



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

VIRTUÁLNÍ DVOJČE A PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBA

VIRTUAL TWIN AND PREDICTIVE MAINTENANCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Kotrba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Tůma, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Martin Kotrba**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Tůma, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Virtuální dvojče a prediktivní údržba

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prediktivní údržba je v současnosti velice diskutovanou problematikou. Součástí této práce bude tvorba virtuálního dvojčete CNC frézky, kde bude kladen důraz především na pohonné mechanismy tohoto zařízení. Kalibrace virtuálního dvojčete pak bude provedena pomocí měření příslušných veličin u reálného stroje.

Cíle diplomové práce:

Rešerše v oblasti prediktivní údržby a virtuálního dvojčete.
Tvorba/úprava CAD modelu stroje.
Realizace testovacího cyklu při použití software MSC Adams.
Realizace měření obráběcího stroje za stejných podmínek jako simulace.
Vyhodnocení měření a kalibrace dvojčete.
Vlastní závěry a vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.

Twins with potential: Siemens - The magazine [online], 2018 [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/customer-magazine/en/home/industry/digitalization-in-machine-building/the-digital-twin.html>

Engineering: 5 Ways Industry 4.0 Will Impact Machine Tools [online], 2018 [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13084/5-Ways-Industry-40-Will-Impact-Machine-Tools.aspx>

Engineering: Peering into the Future of Machine Tools with Predictive Maintenance [online], 2018. [cit. 2018-10-29]. Dostupné z:

<https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/14626/Peering-into-the-Future-of-Machine-Tools-with-Predictive-Maintenance.aspx>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem virtuálního dvojčete křížového stolu MCV 754 QUICK od českého výrobce Kovošvit MAS. Rešeršní část popisuje základní principy metodiky prediktivní údržby a technologie virtuálního dvojčete. Praktická část zahrnuje zjednodušení výchozího modelu křížového stolu. Tento model byl následně převeden do simulačního software MSC Adams, kde byl optimalizován tak, aby jeho chování co nejpřesněji odpovídalo fyzickému zařízení. Na modelu byl následně provedeno několik simulací. Dále byl představen návrh prediktivní metody pro výpočet zbývající životnosti jednotlivých délkových úseků kuličkového šroubu. Simulace provedené na virtuálním dvojčeti sloužily jako zdroj dat pro vyzkoušení navrhované metody.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of a virtual twin of cross table MCV 754 QUICK from the Czech manufacturer Kovošvit MAS. The research part describes the basic principles of predictive maintenance methodology and virtual twin technology. The practical part includes a simplification of the initial cross table model. This model was then transferred to the simulation software MSC Adams, where it was optimized so that its behavior corresponds as closely as possible to the physical device. Several simulations were subsequently performed on the model. Then a concept for a predictive method for calculating the remaining service life of individual sections of the ball screw was presented. Simulations performed on a virtual twin served as a source of data to test the proposed method.

KLÍČOVÁ SLOVA

Prediktivní údržba, Virtuální dvojče, kuličkový šroub, životnost kuličkového šroubu, MSC Adams, optimalizace virtuálního dvojčete, výpočet odhadované životnosti, simulace výrobních strojů

KEYWORDS

Predictive maintenance, Virtual twin, ball screw, ball screw service life, MSC Adams, virtual twin optimization, service life calculation, machine tools simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOTRBA, Martin. *Virtuální dvojče a prediktivní údržba*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125044>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jiří Tůma.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Jiřímu Tůmovi, Ph.D. za ochotu, přístup, trpělivost, odborné rady a vedení při tvorbě této diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Tůmy, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26.6.2020

.....

Kotrba Martin

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	MOTIVACE	17
3	ÚDRŽBA	19
3.1	Reaktivní údržba	20
3.2	Preventivní údržba	20
3.2.1	Zavedení preventivní údržby do podniku	20
3.3	Prediktivní údržba.....	21
3.3.1	Zavedení prediktivní údržby do podniku.....	21
3.4	Vibrodiagnostika.....	22
3.4.1	Princip snímání vibrací	22
3.4.2	Snímače výchylky.....	23
3.4.3	Snímače rychlosti	24
3.4.4	Snímače zrychlení.....	24
3.4.5	Delta Shear akcelerometry (Obr. 6a).....	25
3.4.6	Planar Shear akcelerometry (Obr. 6b)	25
3.4.7	Akcelerometry s centrálním tlakovým namáháním (Obr. 6c)	25
3.4.8	Uchycení akcelerometrů	26
3.4.9	Frekvenční analýza vibrací	27
3.5	Termodiagnostika	27
3.6	Elektrodiagnostika	28
3.7	Tribodiagnostika	28
4	VIRTUÁLNÍ DVOJČE	29
4.1	Princip komunikace virtuálního dvojčete	29
4.1.1	Senzory	29
4.1.2	Data.....	29
4.1.3	Integrační prvky (integrators).....	29
4.1.4	Analytické prvky	29
4.1.5	Digitální dvojče	30
4.1.6	Akční členy (actuators).....	30
4.2	Vznik digitálního dvojčete.....	31
4.3	Provoz virtuálního dvojčete	31
4.4	Virtuální dvojče obráběcích strojů.....	31
4.4.1	DMG MORI Virtual Machine	32
4.4.2	Siemens Sinumerik ONE.....	32
5	VYTVOŘENÍ DIGITÁLNÍHO DVOJČETE	33
5.1	Popis fyzického dvojčete	34
5.2	Zjednodušení modelu.....	37
5.2.1	Metodika zjednodušování modelu	38
5.2.2	Zjednodušený model lože	38
5.2.3	Zjednodušený model saní	39
5.2.4	Zjednodušený model stolu	39
5.2.5	Zjednodušená sestava křížového stolu	40
5.3	Vytvoření virtuálního dvojčete v MSC ADAMS	40

5.3.1	MSC Adams	40
5.3.2	Přenesení zjednodušeného modelu do prostředí MSC Adams.....	42
5.3.3	Definice kinematických vazeb modelu	44
5.3.4	Definice dynamických vlastností modelu	45
5.3.5	Definování ložisek.....	46
5.3.6	Definice silového zatížení a pasivních odporů.....	49
5.3.7	Definice řízení pohybu stolu	52
5.3.8	Simulace funkčnosti modelu	53
5.4	Experiment na fyzickém zařízení	53
5.4.1	Experiment 1	55
5.4.2	Experiment 2	56
5.4.3	Experiment 3	58
5.5	Optimalizace virtuálního dvojčete.....	60
5.5.1	Přenesení rychlostní funkce do modelu virtuálního dvojčete	60
5.5.2	Optimalizace dynamického chování virtuálního dvojčete	60
5.6	Simulace funkčního virtuálního dvojčete.....	62
6	NÁVRH PREDIKTIVNÍ METODY PRO VÝPOČET ŽIVOTNOSTI KULIČKOVÉHO ŠROUBU.....	65
6.1	Kuličkový šroub	65
6.2	Konvenční metoda výpočtu životnosti KŠ.....	65
6.2.1	Aplikace konvenční metody	66
6.3	Návrh modifikace prediktivní metody životnosti KŠ.....	67
6.4	Aplikace navrhované metody	68
6.4.1	Aplikace navrhované metody - analýza simulace 1	68
6.4.2	Aplikace navrhované metody – analýza simulace 2	70
6.4.3	Aplikace navrhované metody – analýza simulace 3	71
6.5	Zhodnocení výsledků simulací	74
6.6	Zhodnocení navrhované metody	74
6.7	Další aplikace metody	74
7	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	75
8	ZÁVĚR.....	77
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	79
10	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK....	83
10.1	Seznam zkratk.....	83
10.2	Seznam symbolů.....	83
10.3	Seznam obrázků.....	84
11	SEZNAM PŘÍLOH	87

1 ÚVOD

V dnešní době vzniká velký nátlak na výrobce obráběcích strojů, aby jejich výrobky vykonávaly svou činnost s minimální mírou poruchovosti. Z pohledu zákazníka znamená každá závažná porucha zpomalení výroby a ztrátu zisku. Z průmyslové praxe je známo, že neexistuje „dokonale bezporuchové zařízení“. Aby se předcházelo závažnější poruše, je třeba na stroji provádět pravidelnou údržbu.

Nejnovějším trendem vedení údržby je tzv. prediktivní údržba, která pomocí digitálních technologií a měřicí techniky měří a zaznamenává aktuální stav stroje. Vyhodnocením naměřených dat lze přesněji zjistit aktuální technický stav zařízení. Z odhadovaného technického stavu pak lze určit počet výrobních cyklů do poruchy, nebo ztráty požadované přesnosti. Na základě těchto informací může provozovatel stroje naplánovat opravu stroje tak, aby ještě nedošlo k jeho poškození a zároveň aby oprava minimálně ovlivnila chod podniku.

Vzhledem k nárůstu povědomí veřejnosti o průmyslu 4.0, investují výrobci i provozovatelé strojů do vývoje digitálních technologií nemalé částky za účelem optimalizace výroby. Při správné aplikaci mohou tyto technologie výrazně snížit náklady na vývoj a provoz daného zařízení. Ušetřený zisk tak může provozovateli zajistit stabilitu na trhu a možnost investice do dalšího vývoje.

Dá se očekávat, že přechod podniku na systém prediktivní údržby je z počátku velmi komplikovaný, nicméně z dlouhodobého hlediska toto řešení výrazně zlepší chod podniku snížením počtu závažnějších poruch. Vzhledem k pokroku digitalizace a měřicí techniky se náklady na zavedení prediktivní údržby stále snižují. Zároveň se na trhu objevuje více firem, jež se specializují právě na zavedení prediktivní údržby.

2 MOTIVACE

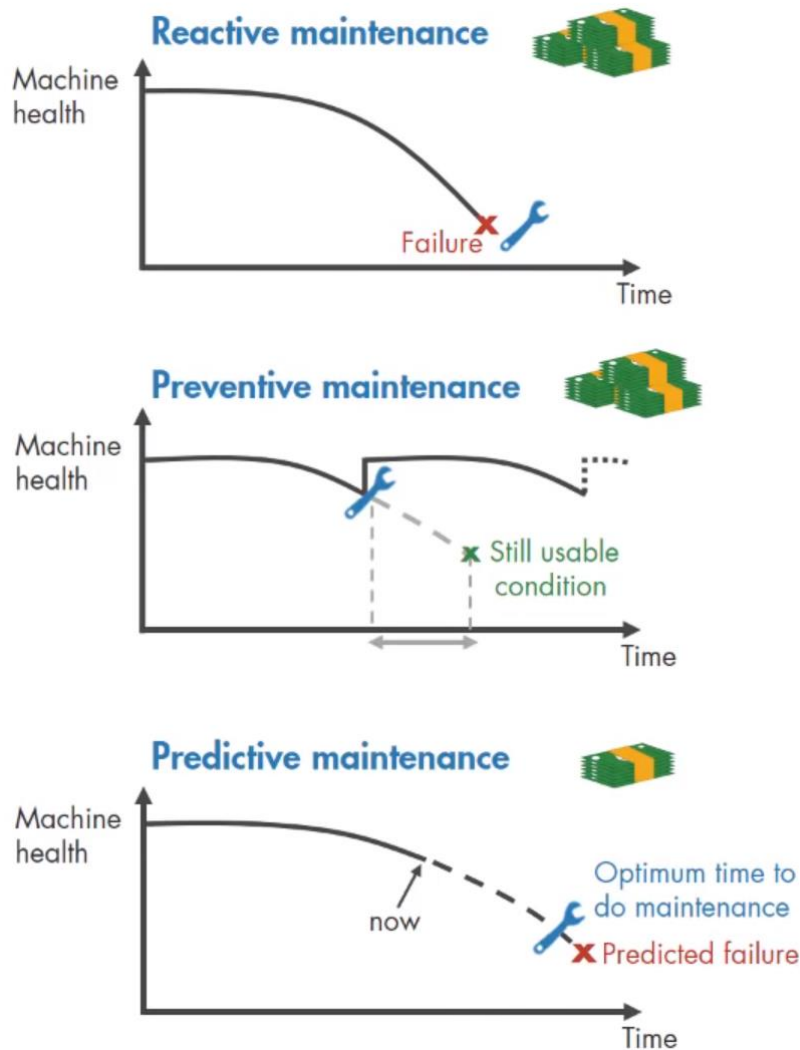
Motivací pro tvorbu této diplomové práce pro mě bylo zužitkování nabraných znalostí ve svém bývalém zaměstnání na oddělení preventivní a prediktivní údržby ve firmě Bosch Diesel Jihlava. Dále výzva k vypracování něčeho od základu dle vlastních kritérií. Zároveň tato práce částečně navazuje na mou bakalářskou práci, kde byl předložen návrh pro aplikaci Průmyslu 4.0 na pracoviště v prostorách dílny UVSSR VUT FSI, kde byl mimo jiné předložen i stručný návrh na systém prediktivní údržby.

3 ÚDRŽBA

Každé zařízení má určitou životnost. Tato životnost závisí na kondici jednotlivých komponent. Aby zařízení fungovalo bezproblémově, je třeba na něm provádět pravidelnou údržbu. Náklady na údržbu tvoří značnou část provozních nákladů na zařízení. Způsobem vedení údržby lze tyto náklady značně ovlivnit. Zároveň lze částečně ovlivnit velikost případné poruchy a délku odstávky zařízení. Při maximální produktivitě stroje je snaha o minimální čas strávený údržbou stroje. Na Obr. 1) je zobrazena časová závislost provedení údržby či opravy stroje v závislosti na způsobu vedení údržby. [1]

Dělení typů provedení údržby:

- Reaktivní údržba
- Preventivní údržba
- Prediktivní údržba



Obr. 1) Časová závislost kondice stroje na čase provedení údržby z pohledu reaktivní, preventivní a prediktivní údržby [2]

3.1 Reaktivní údržba

Reaktivní údržba probíhá až poté, co na zařízení dojde k poruše nebo ztrátě požadovaných vlastností. Stroj tedy pracuje do maximálního vytížení. Toto řešení je z globálního hlediska velice nepraktické. Stroj může selhat ve špičce, neboť není známo, kdy dojde k poruše. Tato nečekaná porucha silně ovlivní výrobu, protože je časově a finančně značně náročnější než plánovaná odstávka bez závažné poruchy. Nicméně tomuto typu závažné havárie se nikdy nedá zcela předejít, tudíž myšlenka podniku bez reaktivní údržby je nereálná. [1] [2]

3.2 Preventivní údržba

Jedná se o průběžné preventivní prohlídky, během kterých dochází ke kontrole technického stavu stroje a případné výměně opotřebených součástí. Tyto kontroly jednotlivých zařízení probíhají v určitých časových intervalech v závislosti na životnosti daných komponent (týdenní, měsíční, čtvrtletní, půlroční, roční...). Tímto systémem lze snadněji plánovat odstávku tak, aby co nejméně ovlivnila produktivitu podniku. Preventivní údržba je organizačně a technologicky náročnější než reaktivní údržba, nicméně tento komplikovanější přístup výrazně snižuje riziko závažnější poruchy. Náklady na preventivní údržbu jsou zpravidla nižší než na údržbu reaktivní, jelikož zde nevzniká velký časový nátlak na opravu stroje a pořízení náhradních dílů. [1] [2]

3.2.1 Zavedení preventivní údržby do podniku

Pro zavedení systému preventivních prohlídek je třeba nejprve určit vhodnou periodu kontroly zařízení v závislosti na typu použitých komponent. Následně sestavit kalendář prohlídek tak, aby prohlídky strojů minimálně ovlivnily výrobu. Zároveň musí být preventivní prohlídky rovnoměrně časově rozděleny tak, aby pro vykonání prohlídek bylo třeba co nejméně pracovníků údržby. Nicméně zde musí být určitá časová rezerva pro neočekávané poruchy s vyšší prioritou oprav. Tedy pokud technik údržby není pracovním vytížen, vykonává preventivní prohlídky dle navrhovaného kalendáře. V případě závažné poruchy na jiném zařízení je technik přesunut k danému zařízení pro vykonání reaktivní údržby.

Preventivní prohlídky se zpravidla dělí na elektrické a mechanické. Prohlídky probíhají současně, za účelem minimalizace prostoje zařízení.

Náplň elektrické prohlídky:

- Kontrola rozvaděče
- Kontrola uzemnění
- Kontrola funkce tlačítka total stop a dalších ochranných prvků
- Kontrola funkčnosti signalizačních kontrol a osvětlení pracovního procesu
- Kontrola opotřebení kabeláže, poškození konektorů a volnosti kabelů u pohyblivých prvků
- Funkčnost snímačů
- Čištění elektrických komponent
- Kontrola stavu motorů, čerpadel, ventilátorů
- Záloha software a dokumentace poruch

Náplň mechanické prohlídky:

- Kontrola hydraulických okruhů
- Výměna provozních kapalin, kontrola funkce chladicího agregátu
- Kontrola funkce mazání dle mazacího plánu
- Kontrola pneumatických okruhů
- Kontrola poškození krytů
- Kontrola hlučnosti zařízení
- Kontrola bezpečnostních prvků a krytů
- Kontrola opotřebení kuličkového šroubu, ložisek a vedení
- Kontrola stavu dopravníku třísek

3.3 Prediktivní údržba

Principem Prediktivní údržby je predikce, tj. předpověď stavu zařízení. Hlavním pilířem je průběžný sběr dat o technickém stavu zařízení. Každý stroj je vybaven měřicí technikou generující data o kondici jednotlivých komponent. Tyto data jsou dále zpracovávána a archivována. Vyhodnocením těchto dat lze včas odhalit vznikající poruchu na stroji a odstranit ji dříve, než dojde k poruše závažnější. Odstávka zařízení se naplňuje tak, aby minimálně ovlivnila výrobnost podniku a ušlý zisk provozovatelů. [1] [2]

Náhradní díly se mohou naskladnit s dostatečným předstihem tak, aby je údržba měla k dispozici během odstávky a zároveň aby nezabíraly místo ve skladu příliš dlouho. Z hlediska produktivity je tento systém neefektivnější, nicméně vždy pracuje v kolaboraci s preventivní a reaktivní údržbou. [1] [2]

3.3.1 Zavedení prediktivní údržby do podniku

Jelikož základem metodiky prediktivní údržby je průběžný sběr dat z měření v reálném čase, je třeba nejprve investovat nemalé náklady do vybudování datové infrastruktury (internet věci). Dále je třeba měřená konkrétní stroje a zařízení vybavit měřicí technikou, pro měření veličin indikující zhoršování stavu stroje. Mezi hlavní indikátory technického stavu stroje patří vibrace, teplo, elektřina a tribologie. Následně je třeba stanovit systém vyhodnocování dat. Na základě naměřených dat systém dokáže vypočítat odhadovanou dobu do poruchy. Technik údržby následně navrhne termín opravy tak, aby byla provedena dostatečně dříve, než by mělo dojít k závažnější poruše. Zároveň vyhodnocovací systém detekuje poruchy závažnějšího stavu, tedy provozovatel je okamžitě upozorněn, že na stroji vznikla porucha či jiná závada chodu pracoviště. Provozovatel tak získává detailnější informace o průběžném chodu pracoviště. Upozornění o poruše může být provedeno např. formou sms zprávy. Tato zpráva obsahuje charakteristické informace o daném problému. [2] [3]

Příklady zpráv charakterizující poruchu [3]

- **Datum:** 6.5. 2018 13:47 / **stroj:** frézka KOVOSVIT MCV 754 QUICK / **problém:** Osa X – překročení kritické hodnoty vibrací
- **Datum:** 24.11. 2020 15:46 / **stroj:** robot ABB 130/6 / **problém:** narušení pracovního prostoru / **řešení:** snížení rychlosti posuvu na 0,05 m/s

Modifikací tohoto systému je tzv. virtuální dvojče, které je detailněji popsáno v kapitole 4. Jedná se o virtuální obraz konkrétního fyzického zařízení, ve kterém se simuluje jeho aktuální

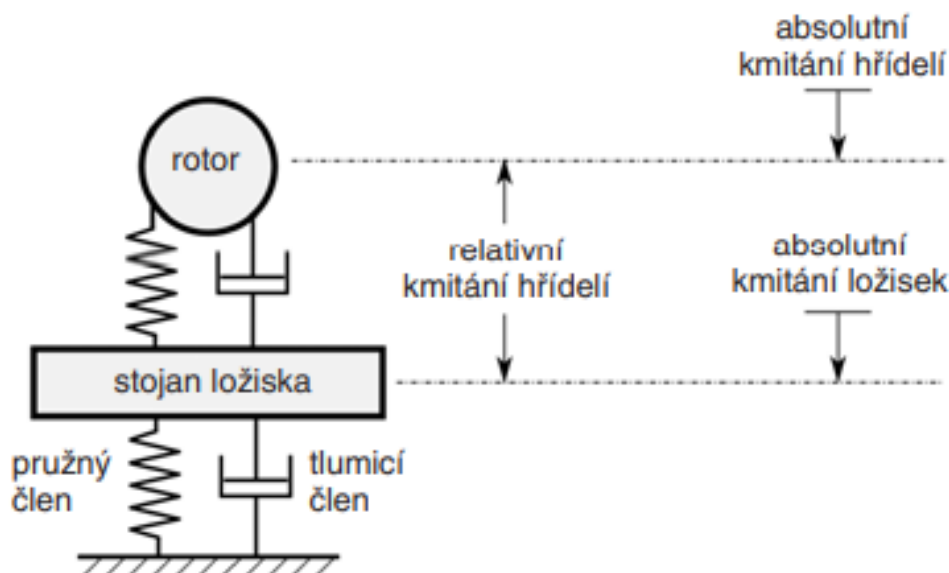
stav a vstupují do něj data z řídicího systému stroje a data z měření. Dle simulací je možno lépe predikovat technický stav stroje a jeho provozuschopnost.

3.4 Vibrodiagnostika

Vibrace (kmitání, chvění, hluk) jsou ukazatelem technického stavu pohybujících se mechanických částí stroje. Vibrodiagnostika je jedním z nejvýznamnějších oborů průmyslové diagnostiky. Měření vibrací se provádí na stroji i v bezzávadném stavu, který slouží jako referenční hodnota pro další měření. Zhoršováním stavu stroje se mění i jeho kmitočtové spektrum. Analýzou vibračních spekter lze detekovat a predikovat poruchu nebo opotřebení dané části stroje. Nejčasnějšími zdroji vibrací bývá: neváha vřetene, opotřebení ložisek, kuličkových šroubů, vedení, ozubených kol, rotorů motoru a klikových a vačkových mechanismů. [1] [4]

3.4.1 Princip snímání vibrací

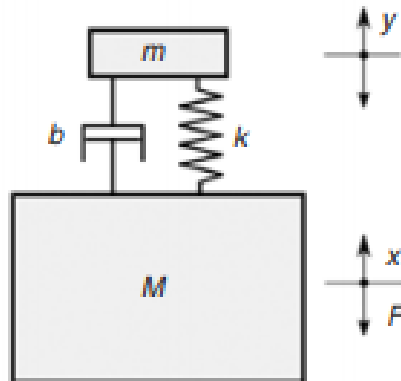
Na počátku měření je třeba určit, zda je požadováno měření vibrací v absolutní nebo relativní rovině. Měření absolutních vibrací popisuje pohyb sledovaného objektu (např. rotor) k Zemi, resp. k zemskému souřadnému systému, u kterého předpokládáme že je dokonale statický. U relativního měření pozorujeme pohyb vůči vlastní vhodně zvolené základně. Nejčastější základnou pro relevantní měření vibrací bývá rám stroje, který sám může také kmitat vzhledem k Zemi (Obr. 2). Mezi nejvíce namáhané součásti z hlediska vibrací patří ložiska, resp. valivá ložiska, protože u ložisek s kluzným uložením tlumí vibrace mazivo. Při měření vibrací na ložiskách je měřena relativní vibrace vůči rámu stroje. Pro celkové měření vibrací na stroji jsou měřeny absolutní vibrace na rámu stroje vůči Zemi, nezávisle vibracích relativních. [4]



Obr. 2) Relativní a absolutní vibrace [4]

Pohyb mechanického kmitání citlivé části snímače vibrací je charakterizováno výchylkou y [m], rychlostí \dot{y} [$m \cdot s^{-1}$] a zrychlením \ddot{y} [$m \cdot s^{-2}$], přičemž tyto veličiny jsou na sobě závislé (Obr. 3). Do obecné rovnice kmitání (rovnice 1.) dále vstupují parametry: hmotnost kmitajícího bodu snímacího zařízení m [kg], součinitel tlumení soustavy b [$N \cdot s/m$] a součinitel

tuhosti soustavy k [N/m]. Výstupem této soustavy je budící síla F_b [N], která je ekvivalentní součinu hmotnosti měřeného objektu M [kg] a jeho zrychlení \ddot{x} [m*s⁻²]. [4]



Obr. 3) Obecné schéma kmitavé soustavy [4]

Obecná rovnice kmitavé soustavy [4]

$$m * \ddot{y} + \dot{b} * \dot{y} + k * y = F_b = M * \ddot{x} \quad (1)$$

Další charakteristikou kmitání je frekvence buzení f_b [Hz] (rovnice 2.), která vychází z úhlové frekvence soustavy ω [rad/s] (rovnice 3.). [4]

Výpočet frekvence otáček:

$$f_b = \frac{\omega}{2 * \pi} \quad (2)$$

Výpočet úhlové rychlosti kmitavé soustavy

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

Při měření vibrací je měřenou veličinou výchylka, rychlost změny výchylka nebo zrychlení. Tyto veličiny jsou na sebe vzájemně vázány. Pro běžná měření v rozsahu frekvencí 10 Hz až 1000 Hz se používá jako měřená veličina rychlost, pro frekvence nad 1000 Hz zrychlení a pro frekvence pod 10 Hz výchylka. Nicméně v praxi až na výjimky nalezneme pouze snímače zrychlení (akcelerometry). Na rozdíl od velometrů (snímač rychlosti) jsou akcelerometry výrazně spolehlivější a odolnější. Rychlostní spektrum soustavy je vypočteno integrací spektra zrychlení. [4]

3.4.2 Snímače výchylky

Snímače výchylky mají vysokou hmotnost kmitavého bodu m [kg] a zanedbatelnou tuhost k [N/m] a tlumení b [N*s/m]. Při zanedbání těchto parametrů vznikne rovnici kmitání pro snímače výchylky (rovnice 4.) která vychází z rovnice 1. [4]

Rovnice kmitavé soustavy pro snímače výchylky [4]

$$m * \ddot{y} = M * \ddot{x} \rightarrow y \approx x \quad (4)$$

Pro správnou funkci snímače musí platit že $m \ll M$. Snímače výchylky mohou fungovat na principu indukčním, kapacitním, magnetickém a optickém. Nicméně v praxi se nejčastěji používají snímače indukčnosti, který funguje na principu závislosti indukčnosti cívky na hustotě vířivých proudů. Obecně platí, že se snímače výchylky používají pro frekvence do 10 Hz. Spektrum rychlosti a zrychlení se získá první a druhou derivací spektra rychlosti. [4]

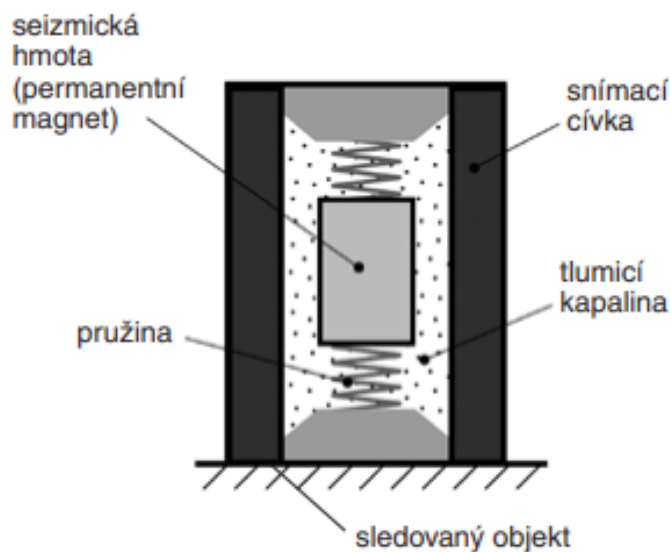
3.4.3 Snímače rychlosti

Dominantní veličinou pro snímače rychlosti (velometry) je tlumení b [$N \cdot s/m$]. Po upravení rovnice 1. dostaneme vztah (rovnice 5.). [4]

Rovnice kmitavé soustavy pro snímače rychlosti [4]:

$$b \cdot \dot{y} = M \cdot \ddot{x} \rightarrow y \approx \dot{x} \quad (5)$$

Snímače rychlosti kmitání fungují na principu pohybu měřící cívky vůči permanentnímu magnetu, jež tvoří seizmickou hmotou snímače a je ponořen v tlumící kapalině (Obr. 4). V cívce se indukuje elektromagnetická síla U [N], která je přímo úměrná rychlosti kmitání. Snímače rychlosti mají užití pro frekvence od 10 Hz do 3,5 kHz. Nevýhodou elektrodynamických snímačů rychlosti je velká citlivost na elektromagnetické rušení. Z tohoto důvodu se snímače rychlosti vyskytují jen zřídka. [4]



Obr. 4) Princip snímače rychlosti kmitání [4]

3.4.4 Snímače zrychlení

Snímače zrychlení (akcelerometry) mají jako dominantní veličinu tuhost k . Hodnoty parametrů b a m jsou zanedbatelné. Po dosazení do rovnice 1. dostaneme vztah (rovnice 6.). [4]

Rovnice kmitavé soustavy pro snímače zrychlení [4]:

$$k \cdot y = M \cdot \ddot{x} \rightarrow y \approx \ddot{x} \quad (6)$$

V praxi se nejčastěji setkáme s akcelerometry fungující na principu piezoelektrického jevu. Princip tohoto jevu spočívá v tom, že určité materiály (např. PZT, $PbZrO_3$, $PbTiO_3$) generují elektrický náboj vlivem mechanického napětí (tah, tlak, smyk). Velikost generovaného náboje je závislá na velikosti deformace daného piezoelektrického prvku (Obr. 5.). [5]



Obr. 5) Princip Piezoelektrického jevu [5]

3.4.5 Delta Shear akcelerometry (Obr. 6a)

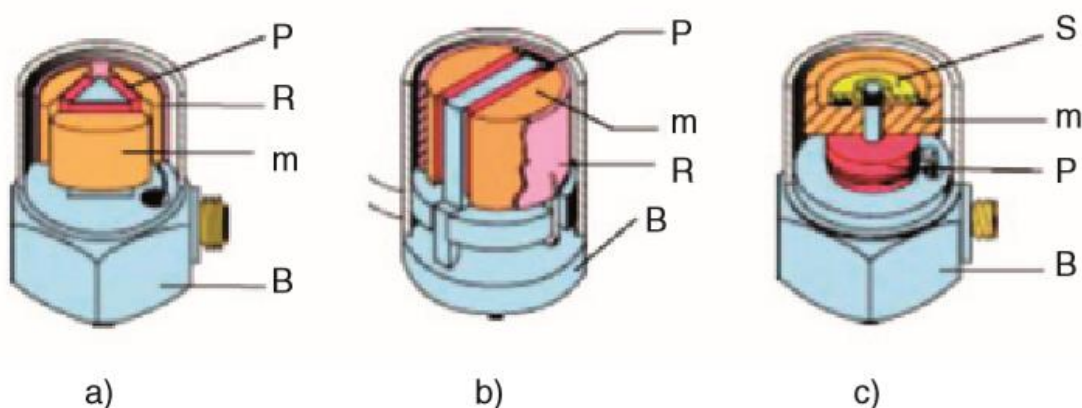
Tento typ konstrukce je tvořen setrvačnou hmotou a třemi dvojicemi piezokrystalů namáhaných na smyk, které jsou upevněny na trojbokém středovém sloupku s použitím předepjatého prstence. Toto uspořádání zaručuje velkou citlivost, dobrou linearitu, vysokou hodnotu vlastní frekvence a malou hmotnost snímače. Jelikož je základna oddělena od vlastního snímacího mechanismu, mají tyto snímače zvýšenou odolnost proti mechanickému zatížení a mohou pracovat při vyšší teplotě. [4]

3.4.6 Planar Shear akcelerometry (Obr. 6b)

Uspořádání Planar Shear funguje na stejném principu jako Delta shear, s tím rozdílem, že jsou zde pouze dvě dvojice piezoelektrických krystalů, které jsou upevněny na plochém sloupku. Oproti Delta Shear má nižší citlivost. [4]

3.4.7 Akcelerometry s centrálním tlakovým namáháním (Obr. 6c)

Piezoelektrická a setrvačná hmota se pohybuje po středovém nosníku. Předepjetí zde obstarává disková pružina. Na rozdíl od Delta Shear a Planar Shear jsou piezoelektrické krystaly namáhány na prostý tlak. Vlivem tlakového zatížení snímače může dojít k deformaci základny, což může vést k ovlivnění signálu a vzniku nepřesnosti měření. [4]



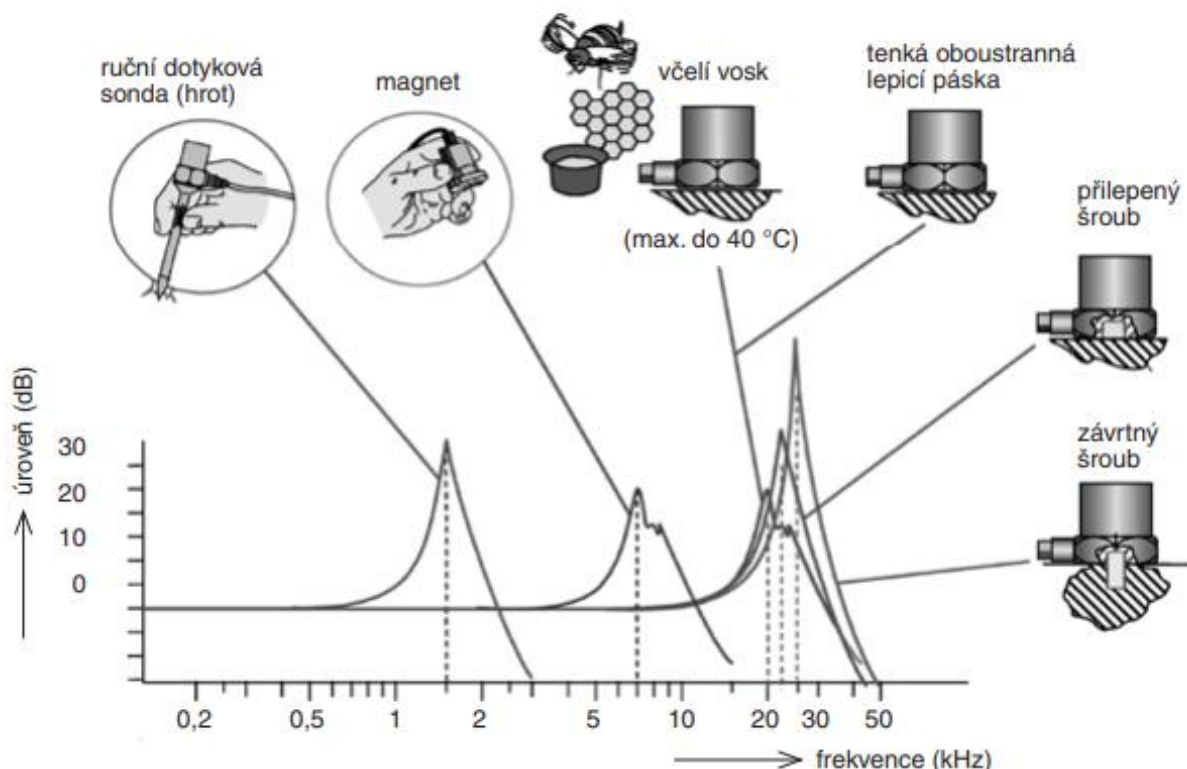
Obr. 6) Konstrukční uspořádání piezoelektrického akcelerometru:
 a) Delta Shear b) Planar Shear c) s centrálním tlakovým namáháním
 (S – předpínací disk, m – seizmická hmota, P – piezoelektrický krystal, B – těleso snímače, R – Předpínací prsteneček) [4]

3.4.8 Uchycení akcelerometrů

Nevhodný způsob uchycení snímačů může vést ke zkresleným hodnotám během měření. Při rezonanci snímače dochází ke znehodnocení měřených dat. Obecně platí že velikost vlastní frekvence snímače je úměrná tuhosti jeho spoje vůči měřenému objektu (Obr. 7). [4]

Způsoby uchycení snímače:

- **Magnetická příchytka** – nízká tuhost, nižší frekvenční rozsah, snadná demontáž, vhodné jako přenosné servisní a kalibrační zařízení, pro hledání vhodného měřeného místa
- **Lepný spoj** – dostatečná tuhost, vyšší frekvenční rozsah, pro stálé upevnění na zařízení, adhezivní látka musí být dostatečně odolná ale tak, aby během demontáže nedošlo k poškození snímače
 - Včelí vosk (do 40 °C)
 - Oboustranná lepicí páska
 - Kyanoakrylátové lepidlo, zubní cement
- **Šroubový spoj se silikonovou výplní mezi stykovými plochami** – vysoká tuhost, možnost využití celého frekvenčního pásma snímače, pro stálé upevnění na zařízení, nevýhodou je narušení konstrukce měřeného objektu za účelem vytvoření závitového spoje
 - Přilepený šroub
 - Závrtný šroub
- **Ruční dotyková sonda** – nízký frekvenční dosah, vhodné jako přenosné měřicí zařízení, pro hledání vhodného měřeného místa



Obr. 7) Závislost uchycení snímače zrychlení na velikosti vlastní frekvence [4]

3.4.9 Frekvenční analýza vibrací

Frekvenční analýza signálu vychází z časové analýzy, která je pomocí Fourierovy transformace upravená na amplitudově-fázové spektrum. Tato metoda odstraní nedostatky analýzy časové oblasti a umožní snadné lokalizování případné poruchy na zařízení. Pro identifikaci vznikající poruchy je třeba rozbor frekvenční analýzy. Oproti časové analýze získáváme informace o vyšších harmonických frekvencích měřené soustavy. [4]

Frekvenční analýzu lze rozdělit do třech oblastí:

Pásmo nízkých frekvencí

- Do čtvrté až šesté harmonické frekvence součásti s největšími otáčkami
- Nevývaha, ohyb a přesazení hřídele
- Uvolnění mechanických vazeb
- Nestabilita radiálních ložisek

Pásmo středních frekvencí

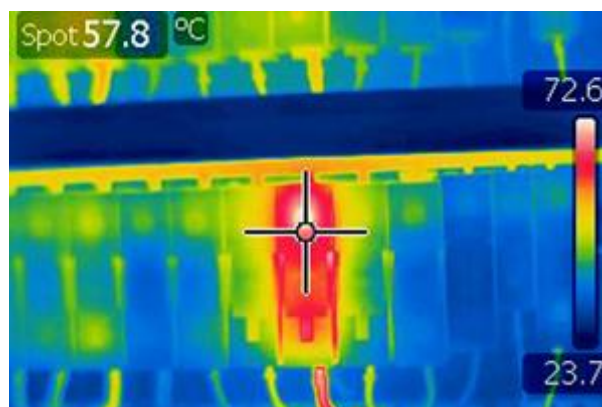
- Od pásma nízkých frekvencí do 1 až 5 kHz (podle otáček a typů převodů)
- Závada převodovek a ozubených převodů

Pásmo vysokých frekvencí

- Od pásma středních frekvencí výše
- Počínající závady valivých ložisek, projevující se vysokými úzkými impulzy, které jsou při nižších a středních frekvencích překryty intenzivnějšími vlivy ostatních prvků soustavy

3.5 Termodiagnostika

Hlavním indikátorem elektrických a mechanických ztrát a poruch je zvýšení teploty. Změna teploty může indikovat poruchu rozvaděče (Obr. 8), nesouměrný odběr, opotřebení vinutí a přetížení nebo jinou poruchu elektrických komponent. Z mechanického pohledu pak zvýšená teplota může být způsobena změnou řezných podmínek, mechanickou poruchou motoru a poruchou chladicího okruhu. Měření tepla zároveň slouží jako prevence proti požáru. Termovizní měření se tedy provádí pro kontrolu, zda je stroj celkově v pořádku. Samotné měření probíhá pomocí tepelného čidla připojeném na stroji nebo pomocí vestavěné termokamery. Termovizní měření dále může provádět technik preventivní údržby pomocí přenosné termokamery během preventivní prohlídky stroje. [1][6][7]



Obr. 8) Detekce poruchy relé v rozvaděči pomocí termokamery [7]

3.6 Elektrodiagnostika

Kvalita elektrické energie ovlivňuje jak kvalitu výrobku, tak může vést ke zhoršení funkčnosti stroje. Proto je nutno brát elektrickou energii jako další základní surovinu vstupující do výrobního procesu, stejně jako materiál nebo řeznou kapalinu. Pro měření kvality elektrické sítě se používají tzv. analyzátoři kvality el. sítě. Indikátorem poruchy elektrické sítě bývá zvýšení teploty nebo změna chování motoru. [1]

3.7 Tribodiagnostika

Pod pojmem tribodiagnostika se rozumí vědní obor, zabývající se analýzou olejů, paliv, maziv a emulzí. Na základě tribologického měření lze zjistit degradaci, čistotu a teplotu provozní kapaliny. Nedostatečná kvalita provozních kapalin z dlouhodobého hlediska výrazně snižuje kvalitu, spolehlivost a životnost daného stroje. Obr. 9) zobrazuje degeneraci ložiska vlivem nedostatečného mazání, což vedlo až k zadření ložiska následované poruchou stroje. [8] [9]



Obr. 9) Degenerace vnitřního kroužku ložiska způsobená nedostatečným mazáním [10]

Z hlediska prediktivní údržby je tribodiagnostické měření nejčastěji prováděno pomocí tzv. chytrých průtokoměrů, jež jsou umístěny přímo na stroji. Tento typ měřicí techniky snímá velikost průtoku, jakost a teplotu provozní kapaliny. Dle průběžného monitorování stavu je možné predikovat další průběh degenerace dané kapaliny na konkrétním stroji. Na základě těchto dat je třeba upravit periodu výměny provozních kapalin a vyčištění, popř. výměnu degradovaných komponent (hadičky, ventily, filtry). [8] [9]

4 VIRTUÁLNÍ DVOJČE

Virtuální (digitální) dvojče (Digital Twin, Virtual Twin) je virtuálním modelem fyzického objektu nebo systému. Termín virtuální dvojče poprvé definoval Michael Grieves jako reprezentaci vyrobeného produktu ve virtuální formě, přičemž virtuální model sloužil k porovnání vyrobeného produktu s původním inženýrským návrhem. Původně termín virtuální dvojče sloužilo pouze jako reprezentace fyzických objektů ve virtuálním prostředí. V dnešní době je tato definice použita pro konstrukční návrh výrobku. S nárůstem digitalizace se virtuální dvojče změnilo ze statického systému na dynamický systém nesoucí měřené veličiny konkrétního fyzického systému v reálném čase. Tyto veličiny jsou měřeny senzory přímo na zařízení, které jsou propojeny pomocí internetu věcí. [11]

Snahou virtuálního dvojčete je ekvivalentní chování vůči referenčnímu objektu. Jelikož do digitálního dvojčete vstupují aktuální měřené veličiny, lze monitorovat stav fyzického zařízení na dálku. Ve virtuálním prostředí pak lze snadno simulovat nejrůznější scénáře, které mohou ve fyzickém systému nastat. Tyto simulace se opírají o reálná data, která byla naměřena na konkrétním zařízení. Na základě výsledků jednotlivých scénářů se fyzický systém optimalizuje tak, aby byl co nejefektivnější. [12]

4.1 Princip komunikace virtuálního dvojčete

Funkčnost virtuálního dvojčete je založena na kontinuálním datovém toku informací mezi fyzickým a virtuálním systémem (Obr. 10). Tyto data jsou generována senzory umístěným ve fyzickém systému. Data jsou po vstupu do virtuálního systému simulována a analyzována. Na základě analýzy dat ze simulace ve virtuálním dvojčeti je upraven chod akčních členů ve fyzickém systému. Prvky komunikační infrastruktury virtuálního a fyzického dvojčete tvoří: senzory, integrační prvky, analytické prvky a akční členy. [13]

4.1.1 Senzory

Senzory (snímače) jsou měřicí zařízení, umístěné ve výrobním procesu. Umožňují vytvářet signály generující data o chování fyzického procesu. [13]

4.1.2 Data

Data tvoří provozní informace ze sensorů, která jsou následně kombinována s dalšími daty podniku jako konstrukční specifikace, externí provozní informace či specifikace zákazníka. [13]

4.1.3 Integrační prvky (integrators)

Integrační technologie zprostředkovává komunikační přenos mezi fyzickým a virtuálním rozhraním a naopak. Zároveň zajišťuje bezpečnost přenášených dat a eliminaci rušivých signálů. [13]

4.1.4 Analytické prvky

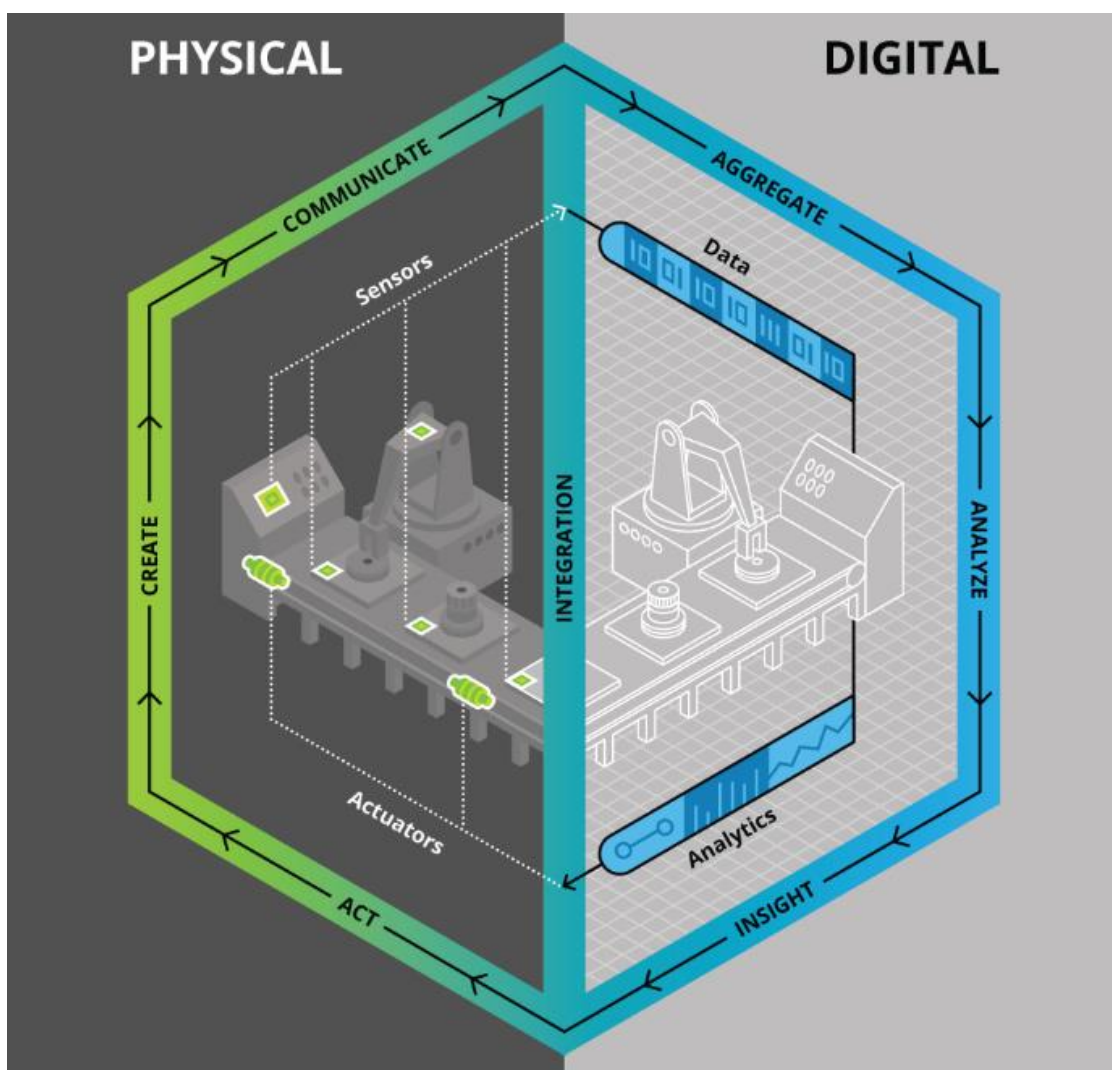
Pomocí algoritmických simulací jsou příchozí data analyzována a následně zpracována pro vytvoření statistického formátu, který je následně přesunut virtuálního dvojčete [13]

4.1.5 Digitální dvojče

Cílem digitálního dvojčete je identifikovat netolerovatelné odchylky od optimálních provozních podmínek. Tato odchylka může být způsobena chybnou logikou virtuálního dvojčete, změnou technologického procesu, poruchou či jiným narušením provozních podmínek. Na základě této odchylky vytvoří optimální řešení pro její odstranění. Následné řešení je realizováno skrze akční členy. [13]

4.1.6 Akční členy (actuators)

Akční členy jsou vykonavatelé řešení, navrženém virtuálním dvojčetem ve fyzickém systému. Tyto členy mohou vyžadovat potvrzení od fyzické osoby pro provedení akčního zásahu do pracovního procesu, v závislosti na velikosti navrhovaného zásahu. [13]



Obr. 10) Princip komunikační infrastruktury fyzického systému s virtuálním dvojčetem [13]

Virtuální dvojče se netýká pouze obráběcích strojů, ale i ostatních dynamických systémů v průmyslu jako: výrobní linka, logistika, továrna, elektrická síť nebo testování výrobku. Očekává se, že v budoucnu se technologie digitálního dvojčete bude aplikovat např. pro simulaci samoříditelných vozidel nebo ve zdravotnictví, pro simulaci zdravotního stavu pacienta, kde se data mohou sbírat pomocí implantovaného čipu nebo chytrých hodinek. [12]

4.2 Vznik digitálního dvojčete

Virtuální dvojče je vytvořeno odborníky z oblasti průmyslu, datovými analytiky příp. odborníky z analytické matematiky. Dochází ke sběru velkého množství vstupních dat, které jasně definují zkoumaný systém a jeho chování. Následně se vytvoří virtuální model optimalizovaný tak, aby se choval stejně jako referenční model. Tento model často vychází z prototypu konstrukčního návrhu a zároveň může sloužit jako zpětná vazba ve fázi vývoje fyzického systému pro optimalizaci jeho komponent. Jeho složitost pak závisí na hloubce pozorování daného systému v souladu se schopnostmi vývojářů a požadavky zákazníka. [14]

4.3 Provoz virtuálního dvojčete

V provozu pak virtuální dvojče získává další data z řídicího systému stroje a senzorů umístěných přímo na fyzickém zařízení, tudíž se mění v souladu s aktuálním stavem stroje. Na základě zkušeností s chováním zařízení, informacím o aktuálním stavu a historii oprav lze simulovat chování objektu ve virtuálním prostředí. Testovat v nejrůznějších provozních situacích nebo zkoumat chování a případné poruchy v budoucnu (prediktivní údržba). [14] [15]

Skrze virtuální dvojče je zároveň monitorován stav pracoviště jako celku a při výchylyce od optimálního chodu upraví pracovní cyklus tak, aby pracovní proces opět probíhal v optimálních podmínkách. V krajních případech může akční člen virtuálního dvojčete dokonce zastavit celý výrobní proces, např. nepovolený vstup člověka do pracovního prostoru nebo narušení čistoty pracoviště. [14] [15]

4.4 Virtuální dvojče obráběcích strojů

Trh s poskytovateli virtuálního dvojčete se v poslední době velmi rozšiřuje. Z pozice zákazníka je možné si pořídit virtuální dvojče konkrétního fyzického zařízení přímo od výrobce stroje při nákupu (Okuma 3D Virtual Monitor, DMG MORI Virtual Machine), řídicí systém pro virtuální dvojče (Siemens Sinumerik ONE) nebo univerzální software pro dynamické simulace (ANSYS, MSC ADAMS, Matlab, Simulink). Každá z uvedených variant má své výhody i nevýhody. Obecně platí, že systém dodaný přímo od výrobce je spolehlivější, nejpropracovanější a nejvhodnější pro konkrétní stroj, nicméně tyto vlastnosti zároveň odpovídají výši pořizovacích nákladů. [16] [17]

4.4.1 DMG MORI Virtual Machine

Firma DMG MORI patří mezi nejuznávanější a největší výrobce obráběcích strojů na trhu. Je pochopitelné, že jako leader na trhu udává trendy v oblasti obráběcích strojů a jejich virtuálních dvojčat [17]

Výrobce udává, že systém DMG MORI Virtual Machine přesně kopíruje chování fyzického stroje, obráběcích simulací, kolizí, geometrie a dynamických vlastností. Díky vysoké propracovanosti virtuálního dvojčete je zde možné simulovat veškeré technologické operace jež je fyzické zařízení schopné bez rizika poškození stroje. Tímto je možné snadno předejít případné kolizi během provozního cyklu vlivem chybného programu. DMG MORI Virtual Machine je vhodné jak pro běžný provoz, tak pro zaškolení nových pracovníků. [17]

V kontextu s prediktivní údržbou výrobce udává, že jejich stroje jsou vybaveny více jako 60-ti senzory, čímž je kontinuálně měřen stav stroje (vibrace, teplota, lubrikace), tak aby dosahoval maximální požadované přesnosti a spolehlivosti. V případě poruchy systém okamžitě zareaguje adekvátní reakcí, aby nedošlo k další poruše stroje. Informace o aktuálním stavu stroje jsou prezentovány v uživatelsky přehledném rozhraní [17] [18]

4.4.2 Siemens Sinumerik ONE

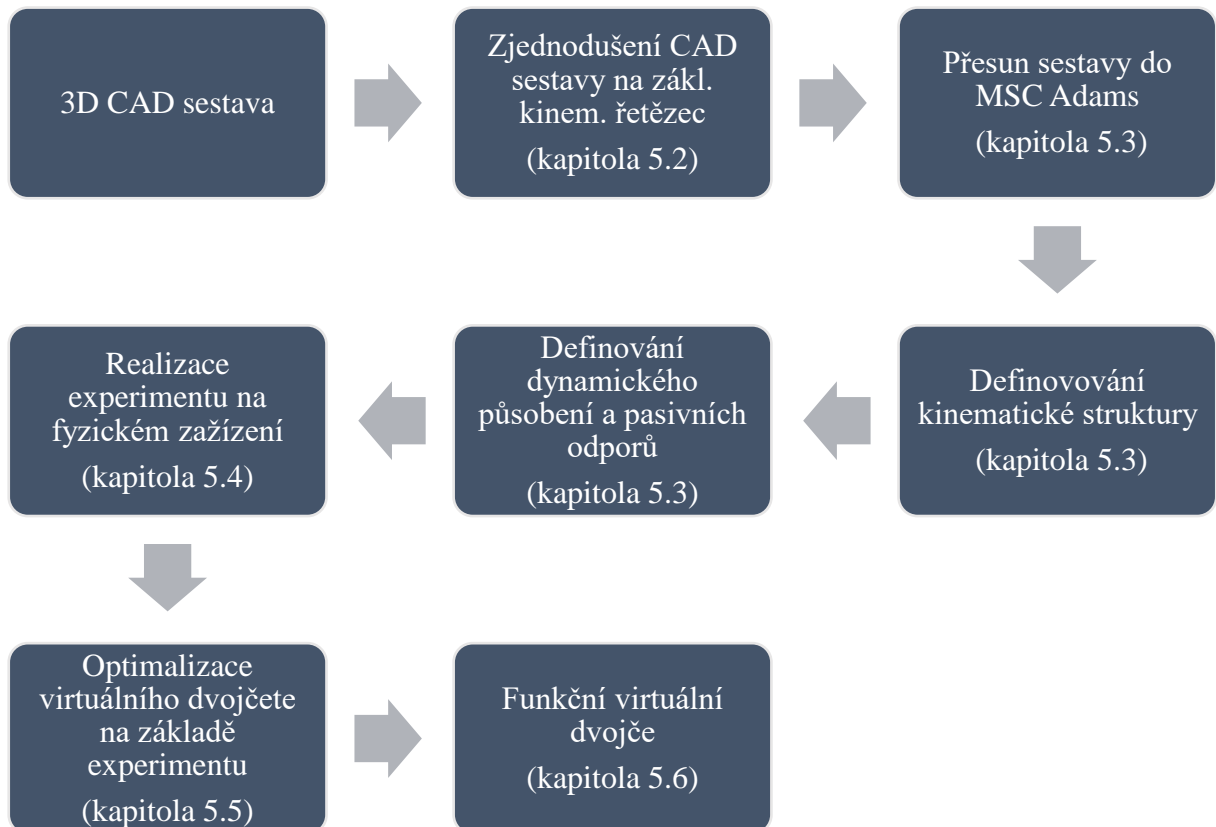
Firma Siemens na mezinárodním strojírenském veletrhu v Hannoveru 2019 poprvé představila nový CNC systém Sinumerik ONE. Tento software umožňuje nepřetržitou interakci mezi fyzickým a virtuálním strojem v rámci jednoho řídicího systému. Firma dále uvádí, že chce, aby se software tohoto typu staly novým průmyslovým standardem a podpořila se tak průmyslová digitalizace. [19] [20] [21]

Tento software má umožnit zkrácení vývoje nových strojů a výrobků. Zároveň je zde možné simulovat kompletní provoz stroje, bez přímého kontaktu s fyzickým zařízením. Tento řídicí systém byl navržen tak, aby byl plně využit v inženýrském prostředí TIA Portal. Zároveň obsahuje integrované bezpečnostní prvky pro ochranu dat. Možnost vytvoření řídicího systému a virtuálního dvojčete v rámci jednoho ekosystému výrazně zjednodušuje práci s virtuálním dvojčetem. Vzhledem k univerzálnosti software je možné virtuální prostředí rozšiřovat o další stroje a zařízení a přiblížit se tak konceptu chytré továrny. [19] [20] [21]

Komunikace řídicího systému s virtuálním dvojčetem využívá nových technologických funkcí jako Top Speed, kde je zvyšována rychlost až na mechanické limity stroje. Tato funkce pracuje v kolaboraci s funkcemi jako Top Surface, která zajišťuje požadovaný stupeň přesnosti při vysoké rychlosti, nebo funkcí IDC (Intelligent Dynamic Control) zajišťující rovnoměrnou dynamickou zátěž jednotlivých os stroje. Použitím těchto funkcí dojde k optimalizaci výrobního procesu, zvýšení produktivity stroje a zároveň snížení rizika poruchy. [19] [20] [21]

5 VYTVOŘENÍ DIGITÁLNÍHO DVOJČETE

Cílem této kapitoly je vytvoření digitálního dvojčete křížového stolu (Osa X a Y) stroje MCV 754 QUICK od výrobce Kovosvit MAS, v software MSC ADAMS. Postup při vytváření virtuálního dvojčete je znázorněn na Obr. 11).



Obr. 11) Schéma postupu při tvorbě virtuálního dvojčete

5.1 Popis fyzického dvojčete

Fyzickou předlohou virtuálního dvojčete je stroj MCV 754 Quick (Obr. 12) od českého výrobce Kovosvit MAS. Tento stroj se momentálně nachází na výukovém pracovišti UVSSR VUT v Brně, kde slouží jako pomůcka k výuce pro studenty VUT. Jedná se o tříosé vertikální obráběcí centrum určené pro frézovací a vrtací operace. Stroj je vybaven rotačním zásobníkem o kapacitě až 24 nástrojů. Výměna nástrojů je provedena pomocí mechanického výměníku nástrojů, je tedy schopen rychlé výměny nástroje s minimálními vedlejšími časy. Stroj je konstruován pro použití výkonných nástrojů se středovým chlazením. Společně s třískovým dopravníkem zajišťuje systém chlazení efektivní odvod třísek. Dále je vybaven vnějším krytováním včetně vodotěsných dveří pro vstup do pracovního prostoru a zajišťující čistotu na pracovišti. Nízký poměr velikosti pracovního prostoru vůči zástavbovým rozměrům umožňuje efektivní uspořádání do výrobních buněk. [22] [23]

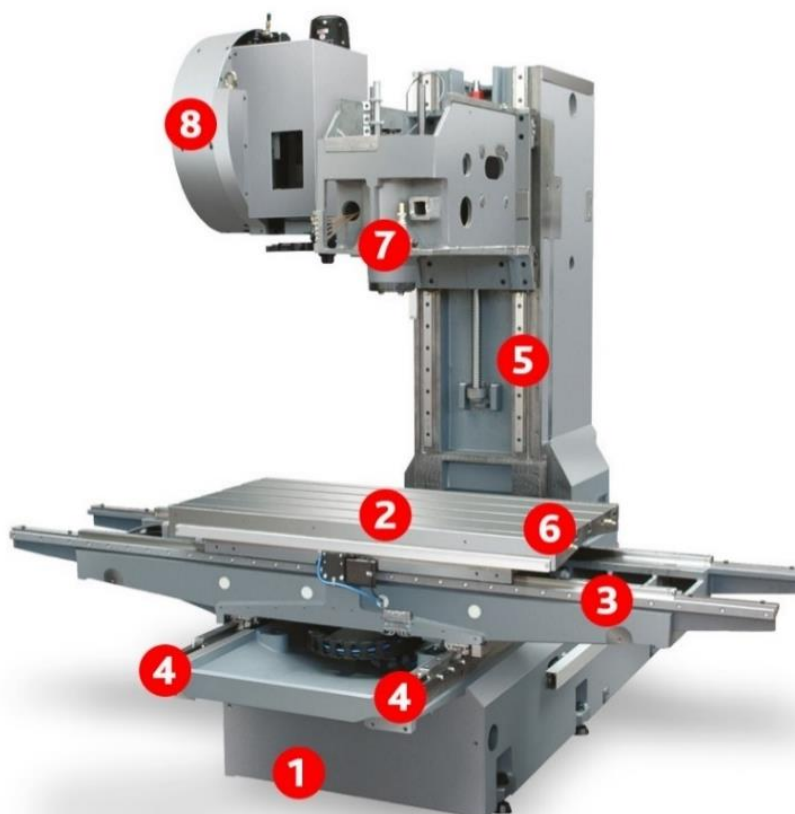
Na přání zákazníka může být stroj dodatečně vybaven infračervenou 3D sondou, nástrojovou sondou, dálkovou diagnostikou, signalizačním majákem nebo přídavným otočným a klopným stolem umožňujícím 4 a 5-ti osé obrábění. [22] [23]



Obr. 12) Kovosvit MAS MCV 754 QUICK [22]

Konstrukce MCV 754 QUICK je postavena na litinovém rámu ve tvaru písmene C. Základem stroje jsou lože, po kterých se pohybují saně (Osa Y), po kterých přejíždí v horizontální rovině stůl (Osa X) o nosnosti až 400 kg. Na lože je pevně připojen stojan, po kterém se ve vertikálním směru pohybuje vřeteník (Osa Z). Pohyb v osách X, Y, Z zajišťuje dvojice lineárních vedení, pro dlouhodobě vysokou pracovní přesnost. Pohon os X, Y, Z je realizován pomocí kuličkových šroubů (dále jen KŠ) s maticí, které pohání rotační servopohony. Všechny osy jsou vybaveny pravítky pro přímé odměřování polohy. Pohon vřetene je zajištěn regulačním motorem přes ozubený řemen. Vřeteno je vybaveno dutinou pro nástroje s kuželem ISO 40. [22] [23]

Kinematická struktura stroje je znázorněna na Obr. 13). V Tab. 1) jsou uvedeny technické parametry stroje.



Obr. 13) Kinematická struktura MCV 754 Quick

1 – Lože, 2 – Upínací plocha stolu, 3 – Lineární vedení Osa X, 4 – Lineární vedení Osa Y, 5 – Lineární vedení Osa Z, 6 -maximální zatížení stolu, 7 – Vřeteník, 8 – Zásobník nástrojů s mechanickou rukou [23]

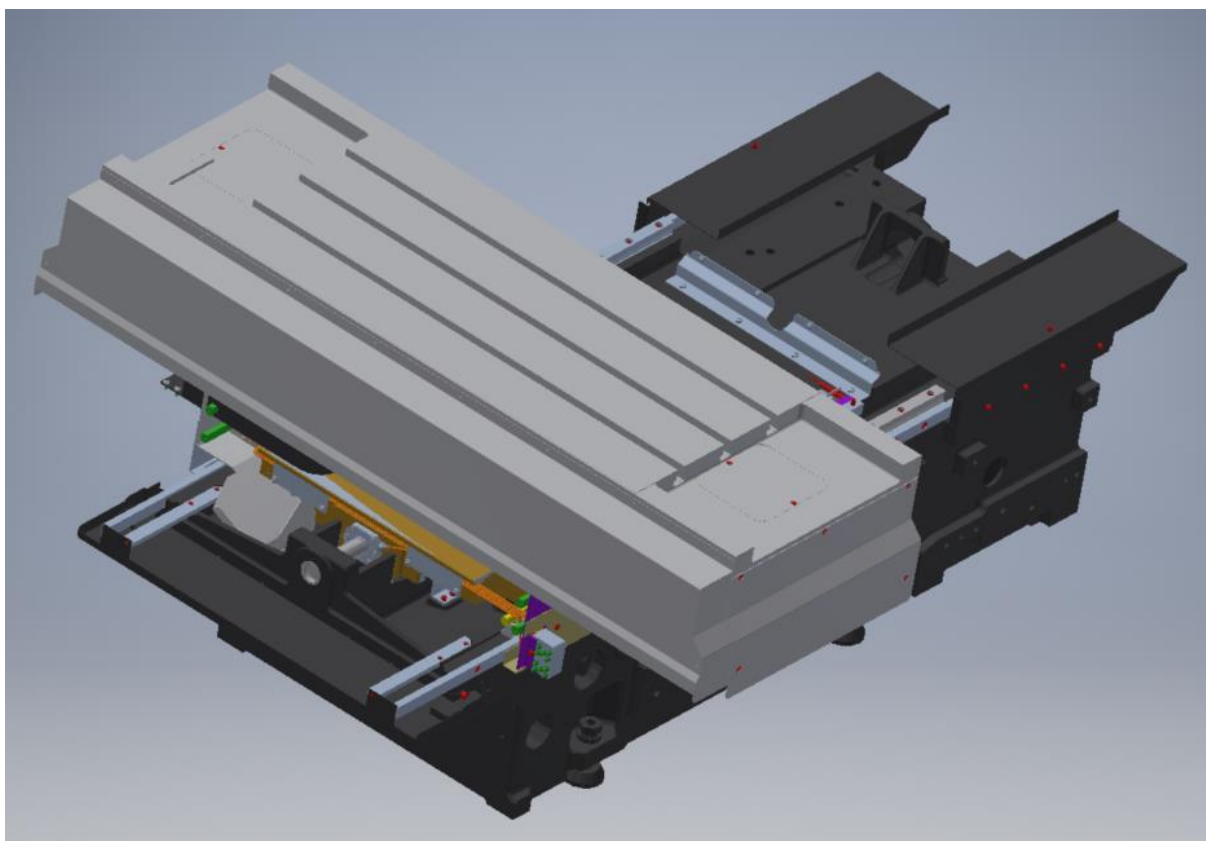
Stroj je dále vybaven online monitorovacím systémem SKF Multilog IMx-8 zajišťující měření vibrací ložisek kuličkových šroubů a vřetene. Firma SKF k tomuto monitorovacímu systému mimo dodává také mobilní aplikaci SKF Multilog IMx Manager dostupné pro operační systémy Android i iOS. Aplikace umožňuje snadný přehled o stavu jednotlivých ložisek konkrétního stroje a zároveň zašle upozornění v případě překročení limitních hodnot. [25] [26]

Tab 1) Technické parametry MCV 754 quick [22] [23] [24]

Rozměry stroje		
délka x šířka x výška	2320 x 2590 x 2560	[mm]
hmotnost celková	4 000	[kg]
Hmotnost lože	795	[kg]
Hmotnost saně	82	[kg]
Hmotnost stůl	338	[kg]
Hmotnost vřeteník	172	[kg]
Hmotnost stojan	445	[kg]
Pracovní rozsah		
X-osa	754	[mm]
Y-osa	500	[mm]
Z-osa	550	[mm]
Stůl		
upínací plocha stolu	1 000 x 500	[mm]
max. zatížení stolu	400	[kg]
Posuv		
pracovní posuv X, Y, Z	1- 30 000	[mm*min ⁻¹]
rychloposuv X, Y, Z	30 000	[mm*min ⁻¹]
Kuličkové šrouby osa X, Y, Z		
stoupání	10	[mm]
průměr	32	[mm]
Vřeteno		
kuželová dutina	ISO 40	-
Max. otáčky	10 000	[rpm]
Motory os X, Y – Siemens 1FK7080-2AF71-1CG2		
Max. otáčky	3000	[rpm]
Momentová konstanta	1,61	[Nm/A]
Jmenovitý kroutící moment	6,8	[Nm]
Jmenovitý proud	4,4	[A]
Počet pólů	8	[-]
Řídicí systém		
Siemens Sinumerik 840D sl		
Lin vedení X,Y,Z		
HIWIN – HGW30		
Kuličkový šroub X, Y, Z		
HIWIN – 32x10 – Double flanged		
dynamická únosnost kuličkového šroubu	40900	[N]

5.2 Zjednodušení modelu

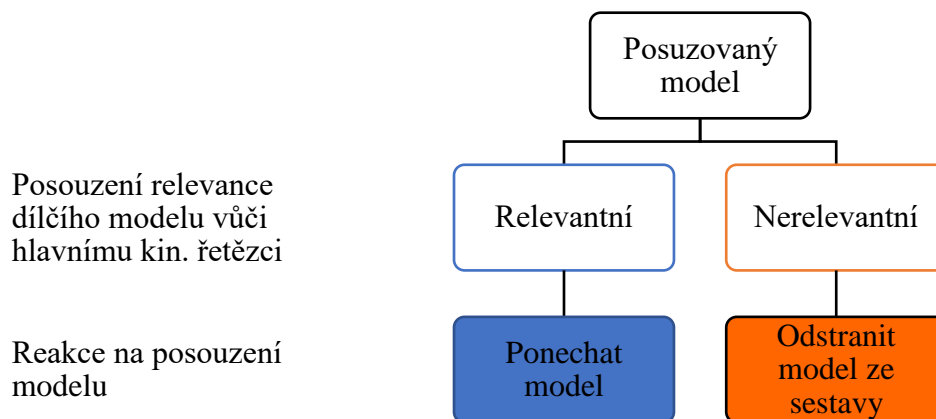
Základem virtuálního dvojčete je model sestavy křížového stolu MCV 754 QUICK (Obr 14), který je součástí zadání této diplomové práce. Vstupní sestava zahrnuje podsestavy pro lože, saně a stůl. Tyto podsestavy v sobě zahrnují modely ložisek, pravítek, šroubových spojů, mechanických dorazů, kabeláže, senzorů, krytů, ale i modely jednotlivých valivých tělísek v ložiskách. Z praktických důvodů je třeba všechny nadbytečné součásti netýkající se přímého kinematického řetězce odstranit, neboť by výrazně komplikovaly další práci s modelem a zbytečně by zvyšovaly výpočetní nároky simulací. Základní kinematický řetězec tvoří modely: lože, KŠ osy Y, saně, KŠ osy X a stůl. Úprava sestavy probíhá ve studentské verzi Autodesk Inventor Professional 2019.



Obr. 14) Výchozí model křížového stolu MCV 754 QUICK

5.2.1 Metodika zjednodušování modelu

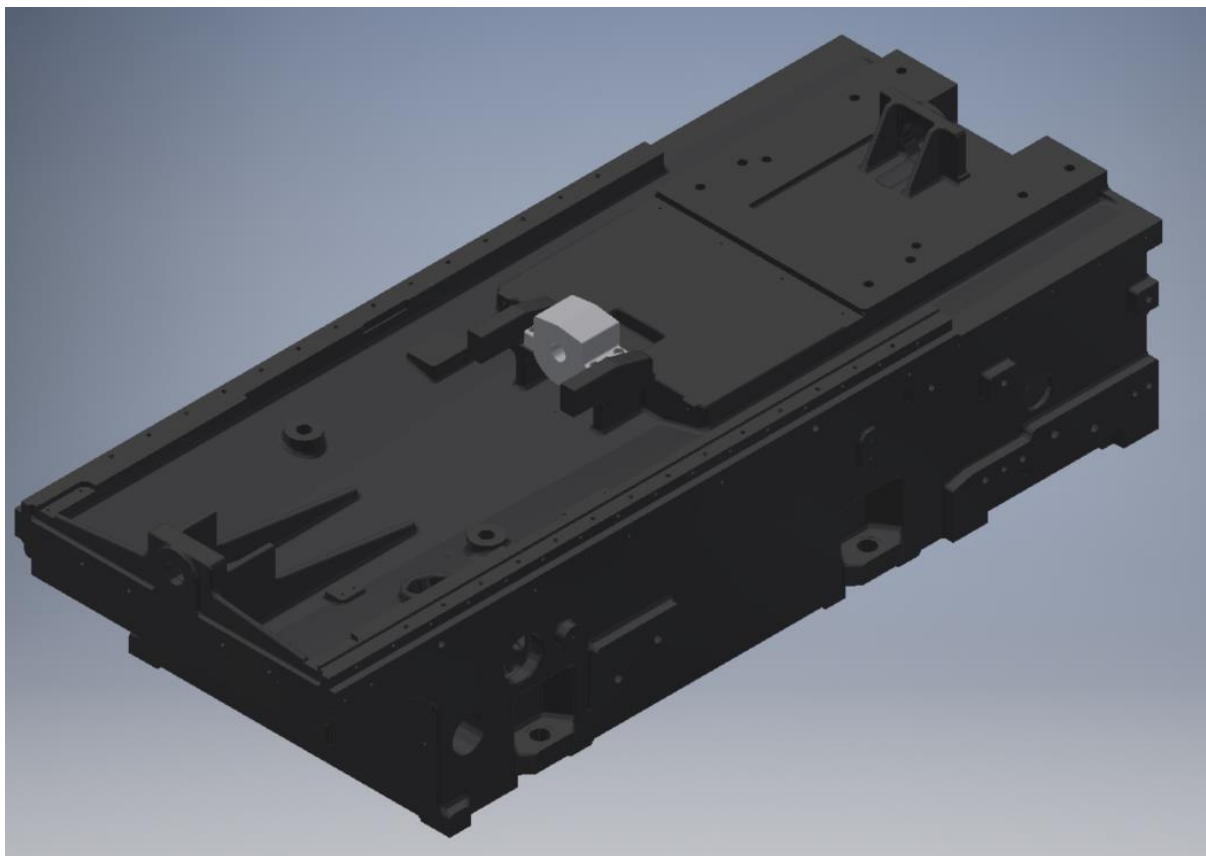
Pro zachování funkčnosti modelu je třeba posoudit každý model podsestavy, zda je relevantní vůči danému elementu hlavního kinematického řetězce. Pokud je model relevantní, zůstává, pokud není, je odstraněn. Tato metoda je sice časově náročná a z dlouhodobého hlediska nepraktická, ale eliminuje případné chyby způsobené odstraňováním prvků po skupinách. Schéma posuzovací metody je zobrazeno na Obr. 15).



Obr. 15) Schéma logiky zjednodušování modelu

5.2.2 Zjednodušený model lože

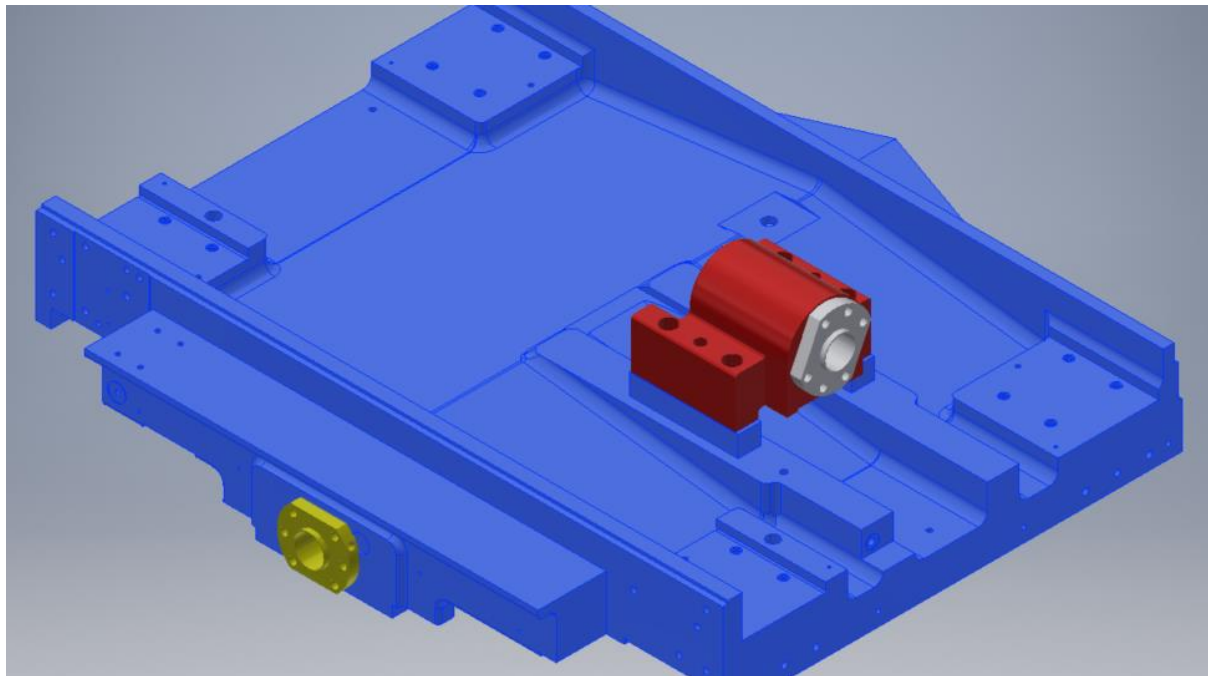
Zjednodušený model (Obr. 16) se skládá z modelu odlitku lože, domečku pro uložení KŠ a dvojice podložek, na kterých je domeček uložen. Domeček slouží jako referenční poloha pro zpětnou montáž KŠ osy Y do výsledného modelu křížového stolu.



Obr. 16) Zjednodušený model lože

5.2.3 Zjednodušený model saní

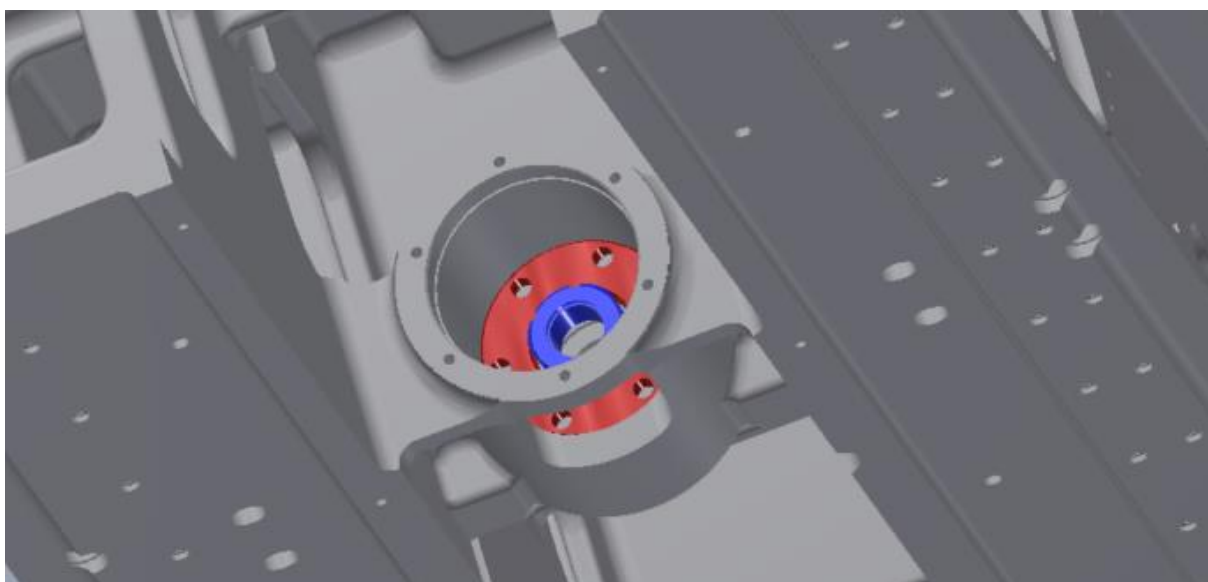
Zjednodušený model tvoří model saní, matice pro KŠ os X a Y a domeček pro matici osy X (Obr. 17). Poloha matic os X a Y určuje vzájemnou polohu KŠ osy Y vůči ose X, tedy výslednou polohu modemu stolu vůči modelu lože.



Obr. 17) Zjednodušený model saní

5.2.4 Zjednodušený model stolu

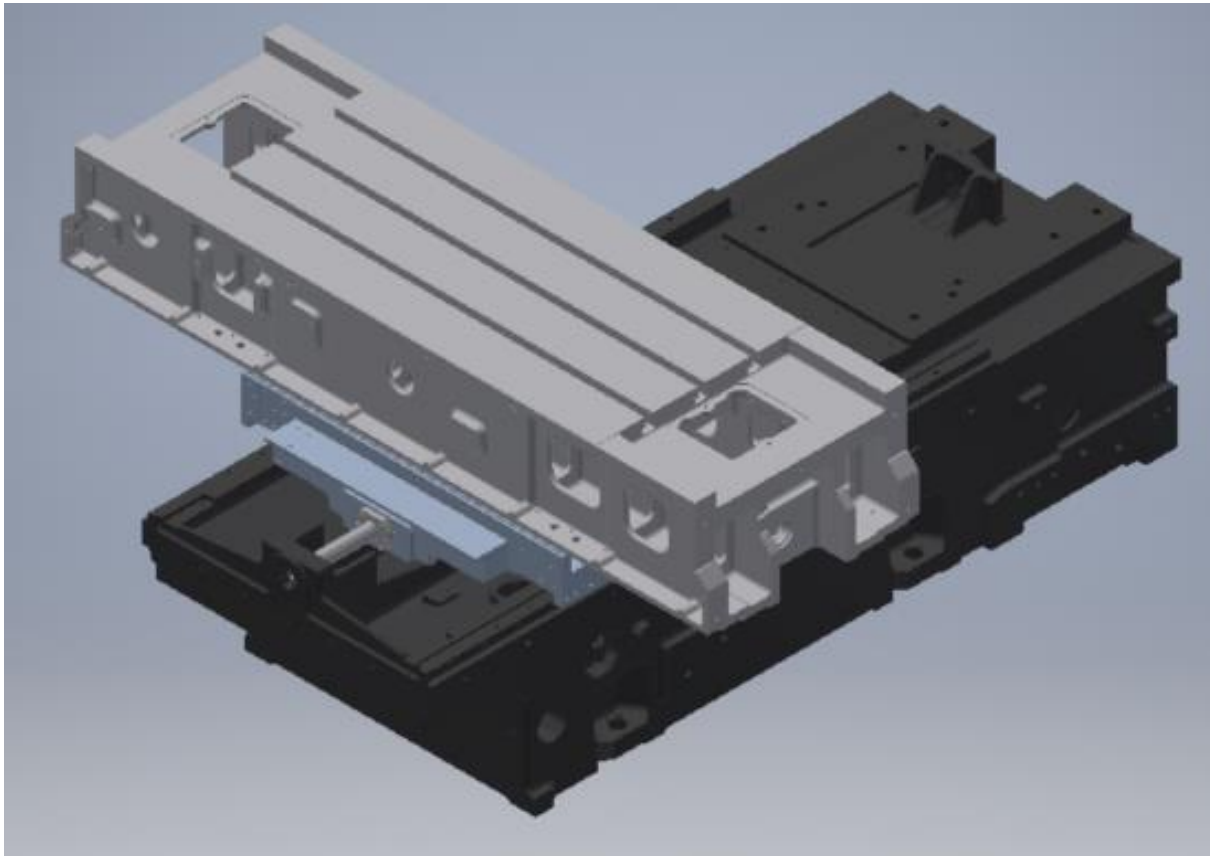
Zjednodušený model (Obr. 18) tvoří model odlitku stolu, víko ložiska a přírubová matice SKF. Přírubová matice SKF slouží jako spojovací bod modelu stolu s KŠ osy X.



Obr. 18) Detail zjednodušeného modelu stolu

5.2.5 Zjednodušená sestava křížového stolu

Modely KŠ osy X a osy Y nebylo třeba nějak upravovat. Výsledná sestava (Obr. 19) je složena pouze z nezbytných součástí kin. řetězce. Zjednodušené modely lože, saní, stolu a kuličkových šroubů jsou zvlášť vyexportovány do vhodného formátu pro simulace. V tomto kroku je změna polohy jednotlivých modelů v prostoru vysoce nežádoucí, neboť prostorová manipulace s objekty v prostředí MSC Adams je problematická. Pro exportování byl zvolen formát .STP (step).



Obr. 19) Zjednodušený model sestavy

5.3 Vytvoření virtuálního dvojčete v MSC ADAMS

Tato kapitola popisuje postup během vytváření virtuálního dvojčete křížového stolu obráběcího centra MCV 754 QUICK v prostředí software MSC Adams.

5.3.1 MSC Adams

MSC Adams je simulační software, jež umožňuje relativně snadno simulovat dynamické chování objektů ve virtuálním prostoru. Fyzikální chování prostředí MSC Adams z hlediska dynamiky odpovídá fyzikálnímu chování reálného světa. Toto stanovisko je však nutno brát s určitou rezervou. [27] [28] [29] [30] [31] [32]

Přesnost chování virtuálního modelu je úzce spojena s jeho propracovaností. Tato propracovanost pak silně ovlivňuje nároky na výpočetní výkon simulací. V dnešní době jsou simulace tohoto typu velmi rozšířené, neboť výrazně snižují čas a náklady během vývoje zařízení. Je tedy možné snadno otestovat a následně optimalizovat výrobek ještě před výrobou

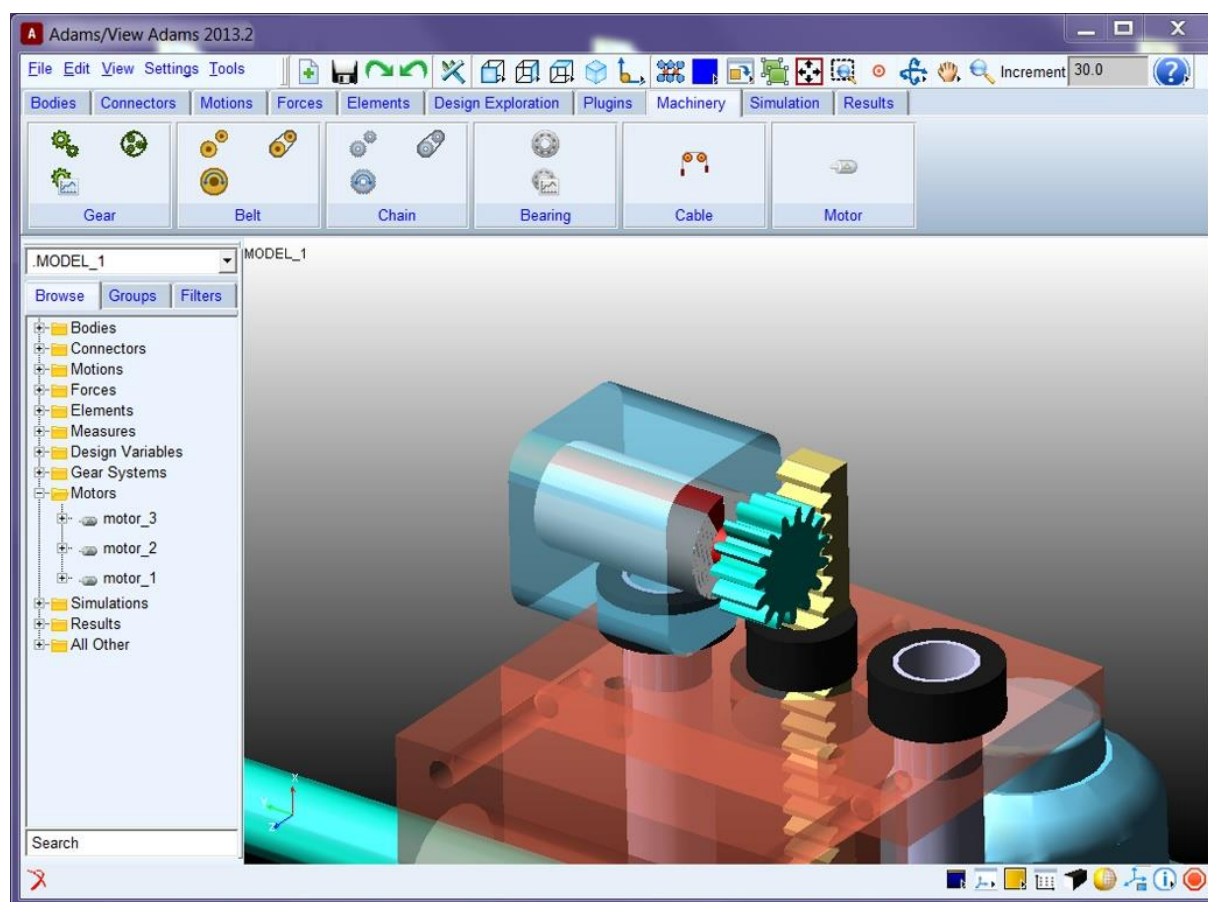
prvního prototypu. Je zde možné kontrolovat funkčnost řízení komplexních pohybových soustav jako vačkové, táhlové a převodové mechanismy. [27] [28] [29] [30] [31] [32]

Vzhledem ke své všestrannosti a rozšíření digitálních technologií má tento software široké uplatnění napříč mnoha segmenty jako: biomechanika, automobilový průmysl, kosmonautika, strojírenství atd. [27] [28] [29] [30] [31] [32]

V základní verzi software disponuje prvky jako: ložiska, motory, řetězové, řemenové, třecí a ozubené převody, prutové, lanové soustavy a pružiny. Příplatkové rozšíření obsahuje detailnější zpracování daného segmentu jako zavěšení automobilu, vibrační a pevnostní analýzy, mechanismy, rozšíření knihoven, simulace v reálném čase atd. Uživatelské rozhraní MSC Adams je zobrazeno na Obr. 20). [27] [28] [29] [30] [31] [32]

MSC Adams umožňuje snadnou práci s naměřenými hodnotami v integrovaném postprocesoru. Práce v postprocesoru zahrnuje tvorbu grafů, jejich stylistickou úpravu, matematické operace s daty a jejich export pro další zpracování. [27] [28] [29] [30] [31] [32]

Jelikož jsou simulace v grafickém prostředí MSC Adams výkonově a časově náročné, umožňuje export matematického modelu soustavy do software typu Matlab nebo Simulink. Tento krok není podstatný během tvorby virtuálního dvojčete. Nicméně při propojení virtuálního dvojčete s fyzickým zařízením systémem může výrazně snížit časovou a výkonnostní náročnost na vyhodnocovací systém vzhledem k množství měřených dat. [27] [28] [29] [30] [31] [32]



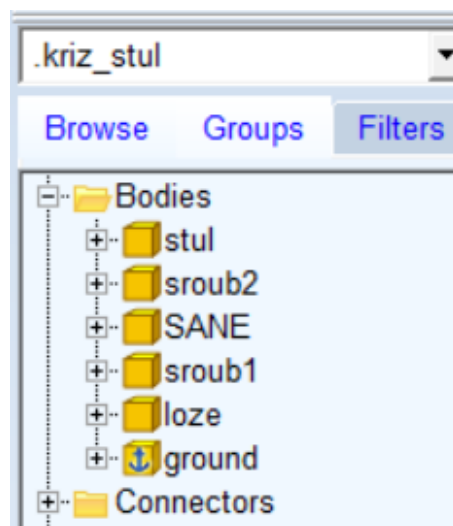
Obr. 20) Uživatelské rozhraní MSC Adams [28]

Pro účely této diplomové práce byla zvolena studentská verze MSC Adams 2019.2 se základním balíčkem funkcí a knihoven. Počet funkčních těles je pro tuto verzi omezen na 25. Jelikož byla soustava křížového stolu v kapitole 5.2 zredukována na pět těles, model virtuálního dvojčete by neměl být jakkoli omežován limity studentské verze.

5.3.2 Přenesení zjednodušeného modelu do prostředí MSC Adams

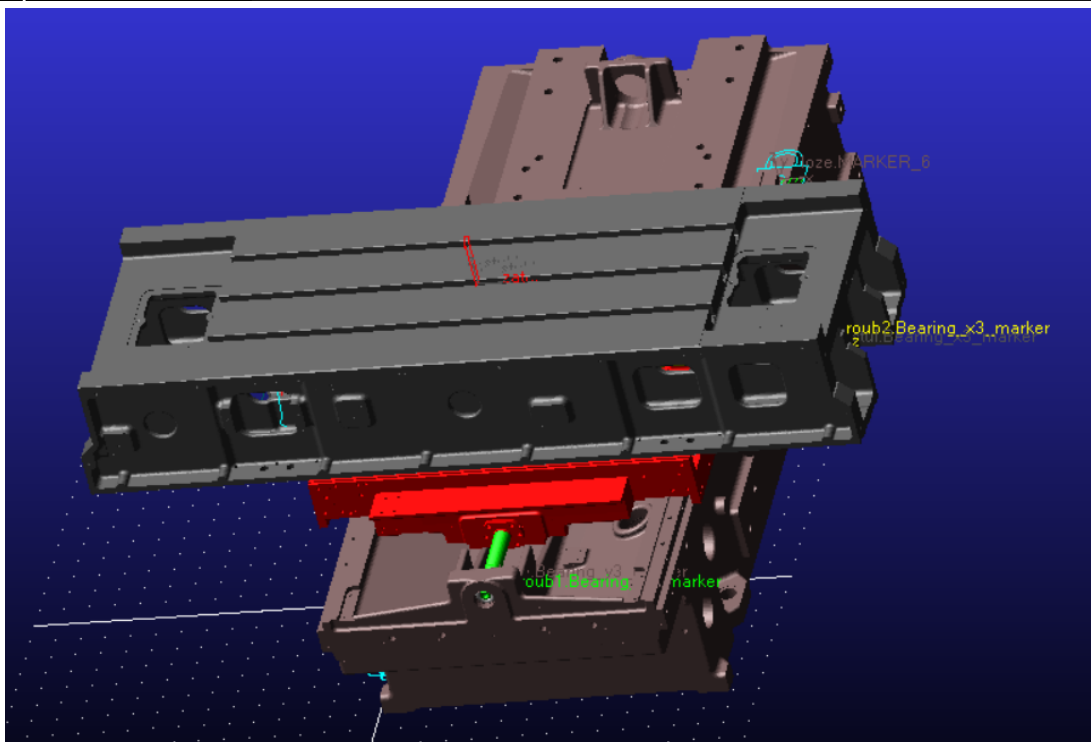
Oproti 3D-CAD software jako Autodesk Inventor nebo SolidWorks, které jsou přizpůsobeny na práci se 3D objekty je manipulace se sestavami a 3D tělesy v prostředí výrazně náročnější. Kdyby byla soustava přenesena jako celek, hrozilo by, že by nešla rozdělit na jednotlivé prvky kinem. řetězce. Z těchto důvodů byly modely KŠ a modely z kapitol 5.2.2-5.2.4 přeneseny postupně. Jelikož se kinematický řetězec křížového stolu skládá pouze z pěti elementů, není individuální import modelů problematický. Nicméně pokud by soustava byla složená z mnoha elementů, tento krok by byl výrazně časově náročnější.

Pro zjednodušení práce byly jednotlivé modely přejmenovány tak, aby bylo okamžitě jasné, o který člen soustavy se jedná (Obr. 21), nikoli podle identifikačních čísel soustavy definované výrobcem.



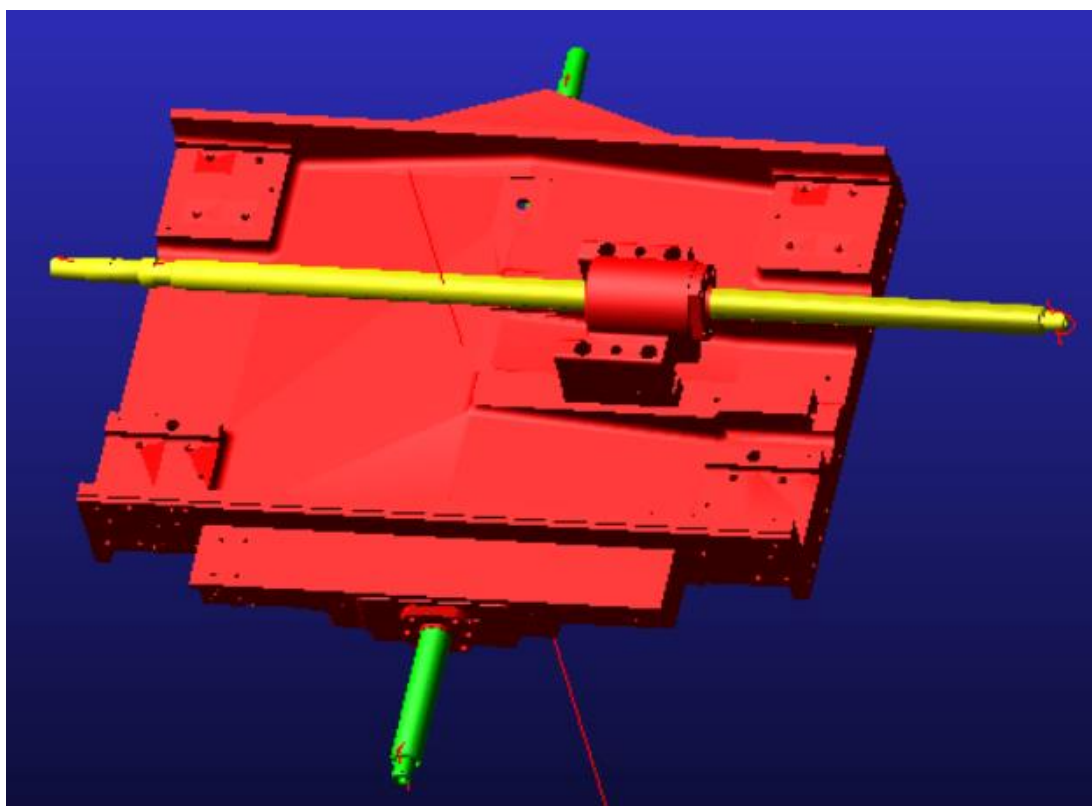
Obr. 21) Seznam použitých těles v prostředí MSC Adams

Zároveň každý díl sestavy dostal specifickou barvu pro snadnější identifikaci ve 3D prostoru (Obr. 22). Výchozí poloha stolu, vzhledem souřadnému systému fyzického zařízení byla zvolena $x=400$ mm, $y=400$ mm.



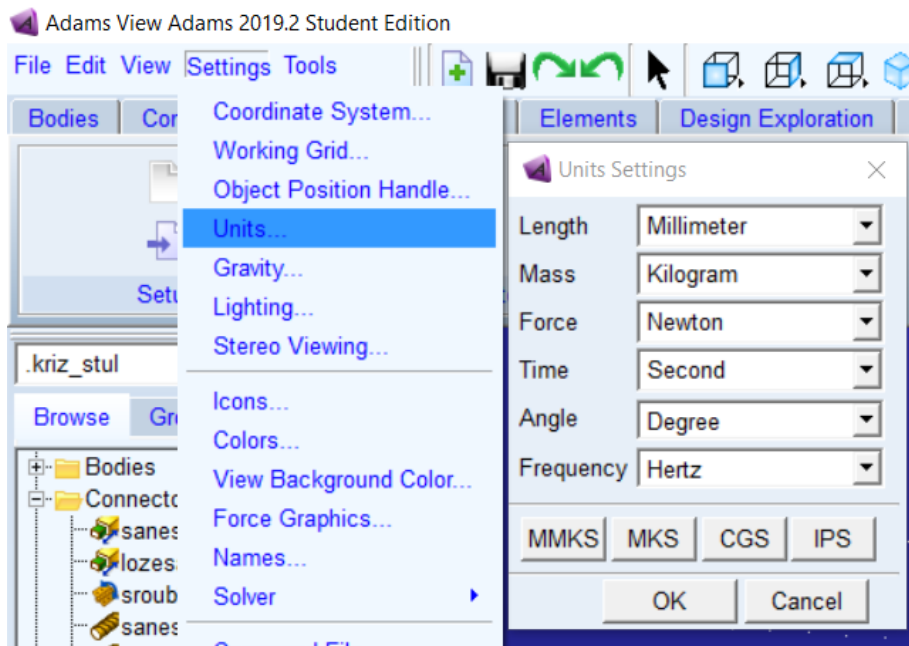
Obr. 22) Model křížového stolu v MSC Adams

Dočasně byla odebrána viditelnost modelům **stul** a **loze**, neboť by zbytečně komplikovaly vytváření kinematických vazeb, ložisek a silového zatížení (Obr. 23).



Obr. 23) Pracovní model křížového stolu

Dále je třeba definovat pracovní jednotky. Pro tento model byly zvoleny jednotky: **mm**, **kg**, **N**, **s**, **°**, **Hz** (Obr. 24). Tento krok je velmi důležitý, neboť pokud by se na něj zapomnělo, docházelo by k systematickému zavádění chyby, neboť při zadávání hodnot MSC Adams zpravidla neupozorňuje, v jakých jednotkách se příslušná hodnota definuje. Příkladem budiž definování momentu setrvačnosti, který je standardně podle jednotek SI definován jako **kg*m²**, nicméně pro tuto soustavu je ho třeba definovat jako **kg*mm²**, neboť jednotka polohy byla zvolena v mm. V horším případě mohou být hodnoty nevědomky definovány v imperiálních jednotkách (palec, libra, pinta). V takovém případě by zpětná úprava modelu byla velice komplikovaná a časově náročná.

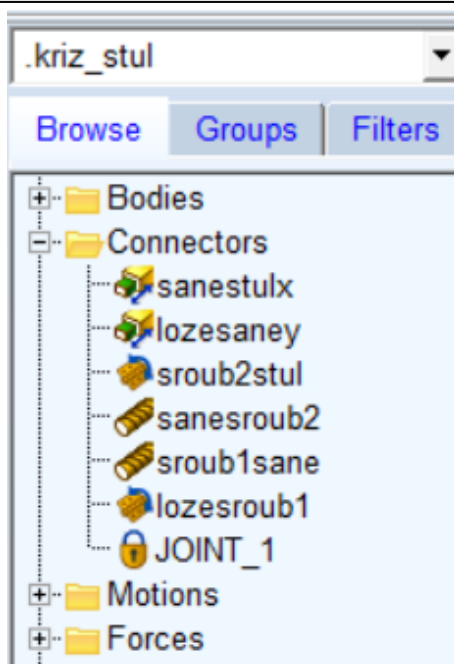


Obr. 24) Definice pracovních jednotek pro MSC Adams

5.3.3 Definice kinematických vazeb modelu

Soustava byla zavazbena tak, aby odpovídala reálnému zařízení. Jednotlivé vazby přímo reprezentují konkrétní mechanické pohybové elementy (Tab 2). Reprezentace těchto vazeb je zobrazena na Obr. 25)

Pro rotační a šroubové vazby je důležité, aby se nacházely v ose modelu KŠ, resp. v ose jeho těžiště. V opačném případě by tato excentricita způsobovala nežádoucí silové působení, stejně jako excentricita na fyzickém zařízení. Šroubové vazby byly definovány se stoupáním $P=10$ mm dle parametrů KŠ referenčního zařízení.



Obr. 25) Seznam použitých vazeb

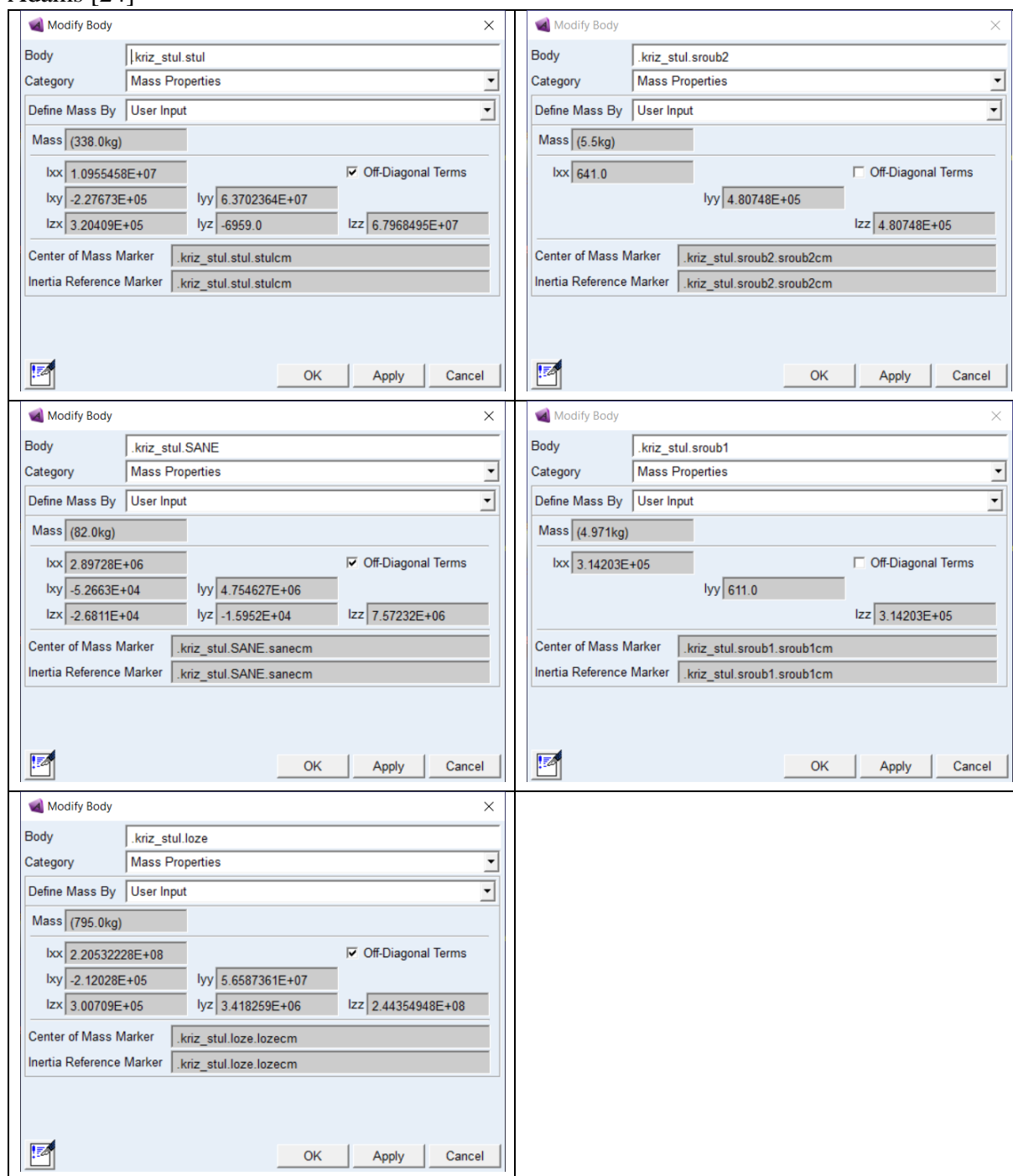
Tab 2) Popis použitých kinematických vazeb

Vazba	Typ vazby	Reprezentace fyzické součásti
sanestulx	translační	dvojice lineárního vedení pro osu X
lozesaney	translační	dvojice lineárního vedení pro osu Y
sroub2stul	rotační	uložení KŠ osy X v ložiskách
sanesroub2	šroubová	KŠ a matice osy X
sroub1sane	šroubová	KŠ a matice osy Y
lozesroub1	rotační	uložení KŠ osy Y v ložiskách
JOINT_1	fixní	uložení lože na betonovém základu

5.3.4 Definice dynamických vlastností modelu

Pro správnou funkčnost dynamických simulací je třeba definovat dynamické parametry jednotlivých elementů kinematického řetězce. Tyto parametry byly definovány pomocí hmotnosti dané součásti, polohy těžiště vzhledem k počátku souřadného systému a momentem setrvačnosti vůči těžišti příslušné součásti (Tab 3). Hodnoty hmotnosti byly definovány dle technických parametrů od výrobce. Poloha těžiště a momenty setrvačnosti byly změřeny a vypočteny pomocí software Autodesk Inventor Professional 2019 během úpravy modelu v kapitole 5.2.

Tab 3) Definice dynamických parametrů jednotlivých komponent křížového stolu do MSC Adams [24]

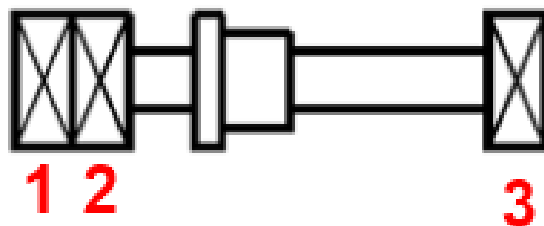


5.3.5 Definování ložisek

V této fázi funkci ložisek nahrazují rotační vazby, nicméně software MSC Adams verze 2019.2 umožňuje mimo jiné funkce vytváření a diagnostiky ložisek. Nahrazením rotační vazby ložisky získáme přesnější informace o zátěži konkrétního ložiska během simulací. Na základě těchto informací lze lépe predikovat technický stav konkrétního ložiska pro daný křížový stůl.

Uložení kuličkových šroubů pro osu X i osu Y (Obr. 26) zajišťují v obou případech dvojice axiálně radiálních kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem na jedné straně a jedno

radiální jehličkové na straně druhé. Tento typ uložení se vykazuje velmi dobrou tuhost uložení vzhledem k jeho jednoduchosti a ceně.



Obr. 26) Schéma uložení KŠ., 1 a 2 – axiálně radiální ložisko, 3 jehličkové ložisko [33]

Vzdálenosti ložisek byly změřeny v software Autodesk Inventor během fáze zjednodušování modelu (Tab 4). Parametry ložisek os X a Y jsou uvedeny v Tab 5).

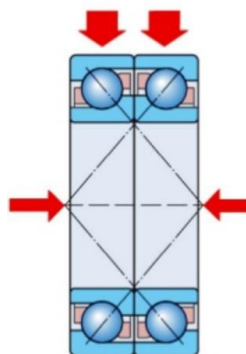
Tab 4) Vzdálenost mezi ložisky

	1-2	2-3
Osa X	29,25 mm	982,5 mm
Osa Y	28,85 mm	843,9 mm

Tab 5) Parametry použitých ložisek [34] [35]

Ložisko	1, 2	3
Název	NSK-25TAC62	IKO-NA4904
Typ	kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem 60°	Jednořadé jehličkové ložisko
Způsob zatěžování	jednosměrně axiálně radiální	radiální
Vnitřní průměr	25 mm	20 mm
Základní dynamická únosnost	28,5 kN	21,6 kN

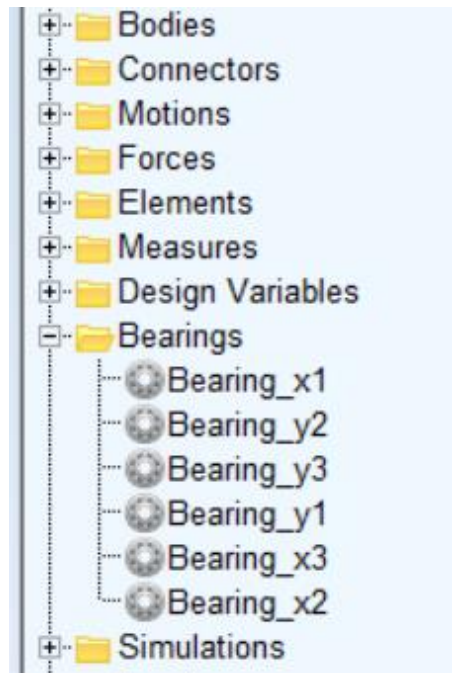
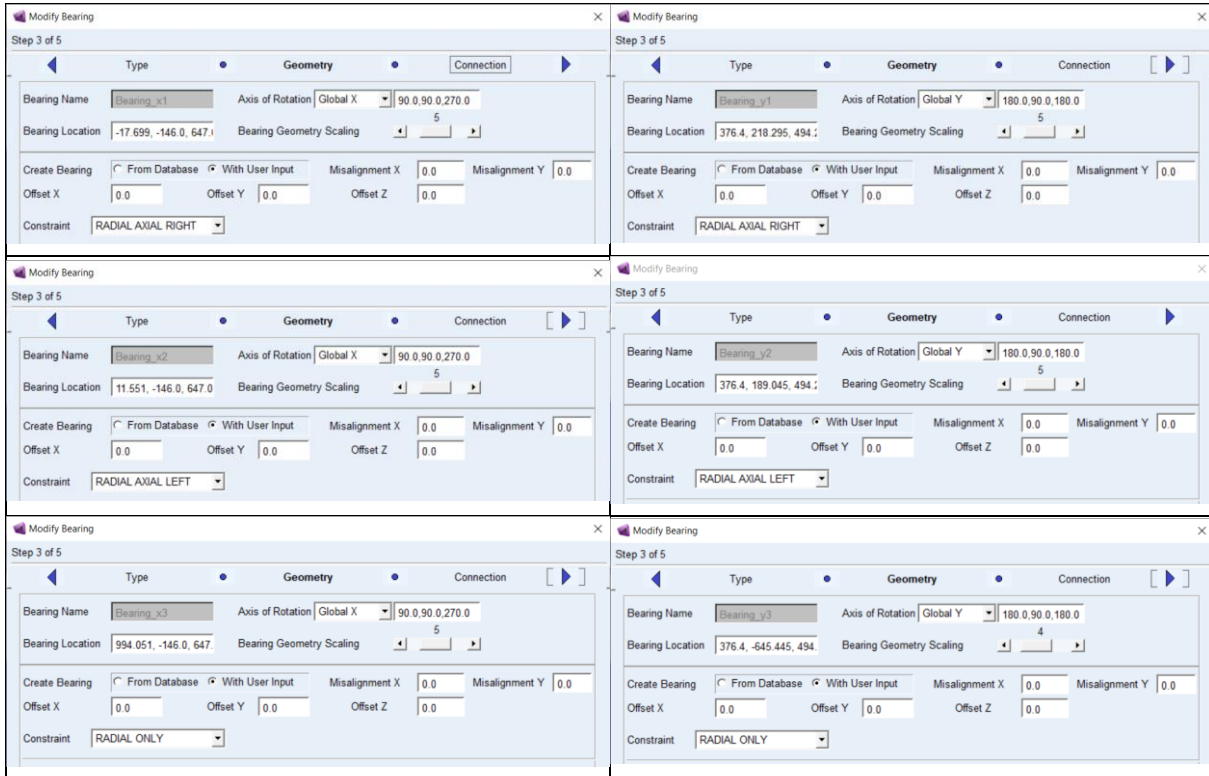
Jelikož ložiska 1 a 2 jsou schopna přenášet axiální sílu pouze v jednom směru, jsou vůči sobě zrcadlově obrácena. V tomto uložení (Obr. 27) ložisko 1 přenáší axiální sílu v záporném směru a ložisko 2 ve směru kladném.



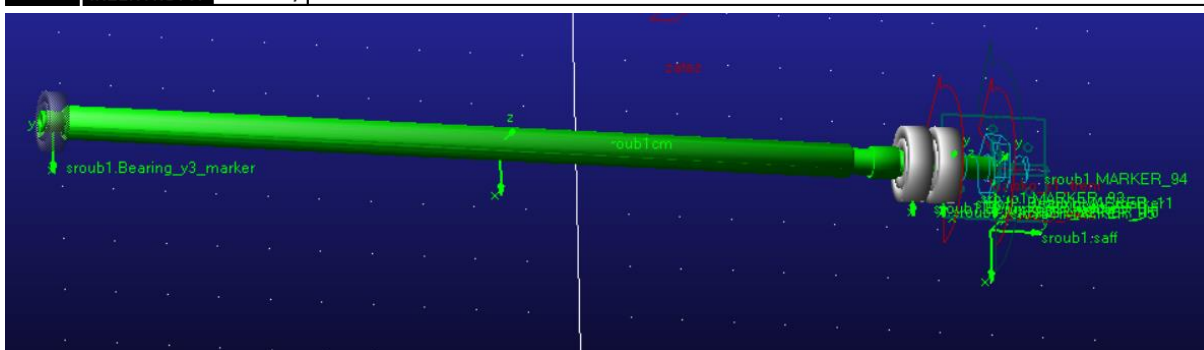
Obr. 27) Uložení ložisek 1 a 2 na KŠ [36]

Dekladace ložisek x1-x3 a y1-y3 do modelu křížového stolu je zobrazena v Tab 6). Obr. 28) zobrazuje seznam ložsek v MSC Adams a na Obr. 29) je zobrazena vizuální reprezentaci ložisek v modelu křížového stolu

Tab 6) Definování ložisek x1-x3 a y1-y3 do MSC Adams



Obr. 28) Seznam použitých ložisek v MSC Adams



Obr. 29) Vizualní reprezentace ložisek osy Y v prostředí MSC Adams

5.3.6 Definice silového zatížení a pasivních odporů

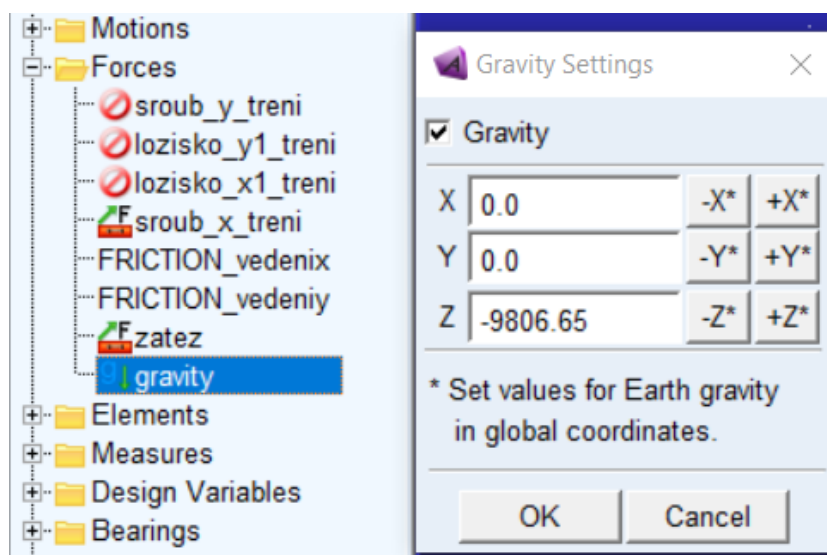
Cílem této podkapitoly je definovat silové zatížení do modelu křížového stolu. Hodnoty silového působení budou následně v kapitole 5.5 optimalizovat tak, aby chování virtuálního modelu co nejpřesněji odpovídalo chování fyzického zařízení na základě experimentu v popsaném v kapitole 5.4

Na soustavu křížového stolu z hlediska silového působení působí:

- Gravitační zrychlení
- Řezná síla z obrábění
- Tíhová síla obrobku
- Pasivní odpory:
 - Valivé tření v lineárním vedení
 - Valivé tření v ložiskách
 - Valivé tření v KŠ

Gravitační zrychlení

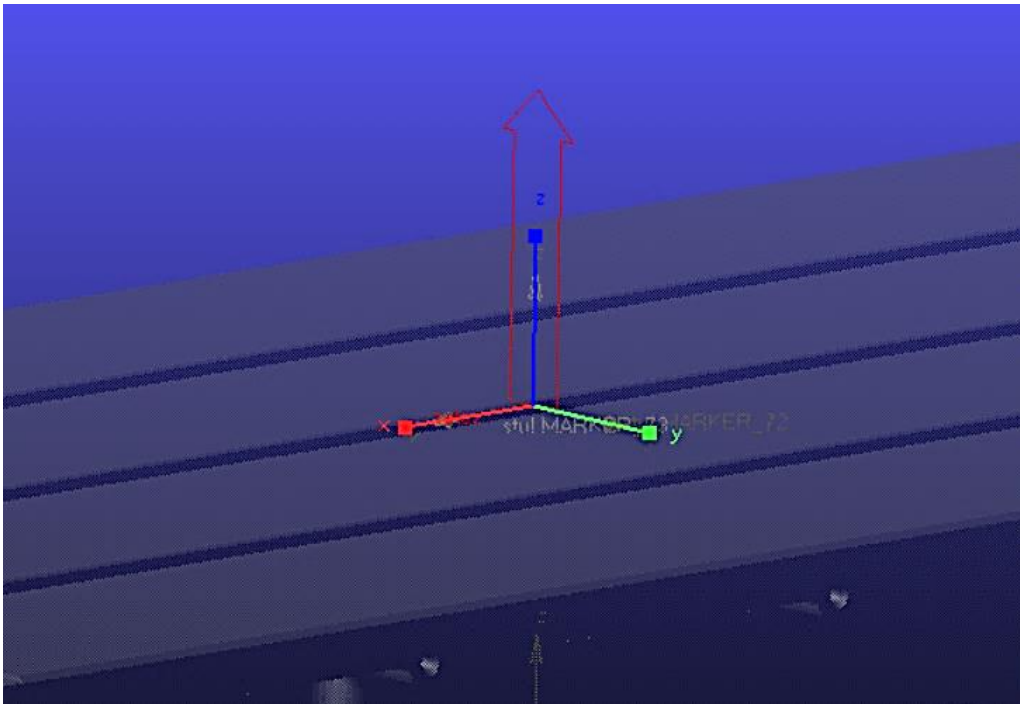
Gravitační zrychlení bylo zvoleno do záporného směru osy Z, vzhledem k orientaci souřadného systému modelu. Software automaticky předpokládá, že simulace probíhají v gravitačním poli Země. Pro účely této diplomové práce byla přejata doporučená hodnota gravitačního zrychlení o velikosti $9806,65 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ (Obr. 30).



Obr. 30) Definování gravitace do MSC Adams

Řezná a tíhová síla

Na povrchu tělesa stolu bylo definováno silové působení **zatez** (Obr. 31), reprezentující silové působení obrobku na stůl. Její orientace odpovídá globálnímu souřadnému systému modelu. Zátěž tvoří hmotnost, resp. tíhová síla obrobku, případně řezná síla v ose Z. Složku X a Y tvoří řezné síly působící na obrobek. Jelikož experiment v kapitole 5.4 nezahrnuje obrábění ale pouze pohyb se závažím, silové působení v ose X a Y je rovno nule. Velikost síly ve směru Z byla stanovena na hodnotu -1000 N, odpovídající závaží o přibližné od hmotnosti 100 kg. Tato hodnota bude upravena na základě skutečné hmotnosti závaží během experimentu v kapitole 5.4.



Obr. 31) Silové působení **zatez** umístěné na upínací desku stolu

Tření v lineárním vedení

Lineární vedení je ve virtuálním modelu nahrazeno translační vazbou. MSC Adams umožňuje definici tření přímo do translační vazby. Do vazeb **sanestulx** a **lozesaney** bylo vytvořeno tření. Vzhledem k povaze soustavy uvažujeme pouze dynamické tření. Velikost koeficientu tření byla zvolena na hodnotu $f_d = 0,1$.

Tření v ložiskách

Software MSC Adams neumožňuje definovat tření do jednotlivých ložisek. Pro zjednodušení regulace pasivních odporů v ložiskách reprezentuje reakci v ložiskách 1, 2, 3 pouze jedno silové působení pro danou osu (Obr. 32). Je důležité, aby osa definovaného třecího momentu procházela bodem, jež byl definován jako těžiště modelu kuličkového šroubu, v opačném případě by tato excentricita způsobila nežádoucí silové působení a funkčnost modelu by neodpovídala reálnému zařízení.

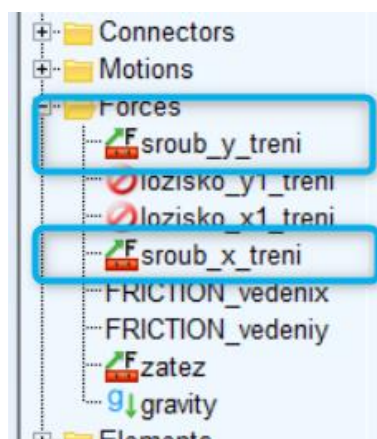


Obr. 32) Reprezentace pasivních odporů v ložiskách pro osu X a Y

Velikost třecího momentu pro osu X a Y je závislost zrychlení příslušné osy, její hmotnosti, poloměru ložiska a koeficientu tření. Jednotkou momentu pasivních odporů v ložiskách je [N*mm], neboť vzdálenost je pro tento model definována v [mm].

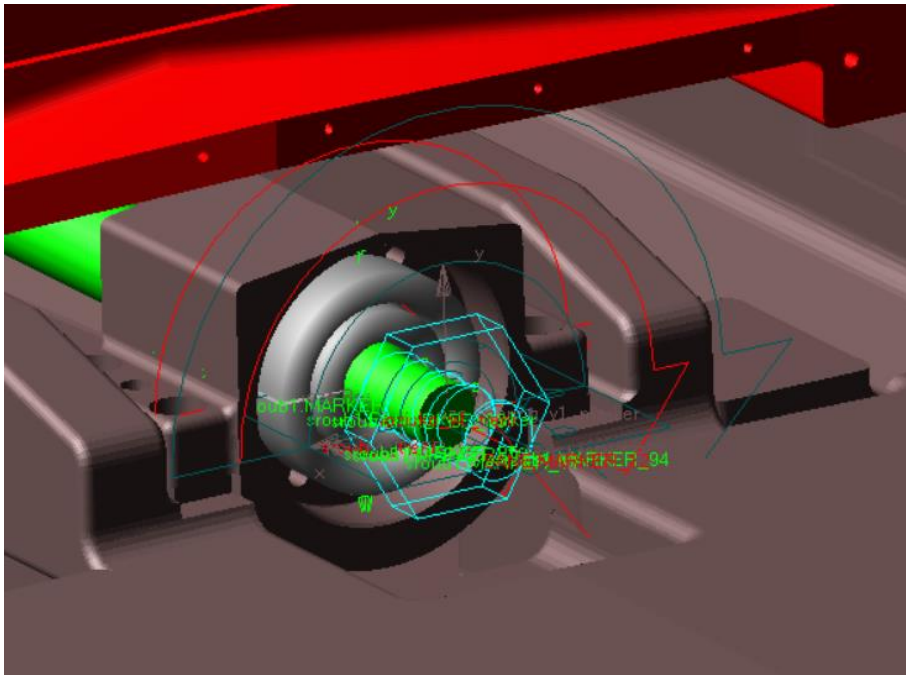
Tření v kuličkových šroubech

KŠ jsou v modelu reprezentovány pomocí šroubových vazeb. Tyto vazby neumožňují zavedení tření. Princip návrhu pasivních odporů pro KŠ je totožný s návrhem pasivních odporů v ložiskách (Obr. 33).



Obr. 33) Reprezentace pasivních odporů v KŠ pro osu X a Y

Obr. 34) zobrazuje kompletní uložení osy Y zahrnující ložiska, pasivní odpory a šroubovou vazbu.



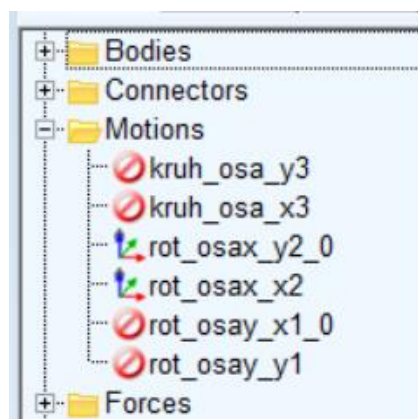
Obr. 34) Uložení osy Y

Hodnoty všech pasivních odporů budou upraveny v kapitole 5.5.2 Optimalizace dynamického chování virtuálního dvojčete.

5.3.7 Definice řízení pohybu stolu

Software MSC Adams umožňuje řízení pohybu dynamicky (síla / moment) nebo kinematicky (poloha, poloha rychlost zrychlení, natočení, úhlová rychlost, úhlové zrychlení). Pro tento model byla zvolena metoda řízení pomocí úhlové rychlosti, resp. otáček KŠ osy X a osy Y. Tato varianta byla zvolena, jelikož reprezentuje řízení otáček motoru během polohování křížového stolu. Obdobně jako u definování rotačních vazeb je třeba dbát, aby osa rychlostní funkce procházela těžištěm modelu KŠ.

Experiment v kapitole 5.4 obsahuje celkem tři polohovací cykly. Pro jednodušší přechod mezi testovacími cykly byly vytvořeny tři rychlostní funkce pro otáčky os X a Y (Obr. 35). Přičemž během simulací budou aktivní pouze funkce relevantní danému cyklu. Jelikož v kapitole 5.3.2 byla zvolena jednotka natočení ve stupních [°], tedy jednotkou řízení polohy křížového stolu je [$^{\circ}\cdot\text{s}^{-1}$].

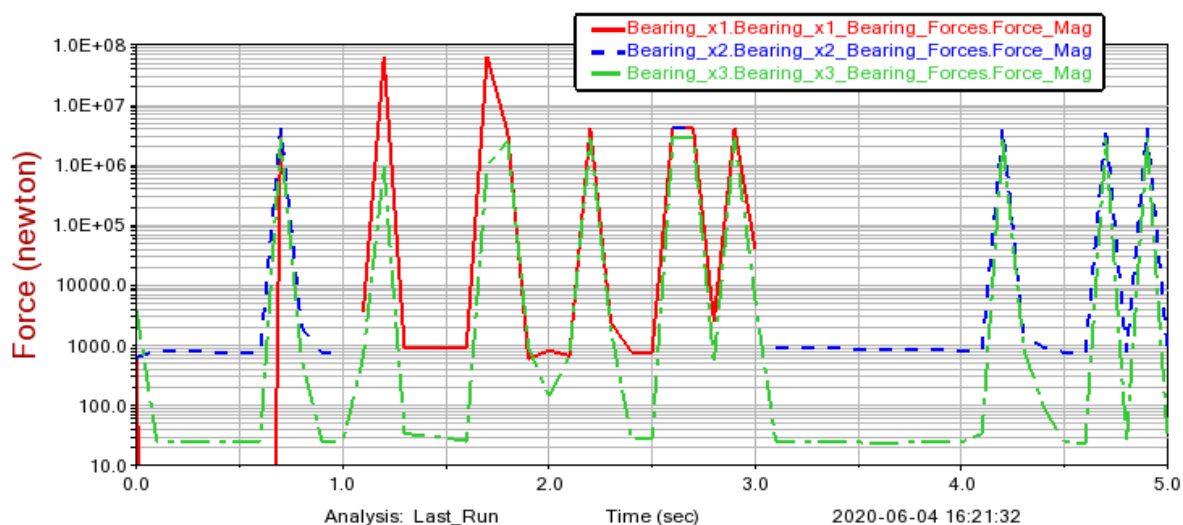


Obr. 35) Seznam použitých rychlostních funkcí

5.3.8 Simulace funkčnosti modelu

V této fázi byla provedena prvotní simulace virtuálního modelu. Cílem této simulace je kontrola funkce modelu, identifikace a eliminace chyb způsobených během vytváření modelu. Jako polohovou funkci byl zvolen pohyb po kružnici, která bude později sloužit jako předloha v testovacího cyklu 3 v kapitole 5.4.

Testovací simulace odhalila enormně vysoké zatížení ložisek x1, x2, x3 (Obr. 36). Toto zatížení způsobovala excentricita těžiště KŠ osy X. Z Obr. 36 je dále patrné, že ložisko x1 mezi časy 1 s a 3 s nevykazuje žádné silové působení a ložisko x2 je naopak pouze v tomto časovém úseku silově zatěžováno. Jelikož jsou ložiska x1 a x2 jednosměrně axiálně-radiální, toto chování potvrzuje správnost funkce ložisek x1 a x2 během simulace.



Obr. 36) Silové působení na ložiska způsobené nevyváhou tělesa **sroub2**

Zároveň simulace odhalila, že ložisko y3 bylo vlivem nepozornosti definováno jako axiálně-radiální, tedy přenášelo i axiální zatížení, které by měly přenášet pro osu Y pouze ložiska y1 a y2. Obě tyto chyby byly následně opraveny. Po opětovném spuštění simulace se žádná ze zmíněných chyb již neprojevovala.

5.4 Experiment na fyzickém zařízení

V této fázi je třeba optimalizovat virtuální dvojčte tak, aby jeho chování co nejpřesněji odpovídalo dvojčeti reálnému. Cílem této podkapitoly je realizace třech testovacích cyklů na fyzickém zařízení (Tab 7). Tyto cykly budou zároveň simulovány na virtuálním dvojčeti. Následně budou ve virtuálním modelu laděny pasivní odpory tak, aby průběh kroutícího momentu na KŠ modelu odpovídal průběhu měřeného kroutícího momentu na motorech fyzického zařízení. Každý experiment bude realizován nejprve naprázdno a poté se závažím reprezentující hmotnost obrobku během obráběcího cyklu. Jako závaží byly zvoleny čtyři ocelové hranoly o celkové hmotnosti 119 kg, které byly ke stolu upevněny pomocí upínek.

Během testovacích cyklů byla měřena relativní poloha x, y, rychlost, x, y a momentotvorný proud I_{qx} , I_{qy} . Průběhy kroutících momentů motorů byly získány součinem proudů I_{qx} a I_{qy} momentovou konstantou motoru k_m (rovnice 8). Všechny experimenty začínají ve výchozí poloze $x = 400$ mm, $y = 400$ mm.

Výpočet kroutícího momentu pomocí momentové konstanty:

$$M_k = I_q * k_m \quad (7)$$

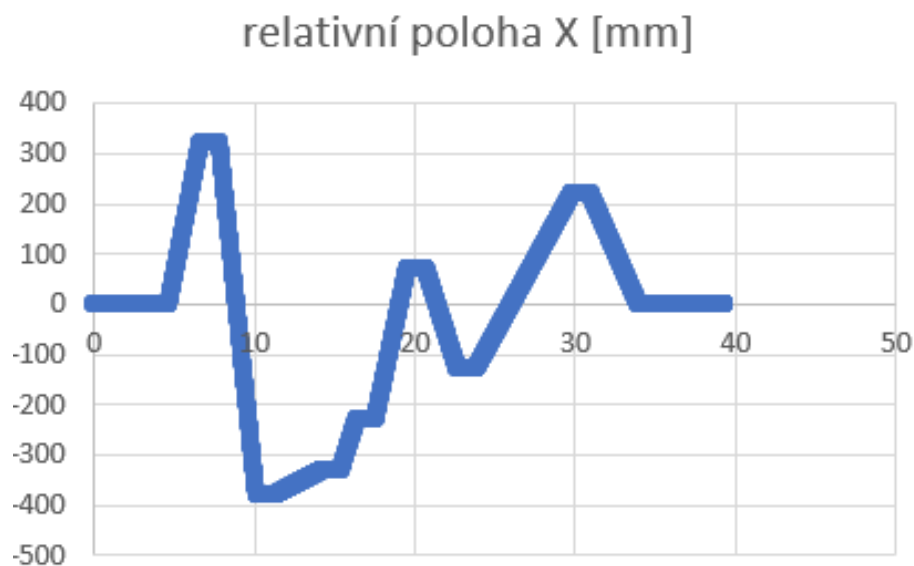
Tab 7) Tabulka testovacích cyklů

Experiment		
1	2	3
Stručný popis cyklu		
Prostý pohyb po celé délce osy X při různých konstantních rychlostech pohybu	Prostý pohyb po celé délce osy Y při různých konstantních rychlostech pohybu	Kruhová interpolace s polohou středu x = 400, y = 300, při konstantní rychlosti posuvu v = 9420 mm*s ⁻¹
G-funkce testovacího cyklu		
N10 g54 g00 x0 y0 N20 g91 N30 g01 x320 f9696.97 N40 g04 f01 N50 g01 x-700 f18276.76 N60 g04 f01 N70 g01 x50 f1000 N80 g04 f01 N90 g01 x100 f6002.401 N100 g04 f01 N110 g01 x300 f9009 N120 g04 f01 N130 g01 x-200 f6060.6 N140 g04 f01 N150 g01 x350 f3500 N160 g04 f01 N170 g01 x-220 f4400 N180 m30	N10 g54 g00 x0 y0 N20 g91 N30 g01 y100 f3030.3 N40 g04 f01 N50 g01 y-500 f15151.51 N60 g04 f01 N70 g01 y50 f1000 N80 g04 f01 N90 g01 y100 f6024.096 N100 g04 f01 N110 g01 y300 f9090.909 N120 g04 f01 N130 g01 y-200 f6060.6 N140 g04 f01 N150 g01 y150 f1500 N180 m30	N10 g54 N20 g00 x0 y0 N30 g90 N40 g64 N50 g02 x0 y-200 cr=100 f9420 N60 g02 x0 y0 cr=100 N70 m30

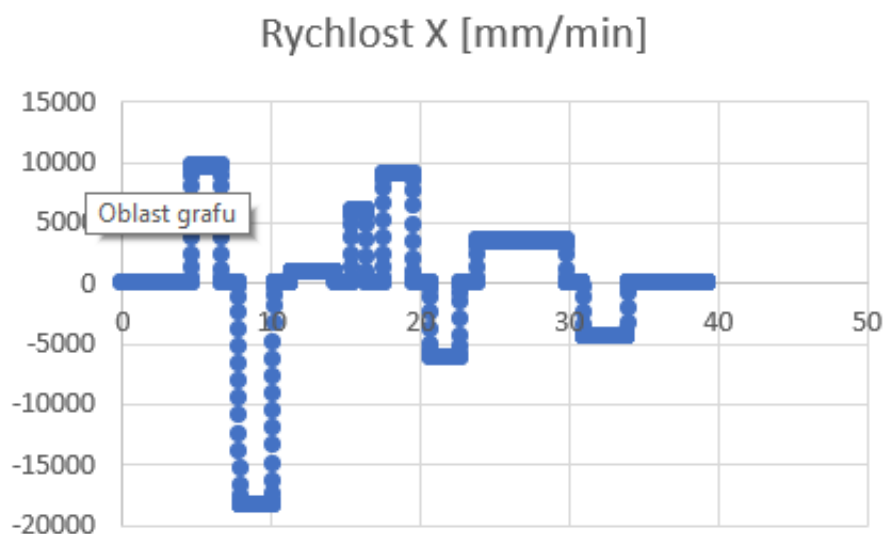
Naměřená data pochází přímo z řídicího systému stroje. Přibližná perioda vzorkování je 0,002 s. Vzorkování rychlosti, polohy a proudu má vyšší periodu. Po měření byla naměřená data zredukována tak, aby rozdíl period vzorkování nevytvářel šum při tvorbě polohových, rychlostních a momentových charakteristik. Úprava naměřených dat byla provedena v programu Microsoft Excel. Momentové charakteristiky jsou záměrně vůči sobě časově posunuty tak, aby šlo snadně identifikovat, zda se jedná o cyklus bez zátěže či se zátěží.

5.4.1 Experiment 1

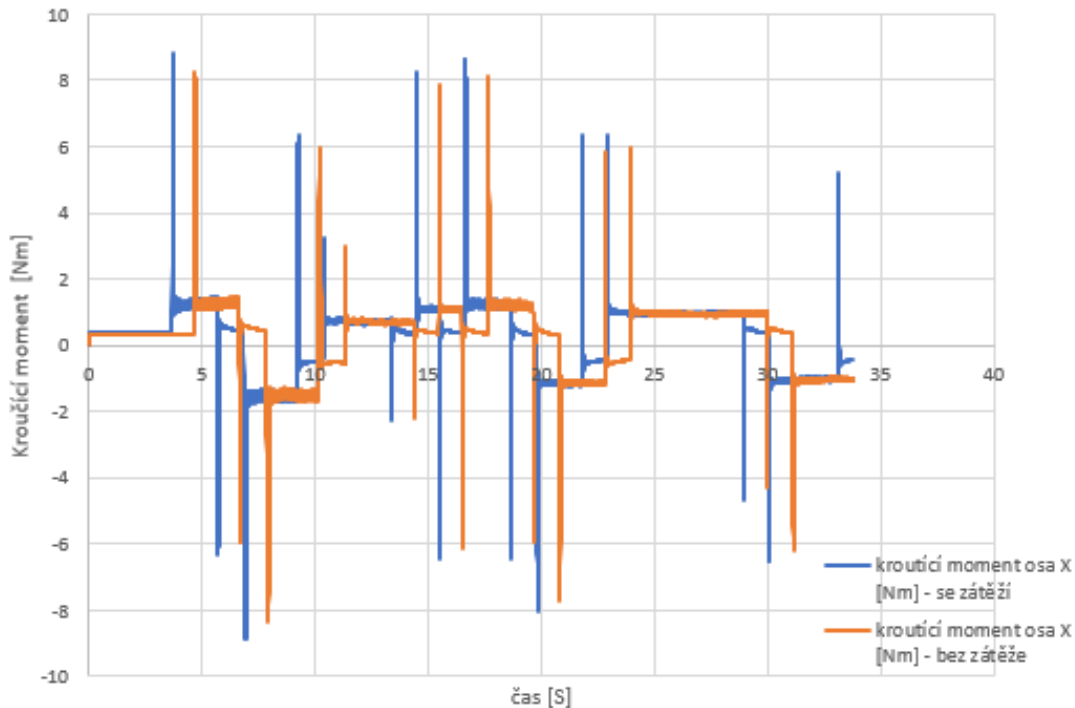
Účelem testovacího cyklu 1 je získání dat pro optimalizaci chování osy X virtuálního dvojčete. Během **experimentu 1** byla měřena pro osu X poloha (Obr. 37), rychlost (Obr. 38) a momentotvorný proud, který byl následně přepočten na krouticí moment (Obr. 39).



Obr. 37) Experiment 1 – měření relativní polohy X



Obr. 38) Experiment 1 – měření rychlosti X

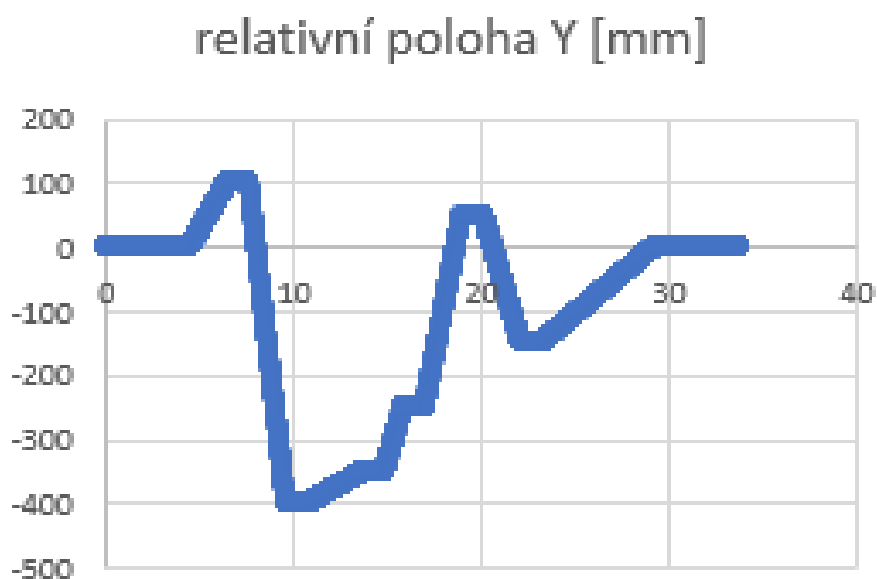


Obr. 39) Experiment 1 – Srovnání průběhu kroučícího momentu na motoru osy X bez zátěže a se zátěží

Experiment 1 ukázal, že po přidání zátěže se kroučící moment na motoru osy X zvýšil zhruba o 5,5 %. Naměřené hodnoty testovacího cyklu se zátěží budou sloužit jako referenční hodnota pro ladění osy X virtuálního dvojčete v kapitole 5.5.

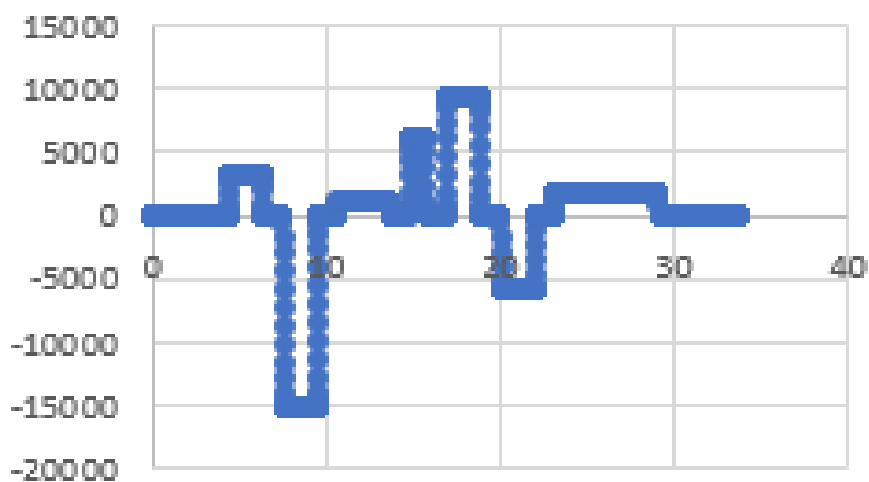
5.4.2 Experiment 2

Během **experimentu 2** bude pozorována poloha Y (Obr. 40), rychlost Y (Obr. 41) a průběh kroučícího momentu na ose Y (Obr. 42) obdobně jako během **experimentu 1**.

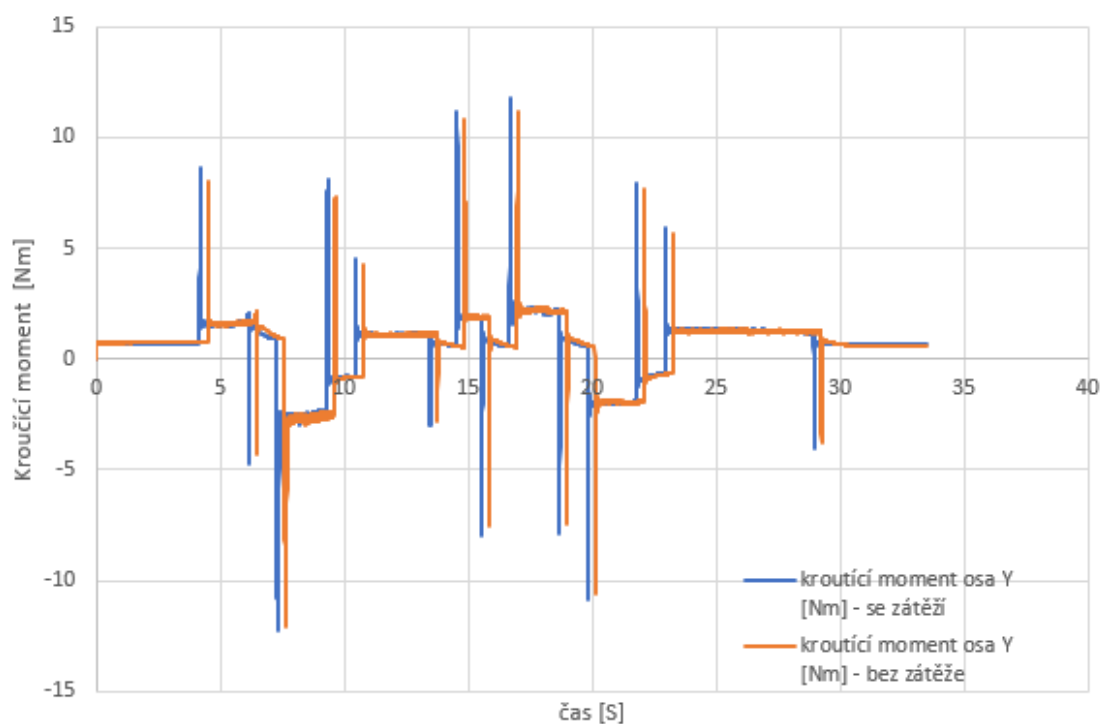


Obr. 40) Experiment 2 – měření relativní polohy Y

Rychlost Y [mm/min]



Obr. 41) Experiment 2 – měření rychlosti Y

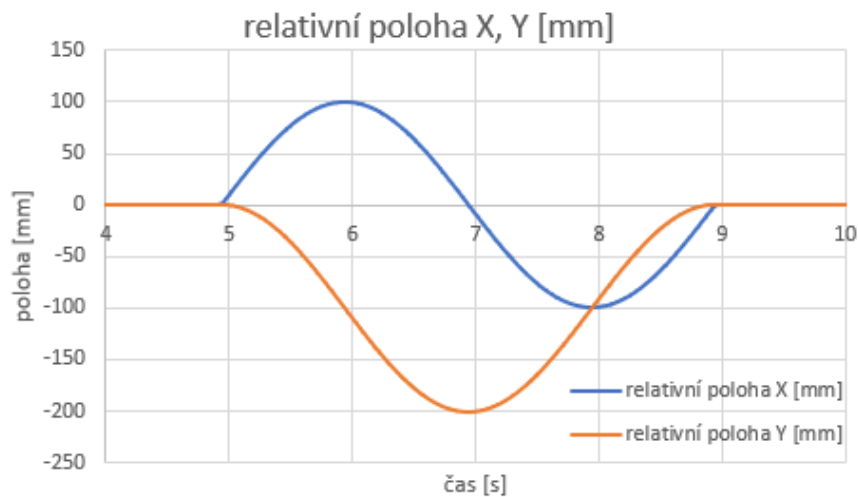


Obr. 42) Experiment 2 – Srovnání průběhu kroučícího momentu na motoru osy Y bez zátěže a se zátěží

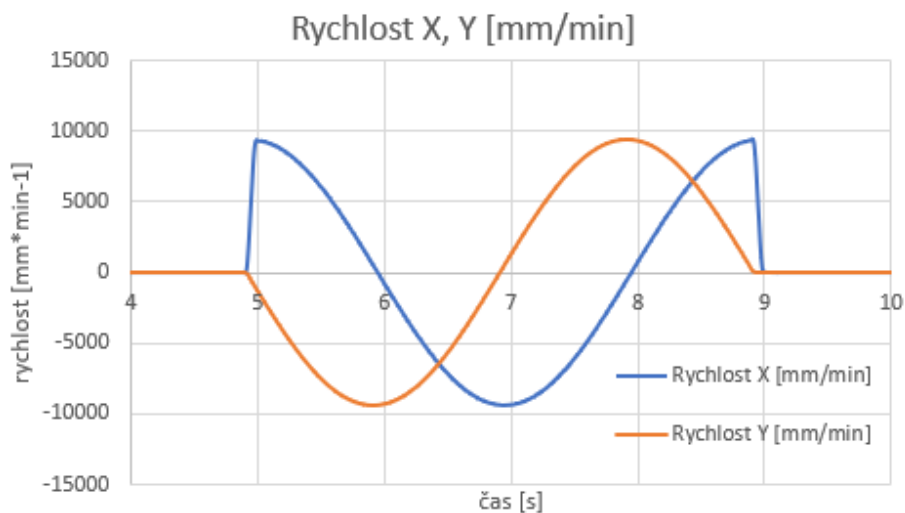
Hodnota kroučícího momentu po přidání zátěže se zvýšila zhruba o 7,2 %. Naměřené hodnoty testovacího cyklu se zátěží budou sloužit jako referenční hodnota pro ladění osy Y virtuálního dvojčete.

5.4.3 Experiment 3

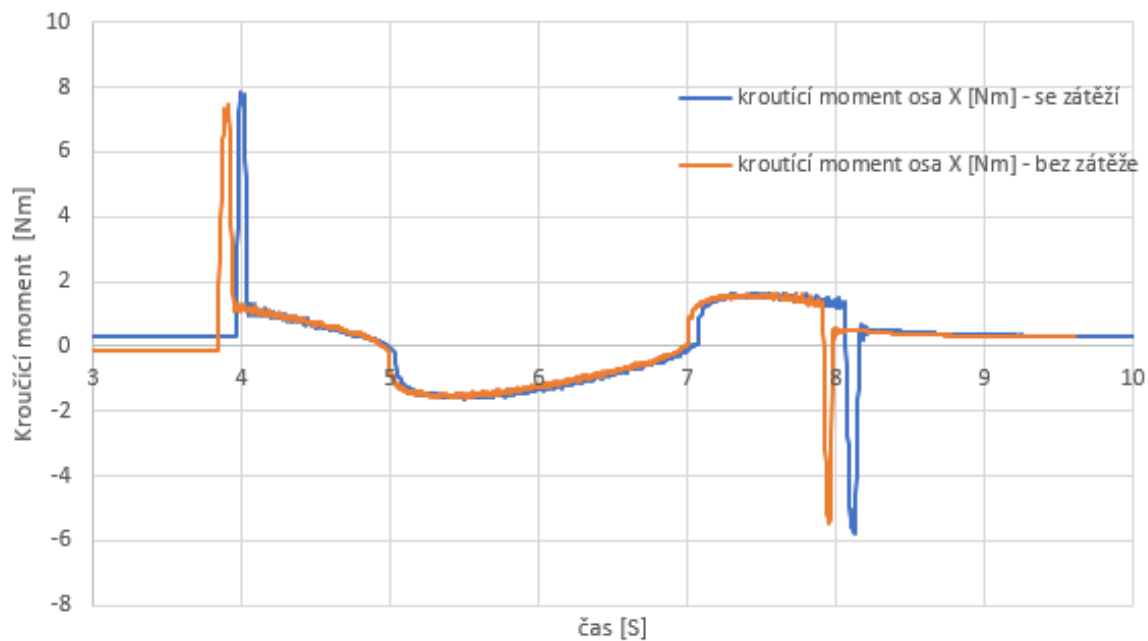
Cílem **experimentu 3** je provedení kruhové interpolace v rovině XY (Obr. 43). Naměřená data budou sloužit jako sekundární referenční hodnoty pro nastavení osy X a osy Y virtuálního dvojčete. Jelikož jsou průběhy rychlostí X a Y (Obr. 44) podobné, resp. jejich průběh je posunut o 90° , bude zároveň pozorován poměr velikosti zátěže na ose X vůči ose Y. Průběh kroutícího momentu os X a Y je zobrazen na Obr. 45 a 46.



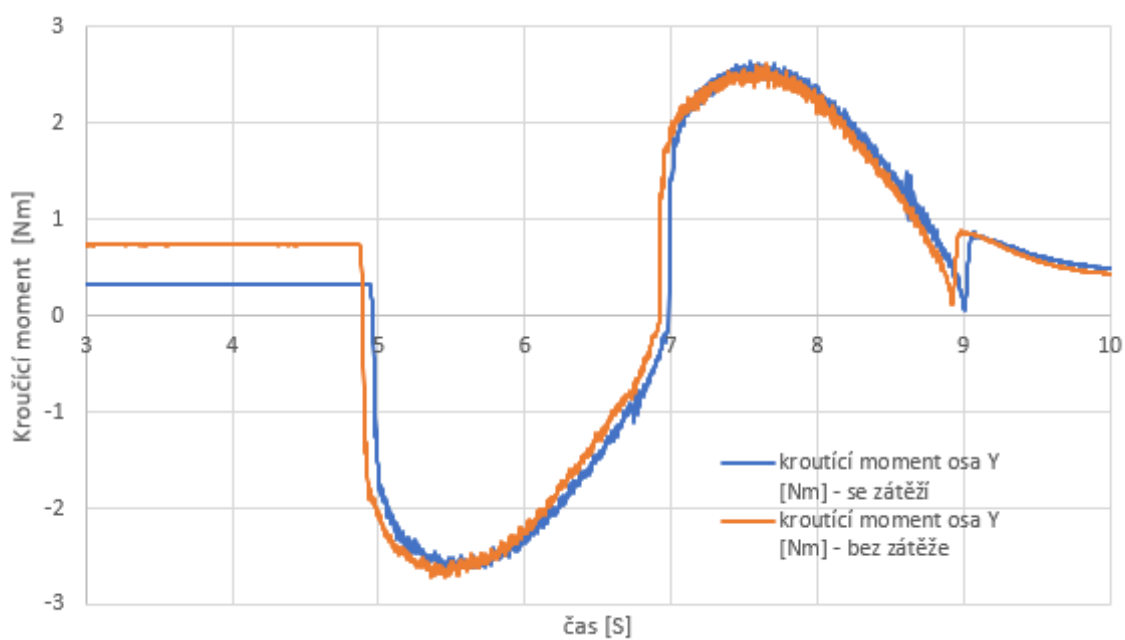
Obr. 43) Experiment 3 – měření relativní polohy X, Y



Obr. 44) Experiment 3 – měření rychlosti X, Y



Obr. 45) Experiment 3 – průběh kroučícího momentu na ose X se zátěží a bez zátěže



Obr. 46) Experiment 3 – průběh kroučícího momentu na ose Y se zátěží a bez zátěže

5.5 Optimalizace virtuálního dvojčete

Pro optimalizaci virtuálního dvojčete je třeba nejprve přenést kinematické chování křížového stolu z experimentů 1-3. Následně budou laděny velikosti pasivních odporů tak, aby průběh krouťícího momentu na modelu odpovídal průběhu krouťícího momentu M_k z experimentů 1-3.

5.5.1 Přenesení rychlostní funkce do modelu virtuálního dvojčete

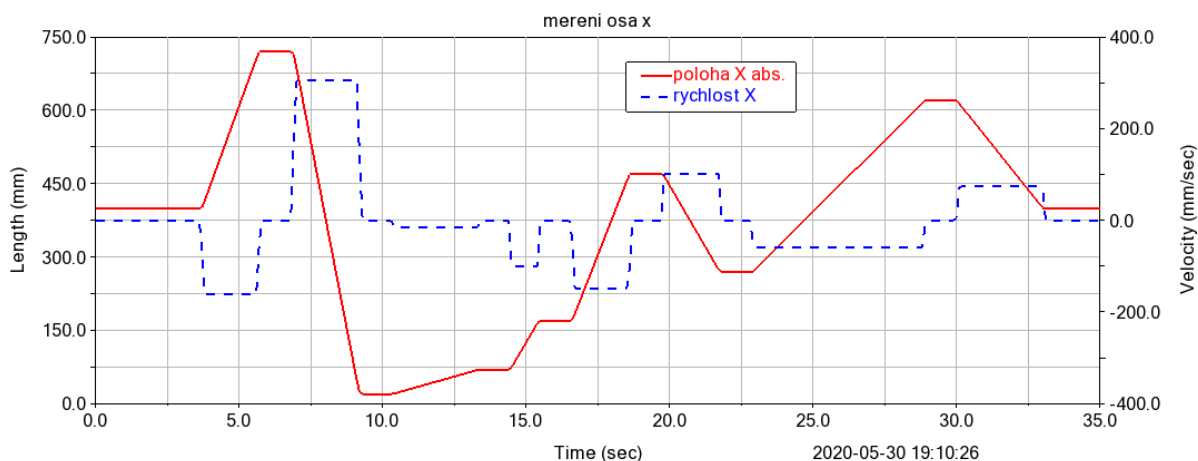
V kapitole 5.3.7 byl zvolen způsob řízení pohybu virtuálního dvojčete pomocí rychlosti otáčení modelu KŠ. Pro řízení polohy tedy je třeba přesunout rychlostní funkci z experimentu 1-3 do MSC Adams. Jelikož byla data z měření zpracována v české verzi programu Microsoft Excel, který používá pro oddělení desetinného místa symbol „desetinná čárka“ je třeba data z experimentu upravit tak, aby byl použit symbol „desetinná tečka“ neboť MSC Adams tento formát pro zápis čísla nepodporuje a mohlo by dojít ke znehodnocení dat.

Pro řízení rychlosti byla zvolena jednotka [$^{\circ}$ *s $^{-1}$] a hodnoty rychlosti byly během experimentu měřeny v [mm*min $^{-1}$], je tedy třeba přepočít jednotek tak aby pohybová funkce virtuálního dvojčete odpovídala pohybové funkci během příslušného experimentu.

Předpis upravené rychlostní funkce pro virtuální dvojče:

AKISPL(time,0,kriz_stul.rychlost_osaX_mm_min,0)/60/10*360d

Přičemž „AKISPL(time,0,kriz_stul.rychlost_osaX_mm_min,0)“ je funkce rychlosti osy X naměřená z experimentu 1, „60“ převod z [ot*min $^{-1}$] na [ot*s $^{-1}$], „10“ stoupání šroubu a „360d“ převod z [ot*s $^{-1}$] na [$^{\circ}$ *s $^{-1}$]. Z Obr. 47) je patrné, že průběh polohy i rychlosti osy X odpovídá průběhu polohy a rychlosti osy X z **experimentu 1** (Obr. 37 a 38). Nyní lze říci, že kinematické chování virtuálního dvojčete během simulace odpovídá chování fyzického zařízení. Stejným způsobem byly definovány pohybové funkce simulující **experiment 2 a 3**.



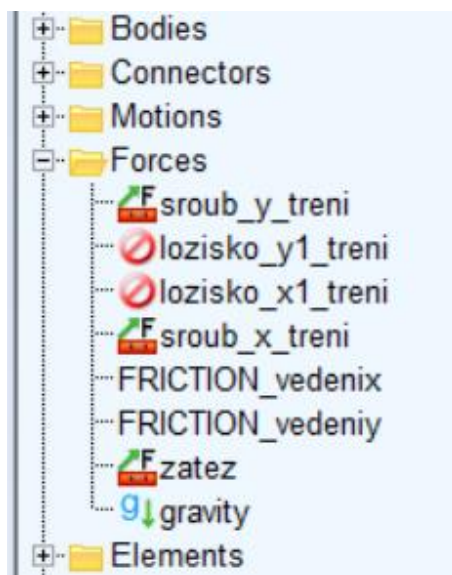
Obr. 47) Průběh polohy a rychlosti osy X při simulaci experimentu 1 v MSC Adams

5.5.2 Optimalizace dynamického chování virtuálního dvojčete

O virtuálním dvojčeti můžeme říci, že je dynamicky optimalizované tehdy, pokud jeho silové působení odpovídá fyzickému zařízení. Pro tento model musí tedy platit, že průběh krouťícího momentu na KŠ musí odpovídat změřenému momentu na motoru během experimentu, resp. jeho převrácené hodnotě, jelikož je soustava řízena kinematicky. Tudiž změřený moment během simulace je reakční síla vůči danému pohybu. Jako referenční hodnota ladění osy Y byl zvolen krouťící moment osy Y během **experimentu 2** se zátěží (Obr. 42).

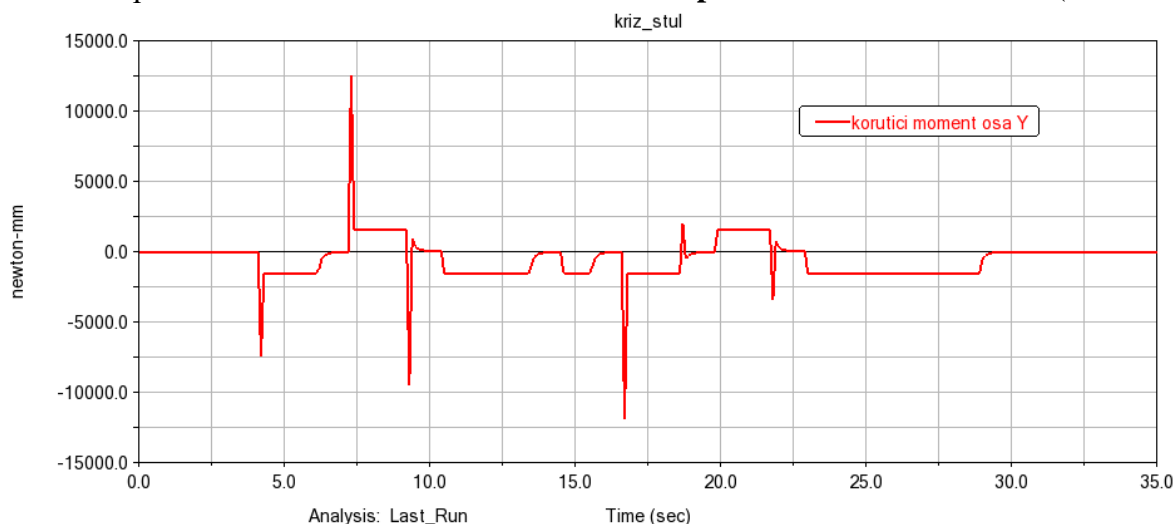
Vektor silového působení **zatez** byla upravena na hodnotu **[0,0, -1194.9]**, čímž odpovídá silovému působení závaží během experimentu se závažím.

Jelikož jsou funkce třecího momentu KŠ i ložisek lineárně závislé na zrychlení stolu v daném směru, pro zjednodušení regulace pasivních odporů bylo silové působení reprezentující pasivní odpory v ložiskách **lozisko_y1_treni** a **lozisko_x1_treni** deaktivováno (Obr. 48). Velikosti třecího momentu **sroub_y_treni** v sobě zahrnuje i kroutící moment **lozisko_y1_treni**.



Obr. 48) Zjednodušení pasivních odporů

Po naladění pasivních odporů hodnota kroutícího momentu na KŠ osy Y (Obr. 49) zhruba odpovídá kroutícímu momentu během **experimentu 2** se zátěží (Obr. 42).



Obr. 49) Kroutící moment na KŠ osy Y během simulace **experimentu 2** se zátěží

Výsledná velikost koeficientu dynamického tření pro sílu **FRICITION_vedeniy** byla během optimalizace nastavena na $f_{dy}=0,18$.

Předpis funkce třecího momentu osy Y **sroub_y_treni**:

$$\text{ACCY}(\text{kruz_stul.stul.cm}) * (338 + 5.5 + 82 + 119.49) * 0.9953 * 16 * 0.00030 * (-1)$$

Kde „**ACCY(.kriz_stul.stul.cm)**“ představuje funkci zrychlení tělesa **stul** v ose Y, „**338+5.5+82+119.49**“ součet hmotností těles **stul**, **sroub2**, **loze** a velikost síly **zatez** v kg, „**0.9953**“ je hodnota funkce sin stoupání KŠ, „**16**“ poloměr KŠ, „**0,00030**“ laděná hodnota koeficientu tření a „**(-1)**“ je korekce směru působení momentu.

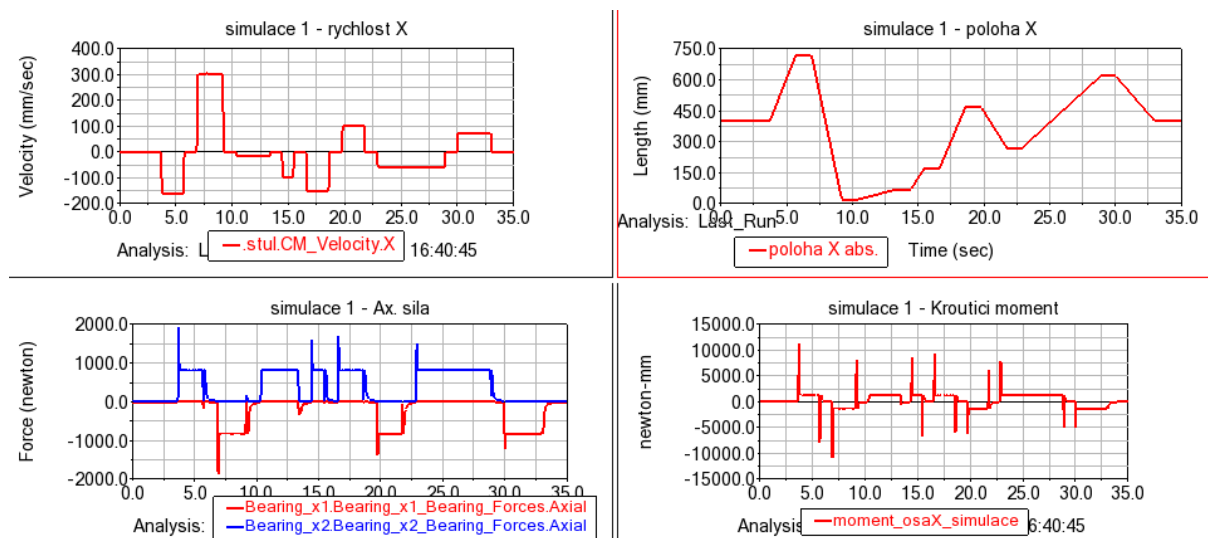
Stejným způsobem byly naladěny pasivní odpory osy X, přičemž jako referenční hodnota sloužil průběh kroutícího momentu **experimentu 1** se zátěží. Pro kontrolu byla provedena simulace **experimentu 3** a její následné porovnání průběhu momentů osy X a Y s experimentálními daty.

5.6 Simulace funkčního virtuálního dvojčete

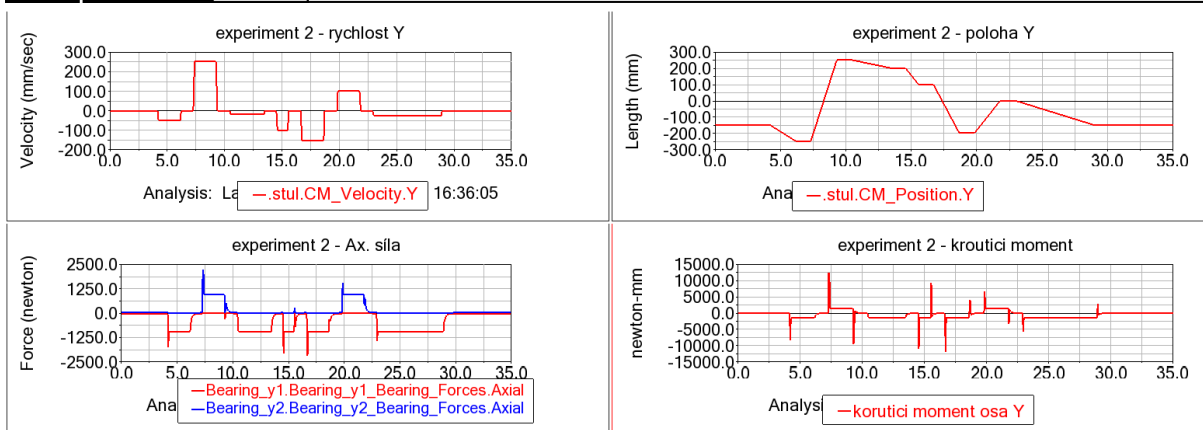
Nyní lze říci, že chování virtuálního dvojčete odpovídá chování referenčního zařízení. Pro demonstraci funkce virtuálního dvojčete byly opět simulovány experimenty 1-3 se zátěží (dále jen **simulace 1-3**). Velikost kroku simulace byla zvolena 0,05s, vzhledem k omezení výpočetního výkonu (Tab 8). Během experimentu byla měřena velikost axiální síly ložisek **x1**, **x2**, **y1**, **y2**, poloha a rychlost stolu ve směru X a Y. Průběh měření **simulací 1,2,3** je zobrazen na Obr. 50-52. Detail průběhu měřených veličin ze **simulací 1-3** je zobrazen v příloze této diplomové práce.

Tab 8) Parametry simulací 1-3

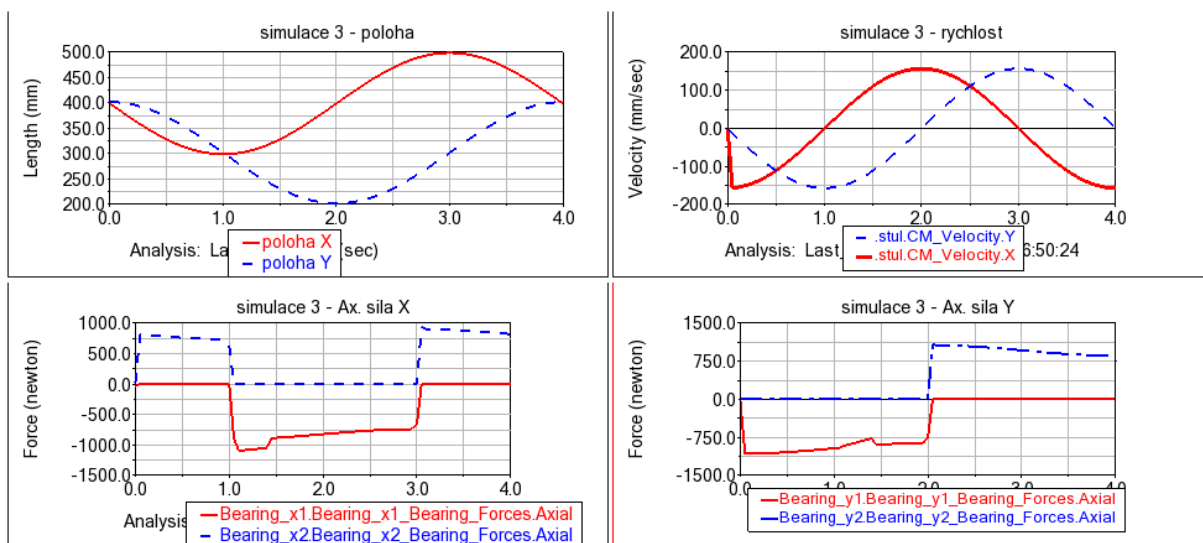
	Simulace 1	Simulace 2	Simulace 3
Předloha simulace	Experiment 1	Experiment 2	Experiment 3
Stručný popis simulace	Lineární pohyb osa X	Lineární pohyb osa Y	Kruhová interpolace rovina XY
Velikost kroku	0,05 s	0,05 s	0,05 s
Délka simulace	35 s	30 s	4 s



Obr. 50) Měření simulace 1



Obr. 51) Měření simulace 2



Obr. 52) Měření simulace 3

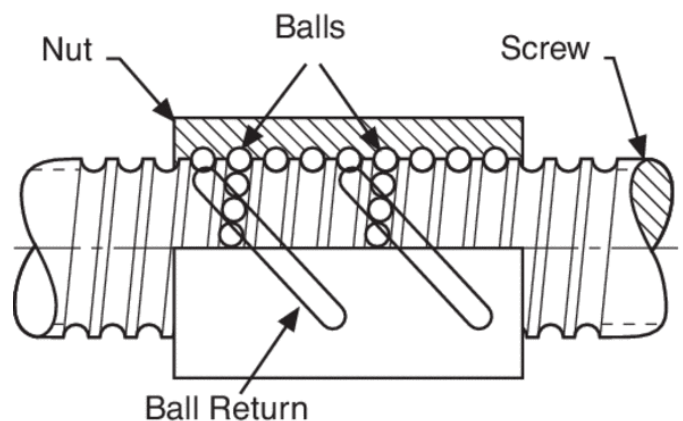
6 NÁVRH PREDIKTIVNÍ METODY PRO VÝPOČET ŽIVOTNOSTI KULIČKOVÉHO ŠROUBU

Cílem této kapitoly je vytvoření prediktivní metody měření životnosti jednotlivých délkových úseků KŠ na základě simulací provedených na virtuálním dvojčeti v kapitole 5.6. V praxi by aplikace této metody znamenala detailnější informace o technickém stavu konkrétního úseku KŠ. Na základě těchto informací provozovatel může usoudit, že určitých polohách stroj již není vhodný pro dokončovací operace, jelikož v dané poloze je KŠ nadměrně poškozen, tedy není garantována dostatečná přesnost.

Veškeré výpočtové operace byly provedeny v software Microsoft Excel.

6.1 Kuličkový šroub

V současnosti jsou pohony polohovacích os obráběcích strojů nejčastěji realizovány pomocí tzv. kuličkového šroubu s maticí, jež je poháněn rotačním servopohonem. Princip KŠ je založen na převodu rotačního pohybu motoru na translační pohyb, obdobně jako trapézový (lichoběžníkový) šroub. Přenos silového působení je zde realizován pomocí odvalování vytvrzených kuliček (popř. válečků), kterými je vyplněn prostor mezi hřídelí šroubu a maticí podobně jako u valivého ložiska. Po odvalení kuličky na konec matice je kulička přenesena pomocí tzv. převaděče zpět na začátek matice (Obr. 53). [33] [43]



Obr. 53) Princip funkce kuličkového šroubu [44]

Odpor valivého tření KŠ je výrazně menší oproti trapézovému šroubu, u kterého dochází k přímému třecímu kontaktu mezi pohybovým šroubem a maticí. Díky nízké velikosti pasivních odporů se účinnost tohoto mechanismu pohybuje kolem 90 %, v závislosti na vlastnostech daného šroubu, přesnosti provedení a provozních podmínkách. Valivé elementy jsou předepjaty, což zajišťuje vymezení vůle mezi hřídelí šroubu a maticí, tedy vysokou přesnost polohování. [33] [43]

6.2 Konvenční metoda výpočtu životnosti KŠ

Konvenční metoda pro výpočet životnosti kuličkového šroubu (rovnice 10) vychází z výpočtu životnosti valivých ložisek, jelikož se dá říci, že: „KŠ je ložisko, jehož trajektorii pohybu valivých elementů tvoří šroubovice“.

Základní bezporuchová životnost pro metrické šrouby L_h je dána jako 10^6 otáček při silovém působení o velikosti dynamické únosnosti C_{dyn} [N] v axiálním směru (rovnice 10). Tato metoda v sobě zahrnuje výpočet středních otáček n_m (rovnice 8) a středního zatížení F_m (rovnice 9) v axiálním směru. U palcových šroubů (imperiální jednotky) hodnota L_h představuje 10^6 palců lineárního pohybu, tedy je třeba do výpočtu zahrnout stoupání šroubu P. Nicméně tato metoda v sobě nějak nezahrnuje polohu matice vůči KŠ, tj. bere životnost šroubu jako celek. [33] [38]

Je třeba dodat, že životnost KŠ může být výrazně zkrácena vlivem znečištění, nedostatkem mazání, nesprávném uložení a nepřesností montáže. [33]

6.2.1 Aplikace konvenční metody

Pro základní určení životnosti KŠ osy Y byla zvolena data ze **simulace 2**. Jelikož ložisko **y1** přenáší axiální sílu pouze v kladném směru a ložisko **y2** ve směru záporném, pro výpočet je třeba sečíst průběh jejich absolutních hodnot. Velikost rychlosti je třeba také přepočítat do absolutních hodnot, aby se silové účinky neodčítaly. V Tab 9) jsou uvedeny všechny potřebné parametry pro výpočet odhadované životnosti L_h .

Tab 9) Tabulka použitých prvků pro výpočet odhadované životnosti KŠ [37]

L_h	Odhadovaná životnost KŠ v provozních hodinách	-	[h]
C_{dyn}	Dynamická únosnost KŠ	40900	[N]
F_m	Střední zatížení	-	[N]
n_m	Střední otáčky	-	[min^{-1}]
x_c	Počet různých zátěžových režimů během jednoho cyklu	-	[-]
n_i	Otáčky i-tého cyklu	-	[min^{-1}]
F_i	Axiální síla i-tého cyklu	-	[N]
t_i	Poměrná doba v % po kterou působí zatížení F_i	-	[%]

Střední otáčky **simulace 2**: [38]

$$n_m = \sum_{i=1}^{x_c} n_i * \frac{t_i}{100} = 286,7 \text{ min}^{-1} \quad (8)$$

Střední zatížení **simulace 2**: [38]

$$F_m = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^x F_i * \frac{n_i * t_i}{n_m * 100}} = 1017,68 \text{ N} \quad (9)$$

Odhadovaná životnost **simulace 2** v provozních hodinách: [38]

$$L_h = \left(\frac{C_{dyn}}{F_m} \right)^3 * \frac{10^6}{n_m * 60} \quad (10)$$

$$L_h = \left(\frac{40900}{1017,68} \right)^3 * \frac{10^6}{286,7 * 60} = 3867678,47 \text{ h} = 441,5 \text{ r}$$

Vypočtená hodnota odhadované životnosti KŠ osy Y během nepřetržitého provozu 24h/365d je 441,5 let. Vzhledem k průběhu **simulace 2** je pochopitelné, že životnost je velmi vysoká, neboť do **simulace 2** nevstupuje žádné silové působení mimo pasivní odpory a stůl většinu času simulace setrvává v klidové poloze. Pochopitelně reálná životnost bude výrazně nižší.

Stejným způsobem byla zpracována data z ze **simulace 1 a 3**. Vypočtené hodnoty n_m , F_m a L_h jsou uvedeny Tab 10).

Tab 10) Tabulka hodnot z výpočtu odhadované životnosti KŠ pro **simulace 1-3**

	Simulace 1 – osa X	Simulace 2 – osa Y	Simulace 3 – osa X	Simulace 3 – osa Y
n_m [ot*min⁻¹]	384	282	594	594
F_m [N]	841,34	1017,68	819,55	975,6
L_h [roky]	570,1	441,5	399,6	236,9

6.3 Návrh modifikace prediktivní metody životnosti KŠ

Koncept navrhované metody „úbytku životnosti kuličkového šroubu“ vychází z článku „Calculation Of Component Durability Based On Simulation Model“ [39] vydaném zaměstnanci UVSSR na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Představuje stanovení základní životnosti ložiska dle konvenční metody při referenčním tetovacím cyklu a následné odčítání životnosti v závislosti počtu provedených otáček.

Výše zmíněná metoda byla aplikována na KŠ a rozšířena o zohlednění silového působení na KŠ a jeho distribuci ke konkrétnímu délkovému úseku KŠ. Jelikož konvenční výpočet životnosti KŠ nezahrnuje délku šroubu, lze říci, že odhadovaná životnost platí pro celý délkový úsek KŠ. Následně bude KŠ rozdělen na jednotlivé délkové úseky. Hodnota počáteční odhadované životnosti L_h (rovnice 10) pro každý úsek je rovna odhadované životnosti vypočtené konvenčním způsobem. Pro tuto aplikaci byl zvolen výpočet stanovené životnosti v provozních hodinách.

Hodnoty rychlosti a axiální síly šroubu budou následně přiděleny k příslušnému délkovému úseku KŠ v závislosti na aktuální poloze. Pro každý délkový úsek bude zvlášť vypočtena středních otáček n_{mi} (rovnice 11) a středního zatížení F_{ci} (rovnice 12), princip výpočtu je totožný s výpočtem n_m a F_m . Vzhledem k poměru třetích mocnin středního zatížení F_m , středního zatížení pro příslušný délkový úsek F_c a celkové době strávené v dané poloze t_c bude stanovena hodnota úbytku životnosti L_{hc} (rovnice 13). Odhadovaná zbývající životnost pro příslušný délkový úsek L_{hr} (rovnice 14) je pak rovna rozdílu L_h a L_{hc} . [39]

Poměr třetích mocnin F_c a F_m vychází z poměru C_{dyn} a F_m při výpočtu L_h . Prognóza je taková, že úbytek životnosti L_{hc} také závisí na poměru třetích mocnin obdobně jako pro výpočet L_h . Tento předpoklad však nebyl experimentálně ověřen.

Doba t_c je skutečná doba strávená v dané poloze. Lze říci, že t_c zároveň reprezentuje úbytek životnosti při konvenční metodě a L_{hc} úbytek životnosti metody navrhované

Střední otáčky pro vymezený délkový úsek:

$$n_{mi} = \sum_{i=1}^x n_i * \frac{t_i}{100} \quad (11)$$

Střední zatížení pro vymezený úsek:

$$F_c = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^x F_i * \frac{n_i * t_i}{n_{mi} * 100}} \quad (12)$$

Úbytek životnosti v provozních hodinách:

$$L_{hc} = \left(\frac{F_c}{F_m}\right)^3 * t_c \quad (13)$$

Zbývající životnost v provozních hodinách:

$$L_{hr} = L_h - L_{hc} \quad (14)$$

6.4 Aplikace navrhované metody

Pro aplikaci navrhované metody byla zvolena měřená data ze **simulací 1-3**. Velikost jednotlivých délkových úseků KŠ byla zvolena 10 mm, což odpovídá stoupání KŠ daného zařízení. Lze tedy říci, že metoda byla aplikována pro každý jednotlivý závit KŠ.

Nejprve byla pro každou simulaci zvlášť určena hodnota L_h , F_m , n_m (Tab 10). Dále byla data z každé simulace distribuována k příslušnému délkovému úseku v závislosti na poloze. Následně byla pro každý délkový úsek z příslušné simulace stanovena hodnota F_c , t_c a L_{hc} .

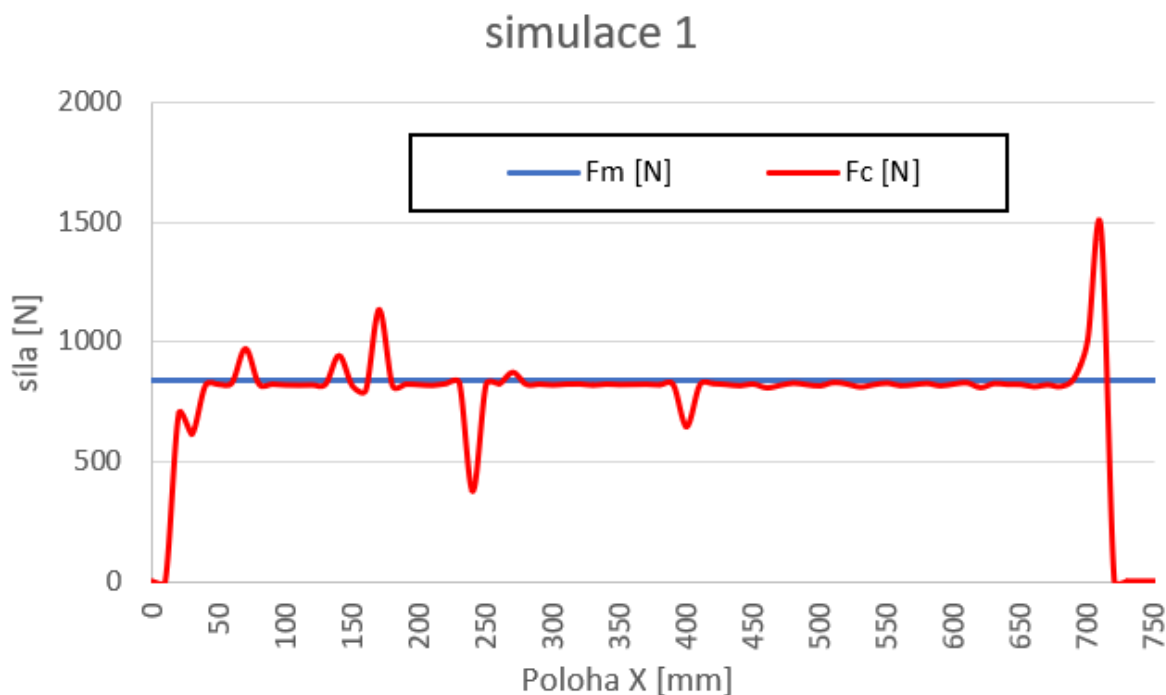
Jelikož se délka **simulací 1-3** trvá pouze několik sekund, pro přehlednější zápis hodnot t_c a L_{hc} bylo zvoleno měření času v [s]. Vzhledem k velikosti L_h by úbytek L_{hc} byl zanedbatelný. Pro demonstraci metody bylo zvoleno porovnání hodnot t_c a L_{hc} přičemž t_c reprezentuje úbytek životnosti vztažený na celou délku KŠ vycházející z konvenční metody a L_{hc} úbytek životnosti metody navrhované.

6.4.1 Aplikace navrhované metody - analýza simulace 1

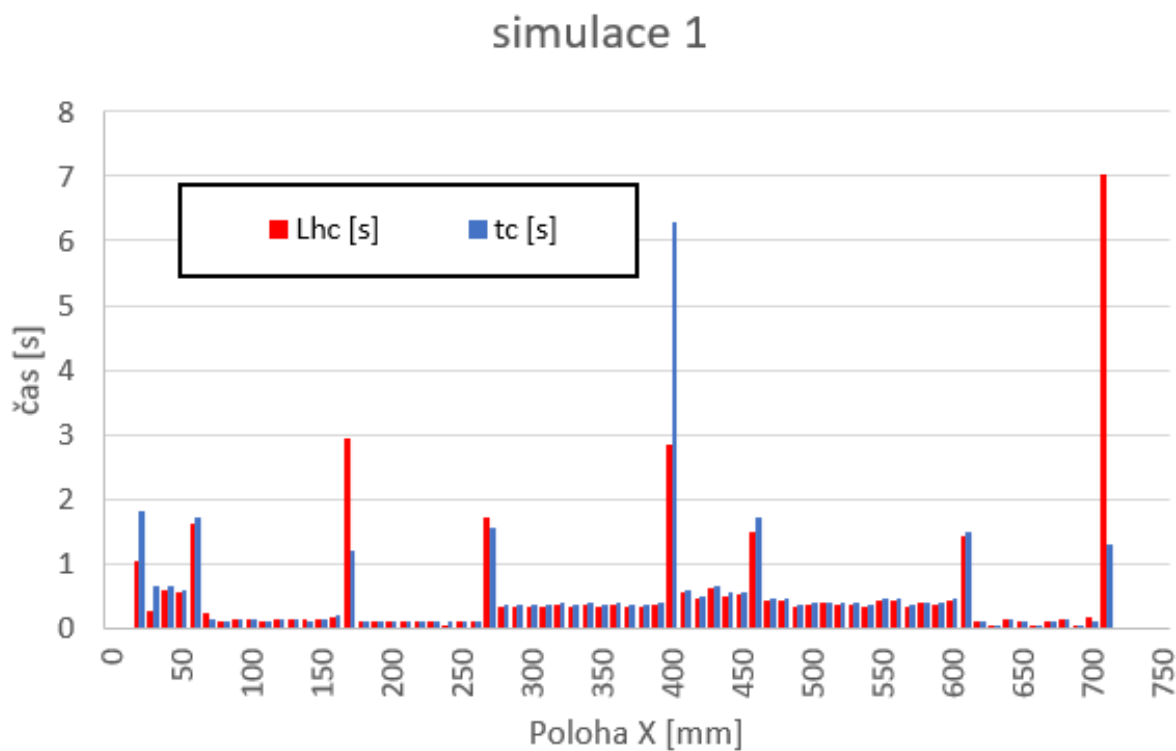
Celková délka **simulace 1** $t_{sim1} = 35$ s. Nejdelší dobu setrvává v poloze $x = 400$ mm, nicméně většinu doby, jež setrvává v této poloze na KŠ nepůsobí žádná síla (Obr. 54), tedy nedochází ani k mechanickému zatěžování KŠ. Vypočtená hodnota $L_{hc400} = 2,85$ s (Obr. 55) je zhruba poloviční oproti $t_{c400} = 6,3$ s.

Naopak v poloze $x = 710$ mm setrvává stůl po dobu pouze $t_{c710} = 1,3$ s. Z Obr. 55 je však patrné že hodnota F_{c710} je téměř dvojnásobná vůči F_m . Toto silové působení vytváří setrvačné

síly během akcelerace a decelerace v okolí dané polohy. Úbytek životnosti $L_{hc710} = 7,02$ s je více jak o 500 % větší v porovnání se skutečnou dobou strávenou v poloze t_{c710} .



Obr. 54) Silové působení na KŠ osy X během simulace 1



Obr. 55) Porovnání úbytku životnosti KŠ osy X během simulace 1

Dle konvenční metody by pro **simulaci 1** by nevíce zatěžovaným místem měla být poloha $x = 400$ mm. Navrhovaná metoda ukázala, že v dané poloze nedochází k tak výraznému zatěžování KŠ. Dle navrhované metody je nevíce opotřebovaný úsek $x = 710$ mm. Tento výsledek je očekávaný, neboť v poloze $x = 710$ dochází k největšímu zrychlení, jehož velikost určuje velikost pasivních odporů v KŠ a ložiskách virtuálního modelu.

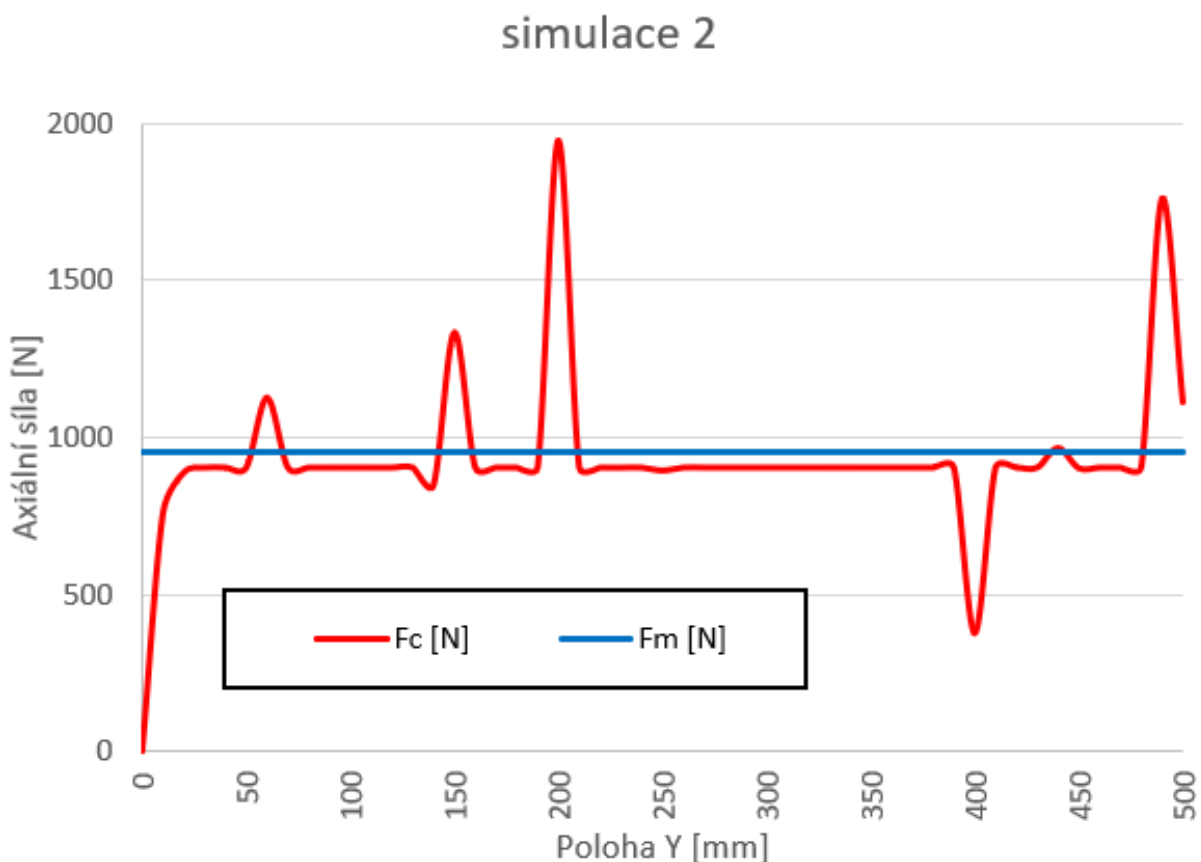
Čas $t_{sim1} = 35$ s odpovídá úbytku životnosti KŠ podle konvenční metody pro **simulaci 1**. Navrhovaná metoda ukázala, že nejvyšší úbytek životnosti pro konkrétní délkový úsek je $L_{hc710} = 7,02$ s. Jelikož je $t_{sim1} > L_{hc710}$ lze říci, že dle navrhované metody je úbytek životnosti konkrétního úseku KŠ výrazně menší než dle metody konvenční při parametrech **simulace 1**.

6.4.2 Aplikace navrhované metody – analýza simulace 2

Celková délka **simulace 2** $t_{sim2} = 30$ s. Obr. 57 ukazuje, že KŠ strávil nejdelší dobu v poloze $y = 400$. Avšak Obr. 56 ukazuje, že hodnota F_{c400} je zhruba poloviční než F_m . Naopak velikost střední síly F_{c200} a F_{c490} je zhruba dvojnásobná vůči F_m . Z obr. 57 je patrné, že hodnota $t_{c200} = 0,05$ je minimální, tedy hodnota L_{hc200} nebude příliš vysoká.

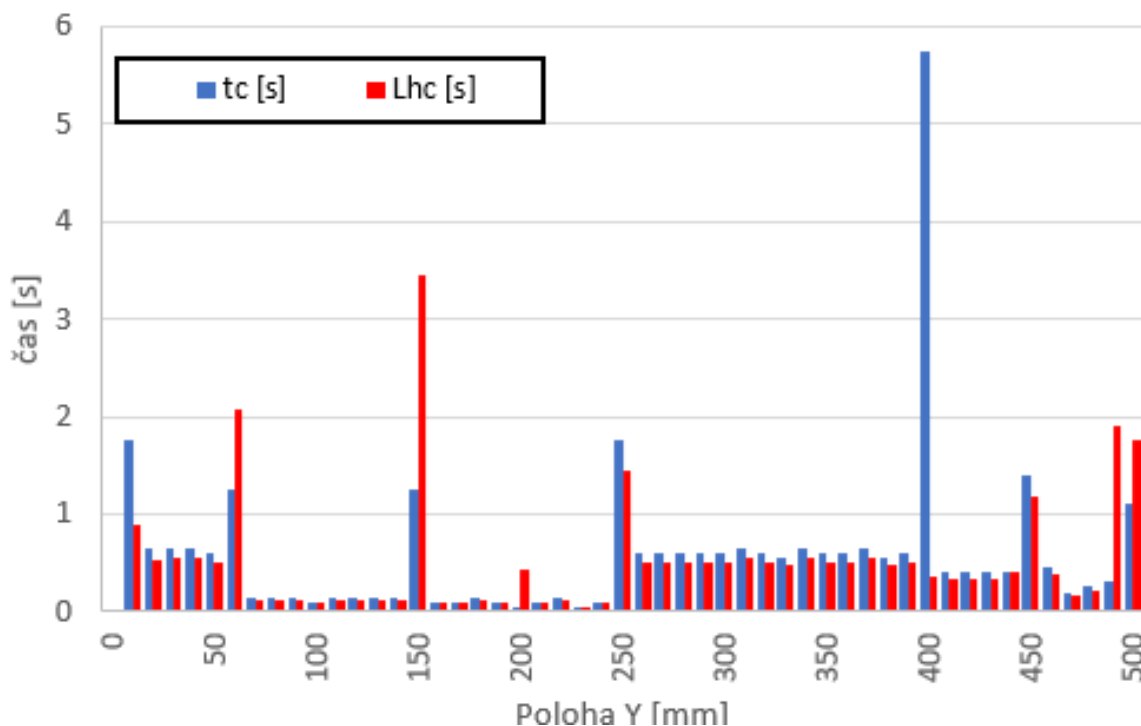
Největší hodnotu úbytek životnosti má $L_{h150} = 3,44$ s. Tento výsledek je neočekávaný, neboť ukázal, že největší hodnota úbytku životnosti L_{h150} není v poloze s největší hodnotou F_c . Zároveň analýza **simulace 2** potvrdila, že i přes vysokou hodnotu $t_{c400} = 5,75$ s může být hodnota $L_{hc400} = 0,36$ s velmi nízká.

Dále je na obrázku možné pozorovat, že hodnota L_{hc} je mimo body s velkou změnou F_c je ve většině případů zhruba o 15% nižší vůči t_c .



Obr. 56) Silové působení na KŠ osy Y během simulace 2

simulace 2



Obr. 57) Porovnání úbytku životnosti KŠ osy Y během simulace 2

6.4.3 Aplikace navrhované metody – analýza simulace 3

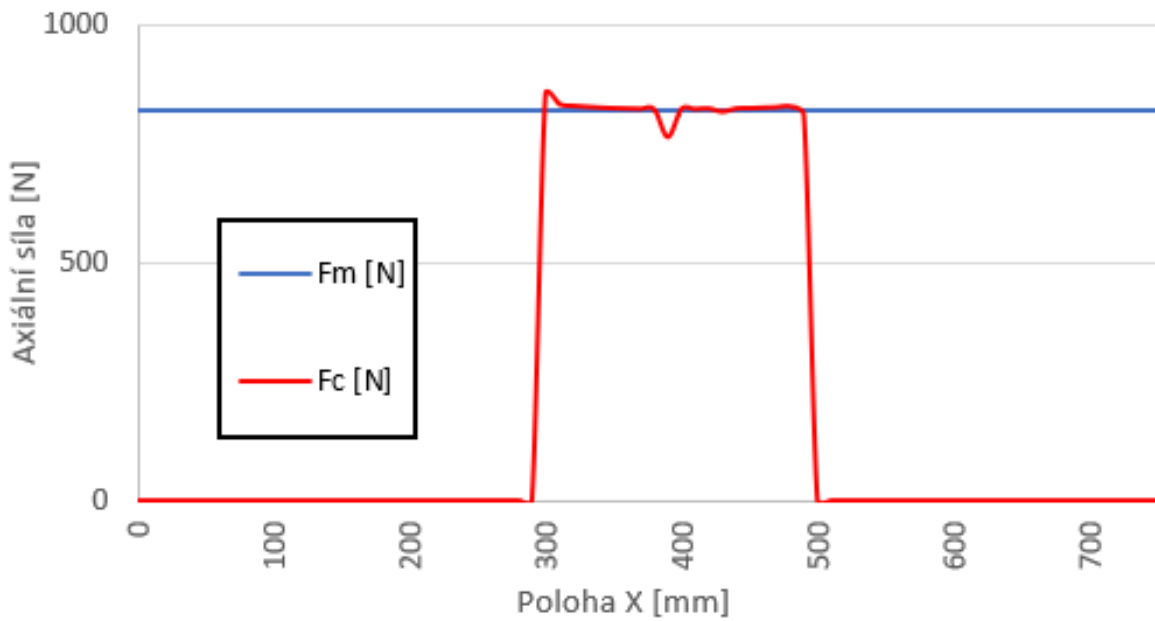
Délka **simulace 3** $t_{sim3} = 4$ s. **Simulace 3** reprezentuje pohyb po kružnici při konstantní rychlosti posunu $v_p = 157$ mm/s. Hodnota střední rychlosti $v_{cX} = v_{cY} = 100$ mm/s. Velikost středního zatížení vybraného úseku F_{cX} a F_{cY} zhruba odpovídá velikosti středního zatížení pro celou délku KŠ $F_{mX} = 819,55$ N a $F_{mY} = 975,58$ N (Obr. 58, 60).

Jelikož na virtuální dvojče křížového stolu působí silové působení pouze pasivních odporů a hmotnost závaží. Polohová funkce nedosahuje vysokých hodnot změny rychlosti (tj. zrychlení) jako u **simulace 1 a 2**, které ovlivňuje velikost třecích sil v KŠ a ložiskách, lze říci, že největší podíl na velikosti F_{mX} a F_{mY} mají třecí síly v lineárním vedení. Toto stanovisko utvrzuje fakt, že velikost poměru sil $F_{mY} / F_{mX} = 1,19$ odpovídá poměru hmotností $m_{osaY} / m_{osaX} = 1,19$. Lze tedy říci, že KŠ osy Y je zhruba o 19 % vytíženější oproti KŠ osy X. Zároveň to vysvětluje, proč je hodnota L_{hsim3X} z tab. 10 výrazně větší oproti L_{hsim3Y} .

Hodnoty L_{hc} a t_c pro **simulaci 3** (59, 61) jsou pro osu X i osu Y na většině délky KŠ shodné. To je způsobeno poměrem sil $F_m / F_c \approx 1$. Zároveň tento výsledek potvrzuje funkčnost metody v případech, kdy $F_m = F_c$.

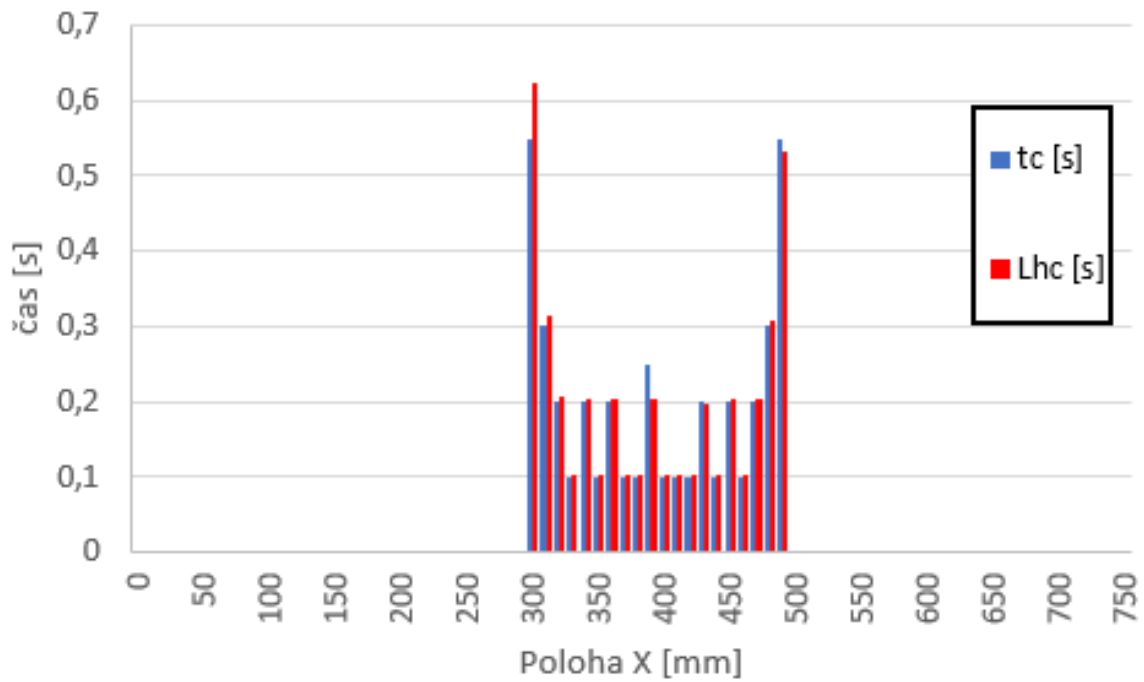
V koncových bodech kružnice je pozorován mírný nárůst L_{hc} vzhledem k t_c . Tento nárůst úbytku životnosti je způsoben acelerací a decelerací v okolí dané polohy.

simulace 3 - osa X



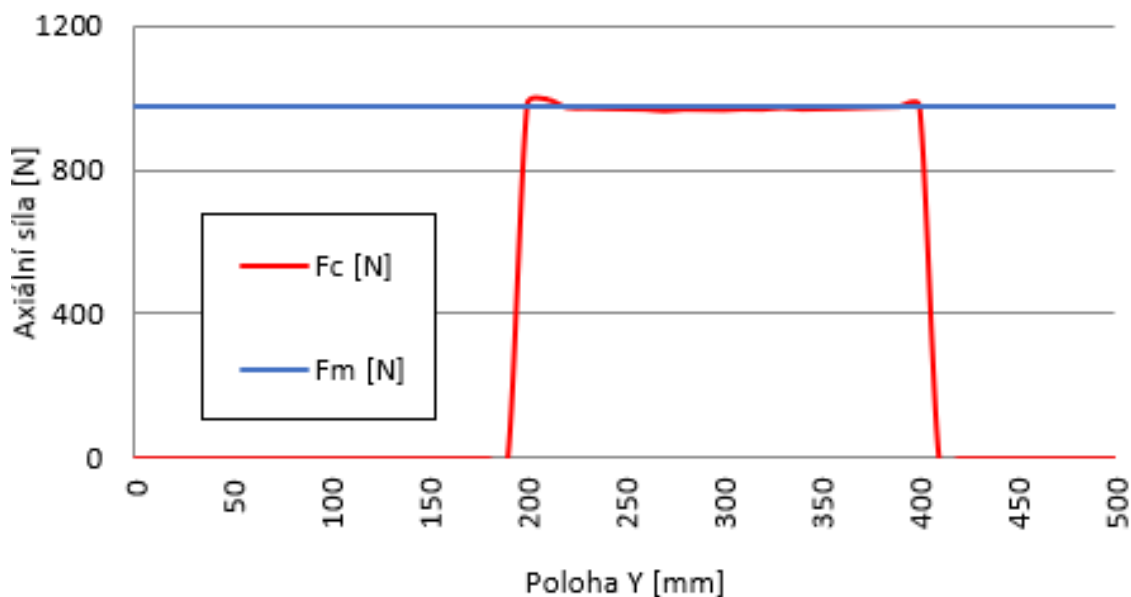
Obr. 58) Silové působení na KŠ osy X během simulace 3

simulace 3 - osa X



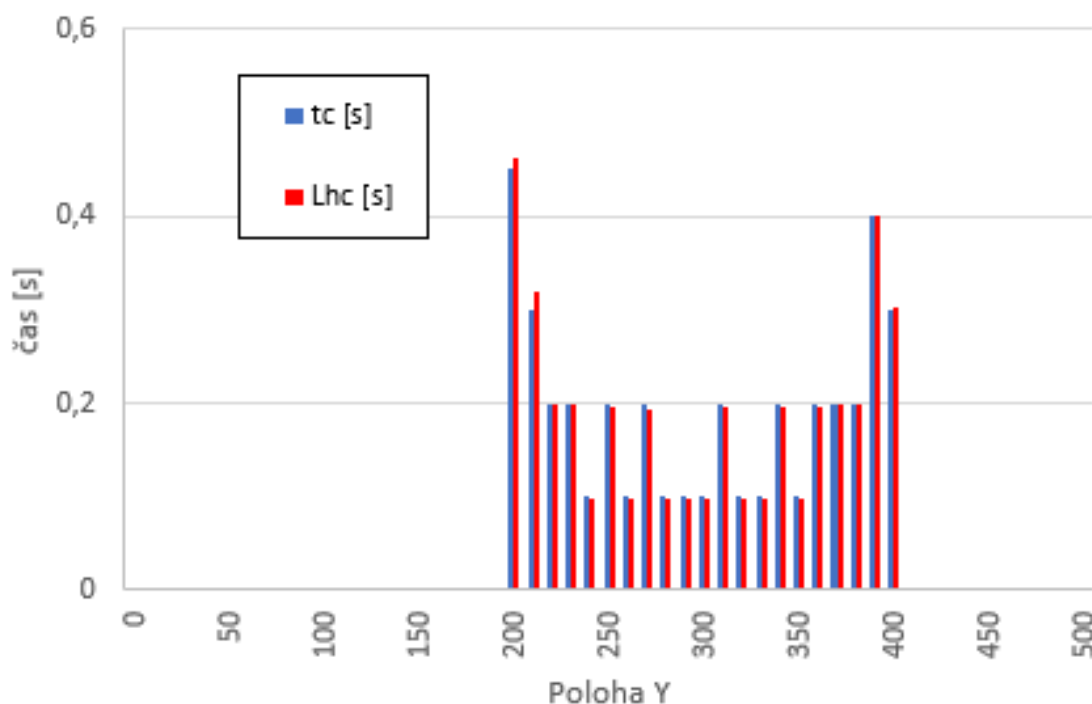
Obr. 59) Porovnání úbytku životnosti KŠ osy X během simulace 3

simulace 3 - osa Y



Obr. 60) Silové působení na KŠ osy Y během simulace 3

simulace 3 - osa Y



Obr. 61) Porovnání úbytku životnosti KŠ osy Y během simulace 3

Skokové změny času t_c v polohách poblíž „středu kružnice“ jsou způsobeny nedostatečnou velikostí kroku **simulace 3**. Pro přesnější analýzu konkrétního délkového úseku KŠ je třeba provést simulaci s větší vzorkovací frekvencí.

6.5 Zhodnocení výsledků simulací

Z analýzy **simulace 1 a 2** bylo zjištěno že poměr velikosti odhadovaného úbytku životnosti daného délkového úseku L_{hc} vůči době strávené v příslušné poloze t_c výrazně závisí na velikosti zrychlení v dané poloze. Pokud by do simulací vstupovala řezná síla v rovině XY, ovlivnila by velikost L_{hc} obdobně jako velikost zrychlení křížového stolu.

Analýza **simulace 3** ukázala, že při rovnoměrném pohybu po kružnici v rovině XY křížového stolu nedochází k výrazné změně středního zatížení konkrétního úseku F_c vůči F_m , tj. hodnota úbytku životnosti daného délkového úseku L_{hc} zhruba odpovídá době strávené v dané poloze t_c . Tento závěr se vztahuje pouze na pohyb „naprázdno“ bez působení řezných sil.

Ze **simulace 3** bylo dále zjištěno, že na KŠ osu Y křížového stolu stroje MCV 754 Quick působí zhruba o 19 % větší síla vzhledem ke KŠ osy X. Dá se předpokládat, že k případné poruše KŠ osy Y dojde dříve než k poruše KŠ osy X. Toto tvrzení platí pouze za předpokladu, že osy X, Y budou zatěžovány podobným cyklem.

Vzhledem k povaze simulací byl výpočet zaměřen na hodnotu „úbytku životnosti“ L_{hc} , nikoli na „zbývající dobu do poruchy“ L_{hr} , která je z pohledu prediktivní údržby důležitá pro naplánování odstávky zařízení. Vzhledem k povaze **simulací 1-3** byla velikost odhadované životnosti L_h příliš vysoká a hodnota L_{hc} zanedbatelná. Pro ověření metody je třeba provést dlouhodobý experiment na fyzickém zařízení.

6.6 Zhodnocení navrhované metody

Výsledky **simulace 1-3** potvrdily že hlavním faktorem pro úbytek životnosti daného délkového úseku L_{hc} je velikost zrychlení křížového stolu a velikost řezné síly, která však nebyla simulována. Exponent poměru sil F_c a F_m je třeba ještě ověřit dlouhodobým experimentem na fyzickém zařízení.

Výhodou této metody je, že při výpočtu úbytku životnosti zohledňuje střední zatížení referenčního cyklu pro stanovení životnosti KŠ. Tj. metoda stále platí i při různorodosti obráběcích cyklů, kde $F_{c1} \neq F_{c2}$ (rovnice 15). Tento fakt má velký význam při kusové výrobě, s vysokou diverzifikací obráběcích cyklů, tj. různém zatěžování KŠ.

Zbývající životnost v provozních hodinách pro více obráběcích cyklů:

$$L_{hr} = L_h - \sum_{i=1}^i L_{hci} \quad (15)$$

6.7 Další aplikace metody

Jelikož výpočet životnosti KŠ vychází z výpočtu životnosti valivých ložisek, tuto metodu lze po úpravě aplikovat také na ložiska, popř. lineární vedení. Pouze by nedocházelo k distribuci působících sil na jednotlivé délkové úseky při aplikaci na ložiska. Výpočet sil F_c a F_m by pak zohledňoval zatížení v axiálním i radiálním směru. Exponent poměru sil F_c a F_m by byl upraven v závislosti na exponentu silového poměru C_{dyn} a F_m pro výpočet L_h konkrétního typu ložiska a lin. vedení.

7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Pro správnou funkčnost virtuálního dvojčete je třeba přímé propojení navrhovaného dynamického modelu s fyzickým zařízením. Toto propojení může být realizováno například pomocí řídicího systému Siemens Sinumerik ONE.

Během tvorby této Diplomové práce probíhalo zpracování dat ze simulací „poloautomaticky“. Distribuce dat k délkovým úsekům byla prováděna ručně, výpočet F_c a L_{hc} automatizovaně v programu Microsoft Excel. Pro další aplikaci metody je třeba vytvořit plně automatizované řešení obsahující zároveň filtraci chybných dat.

Po automatizaci zpracování dat je možné aplikovat metodu přímo na data ze řídicího systému fyzického stroje. Tento systém sběru a analýzy dat by pak mohl fungovat autonomně bez zásahu člověka. Uživatelské rozhraní tohoto systému by mohlo být zprostředkováno např. pomocí mobilní aplikaci, obdobně jako systém SKF Multilog IMx-8 zmíněný v kapitole 5.1. Provozovatel stroje pak může dálkově kontrolovat stav zařízení v uživatelsky přívětivém rozhraní.

Nutno podotknout, že koncept nějak nezohledňuje vibrace, které mají výraznější dopad na degeneraci mechanických komponent. Dalším faktorem ovlivňující životnost KŠ je čistota prostředí, mazání, teplota a ostatní poruchy na stroji, které virtuální dvojče navrhované v kapitole 5 také nezohledňuje.

8 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá návrhem virtuálního dvojčete křížového stolu obráběcího centra Kovosvit MAS MCV 754 QUICK v kontextu s prediktivní údržbou. Během tvorby této práce byl na základě experimentu na fyzickém zařízení vytvořen simulační model s odpovídajícími dynamickými vlastnostmi. Dále byl předložen návrh prediktivní metody životnosti kuličkového šroubu. Navrhovaná metoda byla následně aplikována na naměřená data ze simulací na virtuálním modelu.

Kapitola 3. se zabývá rešerší současného stavu vedení údržby. Tato kapitola je primárně zaměřená na metodiku prediktivní metody, především na vibrodiagnostiku. Velkou část této kapitoly dále tvoří poznatky autora z praxe na oddělení preventivní a prediktivní údržby.

Reseršní část této diplomové práce dále tvoří uvedení do problematiky virtuálního dvojčete, popsána v kapitole 4. Obsahem této kapitoly je základní přehled o koncepci virtuálního dvojčete a jeho aplikaci na obráběcí stroje.

Praktická část je založena na tvorbě virtuálního dvojčete křížového stolu, popsáném v kapitole 5. Nejprve byl vstupní model zjednodušen na základní kinematický řetězec. Následně byl převeden do simulačního software MSC Adams, kde byly definovány dynamické vlastnosti odpovídající referenčnímu zařízení. Dále byl proveden experiment na fyzickém stroji. Experiment byl následně simulován na virtuálním dvojčeti. Dle naměřených dat z experimentu byly následně laděny pasivní odpory modelu tak, aby jeho chování co nejpřesněji odpovídalo referenčnímu zařízení. Výstupem této kapitoly je funkční dynamický model křížového stolu.

V kapitole 6 byl předložen návrh prediktivní metody životnosti kuličkového šroubu. Tato metoda spočívá ve výpočtu odhadovaného úbytku životnosti dílčích úseků kuličkového šroubu vzhledem k jeho stanovené základní životnosti. Cílem této metody je určit nejvíce zatěžované úseky kuličkového šroubu. Jako zdroj dat pro aplikaci navrhované metody byla použita data ze simulací na virtuálním dvojčeti z kapitoly 5.

Aplikací navrhované metody bylo zjištěno, že degenerace kuličkového šroubu výrazně závisí na velikosti zrychlení a řezné síly v kontextu s celkovou dobou strávenou v příslušné poloze. Analýzou simulace kruhové interpolace bylo zjištěno, že degenerace kuličkového šroubu osy Y křížového stolu je zhruba o 19 % větší, než degenerace osy X. Zvýšená degenerace je způsobena větší velikostí setrvačné hmoty osy Y. Na závěr byl předložen stručný návrh pro rozšíření navrhované metody na ložiska stroje a lineární vedení.

Poslední kapitola představuje stručný návrh na uvedení virtuálního dvojčete do provozu a automatizaci navrhované metody.

Přílohy k této diplomové práci obsahují model virtuálního dvojčete křížového stolu MCV 754 QUICK. Dále průběhy měřených veličin během simulací na virtuálním dvojčeti, měřená data ze simulací a výsledky aplikace navrhované metody.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Prediktivní údržba - cesta ke snížení nákladů [online]. 2012, 2012(10) [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prediktivni-udrzba-cesta-ke-snizeni-nakladu.html>
- [2] Predictive Maintenance, Part 1: Introduction. Youtube.com [online]. 19.12.2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=RmVWKLbLq2Y>
- [3] KOTRBA, M. Průmysl 4.0 v kontextu s průmyslovými roboty ve strojírenství. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 66 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.
- [4] Měření vibrací ve vibrodiagnostice. Automa [online]. 2010, 2010(1), 32-36 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [5] Piezoelektrický princip, perovskit a polarizace [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.cz/ceramic-materials/piezo-ceramics/basics/>
- [6] Zjištění poruchy elektrického motoru [online]. 2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/zjisteni-poruchy-elektrickeho-motoru/>
- [7] Thermal Testing [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <http://www.deadshort.com.au/thermal-testing>
- [8] TRIBODIAGNOSTIKA [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://diagnostikastroju.cz/tribodiagnostika/>
- [9] Analýza olejů znamená mnohdy snížení spotřeby olejů, a tedy roční statisícové úspory na nákupu olejů. [online]. 2020, 1.4.2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://diagnostikastroju.cz/analyza-oleju-znamenamnohdy-snizeni-spotreby-oleju-a-tedy-rocni-staticove-uspory-na-nakupuleju/>
- [10] Analýza poškození ložisek [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.coroll.cz/analyza-poskozeni-lozisek.html>
- [11] BÍLIK, Peter. Digitální dvojče jako klíčový nástroj Logistiky 4.0. IT Systems [online]. 2019, (1-2) [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/it-prologistiku/digitalni-dvojce-jako-klicovy-nastroj-logistiky-4.0.htm>
- [12] Co je digitální dvojče a proč je užitečné. Aiworld.cz [online]. 2.2.2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://aiworld.cz/digitalizace/co-je-digitalni-dvojce-a-proc-je-uzitecne-232>
- [13] PARROTT, Aaron a Lane WARSHAW. Industry 4.0 and the digital twin Manufacturing meets its match [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>
- [14] Digitální dvojče: Vůdčí technologie inteligentního průmyslu. <https://www.vseoprumsly.cz/> [online]. 11.6.2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.vseoprumsly.cz/digitalizace/digitalni-prototypovani/digitalni-dvojce-vudci-technologie-inteligentniho-prumyslu.html>
- [15] Digitalization in industry: Twins with potential. New.siemens.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/company/stories/industry/the-digital-twin.html>
- [16] GOOD FACTORY AWARD - PRAISE FOR SMART MANUFACTURING. Okuma.eu [online]. 22.08.2018 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z:

<https://www.okuma.eu/newsroom/press-releases/detail/info/good-factory-award-praise-for-smart-manufacturing/>

[17] Precise 1 : 1 machine simulation. Guaranteed to be feasible and collision-free. In: Media.dmgmori.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://media.dmgmori.com/media/epaper/virtual_machine_uk/index.html#2

[18] DMG MORI. Machine tools for Industry 4.0 with CELOS® by DMG MORI. Youtube.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?time_continue=79&v=eZBawTbz65E&feature=emb_logo

[19] Siemens představuje první digitálně nativní CNC systém Sinumerik: Sinumerik ONE. Siemens.cz [online]. 04.10.2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.siemens.cz/press/siemens-predstavuje-prvni-digitalne-nativni-cnc-system-sinumerik-sinumerik-one>

[20] Prvý úplne digitálny riadiaci systém Sinumerik. Atpjournalsk.com [online]. 08.11.2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.atpjournalsk.com/rubriky/exkluzivne-clanky/sinumerik-one.html?page_id=29728

[21] Siemens představuje první digitálně nativní CNC řídicí systém Sinumerik. Ceskenoviny.cz [online]. 02.10.2019 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/siemens-predstavuje-prvni-digitalne-nativni-cnc-ridici-system-sinumerik/1804672>

[22] MCV 754 QUICK. Kovosvit.cz [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html#main>

[23] MCV 754 QUICK. Kovosvit.cz [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html#features>

[24] Technická dokumentace stroje MCV 754 QUICK.

[25] SKF Multilog On-Line System IMx-8: User Manual Part No. 15V-090-00049-100 Revision A. Aurorum 30, 977 75 Luleå, Sweden, 2017. Dostupné také z: https://www.skf.com/binary/tcm:12-289998/IMx-8%20User%20Manual_EN%2015V_090_00049_100_tcm_12-289998.pdf

[26] SKF Multilog On-line system IMx-8. In: Youtube.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Qb7SqA4h8x8>

[27] Adams. Mscsoftware.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/adamsAdams>

[28] Machinery. Mscsoftware.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/adams-machinery>

[29] Adams Car. Mscsoftware.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/adams-car>

[30] Flexible Multibody Systems in Adams. Mscsoftware.com/[online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/flexible-multibody-systems-adams>

[31] Adams MaxFlex. In: Mscsoftware.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/adams-maxflex>

[32] Adams Real Time. Mscsoftware.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.mscsoftware.com/product/adams-real-time>

[33] ADMIN E-KONSTRUKTÉR. Základy kuličkových šroubů. In: E-konstrukter.cz [online]. 15.01. 2017 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/zaklady-kulickovych-sroubu>

- [34] NA 4904. Skf.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.skf.com/in/products/rolling-bearings/roller-bearings/needle-roller-bearings/needle-roller-bearings-with-machined-rings/productid-NA%204904>
- [35] 25TAC62BDFC10PN7A - NSK Ball Screw Support Bearing - 25x62x15mm. Qualitybearingsonline.com/ [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.qualitybearingsonline.com/25tac62bdfc10pn7a-nsk-ball-screw-support-bearing-25x62x15mm/>
- [36] IONEL DUTU. Angular Contact Ball Bearings Id. In: Slideshare.net [online]. 2.10.2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/Ionel_Dutu/angular-contact-ball-bearings-id
- [37] Matice dvojitá přírubová DDB. Hiwin.cz [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.hiwin.cz/cz/produkty/kulickove-srouby/okruzovane-srouby/58_matice-dvojita-prirubova-ddb
- [38] HYWIN - KULIČKOVÉ ŠROUBY: katalog od výrobce. 2018. Dostupné také z: https://www.hiwin.cz/media/files/CZ_kulickove_srouby_2018.pdf
- [39] TŮMA, Jiří, Michal HOLUB, Rostislav HUZLÍK a Jan PAVLÍK. Calculation Of Component Durability Based On Simulation Model. (PID5577797), 1-5.
- [40] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [41] 5 Ways Industry 4.0 Will Impact Machine Tools. Engineering.com [online]. 8.9.2016 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13084/5-Ways-Industry-40-Will-Impact-Machine-Tools.aspx>
- [42] Peering into the Future of Machine Tools with Predictive Maintenance. Engineering.com [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/14626/Peering-into-the-Future-of-Machine-Tools-with-Predictive-Maintenance.aspx>
- [43] DOČEKAL, Václav. CHLAZENÍ A MAZÁNÍ ROTUJÍCÍCH KULIČKOVÝCH MATIC. BRNO, 2018. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Marek, Dr.
- [44] Technical Note: Stage Components Considerations [online]. 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.newport.com/n/stage-components-considerations>

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam zkratek

KŠ kuličkový šroub

10.2 Seznam symbolů

symbol	jednotka	popis
b	[N*s/m]	součinitel tlumení soustavy
C _{dyn}	[N]	dynamická únosnost KŠ
d	[mm]	průměr kuličkového šroubu
F _b	[N]	budící síla
f _b	[Hz]	frekvence buzení
F _c	[N]	střední zatížení pro příslušný délkový úsek
f _d	[-]	součinitel dynamického tření
F _i	[N]	axiální síla i-tého cyklu
F _m	[N]	střední zatížení zatěžovacího cyklu
g	[m*s ⁻²]	gravitační zrychlení
I _q	[A]	momentotvorný proud
k	[N/m]	součinitel tuhosti soustavy
k _m	[Nm/A]	momentová konstanta motoru
L _h	[h]	odhadovaná životnost KŠ v provozních hodinách
L _{hc}	[h]	že úbytek životnosti pro příslušný délkový úsek
L _{hr}	[h]	odhadovaná zbývající životnost pro příslušný délkový úsek
m	[kg]	hmotnost kmitajícího bodu snímacího zařízení
M	[kg]	hmotnost měřeného objektu
M _k	[Nm]	kroučící moment motoru, vypočtený z I _q
n _i	[min ⁻¹]	otáčky i-tého cyklu
n _m	[min ⁻¹]	střední otáčky zatěžovacího cyklu
P	[mm]	stoupání kuličkového šroubu
t _c	[h]	doba strávená v příslušné poloze
t _i	[%]	poměrná doba v % po kterou působí zatížení F _i
t _{sim1} , t _{sim2} , t _{sim3}	[s]	délka simulace 1, 2, 3
v _{cX} , v _{cY}	[mm/s]	střední rychlost osy X a Y
v _p	[mm/s]	rychlost posuvu simulace
x	[m]	výchylka měřeného objektu

\dot{x}	[m*s ⁻¹]	rychlost měřeného objektu
\ddot{x}	[m*s ⁻²]	zrychlení měřeného objektu
x_c	[-]	počet různých zátěžových režimů během jednoho cyklu
y	[m]	výchylka vibrací
\dot{y}	[m*s ⁻¹]	rychlost výchylky vibrací
\ddot{y}	[m*s ⁻²]	zrychlení výchylky vibrací
ω	[rad/s]	úhlová frekvence soustavy

10.3 Seznam obrázků

Obr. 1)	Časová závislost kondice stroje na čase provedení údržby z pohledu reaktivní, preventivní a prediktivní údržby [2].....	19
Obr. 2)	Relativní a absolutní vibrace [4]	22
Obr. 3)	Obecné schéma kmitavé soustavy [4]	23
Obr. 4)	Princip snímače rychlosti kmitání [4]	24
Obr. 5)	Princip Piezoelektrického jevu [5]	25
Obr. 6)	Konstrukční uspořádání piezoelektrického akcelerometru: a) Delta Shear b) Planar Shear c) s centrálním tlakovým namáháním (S – předpínací disk, m – seizmická hmota, P – piezoelektrický krystal, B – těleso snímače, R – Předpínací prstenec) [4]	25
Obr. 7)	Závislost uchycení snímače zrychlení na velikosti vlastní frekvence [4] ...	26
Obr. 8)	Detekce poruchy relé v rozvaděči pomocí termokamery [7]	27
Obr. 9)	Degenerace vnitřního kroužku ložiska způsobená nedostatečným mazáním [10]	28
Obr. 10)	Princip komunikační infrastruktury fyzického systému s virtuálním dvojčetem [13]	30
Obr. 11)	Schéma postupu při tvorbě virtuálního dvojčete.....	33
Obr. 12)	Kovosvit MAS MCV 754 QUICK [22]	34
Obr. 13)	Kinematická struktura MCV 754 Quick	35
	1 – Lože, 2 – Upínací plocha stolu, 3 – Lineární vedení Osa X, 4 – Lineární vedení Osa Y, 5 – Lineární vedení Osa Z, 6 -maximální zatížení stolu, 7 – Vřeteník, 8 – Zásobník nástrojů s mechanickou rukou [23]	35
Obr. 14)	Výchozí model křížového stolu MCV 754 QUICK.....	37
Obr. 15)	Schéma logiky zjednodušování modelu	38
Obr. 16)	Zjednodušený model lože.....	38
Obr. 17)	Zjednodušený model saní.....	39
Obr. 18)	Detail zjednodušeného modelu stolu.....	39
Obr. 19)	Zjednodušený model sestavy	40
Obr. 20)	Uživatelské rozhraní MSC Adams [28]	41
Obr. 21)	Seznam použitých těles v prostředí MSC Adams	42
Obr. 22)	Model křížového stolu v MSC Adams	43
Obr. 23)	Pracovní model křížového stolu	43
Obr. 24)	Definice pracovních jednotek pro MSC Adams	44
Obr. 25)	Seznam použitých vazeb	45

[33]	Obr. 26)	Schéma uložení KŠ., 1 a 2 – axiálně radiální ložisko, 3 jehličkové ložisko	47
	Obr. 27)	Uložení ložisek 1 a 2 na KŠ [36]	47
	Obr. 28)	Seznam použitých ložisek v MSC Adams	48
	Obr. 29)	Vizuální reprezentace ložisek osy Y v prostředí MSC Adams	49
	Obr. 30)	Definování gravitace do MSC Adams	49
	Obr. 31)	Silové působení zatez umístěné na upínací desku stolu	50
	Obr. 32)	Reprezentace pasivních odporů v ložiskách pro osu X a Y	51
	Obr. 33)	Reprezentace pasivních odporů v KŠ pro osu X a Y	51
	Obr. 34)	Uložení osy Y	52
	Obr. 35)	Seznam použitých rychlostních funkcí	52
	Obr. 36)	Silové působení na ložiska způsobené nevyváhou tělesa sroub2	53
	Obr. 37)	Experiment 1 – měření relativní polohy X	55
	Obr. 38)	Experiment 1 – měření rychlosti X	55
	Obr. 39)	Experiment 1 – Srovnání průběhu kroutícího momentu na motoru osy X bez zátěže a se zátěží	56
	Obr. 40)	Experiment 2 – měření relativní polohy Y	56
	Obr. 41)	Experiment 2 – měření rychlosti Y	57
	Obr. 42)	Experiment 2 – Srovnání průběhu kroutícího momentu na motoru osy Y bez zátěže a se zátěží	57
	Obr. 43)	Experiment 3 – měření relativní polohy X, Y	58
	Obr. 44)	Experiment 3 – měření rychlosti X, Y	58
	Obr. 45)	Experiment 3 – průběh kroutícího momentu na ose X se zátěží a bez zátěže	59
	Obr. 46)	Experiment 3 – průběh kroutícího momentu na ose Y se zátěží a bez zátěže	59
	Obr. 47)	Průběh polohy a rychlosti osy X při simulaci experimentu 1 v MSC Adams	60
	Obr. 48)	Zjednodušení pasivních odporů	61
	Obr. 49)	Kroutící moment na KŠ osy Y během simulace experimentu 2 se zátěží	61
	Obr. 50)	Měření simulace 1	62
	Obr. 51)	Měření simulace 2	63
	Obr. 52)	Měření simulace 3	63
	Obr. 53)	Princip funkce kuličkového šroubu [44]	65
	Obr. 54)	Silové působení na KŠ osy X během simulace 1	69
	Obr. 55)	Porovnání úbytku životnosti KŠ osy X během simulace 1	69
	Obr. 56)	Silové působení na KŠ osy Y během simulace 2	70
	Obr. 57)	Porovnání úbytku životnosti KŠ osy Y během simulace 2	71
	Obr. 58)	Silové působení na KŠ osy X během simulace 3	72
	Obr. 59)	Porovnání úbytku životnosti KŠ osy X během simulace 3	72
	Obr. 60)	Silové působení na KŠ osy Y během simulace 3	73
	Obr. 61)	Porovnání úbytku životnosti KŠ osy Y během simulace 3	73

11 SEZNAM PŘÍLOH

00_virtualni_dvojce.bin	model virtuálního dvojčete
01_Simulace_prubehy.PDF	měření průběhu simulací 1-3
02_Simulace_data.xlsx	změřená data ze simulací 1-3
03_tab_pro_vypocet_Lhc.xlsx	tabulka pro výpočet Lhc A Fc
04_prubehy_Lhc.xlsx	průběhy Lhc a Fc
05_simulace1.avi	video průběhu simulace 1