

Síťová karta PC, na kterém je nainstalován software SIMIT a ovladače pro simulační jednotku má přiřazenu IP adresu 192.168.100.1 (maska 255.255.255.0). SIMIT a simulační jednotka SIMULATION Unit musí být instalovány ve stejné verzi. Zobrazení verze použitých nástrojů po instalaci je na obr. 120.



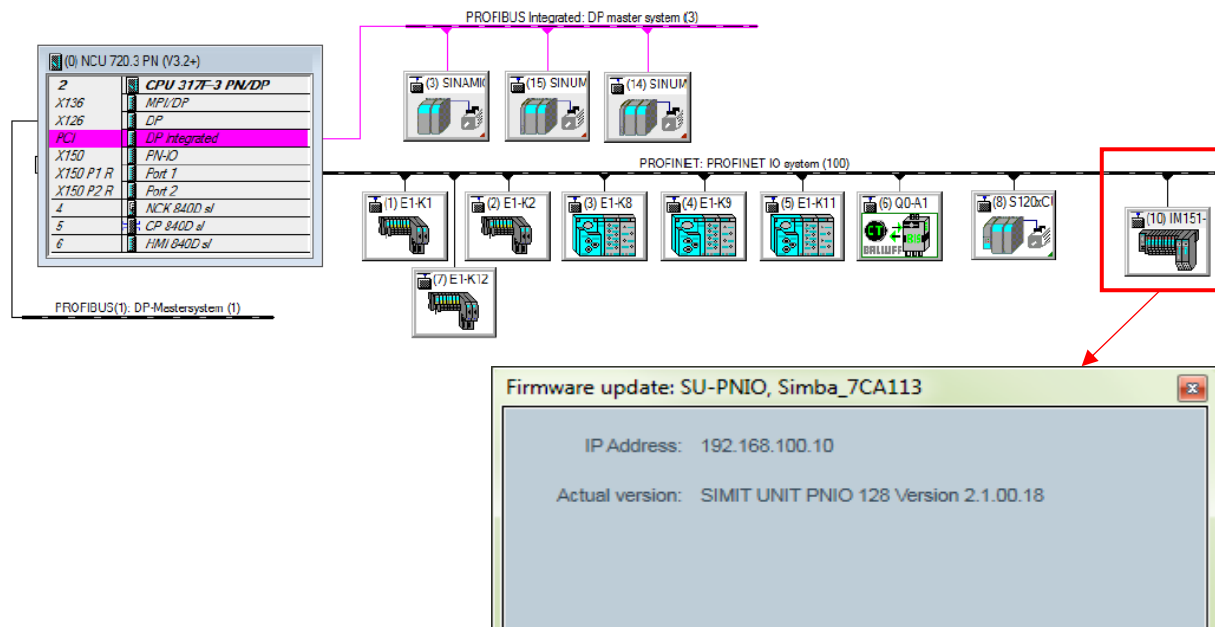
Obr. 120 : Verze SIMIT ULTIMATE a SIMULATION Unit

Pomocí ovladače je na SIMIT Unit nastavena IP adresa 192.168.100.10 (maska 255.255.255.0). Konfigurace je na obr. 121.



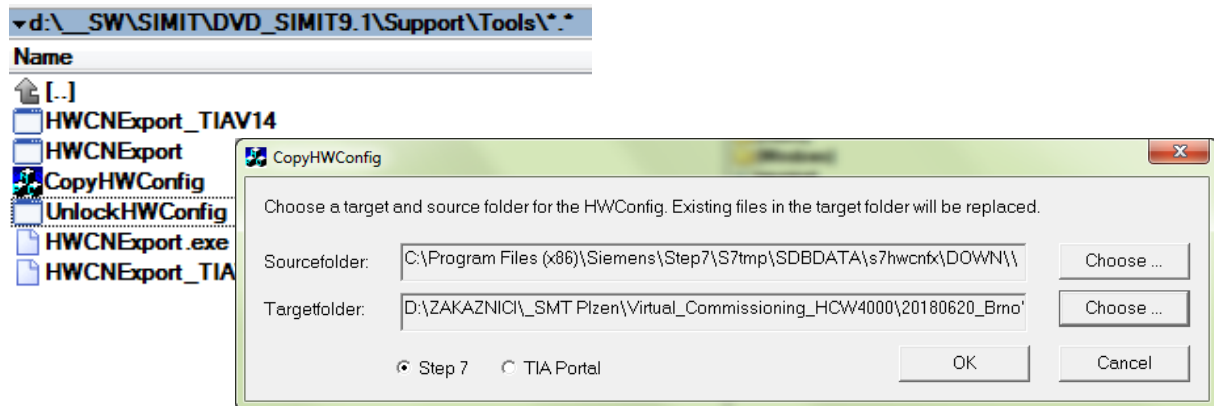
Obr. 121 : Konfigurace SIMIT Unit

Do konfigurace hardware pro Sinumerik v prostředí SIMATIC Manager je přidána analogová karta pro ADAS. Celková konfigurace včetně detailu karty ADAS je na obr. 122.



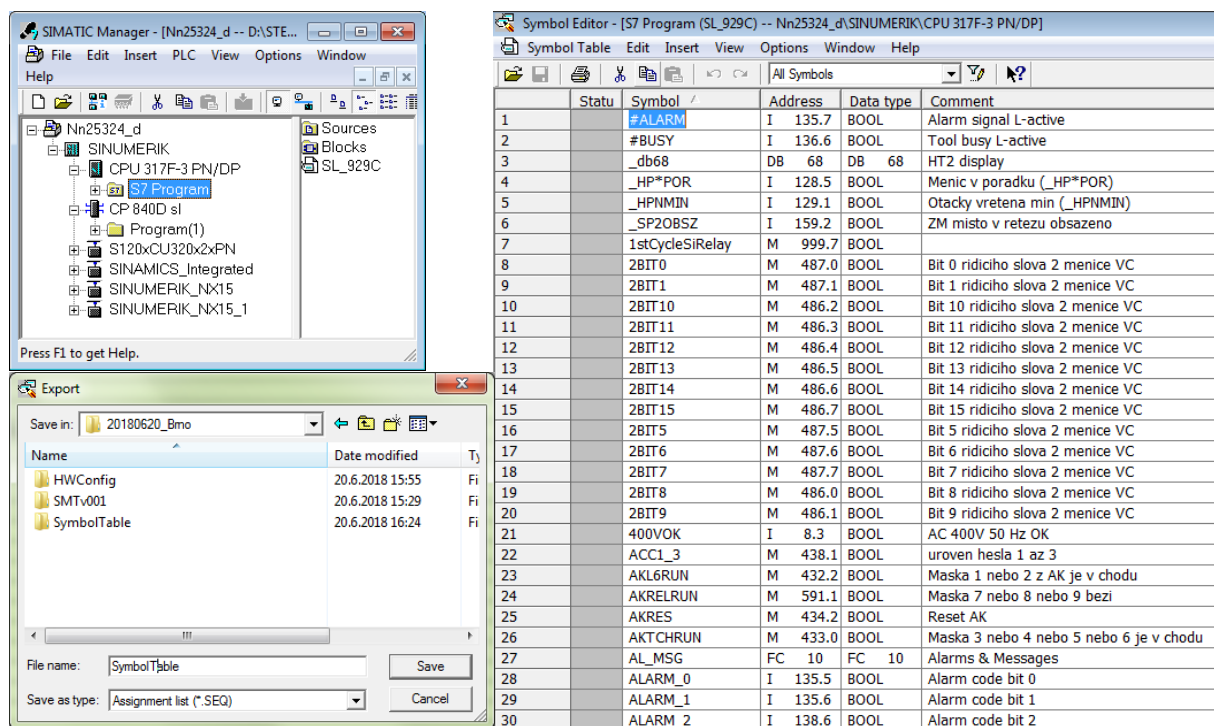
Obr. 122 : Konfigurace hardware pro Sinumerik

Hardwarovou konfiguraci je nutno exportovat pro následnou konfiguraci projektu v SIMIT. Export probíhá pomocí programů UnlockHWConfig a CopyHWConfig a je zobrazen na obr. 123.



Obr. 123 : Export hardwarové konfigurace

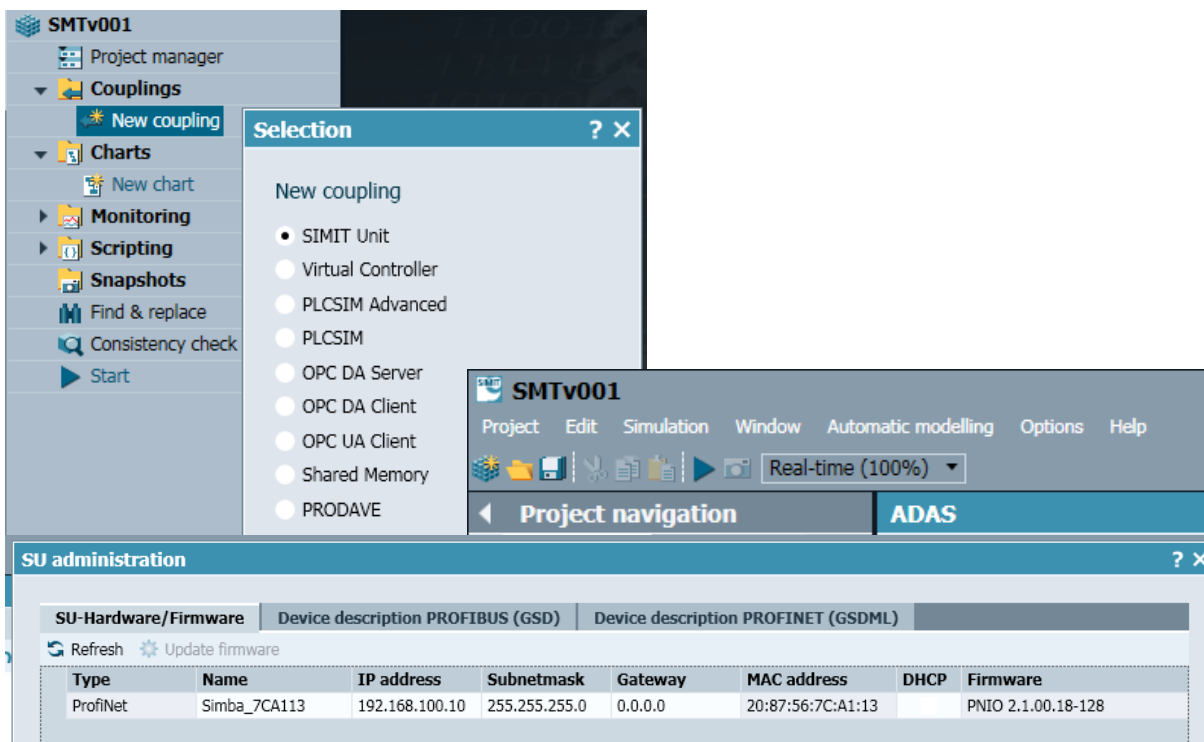
Dále je pro potřeby následného importu do projektu v prostředí SIMIT exportována v SIMATIC Manageru pomocí Symbol Editoru tabulka symbolů dle obr. 124.



Obr. 124 : Export tabulky symbolů

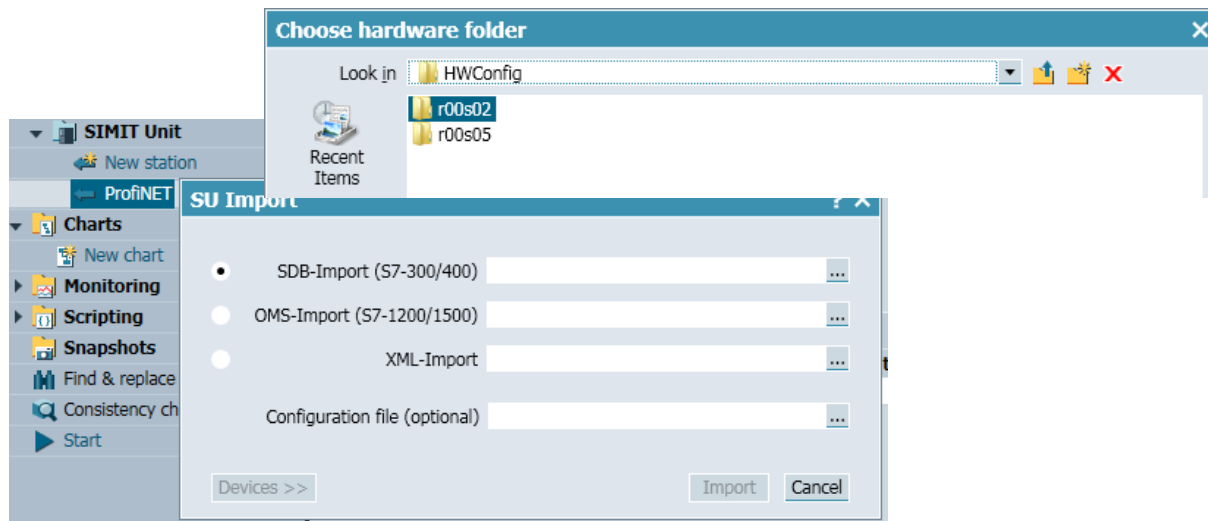
#### 4.7.4.2 Konfigurace SIMIT

Po vytvoření prázdného projektu v SIMIT je potřeba nastavit spojení se SIMIT Unit a importovat hardwarovou konfiguraci. Přidání SIMIT Unit v prostředí projektu v SIMIT je na obr. 125.



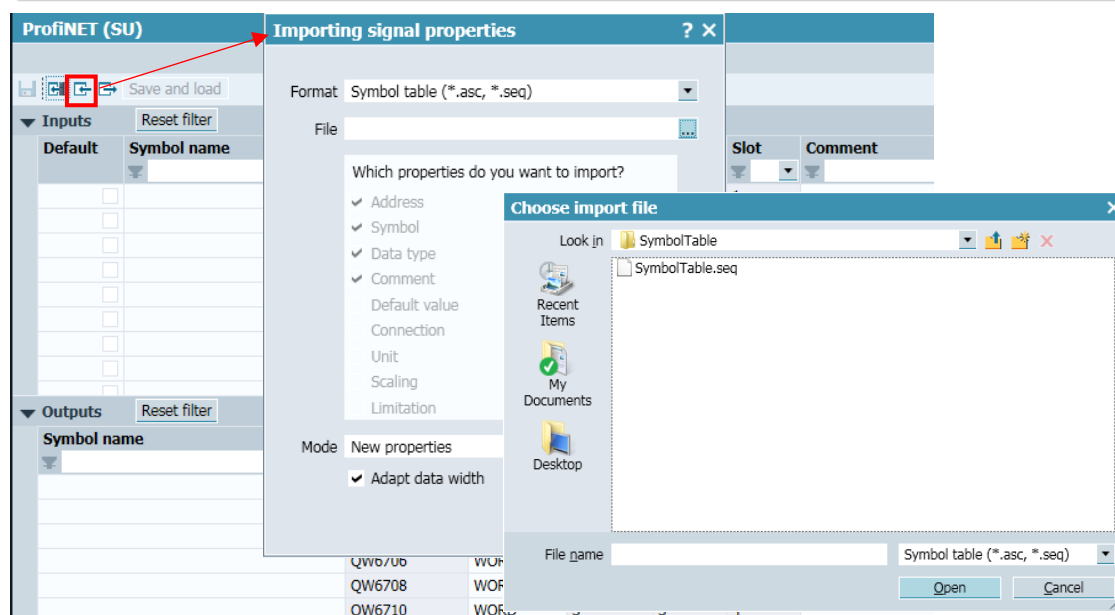
Obr. 125 : Přidání SIMIT Unit a její konfigurace

Import hardwarové konfigurace pro SIMIT Unit, jejichž export je popsán v předchozí kapitole, je na obr. 126.



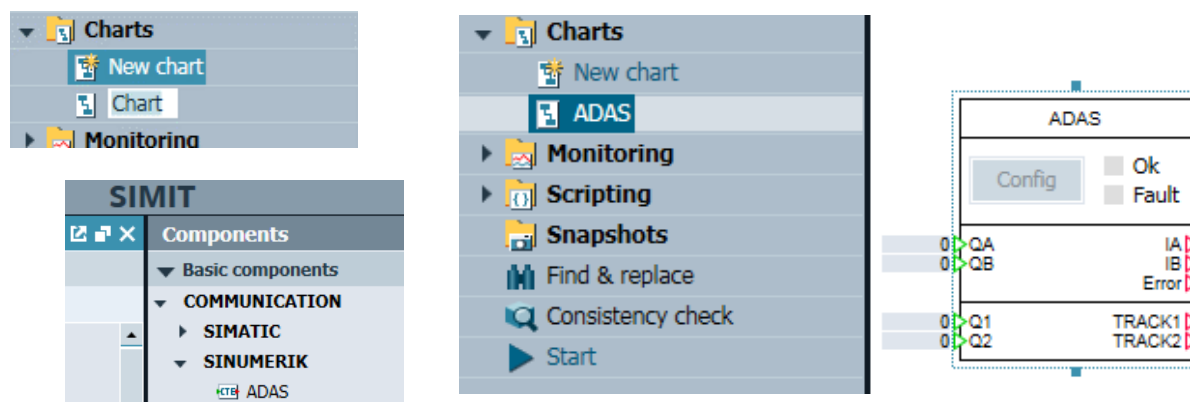
Obr. 126 : Import hardwarové konfigurace

Na rozhraní ProfiNET (SU) následuje import tabulky signálů, jejichž export byl popsán v předchozí kapitole. Import tabulky signálů je na obr. 127.



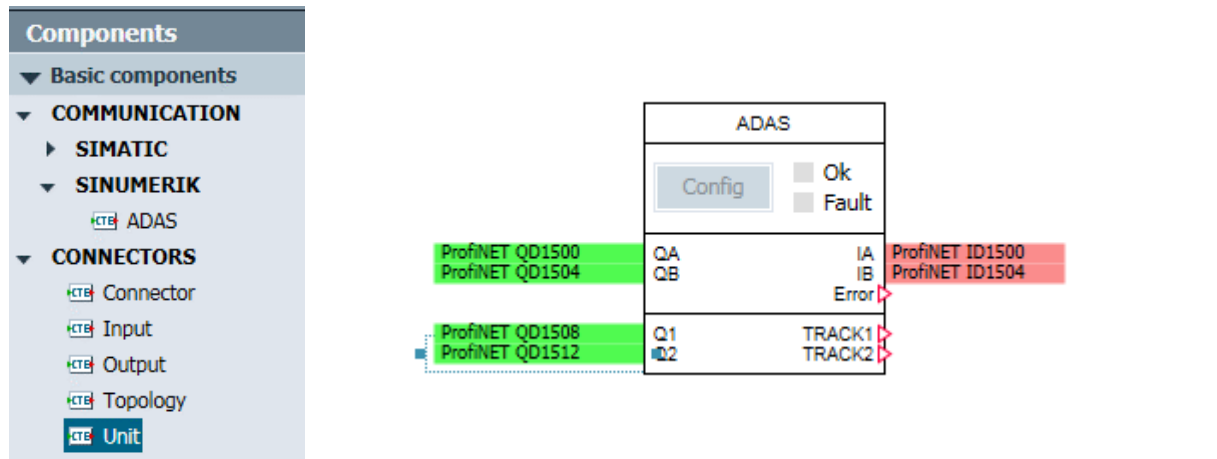
Obr. 127 : Import tabulky symbolů

Nyní je možné tvořit v prostředí SIMIT bloková schémata propojující signály ze strany hardware na rozhraní ProfiNET se signály na straně virtuálního modelu v NX Mechatronic Concept Designer. Základním blokem je blok ADAS, který zajišťuje přenos signálů pro pohyb strojních os. Postup vložení základního bloku ADAS z knihovny je znázorněno na obr. 128.



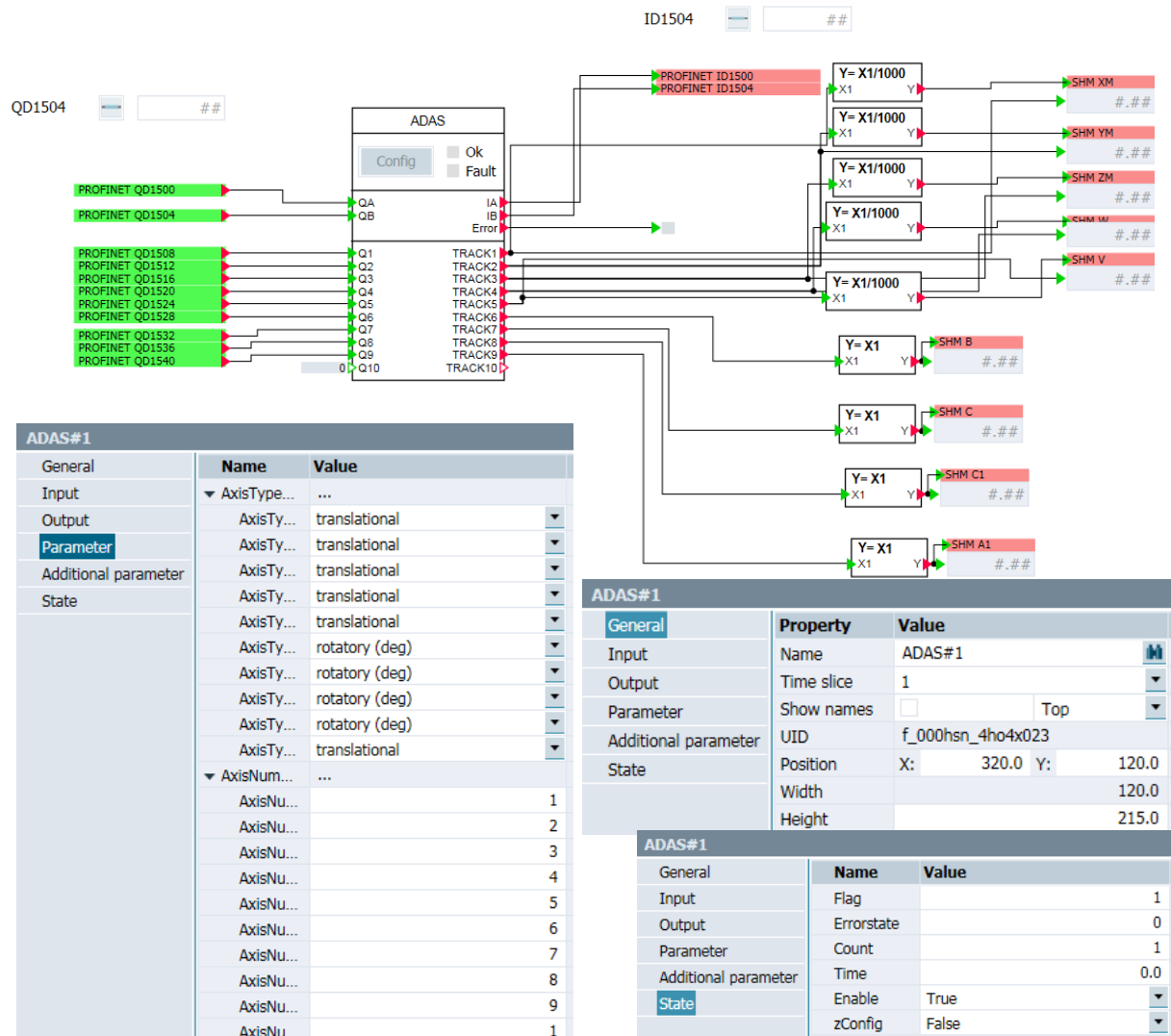
Obr. 128 : Vložení bloku ADAS

Do základního bloku jsou postupně napojovány jednotlivé vstupy a výstupy. Ukázka přidání vstupů a výstupů z ProfiNET je na obr. 129.



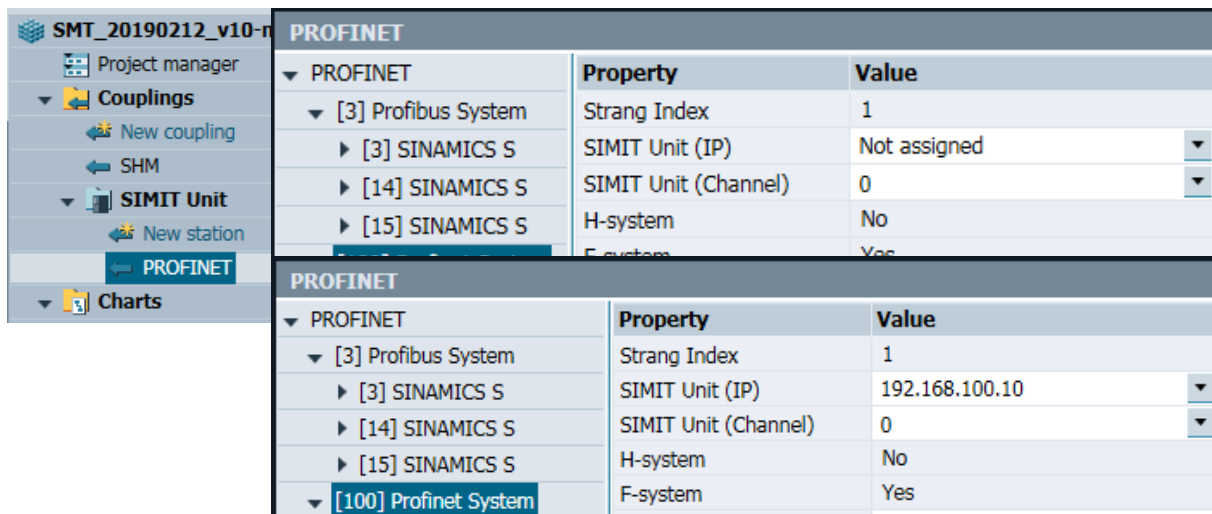
Obr. 129 : Definice vstupů a výstupů pro ADAS

Ukázka funkčního bloku ADAS konfigurovaného pro přenos signálů řízení strojních os z ProfiNET do Shared Memory (SHM) je na obr. 130.



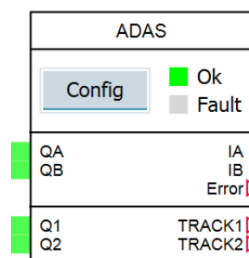
Obr. 130 : Funkční blok ADAS s konfigurací pro řízení strojních os

Zásadním nastavením pro funkční běh bloku ADAS je správné přiřazení IP adresy simulační jednotky. Nastavení musí být nejprve resetováno uložením hodnoty „Not assigned“ a následně nastaveno na správnou hodnotu (192.168.100.10) dle obr. 131.



Obr. 131 : Přiřazení IP adresy pro SIMIT Unit

Pokud je spuštěna simulace a ADAS je konfigurován správně, tak se po kliknutí na tlačítko „Config“ rozsvítí zelená kontrolka „Ok“ viz. obr. 132.



Obr. 132 : Simulace běží a ADAS je správně konfigurován

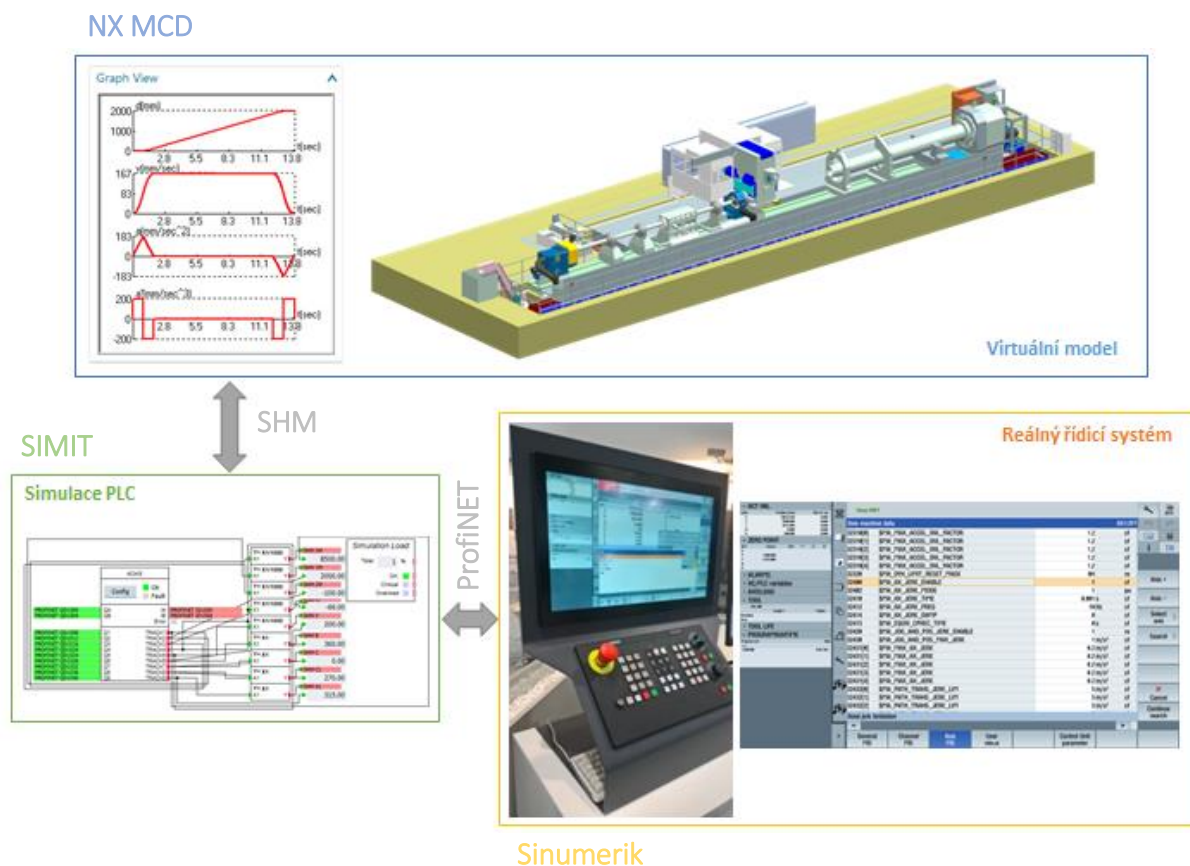
V případě, že svítí kontrolka „Fault“ je třeba zkontrolovat výše popsaná nastavení a opravit konfiguraci.

#### 4.7.4.3 Mapování signálů pro virtuálního oživení

Pro realizaci virtuálního oživení jsou do mechatronického modelu na straně NX MCD mapovány signály přicházející ze skutečného hardware přes prostředí aplikace SIMIT.

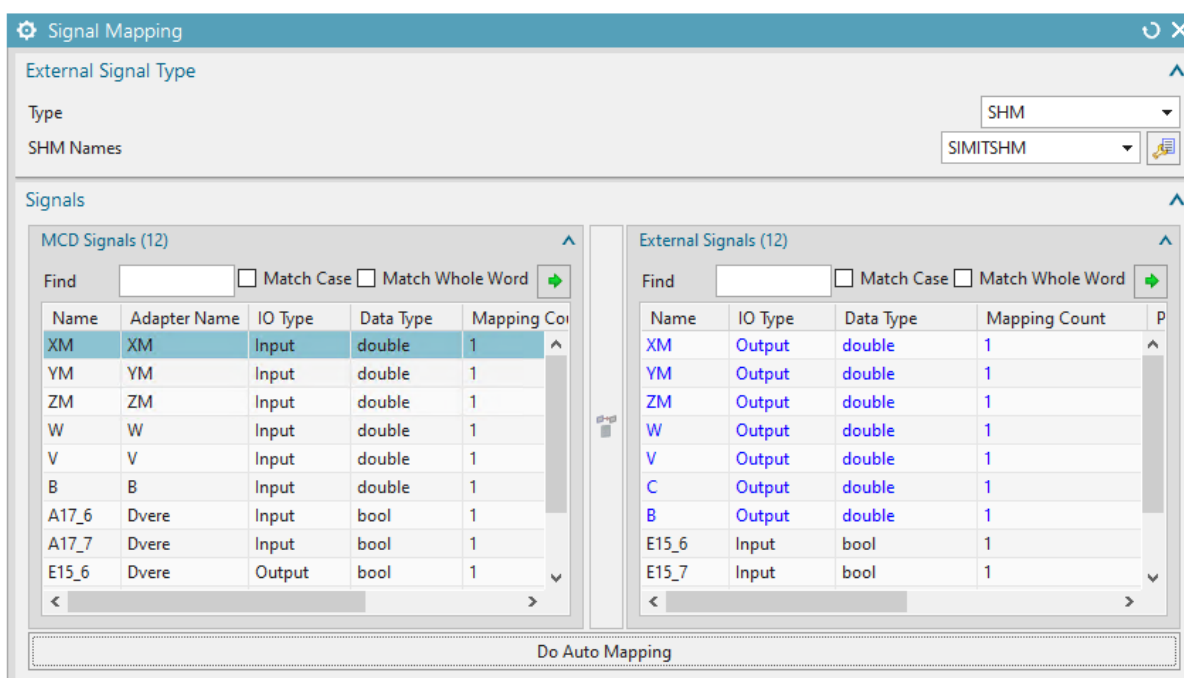
Signály jsou v prostředí SIMIT pomocí funkčních bloků transformovány mezi rozhraním ProfiNET a Shared Memory (SHM). Softwarové nástroje SIMIT a NX pak mezi sebou komunikují právě přes SHM. Schéma komunikace mezi jednotlivými komponentami virtuálního modelu při virtuálním oživení je na obr. 133.





Obr. 133 : Komunikace při virtuálním oživení

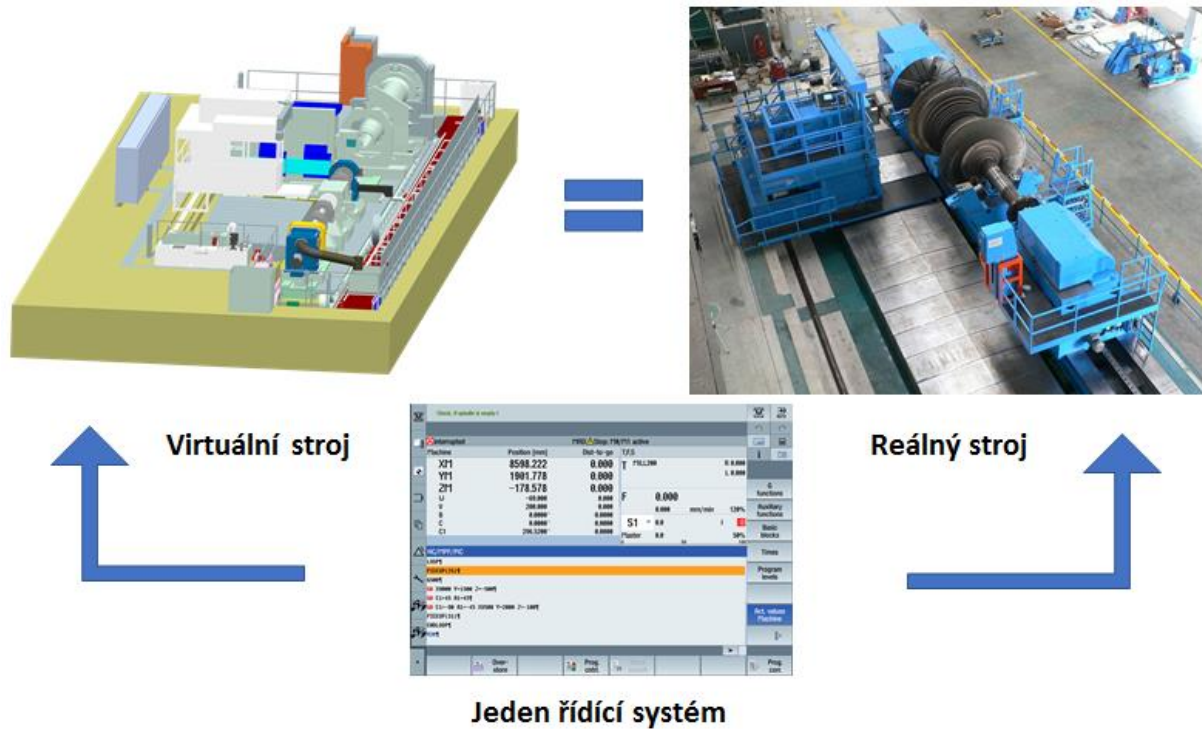
Mapování signálů probíhá ručně nebo automaticky. Pro automatický průběh je nutné dodržet konvenci stejných názvů pro signály, které mají být automaticky mapovány.



Obr. 134 : Mapování signálů v prostředí NX MCD

#### 4.7.4.4 Virtuální oživení

Na systému konfigurovaném dle popsaného postupu bylo realizováno samotné virtuální oživení, které spočívá v tvorbě PLC a nastavení řídicího systému ve virtuální fázi. Základní princip, tedy že stejný řídicí systém je použit pro virtuální i reálný stroj je na obr. 135.



Obr. 135 : Princip řízení reálného a virtuálního stroje (tzv. Digital Twin)

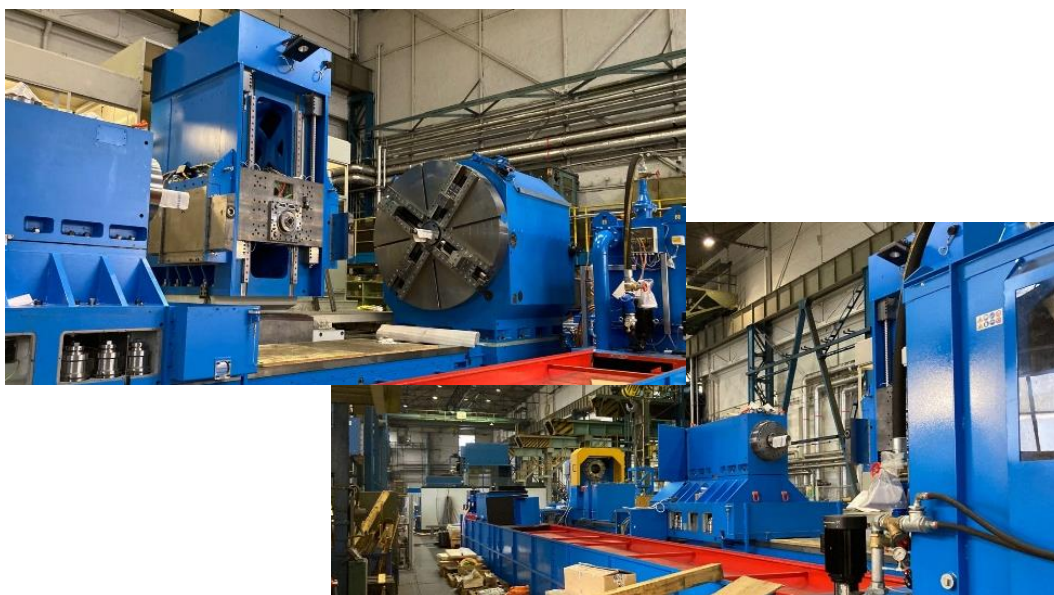
#### 4.7.5 Zhodnocení

V prostředí Mechatronic Concept Designer (MCD) byla provedena stavba virtuálního mechatronického modelu multifunkčního stroje S-MT v provedení s opcí hlubokého vrtání. Model digitálního dvojčete, s možností ovládní z reálného ovládacího panelu, byl prezentován na výstavě EMO Hannover 2019 jako výsledek společného vývoje ŠMT, ZČU a f. Siemens.



*Obr. 136 : Virtuální mechatronický model stroje S-MT na EMO Hannover 2019*

Reálný stroj bude testován a expedován v roce 2021. Sestava reálného stroje je na obr. 137.



*Obr. 137 : Sestava reálného stroje před testováním*

## 4.8 Zhodnocení

### 4.8.1 Přínosy realizace projektu v optimalizovaném PLM

Na základě poznatků z realizace projektu v optimalizovaném prostředí PLM systému s integrací CAx byly vyhodnoceny následující přínosy:

- Navržená struktura objektů definovaná ve vytvořeném datovém modelu umožňuje snadnou orientaci uživatele a vylepšuje základní funkcionalitu systému optimalizací na základě potřeb firmy.
- PLM systém řeší problematiku spolupráce uživatelů na projektu. Uživatel jasně vidí, které soubory modifikují jeho kolegové a má možnost si zarezervovat volný soubor pro úpravy. V průběhu řešení projektu byla umožněna snadná spolupráce mezi pracovištěm Škoda Machine Tool a.s. a pracovištěm Západočeské univerzity.
- Vyhledávání položek se výrazně zrychlilo. Pomocí vyhledávání referencí lze snadno zjistit, kde je díl použit a analyzovat tak například dopad realizovaných změn.
- Vizualizace 3D dat v prostředí PLM systému umožňuje i netechnickým uživatelům získat snadno informace a zorientovat se ve struktuře produktu.
- Správa kusovníku v prostředí PLM zrychlila elementární úpravy jako je například výměna dílu za díl nebo přidání položek kusovníku.
- Zavedením tzv. přesných kusovníků bylo dosaženo zachování kusovníku v takové podobě, v jaké byl vydán do výroby.
- Využití nadstavbových programů vyvinutých autorem disertační práce v prostředí NXOpen zrychlilo a zjednodušilo rutinní činnosti uživatelů.

### 4.8.2 Přínosy aplikace metodik

Na základě poznatků z aplikace metodických postupů definovaných v předchozí kapitole byly vyhodnoceny následující přínosy:

- Použitím principu symetrické soustružnické části stroje se předešlo problémům s deformací koníka a následnému posunutí osa rotace obrobku při obrábění.
- Realizace svařenců dle navržené metodiky zrychlila a zjednodušila konstrukční proces.
- Vhodnou aplikací numerických simulací bylo dosaženo návrhu dostatečně tuhých nosných struktur se snadnou vyrobiteľností.
- Aplikací virtuálního oživení bylo umožněno prověřovat funkce stroje ještě před jeho výrobou a zároveň bylo možné prezentovat dosud nerealizovaný stroje na veletržích.

## 5 Závěr

Cílem disertační práce byla optimalizace využívání CA technologií pro vývoj technického zařízení. Vzhledem k tomu, že Katedra konstruování strojů dlouhodobě spolupracuje s předním výrobcem těžkých obráběcích strojů Škoda Machine Tool a.s., bylo toto téma zasazeno právě do průmyslového odvětví těžkých obráběcích strojů. Práce se zaměřuje na komplexní metodickou podporu implementace a využívání CAx nástrojů specifikovanou pro toto odvětví.

V úvodní části je uveden strukturovaný přehled jednotlivých dostupných softwarových nástrojů s ohledem na jejich potenciál využití ve specifikované oblasti. Zvláštní důraz je kladen na objasnění zásadních pojmů a principů, jako jsou PLM (Product Lifecycle Management), CAD (Computer Aided Design) nebo Digitální dvojče (Digital Twin).

Rozsah stanoveného tématu je podroben literární rešerši, která obsahuje množství především zahraničních článků a publikací zabývajících se danou problematikou. Rešerše se přímo nevyhraňuje pouze na oblast těžkých obráběcích strojů, ale na problematiku CA systémů obecně. Existuje zde totiž předpoklad možné aplikace, nebo modifikace principů aplikovaných v progresivnějších průmyslových odvětvích jako je například letectví nebo automobilový průmysl.

Optimalizace využití CA technologií v těžkých obráběcích strojích vychází z poznatků získaných dílčí výzkumnou činností autora. Navržené řešení stojí na základech platformy komerčního PLM systému s integrací CAx nástrojů a moderních principech virtualizace. Obsahem disertační práce je autorem optimalizovaný datový model PLM systému, který byl implementován do prostředí výrobního podniku. Důraz byl kladen na maximální přizpůsobení systému potřebám vývoje těžkých obráběcích strojů. Pro maximální využitelnost systému bylo navrženo a postupně vylepšováno přizpůsobení uživatelského prostředí PLM a CAx systému, tak aby odpovídalo požadavkům konstruktéra. S využitím vývojového prostředí NXOpen bylo navrženo několik aplikací, které automatizují rutinní činnosti. Velkým přínosem jsou metodiky práce v prostředí PLM a CAx systému, které jasně definují postupy pro vývojové činnosti. Jako příklad je zde uvedena metodika návrhu svařenců, nebo metodika tvorby konfigurovatelných modelů. Numerické analýzy nejsou využívány pouze k ověření návrhu, ale aplikují se již v prvotních fázích vývoje. V neposlední řadě byla implementována metodika virtuálního oživení, která umožňuje zkrátit průběžnou dobu realizace projektu.

Ověření metodiky bylo realizováno a popsáno na vývojovém projektu TRIO FV10219 „Víceúčelové soustružnické centrum pro obrábění rozměrných a tvarově složitých součástí rotačního charakteru, určených pro energetiku a obnovitelné zdroje“. Projekt byl realizován v prostředí PLM systému implementovaném autorem a v jeho průběhu byly využity autorem navržené metodiky práce s PLM a CAx systémem a další poznatky získané v průběhu řešení disertační práce. V rámci projektu vznikl také virtuální model, tzv. digitální dvojče navrženého nového stroje, na jehož realizaci se autor významnou měrou podílel. Digitální dvojče pak bylo autorem prezentováno i na mezinárodním veletrhu ve Stuttgartu.

## 5.1 Shrnutí přínosu disertační práce

Disertační práce obsahuje ověřený metodický postup optimalizace využití CA technologií pro vývoj technického zařízení zaměřený na oblast těžkých obráběcích strojů. Mezi hlavní přínosy disertační práce patří:

- Návrh „optimalizovaného“ datového modelu PLM systému, který byl ověřen nasazením do společnosti vyrábějící těžké obráběcí stroje a využit při vývoji prototypu zcela nového multifunkčního obráběcího stroje.
- Technologické poznatky týkající se základních principů konstrukce nosných dílů těžkých obráběcích strojů, především pak poznatky týkající se konstrukce soustruhů, které byly využity při vývoji prototypu multifukčního centra.
- Inovovaný princip kompenzace padání pinoly vlivem gravitace aplikovaný v konstrukci frézovací věže multifunkčního centra, která je součástí průmyslového vzoru.
- Metodika implementace principu digitálního dvojčete v těžkých obráběcích strojích, která byla ověřena realizací na dvou strojích a prezentována na mezinárodních strojírenských veletrzích ve Stuttgartu a Hannoveru.

## 5.2 Podněty pro budoucí výzkum

Vzhledem k neustále se vyvíjejícím CA technologiím nelze realizované řešení v oblasti optimalizace využívání CA technologií pro vývoj obráběcích strojů v žádném případě považovat za finální. V současné době se jako zajímavý směr pro budoucí výzkum jeví především:

- Rozšiřování využití PLM platformy, do dalších oddělení výrobní společnosti jako jsou například výrobní technologie, výroba nebo montáž, implementací modulů pro technologické postupy a montážní návodky.
- Propojení PLM systému s ERP systémem a zajištění sdílení informací.
- Zlepšování metodiky virtuálního oživení a automatizace rutinních činností souvisejících s přípravou virtuálního modelu.

## 6 Citovaná literatura

- [1] TD-IS - PLM Správa dokumentace. [Online] TD-IS. <https://td-is.cz/plm-sprava-dokumentace/>
- [2] **OVTCHAROVA, J. G.** Virtual engineering: principles, methods and applications. In: DS 60: Proceedings of DESIGN 2010, the 11th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia. 2010.
- [3] **EZELL, Stephen** Why manufacturing digitalization matters and how countries are supporting it. Information Technology & Innovation Foundation, 2018, 66.
- [4] cadenas.in. [Online] <https://www.cadenas.in/in/products/ecatalogsolutions/technology-service/multi-cad>.
- [5] **LI, Jixing, et al.** Rapid structure design and automated adjustment of missile body. Procedia CIRP, 2016, 56: 84-89.
- [6] **JAVVADI, LakshmiNadh.** Services Oriented Architecture in PLM. 2011.
- [7] **HUANG, David Te-Yen; LEE, Jyh-Jon.** On obtaining machine tool stiffness by CAE techniques. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41.8: 1149-1163.
- [8] **WU, Bi-Chu; YOUNG, Gin-Shu; HUANG, Te-Yen.** Application of a two-level optimization process to conceptual structural design of a machine tool. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40.6: 783-794.
- [9] **KEHL, Gerhard; BLANK, David; HÖGER-RIEDEL, Christiane.** Finite Element Analysis as a response to frequently asked questions of machine tool mechanical design-engineers. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. p. 01001.
- [10] **KONG, Dezhong; SHEN, Jingfeng; LI, Baohui.** Finite-element Analysis and Optimization for the Column of Numerically Controlled Triaxial Deep Hole Drilling Machine. Mechanical Engineering Research, 2012, 2.1: 107.
- [11] **LI, Baotong; HONG, Jun; LIU, Zhifeng.** Stiffness design of machine tool structures by a biologically inspired topology optimization method. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 84: 33-44.
- [12] TechSoft Engineering. Optimalizace | TechSoft Engineering, spol. s r.o. [Online] 2017. [Citace: 22. 8 2017.] <http://www.techsoft-eng.cz/vypocetni-analyzy/optimalizace/>.
- [13] **KROLL, L., et al.** Lightweight components for energy-efficient machine tools. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2011, 4.2: 148-160.
- [14] **LAW, Mohit; ALTINTAS, Yusuf; PHANI, A. Srikantha.** Rapid evaluation and optimization of machine tools with position-dependent stability. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 68: 81-90.
- [15] **ZULAIKA, J. J.; CAMPA, F. J.; DE LACALLE, LN Lopez.** An integrated process-machine approach for designing productive and lightweight milling machines. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51.7-8: 591-604.
- [16] **FAßBENDER, Heike; SOPPA, Andreas.** Machine tool simulation based on reduced order FE models. Mathematics and Computers in Simulation, 2011, 82.3: 404-413.
- [17] Virtual\_Commissioning\_General\_Presentation., SIEMENS, 2017.
- [18] Dokumentace : Mechatronic Concept Designer. [Online] Siemens PLM. <https://docs.sw.siemens.com/en-US/product/209349590/doc/PL20200507135732916.mechatronics/html/id1101745>.
- [19] Siement. First steps - instruction for virtual commissioning with SINUMERIK 840D sl. Erlangen : Siemens AG, 2017.